



FACULTATEA DE CONSTRUCȚII

*Ing. Cristian MOJOLIC*

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**ANALIZA ȘI OPTIMIZAREA CONCEPTUALĂ A  
STRUCTURILOR CU DESCHIDERE MARE  
UTILIZÂND SOLUȚII DE IZOLARE SEISMICĂ**

Conducător științific,  
**Prof. dr. ing. Mircea PETRINA**

DRAFT

# Cuprins

1. Introducere .....	1
1.1 Principiile metodei de izolare seismică a bazei .....	1
1.2 Oportunitatea și obiectivele cercetării .....	3
1.3 Conținutul tezei de doctorat.....	5
2. Tipuri de dispozitive de control pasiv utilizate la izolarea seismică .....	8
2.1 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB) .....	8
2.2 Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB) .....	10
2.3 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB).....	13
2.4 Izolator cu frecare (PF).....	17
2.5 Izolatori de tip pendul cu frecare (FP).....	18
2.6 Izolator de tip dublu pendul cu frecare (DCFP) .....	25
2.7 Izolator de tip triplu pendul cu frecare (TCFP) .....	31
2.8 Izolator de tip pendul cu cale de rulare (XY-FP) .....	38
2.9 Izolator glisant de tip Electricité-de-France (EDF) .....	38
2.10 Izolator rulant liniar de tip șină (CLB).....	39
2.11 Izolator RoGlider .....	41
2.12 Izolator de tip resort din oțel .....	42
2.13 Izolator de tip roll-n-cage (RNC).....	43
2.14 Izolator din aliaje cu memoria formei (SMA) .....	45
2.15 Alte tipuri de izolatori.....	48
3. Structuri izolate seismic la nivelul acoperișului .....	52
3.1 Kyoto Aquarena.....	56
3.2 Terminal Ataturk International Airport .....	59
3.3 Terminal Sabiha Gökçen International Airport.....	60
3.4 Hangar Istanbul.....	63
3.5 Seahawk Stadium .....	64
3.6 Sală de sport Halkapinar .....	66
3.7 Centru regional de protecție civilă din Umbria .....	67
3.8 Palas Mall .....	69
4. Studii numerice asupra comportării structurilor cu deschidere mare echipate cu izolatori seismici la nivelul acoperișului .....	71
4.1 Descrierea problemei și obiectivele analizei .....	71

4.2	Solicitarea seismică .....	72
4.3	Structură cu deschidere de 40 m (Str40m) .....	78
	• Descrierea structurii.....	78
	• Caracteristicile sistemului de izolare .....	79
	• Răspunsul seismic al structurii STR40m.....	82
4.4	Structură cu deschidere de 60 m (Str60m) .....	91
	• Descrierea structurii.....	91
	• Caracteristicile sistemului de izolare .....	92
	• Răspunsul seismic al structurii Str60m .....	93
4.5	Structură cu deschidere de 80 m (Str80m) .....	102
	• Descrierea structurii.....	102
	• Caracteristicile sistemului de izolare .....	103
	• Răspunsul seismic al structurii Str80m .....	104
4.6	Analiza comparativă a rezultatelor obținute pe modelele studiate .....	114
5.	Studiu de caz: Sala de sport multifuncțională Slatina.....	122
5.1	Descrierea structurii.....	122
5.2	Solicitarea seismică .....	124
5.3	Răspunsul seismic al structurii .....	129
6.	Optimizarea structurilor cu deschidere mare izolate seismic la nivelul acoperișului .....	142
6.1	Algoritmii genetici.....	144
6.2	Descrierea problemei de optimizare .....	147
6.3	Rezultatele problemelor de optimizare.....	152
7.	Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare.....	156
7.1	Concluzii generale .....	156
7.2	Contribuții personale .....	157
7.3	Direcții viitoare de cercetare.....	159

## Lista figurilor

Fig. 1.1 Principiul metodei de izolare seismică a bazei .....	3
Fig. 2.1 Izolator cu amortizare mică [29] .....	8
Fig. 2.2 Izolator LDRB-deformată și model liniar .....	10
Fig. 2.3 Izolator cu miez de plumb [6, 41] .....	11
Fig. 2.4 Model biliniar forță-deplasare LRB [16, 138] .....	12
Fig. 2.5 Izolator cu amortizare mare [6, 40] .....	14
Fig. 2.6 Izolator cu amortizare mare produs de TENSACCIAI .....	14
Fig. 2.7 Model biliniar forță-deplasare HDRB [16, 122] .....	15
Fig. 2.8 Model biliniar forță-deplasare izolator PF .....	17
Fig. 2.9 Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de lunecare [7] .....	19
Fig. 2.10 Model biliniar forță-deplasare izolator FP .....	21
Fig. 2.11 Comparație între formele PF, FPS,CFPI și VFPI [45] .....	23
Fig. 2.12 Izolatori de tip pendul cu frecare având una (a), două (b), respectiv patru (c) suprafețe de lunecare [101] .....	25
Fig. 2.13 Izolator de tip pendul cu frecare cu două suprafețe de lunecare [7] .....	26
Fig. 2.14 Izolator DCFP- caracteristici geometrice [36] .....	26
Fig. 2.15 DCFP – Deplasare Regim I [38] .....	27
Fig. 2.16 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim I [36, 38] .....	28
Fig. 2.17 DCFP – Deplasare Regim II [38] .....	29
Fig. 2.18 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim II [36, 38] .....	30
Fig. 2.19 Deplasare Regim II [38] .....	30
Fig. 2.20 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim IIIa și IIIb [36, 38] .....	31
Fig. 2.21 Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de lunecare [32, 94] .....	32
Fig. 2.22 Izolator TFP- caracteristici geometrice [39] .....	33
Fig. 2.23 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim I [38] .....	34
Fig. 2.24 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim II [38] .....	35
Fig. 2.25 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim III [38] .....	36
Fig. 2.26 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim IV [38] .....	37
Fig. 2.27 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim V [38] .....	37
Fig. 2.28 Izolator de tip pendul cu cale de rulare [104] .....	38
Fig. 2.29 Izolator glisant de tip Electricité-de-France (EDF)[8] .....	39
Fig. 2.30 Poziții ale izolatorului de tip Electricité-de-France (EDF) în timpul mișcării [8] .....	39
Fig. 2.31 Izolatorul rulant de tip șină (CLB)[127] .....	40
Fig. 2.32 Curba histeretică pentru izolatorul rulant de tip șină (CLB)[127] .....	40
Fig. 2.33 Izolator tip șină și amortizor (CLB)[31] .....	41
Fig. 2.34 Izolator RoGlider™ [102] .....	42
Fig. 2.35 Izolator RoGlider™ instalat la spitalul din WANGANUI [102, 128] .....	42
Fig. 2.36 Izolator de tip resort din oțel și amortizor vâscos [121] .....	43
Fig. 2.37 Izolator de tip roll-n-cage [57] .....	44
Fig. 2.38 Izolator de tip roll-n-cage: componente și poziții deformatate [56] .....	44
Fig. 2.39 Parametrii SMA pentru modelul superelasic [9] .....	45
Fig. 2.40 Izolatori realizați cu SMA [12, 50, 95] .....	46

Fig. 2.41 Izolator superelastic SMA [26] .....	47
Fig. 2.42 Izolator R-FBI [110] .....	48
Fig. 2.43 Izolator Ball-N-Cone [69, 139] .....	49
Fig. 2.44 Izolator cu tije de rulare-model mecanic [63] .....	49
Fig. 2.45 Izolator 3DSIS [123] .....	50
Fig. 2.46 Izolator VFRB [78] .....	51
Fig. 3.1 Auditorium Matsuyama [44] .....	53
Fig. 3.2 Structură de nouă etaje - Armenia .....	53
Fig. 3.3 Izolare seismică acoperiș - R. Villaverde [134] .....	54
Fig. 3.4 Shanghai International Circuit [15, 114, 117] .....	55
Fig. 3.5 Hotel Plaza, Caserta [22, 46] .....	55
Fig. 3.6 Kyoto Aquarena [74] .....	56
Fig. 3.7 Kyoto Aquarena-secțiuni [67] .....	57
Fig. 3.8 Kyoto Aquarena - tipuri izolatori [66] .....	58
Fig. 3.9 Kyoto Aquarena - Poziționare izolatori [67] .....	58
Fig. 3.10 Terminal Ataturk [59, 61] .....	59
Fig. 3.11 Terminal Ataturk – izolatori seismici [20] .....	60
Fig. 3.12 Terminal Sabiha Gökçen [106, 107] .....	61
Fig. 3.13 Sabiha Gökçen – structură acoperiș [142] .....	62
Fig. 3.14 Sabiha Gökçen – izolatori seismici [142] .....	62
Fig. 3.15 Hangar Istanbul [92, 116] .....	63
Fig. 3.16 Hangar Istanbul – Poziționare izolatori [60] .....	64
Fig. 3.17 Seahawk Stadium [14, 131] .....	65
Fig. 3.18 Seahawk Stadium – Izolator [120] .....	66
Fig. 3.19 Halkapinar Arena [48, 49] .....	67
Fig. 3.20 Halkapinar Arena - model [30] .....	67
Fig. 3.21 Centru regional de protecție civilă, Umbria [99] .....	68
Fig. 3.22 Palas Mall - Iași [47] .....	69
Fig. 3.23 Palas Mall – structură acoperiș [47] .....	70
Fig. 3.24 Palas Mall – izolatori FPS [47] .....	70
Fig. 4.1 Accelerograme înregistrate .....	73
Fig. 4.2 Accelerograme artificiale - componente orizontale și verticale .....	75
Fig. 4.3 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor generate artificial .....	75
Fig. 4.4 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor înregistrate și scalate comparativ cu P100-1/2013 .....	77
Fig. 4.5 Direcțiile componentelor acțiunii seismice pentru accelerogramele utilizate .....	78
Fig. 4.6 Structura cu deschidere de 40m (Str40m) .....	78
Fig. 4.7 Dependența de viteză a coeficientului de frecare pentru FP .....	81
Fig. 4.8 Dispunerea în plan a izolatoarelor în cazul structurii cu deschidere de 40m .....	81
Fig. 4.9 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP .....	83
Fig. 4.10 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB .....	85
Fig. 4.11 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB .....	87
Fig. 4.12 Perioadele proprii de vibrație ale structurii .....	87
Fig. 4.13 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului .....	88

Fig. 4.14 Variația forțelor seismice în bază .....	89
Fig. 4.15 Structura cu deschidere de 60m (Str60m).....	91
Fig. 4.16 Dispunerea în plan a izolatorilor în cazul structurii cu deschidere de 60m.....	93
Fig. 4.17 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP .....	95
Fig. 4.18 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB .....	97
Fig. 4.19 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB.....	98
Fig. 4.20 Perioadele proprii de vibrație ale structurii.....	99
Fig. 4.21 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului.....	100
Fig. 4.22 Variația forțelor seismice în bază .....	101
Fig. 4.23 Structura cu deschidere de 80m (Str80m).....	103
Fig. 4.24 Dispunerea în plan a izolatorilor în cazul structurii cu deschidere de 80m .....	104
Fig. 4.25 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP .....	106
Fig. 4.26 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB .....	108
Fig. 4.27 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB.....	110
Fig. 4.28 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului.....	111
Fig. 4.29 Variația forțelor seismice în bază .....	112
Fig. 4.30 Perioadele proprii de vibrație ale structurii.....	113
Fig. 4.31 Valoarea procentuală a forței seismice de bază în cazurile de izolare.....	116
Fig. 4.32 Deplasarea capătului superior al stâlpului pentru cele trei str. sub acțiunea Vr77 .	117
Fig. 4.33 Efectul componentei verticale asupra curbelor hist. ale izolatorului de tip FP.....	119
Fig. 4.34 Variația energiilor $E_i$ , $E_d$ în cazul acțiunii cutremurului A1 pentru structurile.....	120
Fig. 4.35 Curbele histeretice ale izolatorilor HDRB și LRB pentru Str80m în cazul acțiunii cutremurului Vrancea 77 .....	121
Fig. 5.1 Sala de sport din Slatina.....	123
Fig. 5.2 Variația în timp a accelerațiilor pentru cutremurele scalate conform spectrului considerat pe amplasament.....	125
Fig. 5.3 Spectrele de răspuns ale accelerogramelor înregistrate și ale celor scalate conform spectrului de răspuns considerat conform P100-1/2013 .....	126
Fig. 5.4 Accelerograme artificiale - componente orizontale și verticale.....	127
Fig. 5.5 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor generate artificial și cel conform P100-1/2013 .....	127
Fig. 5.6 Poziționarea în plan a izolatorilor pentru cazurile de izolare cu HDRB și LRB .....	129
Fig. 5.7 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP .....	131
Fig. 5.8 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB.....	133
Fig. 5.9 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB.....	135
Fig. 5.10 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului.....	136
Fig. 5.11 Variația forțelor seismice în bază .....	138
Fig. 5.12 Deplasarea capătului liber al stâlpilor .....	140
Fig. 6.1 Tipuri de optimizare structurală [93] .....	143
Fig. 6.2 Diagramă algoritm genetic.....	147
Fig. 6.3 Cadrul transversal al sălii de sport Slatina.....	147
Fig. 6.4 Diagramă proces optimizare .....	150
Fig. 6.5 Elementele obținute în urma procesului de optimizare.....	153
Fig. 6.6 Convergența proceselor de optimizare.....	154

## Lista tabelelor

4.1	Acțiunile seimice orizontale utilizate în analiza de tip time-history .....	76
4.2	Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str40m .....	80
4.3	Valorile momentului încovoietor maxim la baza stâlpului pentru Str40m .....	90
4.4	Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului pentru Str40m.....	90
4.5	Greutatea structurii acoperișului pentru Str40m .....	91
4.6	Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str60m .....	92
4.7	Valorile momentului încovoietor la baza stâlpului pentru Str60m .....	101
4.8	Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului pentru Str60m.....	102
4.9	Greutatea structurii acoperișului pentru Str60m .....	102
4.10	Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str80m .....	104
4.11	Valorile momentului încovoietor la baza stâlpului pentru Str80m .....	112
4.12	Valorile forței tăietoare la baza stâlpului pentru Str80m .....	113
4.13	Greutatea structurii acoperișului pentru Str80m .....	113
4.14	Perioadele proprii de vibrație ale structurilor și ale cutremurelor studiate .....	114
4.15	Ponderea accelerațiilor pe structura izolată din valoarea accelerațiilor pe structura de bază.....	114
4.16	Reducerea medie a deplasărilor la nivelul superior al stâlpilor .....	117
5.1	Acțiunile seimice orizontale utilizate în analiza de tip time-history .....	127
5.2	Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru structura din Slatina..	128
5.3	Valorile momentului încovoietor maxim la baza stâlpului .....	139
5.4	Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului.....	139
5.5	Greutatea structurii acoperișului .....	141
6.1	Pozițiile nodurilor tălpii inferioare .....	152
6.2	Greutatea grinzii cu zăbrele.....	154



# 1. Introducere

## 1.1 Principiile metodei de izolare seismică a bazei

Unele dintre cele mai importante fenomene naturale care afectează viața oamenilor și siguranța construcțiilor sunt cutremurele de pământ. Aceste evenimente naturale au produs de-a lungul istoriei multe pierderi de vieți omenești, dar și distrugerii materiale însemnate. Astfel, protejarea în fața acțiunii seismice a reprezentat o preocupare încă din cele mai vechi timpuri și este principalul obiectiv al ingineriei seismice. Protecția seismică a construcțiilor se poate face fie prin proiectarea structurii astfel încât aceasta să aibă o capacitate de rezistență suficientă, fie prin introducerea în cadrul structurii de rezistență a unor dispozitive speciale de control structural.

Prima structură din lume izolată seismic este considerată a fi mormântul lui Cyrus cel Mare, socotit întemeietorul imperiului persan, care datează aproximativ din anul 550 î.e.n. și este situată în Pasargadae, Iran. Mausoleul este prevăzut cu două fundații realizate din blocuri îmbinate între ele prin mortar, iar legătura dintre acestea se face prin intermediul unor pietre șlefuite, fără material de legătură, care permit alunecarea pe suprafața comună dintre acestea. Aceasta structură are un sistem de izolare care poate fi considerat rudimentar, dar al cărui principiu este utilizat astăzi în realizarea unor dispozitive de izolare pasivă (dispozitive cu frecare). Prima înregistrare a unui sistem modern de izolare a fost în februarie 1870, când Jules Touaillon a înregistrat un patent care prevede introducerea unor bile între două suprafețe semisferice [38, 89]. Primul sistem de izolare care se folosește de proprietățile frecării a fost prezentat în anul 1909 de un medic englez, Johannes A. Calantarients, care propune decuplarea structurii de fundație prin introducerea unui strat de talc amestecat cu nisip, soluție folosită ulterior la realizarea hotelului Imperial din Tokyo, în anul 1921 [89, 94]. Cel dintâi sistem modern de izolare care se bazează pe proprietățile cauciucului a fost aplicat în anul 1969, la școala Pestalozzi din Skopje, Macedonia [93]. Sistemul utilizat este compus din 16 izolatori de cauciuc, fiecare dintre aceștia fiind alcătuit din șapte straturi de cauciuc lipite cu adeziv. Dispozitive asemănătoare au fost utilizate după această perioadă și în Japonia. Cercetările ulterioare au condus la inventarea în anul 1970 a unui nou tip de dispozitiv, care avea și un miez de plumb. În anul 1974, în orașul Sevastopol din Crimeea, se realizează o structură de șapte etaje din beton armat izolată seismic prin utilizarea unor elemente ovale care forțau clădirea să se ridice în timpul cutremurului, generând în același timp și o forță de revenire a sistemului [4, 76, 95]. Nazin a studiat diferite tipuri de curbe asociate acestor

izolatori și a ajuns la concluzia că cele mai bune proprietăți dinamice sunt obținute în cazul izolatorilor eliptici [97]. Tot în această perioadă, în Rusia s-au realizat o serie impresionantă de experimente pe structuri izolate seismic și au fost implementate sisteme pasive de protecție seismică unor număr important de structuri. În 1985 a fost finalizată prima structură izolată seismic de pe teritoriul Statelor Unite, unde s-au folosit un număr de 98 de izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB) [93]. Sistemul de izolare de tip pendul cu frecare a fost inventat de Zayas în 1986 [89, 149].

În Japonia s-a înregistrat, începând cu anul 1995, după producerea cutremurului Kobe, o creștere spectaculoasă a numărului clădirilor construite ce dispun de un sistem de izolare seismică, care a ajuns până la aproape 300 de structuri pe an, însumând la sfârșitul anului 2011 un număr de 2984 de construcții. Din anul 2000, ca urmare a introducerii unei noi legi, s-a procedat în Japonia și la izolarea seismică a caselor de locuit particulare, iar în decurs de 11 ani au fost realizate, în total, 4466 de unități locative [117]. În România, prima structură izolată împotriva cutremurelor este un bloc de locuințe cu patru etaje, realizat în anul 1986, în municipiul Iași și este realizată cu ajutorul unor "sisteme gravitaționale" după modelele dezvoltate de cercetătorii ruși.

Operațiunea de izolare a bazei presupune decuplarea întregii structuri sau a unei anumite părți din structură, prin introducerea unor elemente flexibile pe întreaga suprafață a nivelului de izolare. Se urmărește ca toate deformațiile care apar datorită acțiunii seismice să se producă la nivelul elementelor flexibile, astfel încât restul structurii să aibă un comportament de corp rigid.

Prin implementarea acestui procedeu se vizează creșterea perioadei fundamentale a structurii, astfel încât aceasta să fie cât mai îndepărtată de perioadele dominante ale cutremurelor care se pot produce pe amplasamentul ales pentru structură. Odată cu creșterea perioadei se înregistrează o creștere a deplasărilor, ceea ce înseamnă că în dreptul sistemului de izolare trebuie asigurat spațiul necesar pentru a permite aceste deplasări. De asemenea, creșterea perioadei de vibrație conduce la scăderea pronunțată a forței tăietoare seismice de bază.

Amplasarea planului de izolare depinde de mai mulți factori, precum tipul structurii, numărul de dispozitive utilizate (fapt care afectează costurile de realizare a izolării), efectele așteptate în urma operațiunii etc.

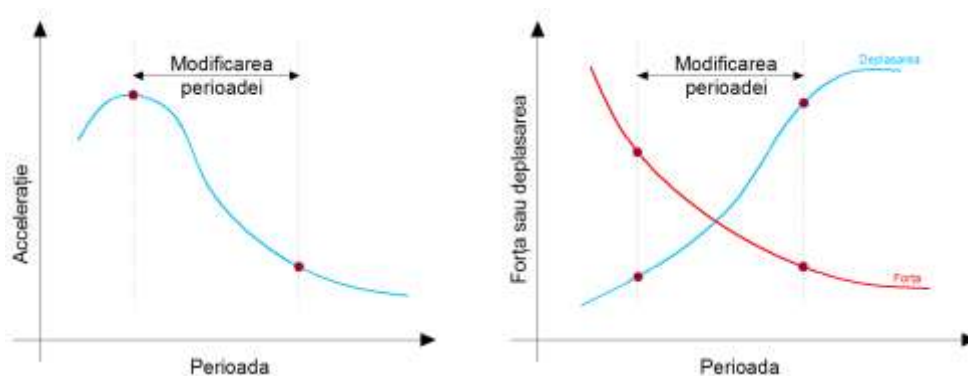


Fig. 1.1 Principiul metodei de izolare seismică a bazei

## 1.2 Oportunitatea și obiectivele cercetării

Designul unui proiect de inginerie este rezultatul unui concept care evoluează treptat începând de la o schemă inițială realizată de o echipă de proiectare împreună cu beneficiarul, pentru a satisface cerințele esențiale funcționalității proiectului finit. Proiectanții încă din fazele inițiale trebuie să ia în considerare mai mulți factori care afectează proiectul, precum: eficiența structurii, costurile de construcție și calitatea acesteia. Proiectarea implică descrierea fizică a unui concept, iar faza de proiectare se bazează pe experiența echipei de proiectare și cunoștințele cu privire la constrângerile și specificațiile care reglementează proiectarea. Optimizarea conceptuală bazată pe mai multe criterii oferă o abordare formală cu scopul de a trata sistematic aceste decizii. Orice procedee de optimizare aplicate în faza de concepție vor conduce la rezultate mai bune ale funcției de optimizat, decât cele aplicate în fazele de detaliu, unde posibilitățile de decizie sunt mai restrictive.

Din perspectiva optimizării seismice conceptuale sunt propuse două strategii care se concentrează asupra întregii structuri. Prima dintre acestea urmărește reducerea răspunsului seismic pe orizontală al structurii prin introducerea pe rând a trei sisteme distincte de izolare pasivă. Cea de-a doua strategie urmărește reducerea răspunsului seismic vertical ca urmare a micșorării masei acoperișului prin utilizarea procedeeleor de optimizare bazate pe algoritmi evolutivi. Un alt aspect important al procesului de optimizare conceptuală este reprezentat de alegerea adecvată a poziției pe verticală a nivelului de izolare seismică.

Este binecunoscut faptul că România are o importantă sursă seismică în zona Vrancea, iar cutremurele provenite din această zonă au făcut, de-a lungul timpului, multe victime omenești și au produs importante pierderi materiale. Structurile de o importanță majoră, cum sunt spitalele, stațiile de pompieri, aeroporturile și centrele de comandă în caz de dezastru, trebuie realizate astfel încât să nu sufere avarii ale structurii sau ale echipamentelor pe care le adăpostesc, în cadrul producerii unor cutremure. Trebuie acordată o importanță deosebită și

clădirilor care pot găzdui aglomerări de persoane (săli de spectacole, săli de sport, stadioane, mall-uri etc.), celor care adăpostesc lucruri de mare valoare (muzee, hangare pentru avioane) sau care se pot transforma cu ușurință în centre de urgență. Pentru a reduce valoarea de investiție a acestor tipuri de clădiri, se impune o altă abordare decât cea clasică, una care aibă în vedere atât creșterea capacității de rezistență cât și scăderea costurilor de realizare a structurii. Deoarece marea majoritate a acestor clădiri pot să aibă structura acoperișurilor cu deschidere mare, s-a analizat situația în care nivelul de izolare să nu fie poziționat în mod clasic, respectiv între infra și suprastructură, ci să fie poziționat în zona punctelor de rezemare ale acoperișului. Acest lucru se datorează și faptului că masa în vibrație constă, în principal, din cea adusă de acoperiș. Astfel, se realizează practic izolarea seismică doar a elementelor acoperișului care sunt situate deasupra nivelului de izolare. Prin această abordare se schimbă răspunsul seismic al întregii structuri și influența poate fi resimțită și în elementele situate sub nivelul de izolare. O astfel de abordare s-a preferat și din considerente de reducere a costului izolatorilor (prin număr de izolatori necesari și dimensiuni), de ușurință în montaj, întreținere și de eventuală înlocuire după un eveniment major. În țările care se situează într-o zonă seismică importantă, astfel de structuri au început să capete o importanță din ce în ce mai mare. În România, un studiu elaborat al acestei metode de izolare seismică a structurilor cu deschidere mare a acoperișului situate în zona seismică Vrancea nu a fost efectuat până în momentul de față. Toate aceste elemente au constituit bazele pentru oportunitatea cercetării în acest domeniu.

*Obiectivele tezei de doctorat sunt:*

- Aprofundarea cunoștințelor cu privire la tipurile, caracteristicile și modelele de calcul ale dispozitivelor pasive de izolare seismică;
- Documentarea cu privire la utilizarea dispozitivelor de izolare la construcțiile cu deschidere mare a acoperișului;
- Realizarea unor studii comparative între diferite sistemele de izolare pasivă dispuse la nivelul acoperișului și aplicate pe structuri cu deschidere mare amplasate pe teritoriul României, prin prisma analizei răspunsului seismic al acestora;
- Elaborarea unui program de optimizare structurală bazat pe utilizarea algoritmilor genetici aplicat structurilor studiate, în scopul reducerii greutateii acoperișului;
- Realizarea în cadrul programului de optimizare a schimbului bilateral de date între programul de calcul structural utilizat pentru simularea modelului (SAP2000) și determinarea

eforturilor în secțiuni și programul Matlab, cu ajutorul căruia s-a făcut codarea algoritmului de optimizare;

- Realizarea unui model de calcul al tuturor caracteristicilor necesare pentru simularea izolatorilor în SAP2000, pe baza specificațiilor primite de la producător și a relațiilor de calcul.

### **1.3 Conținutul tezei de doctorat**

#### *Capitolul 1*

Primul capitol are un caracter introductiv, în cadrul acestuia fiind prezentate principiile metodei de izolare seismică a bazei, principalele avantaje și o scurtă istorie a acesteia. Sunt stabilite principalele obiective și oportunitatea prezentei cercetări.

#### *Capitolul 2*

Capitolul al doilea prezintă tipurile de dispozitive de control pasiv utilizate la izolarea seismică a structurilor. Sunt detaliate modurile de alcătuire, principiile de funcționare, comportamentul acestora, dar și relațiile de calcul ale principalelor caracteristici necesare pentru modelarea lor cu ajutorul unor programe de calcul. Sunt prezentate atât tipurile de izolatori consacrate, care au fost utilizate cu succes în practică, cât și noi mecanisme de izolare propuse de cercetătorii în acest domeniu. Autorul prezintă avantajele și dezavantajele acestor dispozitive, precum și domeniile lor de aplicabilitate.

#### *Capitolul 3*

Capitolul al treilea este alcătuit din prezentarea datelor prezente în literatura de specialitate cu privire la structurile izolate seismic la nivelul acoperișului. S-a efectuat o cercetare amănunțită, care a presupus studiul mai multor clădiri al căror nivel de izolare este poziționat astfel încât să fie decuplată doar structura acoperișului, prin urmare acestea nefăcând parte din categoria clasică a structurilor izolate în bază. S-au selectat structuri care sunt relevante din acest punct de vedere și care sunt poziționate în principalele zone seismice de pe glob, inclusiv în România. Sunt prezentate atât soluțiile de izolare în bază alese pentru diferitele structuri, cât și efectele pe care acestea le au asupra răspunsului seismic al întregii structuri.

#### Capitolul 4

Cel de-al patrulea capitol cuprinde o analiză extinsă a trei structuri propuse de autor, cu scopul de a evidenția eficiența izolării seismice a structurilor la nivelul acoperișului. S-au studiat trei structuri de tip hangar cu diferite deschideri, care au fost supuse unor analize dinamice neliniare. Structurile propuse au deschiderile grinzilor principale ale acoperișului de 40 m (Str40m), 60 m (Str60m), respectiv 80 m (Str80m). Pentru analizele de tip *time-history* au fost selectate, în total, șapte acțiuni seismice cu componente pe toate cele trei direcții. Trei dintre acestea, care corespund principalelor cutremure din zona Vrancea înregistrate în România, au fost scalate conform spectrului de răspuns al amplasamentului ( $a_g=0,3g$  și  $T_c=1,6s$ ). De asemenea, au fost generate patru seturi de accelerograme artificiale, care să corespundă normelor în vigoare și amplasamentului. Pentru fiecare structură în parte au fost propuse trei tipuri de sisteme de izolare, iar caracteristicile acestora au fost calculate de către autor pe baza prescripțiilor oferite de producător. S-au prelucrat datele obținute în urma analizelor și s-au realizat comparații în termeni de deplasări relative, forțe tăietoare de bază, eforturi în elementele de susținere situate sub nivelul de izolare, accelerații relative și energie disipată. Mai mult, s-a cercetat și influența sistemelor de izolare asupra reducerii greutateii elementelor de rezistență ale acoperișului.

#### Capitolul 5

În capitolul cinci sunt prezentate trei propuneri de izolare seismică la nivelul acoperișului a unei structuri reale situate pe teritoriul României. Sala de sport multifuncțională din Slatina are o deschidere maximă a acoperișului de 52,40 m interax și se pliază pe tema abordată de autor în cadrul prezentei cercetări. Au fost propuse trei sisteme de izolare diferite, iar pentru analiza dinamică neliniară s-au utilizat șapte seturi de accelerograme. S-a făcut o comparație a rezultatelor obținute în fiecare caz și s-a evidențiat răspunsul structurilor față de situația în care nu s-a prevăzut niciun fel de dispozitiv de izolare seismică. S-au expus valorile obținute pentru accelerațiile absolute, forța tăietoare de bază, deplasările capătului liber al stâlpilor și eforturile din aceștia, perioadele structurilor.

#### Capitolul 6

Cel de-al șaselea capitol propune analiza unui cadru transversal al sălii multifuncționale din Slatina și optimizarea acestuia în scopul reducerii greutateii fermei transversale. Sunt definite trei probleme de optimizare care au ca variabile pozițiile nodurilor tălpii inferioare a

grinzii cu zăbrele, precum și secțiunile elementelor. Optimizarea se face cu ajutorul algoritmilor genetici. În cadrul primei probleme se face dimensionarea și verificarea secțiunilor cu ajutorul modulului integrat în SAP2000. Cea de-a doua problemă de optimizare, are aceeași funcție obiectiv, însă de această dată algoritmul de dimensionare și verificare a fost scris de autor în Matlab, pe baza prescripțiilor din Eurocod 3, dar utilizând eforturile și tensiunile rezultate în urma analizei cadrului în SAP2000. Această legătură între SAP2000 și Matlab a fost realizată cu ajutorul aplicației integrate numită API (Application Programming Interface). Tot cu ajutorul acesteia se face și modificarea secțiunilor existente în SAP2000 cu cele obținute în cadrul procesului de optimizare. Ultima problemă presupune o abordare similară cu problema anterioară, doar că diferența este dată de modelul cadrului care acum este prevăzut pe rând cu dispozitive antiseismice conform celor trei sisteme de izolare descrise. Comparația dintre rezultatele obținute în cadrul celor trei probleme se face din punctul de vedere al greutateii finale a grinzii cu zăbrele, al deplasărilor și al eforturilor din stâlpii de susținere.

### *Capitolul 7*

Ultimul capitol are o structură clasică și prezintă o sinteză a concluziilor care rezultă în urma cercetărilor efectuate de autor în cadrul capitolelor anterioare. Sunt subliniate contribuțiile proprii și se stabilesc direcțiile de cercetare viitoare.

## 2. Tipuri de dispozitive de control pasiv utilizate la izolarea seismică

### 2.1 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB)

Izolatorii cu amortizare mică (Low-Damping Rubber Bearings – LDRB) au fost inițial realizați integral din cauciuc natural, mai târziu proprietățile lor fiind îmbunătățite prin adăugarea unor plăci din oțel (lamele) [17]. Acest tip de izolatori, din cauciuc natural sau sintetic, sunt utilizați la scară largă în țări precum Japonia, în combinație cu dispozitive suplimentare de amortizare, ca de exemplu amortizori vâscoși, bare de oțel, bare de plumb etc. Elastomerul folosit în Japonia conține cauciuc natural, iar neoprenul a fost utilizat în cadrul unor proiecte realizate în alte țări, cum ar fi Franța [93].

Izolatorii cu amortizare mică sunt alcătuiți din două plăci groase de capăt, iar în interior se regăsește un tipar format dintr-o succesiune de lamele metalice echidistante, între care este inserat cauciucul, în condiții speciale de presiune și temperatură. Se urmărește ca prin această operațiune să se realizeze lipirea cauciucului atât de lamelele interioare, cât și de plăcile de capăt. Lamelele metalice au rolul de a împiedica umflarea cauciucului și de a asigura o rigiditate verticală mare, dar nu au efect asupra rigidității laterale, aceasta fiind controlată prin modulul de forfecare redus al elastomerului. Comportarea materialului la forfecare este considerată liniară până la valori de 100% ale deformațiilor de forfecare, cu o amortizare de 2-3% din amortizarea critică. Materialul nu prezintă curgere lentă [93].



Fig. 2.1 Izolator cu amortizare mică [30]

Izolatorii cu amortizare mică prezintă următoarele principale avantaje: procesul de fabricație este destul simplu, relativ ieftin în comparație cu celelalte tipuri de izolatori [17], iar răspunsul lor mecanic nu este afectat de temperatură, îmbătrânire, istoria și rata de încărcare. Principalul dezavantaj al acestui sistem este utilizarea lui împreună cu alte sisteme suplimentare de disipare a energiei [93].

Rigiditatea izolatorului pe verticală diferă, aceasta fiind mult mai mică atunci când izolatorul este supus la întindere, decât atunci când este comprimat [17].



Izolatorii elastomerici au fost folosiți cu succes atât la clădiri, cât și la alte tipuri de structuri, ei funcționând în parametrii de proiectare chiar și după 50 de ani de utilizare [17].

Cea mai importantă proprietate mecanică a acestui tip de izolator este rigiditatea orizontală scăzută [3, 53, 70, 93] :

$$K_h = \frac{GA_b}{T} \quad (2.1)$$

unde  $G$  este modulul de forfecare al cauciucului,  $A_b$  este suprafața secțiunii transversale a cauciucului,  $T = nt_r$  este grosimea totală a  $n$  straturi de cauciuc de grosime  $t_r$  fiecare.

Rigiditatea verticală mare a izolatorului este dată de formula [3, 70] :

$$K_v = \frac{E_c A_b}{T} \quad (2.2)$$

unde:  $E_c$  este modulul de elasticitate la compresiune al compozitului oțel-cauciuc.

Valoarea lui  $E_c$  pentru un singur strat de cauciuc de formă circulară poate fi considerată ca fiind  $E_c = 6GS^2$ , iar pentru unul de formă dreptunghiulară  $E_c = 6,73 GS^2$  [93].  $S$  este un parametru geometric adimensional numit factor de formă (shape factor) și este definit ca fiind [3, 70] :

$$S = \frac{\text{suprafața încărcată}}{\text{suprafața laterală liberă}} \quad (2.3)$$

În funcție de forma geometrică, factorul de formă poate fi:  $S = R/2t$  pentru un singur strat de cauciuc de grosime  $t$  și rază  $R$ , iar pentru cazul în care cauciucul este sub forma unui pătrat de latură  $a$  și grosime  $t$ , avem  $S = a/4t$  [34, 36, 93].

Din relațiile (2.1) și (2.2) rezultă că pentru un izolator circular, legătura dintre rigiditatea verticală și cea orizontală este:

$$\frac{K_v}{K_h} = 6S^2 \quad (2.4)$$

Se observă că rigiditatea pe verticală pentru factorii de formă uzuali (cuprinși între 15 și 25) utilizați în realizarea acestor izolatori este mult mai mare decât rigiditatea pe orizontală, iar acest lucru presupune deformații mici pe verticală, care determină o perioadă mică pe această direcție, ceea ce conduce la o amplificare a accelerației verticale. Așadar, un sistem de izolare compus din izolatori LDRB oferă o bună izolare doar pe direcția orizontală [143].

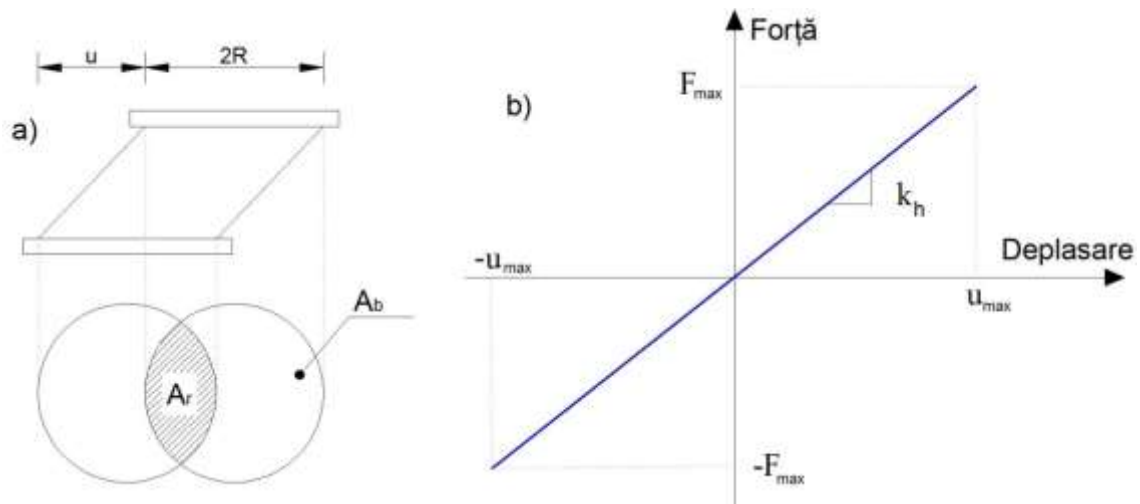


Fig. 2.2 Izolator LDRB-deformată și model liniar

Încărcarea verticală maximă în starea nedeformată se calculează folosind relația [3] :

$$P_{cr0} = \frac{\sqrt{(P_S^2 + 4P_S P_E) - P_S}}{2} \quad (2.5)$$

unde  $P_S = GA_S$ , iar  $P_E$  este forța critică de flambaj dată prin formula lui Euler.

Încărcarea critică verticală la o anumită deplasare laterală poate fi exprimată prin metoda suprapunerii ariilor (Fig. 2.1-a) astfel [20] :

$$P_{cr} = \left(\frac{A_r}{A_b}\right) P_{cr0} \quad (2.6)$$

unde  $A_r$  este aria redusă, corespunzătoare suprapunerii ariilor transversale ale părții inferioare și superioare ale izolatorului.

## 2.2 Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB)

Izolatorii cu miez de plumb (Lead Rubber Bearings – LRB) au fost inventați și testați în Noua Zeelandă în 1975, de către W.H. Robinson, fiind folosiți la scară largă și în țări precum Japonia și Statele Unite ale Americii. Primii izolatori de tip LRB au fost utilizați în anul 1981, la clădirea William Clayton din Wellington, Noua Zeelandă. Aceștia sunt asemănători cu izolatorii cu amortizare mică, dar conțin unul sau mai multe miezuri de plumb [93], eliminând astfel unele dintre dezavantajele pe care le prezintă izolatorii cu amortizare mică [17]. Pentru introducerea miezului de plumb se prevede o gaură puțin mai redusă ca diametru față de dimensiunea acestuia, localizată de obicei în centrul izolatorului. Odată cu introducerea miezului de plumb în spațiul destinat, se realizează o conlucrare între cele două piese [17]. De obicei, izolatorii sunt realizați sub formă circulară, dar pot fi fabricați și având

secțiuni dreptunghiulare. Prin introducerea miezului de plumb crește energia disipată de izolator [105].

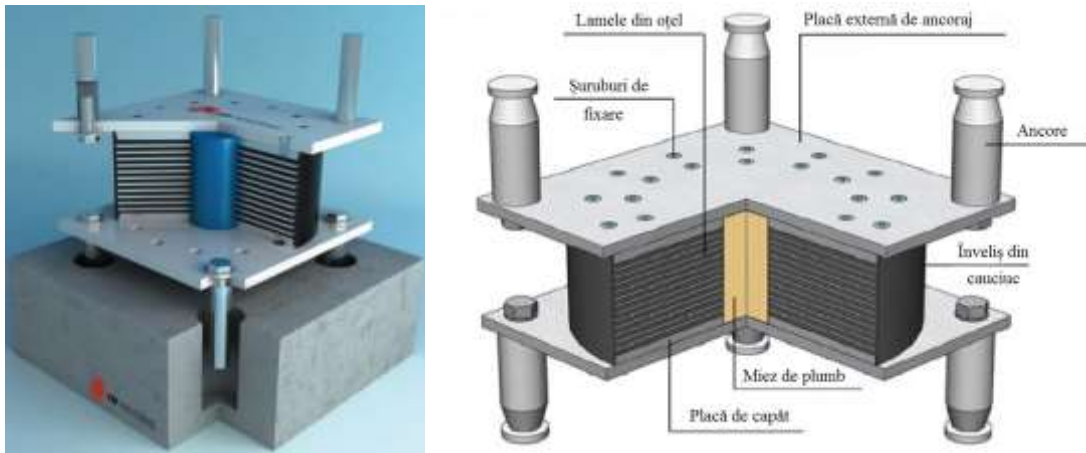


Fig. 2.3 Izolator cu miez de plumb [7, 42]

Performanțele izolatorilor cu miez de plumb depind de forța laterală care acționează asupra lor. Dacă această forță este redusă, deplasarea plăcuțelor metalice din interiorul izolatorului este restricționată de miezul de plumb, iar izolatorul prezintă o rigiditate laterală crescută. Odată cu creșterea forței laterale, foițele metalice forțează miezul de plumb să se deplaseze sau să intre în curgere, fiind astfel asigurată amortizarea histeretică prin absorbția de energie a miezului, iar ca urmare, rigiditatea laterală a izolatorului este redusă. Amortizarea echivalentă a izolatorilor cu miez de plumb variază de la 15% până la 35%. Pentru a descrie proprietățile mecanice ale izolatorilor cu miez de plumb se folosește un model biliniar [17].

Acest model biliniar poate fi definit prin trei parametri importanți:

- $k_e$  – rigiditatea elastică
- $k_p$  – rigiditatea post-elastică
- $Q$  – rezistența caracteristică care este utilizată pentru a estima stabilitatea comportamentului histeretic atunci când izolatorul este supus unor cicluri de încărcare repetate.

Modelul biliniar idealizat, bazat pe date experimentale, este prezentat în Fig. 2.4. Atunci când asupra izolatorului se aplică o forță laterală, între această forță și deplasare va exista o relație liniară până în punctul  $a$ , atât pentru încărcare, cât și pentru descărcare. Rigiditatea pe acest segment este dată de valoarea lui  $k_e$ . În punctul  $b$  se atinge limita de curgere, iar după aceasta, izolatorul înregistrează deplasări mai mari pentru creșteri mici ale forței, iar rigiditatea lui pe acest palier va fi egală cu rigiditatea post-elastică ( $k_p$ ). Odată cu

Începerea palierului de descărcare, rigiditatea se modifică și revine la valoarea inițială  $k_e$  pe un interval egal cu  $2F_y$ , unde  $F_y$  este forța de curgere. După punctul  $d$ , descărcarea continuă cu rigiditatea  $k_p$  [17].

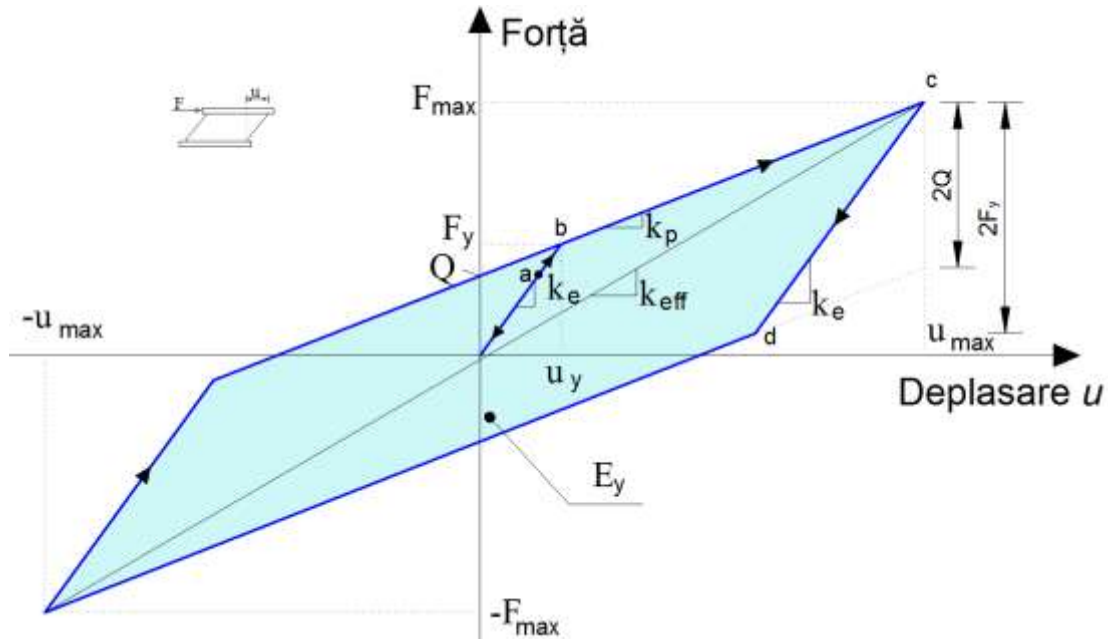


Fig. 2.4 Model bilinar forță-deplasare LRB [17, 146]

Rigiditatea efectivă ( $k_{eff}$ : se exprimă în funcție de rigiditatea post-elastică  $k_p$  și de rezistența caracteristică  $Q$ , căreia îi corespunde o deplasare laterală egală cu  $u$  [17, 25] :

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{u} \quad (2.7)$$

Rigiditatea post-elastică ( $k_p$ ) [17, 36]:

$$k_p = \frac{A_b \cdot G \cdot f_l}{t_r} \quad (2.8)$$

unde  $A_b$  este aria secțiunii transversale a izolatorului (vezi Fig. 2.2-a),  $G$  este modulul de forfecare al cauciucului,  $t_r = \sum t$  este grosimea totală a cauciucului, iar  $f_l$  este un coeficient supraunitar egal cu 1,15.

Rigiditatea elastică ( $k_e$ ) a izolatorului este greu de determinat, dar se poate aproxima ca fiind cuprinsă între următoarele limite [17] :

$$6,5k_p \leq k_e \leq 10k_p \quad (2.9)$$

Deplasarea la limita de curgere ( $u_y$ ) se calculează în funcție de  $k_e$  și  $k_p$ :

$$u_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \quad (2.10)$$

Forța de curgere ( $F_y$ ) la deplasarea de curgere  $u_y$  este [17, 36] :

$$F_y = Q + k_p u_y \quad (2.11)$$

Rezistența caracteristică ( $Q$ ) este:

$$Q = A_p \sigma_y \quad (2.12)$$

unde  $A_p$  este suprafața secțiunii transversale a miezului de plumb, iar  $\sigma_y = 8 \div 10$  MPa este rezistența la curgere a plumbului și depinde de încărcarea verticală și de confinarea miezului de plumb [17, 25, 36].

Amortizarea efectivă a izolatorului ( $\xi_{eff}$ ) este dată de relația [17, 25, 36] :

$$\xi_{eff} = \frac{2Q(u_{max} - u_y)}{\pi k_{eff} D_{max}^2} \quad (2.13)$$

Perioada efectivă a sistemului de izolare ( $T_{eff}$ ) este dată de formula [20] :

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{eff} \cdot g}} \quad (2.14)$$

Unde  $W$  este greutatea susținută de izolator.

### 2.3 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB)

Dezvoltarea unui compus al cauciucului natural care să aibă suficientă amortizare internă, astfel încât să fie eliminată necesitatea utilizării unor sisteme suplimentare de disipare a energiei, a fost realizată în 1982 de către Asociația de Cercetare a Producătorilor Malaezieni de Cauciuc din Marea Britanie. Amortizarea este crescută prin adăugarea în componența cauciucului a carbonului extra fin, a uleiurilor și a rășinilor. Nivelul amortizării este astfel crescut la valori cuprinse între 10% și 20%, la deformații de forfecare de 100%. Se înregistrează nivele mai scăzute ale amortizării corespunzătoare unei duriții mai mici și modul de deformație la forfecare de aproximativ 0,34 MPa, și nivele mai mari ale amortizării corespunzătoare unei duriții crescute, cu valori ale modulului de deformație la forfecare de aproximativ 0,4 MPa. Procesele de fabricare ale izolatoarelor (vulcanizarea, lipirea) rămân aceleași ca și în cazul izolatoarelor cu amortizare mică [93].

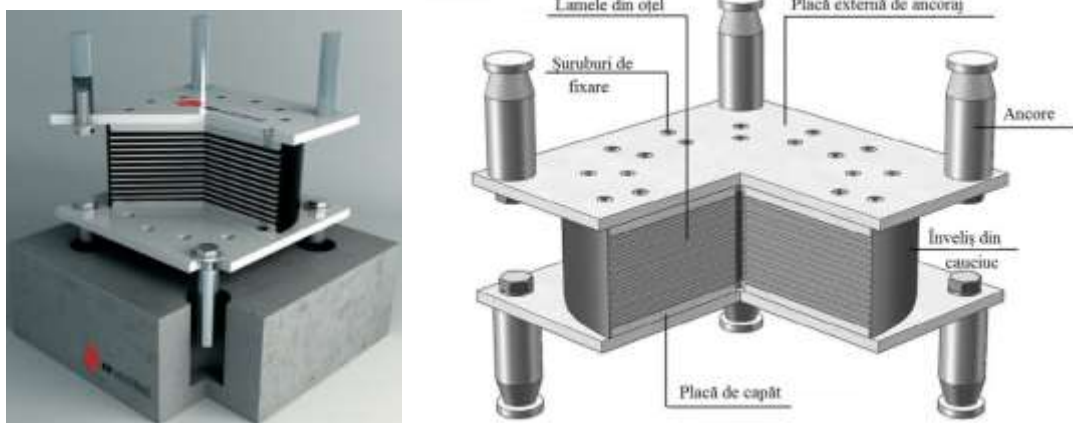


Fig. 2.5 Izolator cu amortizare mare [7, 41]

Comportarea materialului este neliniară la deformații specifice de forfecare mai mici de 20% și este caracterizată printr-o rigiditate și amortizare mai mare, care tinde să minimizeze răspunsul la încărcările din vânt și la acțiuni seismice de mică intensitate. În intervalul de deformații specifice de forfecare cuprins între 20% și 120%, modulul de deformație la forfecare este scăzut și constant. La deformații mari, modulul crește datorită procesului de cristalizare din cauciuc, care este însoțit de o creștere în disiparea energiei. Această creștere a rigidității și amortizării la deformații specifice mari poate fi exploatată pentru a realiza un sistem care este rigid la solicitări mici, oarecum liniar și flexibil la încărcările de proiectare, dar care poate limita deplasările la valori mari, neanticipate, ale încărcărilor [93].



Fig. 2.6 Izolator cu amortizare mare produs de TENSACCAI

O analiză liniară cu rigiditatea inițială poate fi utilizată pentru a estima răspunsul structurii izolate sub acțiunea solicitărilor din vânt și alte solicitări de intensitate scăzută. În mod similar, o analiză liniară poate fi efectuată și atunci când rigiditatea este în conformitate cu o rigiditate moderată, pentru a estima un răspuns al sistemului în raport cu solicitările cutremurului de proiectare [24]. Pentru a ilustra efectele forței laterale aplicate pe izolator

asupra deplasărilor la acțiunea unui seism, dincolo de solicitarea de proiectare, se poate adopta un model biliniar.

Printre avantajele sistemelor HDRB se numără:

- Lipsa necesității combinării cu alte sisteme de absorbție a energiei, precum în cazul LDRB.
- Ușurința cu care sunt fabricate și proiectate;

Proprietățile mecanice ale izolatorilor cu amortizare mare sunt oarecum afectate de efectul îmbătrânirii cauciucului și de variațiile de temperatură [17]. Modificările caracteristicilor orizontale ale izolatorilor elastomerici, datorită îmbătrânirii pe durata de viață a acestora, se estimează a fi mai mici de 20% din valorile inițiale [34]. Elementele prezintă o rigiditate și o amortizare mai mare la primul ciclu de încărcare, după care proprietățile se stabilizează [24].

Pentru trasarea curbei histeretice se folosește același model biliniar, la fel ca în cazul amortizorilor cu miez de plumb (LRB) prezentat în Fig. 2.4.

Parametrii folosiți pentru generarea modelului biliniar pentru izolatorii de tip HDRB sunt aceiași cu cei folosiți în cazul LRB ( $k_e$ ,  $k_p$ ,  $Q$ ), fiind derivați din modulul de amortizare ( $G$ ) și amortizarea efectivă ( $\xi_{eff}$ ), care are valori ce variază între 20% și 30% din rata (fracțiunea) critică de amortizare [17].

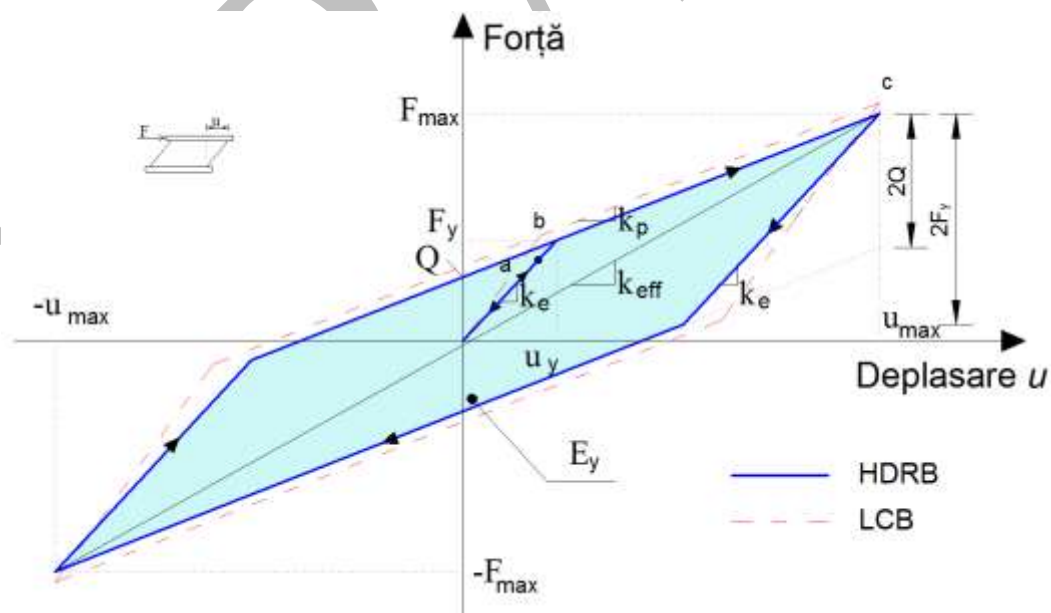


Fig. 2.7 Model biliniar forță-deplasare HDRB [17, 130]

După cum se poate observa în Fig. 2.7, pentru aceeași deplasare maximă, LRB prezintă o rigiditate inițială (rigiditate elastică  $k_e$ ) mai mare decât în cazul HDRB, iar

suprafața curbei histeretice este, de asemenea, mai mare, iar acest lucru înseamnă o energie disipată ( $E_y$ ) mai mare decât în cazul izolatorilor de tip HDRB [130].

*Rigiditatea post-elastică* ( $k_p$ ) [17, 36]:

$$k_p = \frac{A_b \cdot G}{t_r} \quad (2.15)$$

unde  $A_b$  este aria secțiunii transversale a izolatorului (vezi Fig. 2.2-a),  $G$  este modulul de forfecare al cauciucului,  $t_r = \sum t$  este grosimea totală a cauciucului.

*Rezistența caracteristică* ( $Q$ ) este [17]:

$$Q = \frac{\pi \cdot \xi_{eff} \cdot k_p \cdot u_{pr}}{(2 - \pi \cdot \xi_{eff})u_{pr} - 2u_y} \quad (2.16)$$

unde  $\xi_{eff}$  este amortizarea efectivă,  $u_{pr}$  este deplasarea de proiectare, iar  $u_y$  este deplasarea la limita de curgere a izolatorului, valoarea ei nefiind cunoscută a priori. Datele experimentale sugerează că valoarea ei poate fi aproximată conform relației [17, 36] :

$$u_y = (0,05 \div 0,1)t_r \quad (2.17)$$

Odată cunoscute valorile pentru  $k_p$ ,  $u_y$  și  $Q$ , se poate determina *forța de curgere* ( $F_y$ ) la deplasarea de curgere  $u_y$ , ca fiind [17, 36]:

$$F_y = Q + k_p \cdot u_y \quad (2.18)$$

*Rigiditatea elastică* ( $k_e$ ) se determină conform relației [17, 36]:

$$k_e = \frac{F_y}{u_y} = k_p + \frac{Q}{u_y} = k_p \left\{ 1 + \frac{\pi \cdot \xi_{eff} \cdot u_{pr}^2}{u_y [(2 - \pi \cdot \xi_{eff}) \cdot u_{pr} - 2u_y]} \right\} \quad (2.19)$$

*Rigiditatea efectivă* ( $k_{eff}$ ) a izolatorilor HDRB se determină cu ajutorul amortizării efective  $\xi_{eff}$  și a deplasărilor  $u_{pr}$  și  $u_y$  conform relației [17]:

$$k_{eff} = \frac{2Q(u_{pr} - u_y)}{\pi \cdot \xi_{eff} \cdot u_y^2} \quad (2.20)$$

Cu ajutorul rigidității efective ( $k_{eff}$ ) se poate calcula *modulul de forfecare efectiv* ( $G_{eff}$ ) utilizând relația de mai jos [36]:

$$G_{eff} = \frac{k_{eff} \cdot t_r}{A_b} \quad (2.21)$$



Calculul valorilor amortizării efective ( $\xi_{eff}$ ) și a perioadei efective ( $T_{eff}$ ) se va face conform relațiilor (2.13), respectiv (2.14).

## 2.4 Izolator cu frecare (PF)

Sistemul de izolare prin frecare (Pure Friction, PF) este unul dintre primele și cele mai simple sisteme de izolare prin alunecare. Sistemul presupune utilizarea unei articulații și se ghidează după legile alunecării cu frecare. Pentru valori mici ale forțelor laterale (încărcări din vânt), întreaga structură se comportă ca un sistem fix, iar odată cu creșterea forțelor și depășirea valorii forței de frecare, sistemul se pune în mișcare. Forța laterală necesară pentru a antrena mecanismul depinde de coeficientul de frecare, care poate fi controlat prin alegerea materialului potrivit pentru tratarea suprafeței de alunecare.

Studiile efectuate asupra importanței coeficientului de frecare au relevat că dacă se presupune o valoare constantă pentru acesta, răspunsul sistemului poate fi diferit față de cel real (forța tăietoare de bază este mai mică). Atunci când coeficientul de frecare variază în funcție de viteză și sistemul este supus unui seism care are și o componentă verticală, valoarea forței tăietoare de bază este mai mare decât valoarea reală. De asemenea, componenta verticală a unui seism poate afecta considerabil răspunsul lateral al structurii [72].

Printre dezavantajele acestui sistem se numără degradarea materialului cu care se tratează suprafața de alunecare (uzura), întreținerea riguroasă pentru a asigura menținerea proprietăților suprafeței de alunecare pe durata de viață a izolatorului, dar și faptul că sistemul este incapabil să se recentreze după ce a fost mișcat din poziția inițială [108].

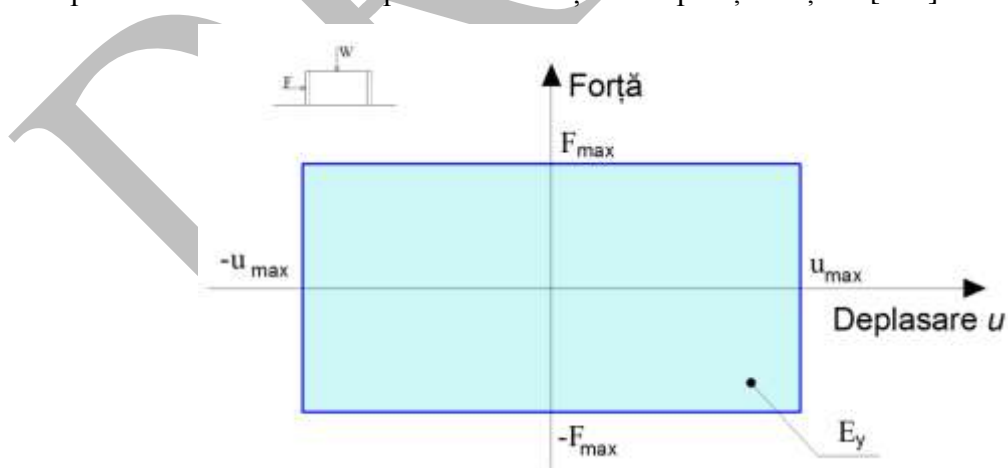


Fig. 2.8 Model biliniar forță-deplasare izolator PF

## 2.5 Izolatori de tip pendul cu frecare (FP)

Izolatorii de tip pendul cu frecare (Friction Pendulum System – FPS) reprezintă un sistem de izolare care combină mișcarea de alunecare și forța de revenire dată de conformarea geometrică a sistemului [93]. Izolarea seismică se obține prin schimbarea perioadei normale de vibrație a structurii susținute.

Intensitatea forței la care începe alunecarea este controlat prin selectarea materialului pe care se face frecarea. În momentul în care forțele seismice sunt mai mici decât forța de frecare, structura izolată se comportă ca o structură normală, neizolată, având o anumită perioadă proprie de vibrație. Odată depășită această forță de frecare, răspunsul dinamic este controlat de izolatorii FPS, iar structura izolată răspunde cu o altă perioadă de vibrație [149].

Rigiditatea laterală este dată de [149]:

$$k = \frac{W}{R} \quad (2.22)$$

unde  $W$  este forța verticală aplicată pe izolator, iar  $R$  este raza de curbură a suprafeței concave. Faptul că rigiditatea este direct proporțională cu forța verticală constituie o proprietate importantă a izolatoarelor de tip FPS, care are efecte apreciabile atunci când studiem comportarea la torsiune. Deoarece forța de frecare este proporțională cu forța verticală, centrul de rigiditate al elementelor de tip FPS care izolează o structură este egal cu centrul maselor structurii izolate și, ca urmare, se minimizează efectele torsiunii [149].

Perioada proprie de vibrație  $T$  a unei mase plasate pe un dispozitiv de tipul FPS este dată de ecuația pendulului și reprezintă perioada unei structuri rigide izolată cu FPS:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2.23)$$

unde  $g$  este accelerația gravitațională.

Faptul că perioada de vibrație este independentă de masa structurii este o altă caracteristică importantă a acestui sistem, astfel că perioada dorită poate fi obținută doar prin alegerea razei de curbură a concavității.

- **Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de alunecare (FP)**

Inițial, suprafețele de alunecare erau prevăzute ca fiind orizontale, dar s-a constatat că acest lucru prezintă un dezavantaj major, deoarece structura nu are capacitatea de a reveni la

poziția inițială, cea de dinaintea aplicării forței exterioare. În cazul în care se înregistrează replici ale unor cutremure sau sunt aplicate alte forțe horizontale există posibilitatea ca deplasarea datorată acestora să depășească deplasarea maximă admisă a izolatorului, ajungându-se astfel la cedarea acestuia. Pentru a reduce distanța față de centrul izolatorului după un cutremur a fost dezvoltat un izolator cu suprafața concavă [17].

El a fost prezentat pentru prima dată de către Victor Zayas, în 1985 [149]. Izolatorul de tip pendul cu frecare (Friction Pendulum - FP) este alcătuit dintr-o componentă articulată, care culisează pe o suprafață sferică din oțel inoxidabil. Partea componentei care culisează, aflată în contact cu suprafața sferică, este acoperită cu un material compozit cu un coeficient de frecare mic. Cealaltă parte este de asemenea sferică, alcătuită din oțel inoxidabil și este așezată într-o cavitate acoperită, similar, cu un material compozit, având coeficient mic de frecare. Pe măsură ce culisorul se deplasează pe suprafața sferică, placa din oțel și, implicit, elementele atașate de aceasta, își modifică poziția, ele ridicându-se, și astfel furnizând forța de revenire a sistemului la poziția inițială [93]. Sistemul se oprește din mișcare atunci când forța de frecare este mai mare sau egală cu componenta forței verticale [17]. Frecarea dintre culisor și suprafața sferică generează amortizare în izolator. Rigiditatea efectivă și perioada de oscilație a structurii este controlată de raza de curbură a suprafeței sferice [93]. Suprafața de alunecare dintre piese este de obicei acoperită cu teflon (PTFE), cu un coeficient de frecare în jur de 3% [17].

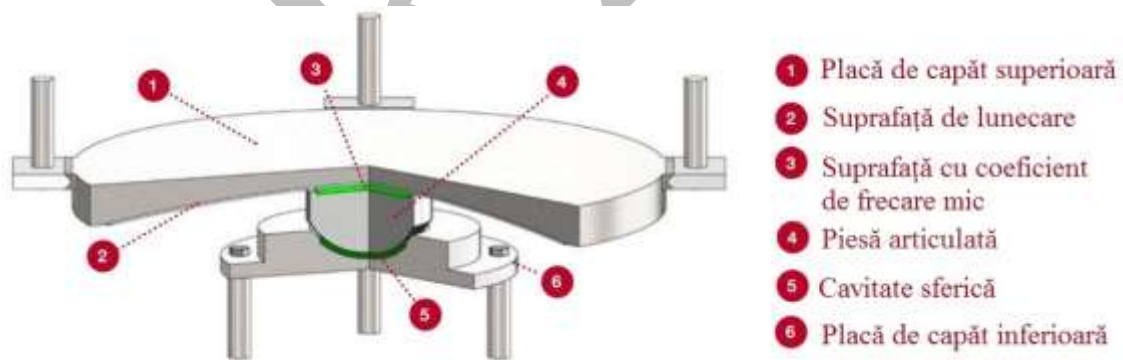


Fig. 2.9 Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de alunecare [8]

Principalele proprietăți și avantaje ale izolatoarelor de tip pendul cu frecare sunt:

- Perioada de vibrație este independentă de masa suportată;
- Forța laterală este direct proporțională cu greutatea cu care este încărcat sistemul de izolatori și, în consecință, forța este dezvoltată în centrul maselor, minimizând astfel efectele torsiunii;

- Se comportă rigid la acțiuni din vânt și seism de intensitate redusă. Acest lucru se datorează frecării din interiorul izolatorului, care nu permite mișcarea decât atunci când este depășită valoarea așa-numitei limite de frecare statică;
- Au capacitate mare de preluare a forțelor verticale. Datorită realizării lor, izolatorii nu prezintă efecte P-Δ considerabile la deplasări mari;
- Proprietățile de flexibilitate și de absorbție a energiei nu sunt interconectate. Flexibilitatea este controlată prin geometria sistemului (raza), iar cea de-a doua proprietate este dictată de frecarea dintre suprafețe. Aceste proprietăți conduc la posibilitatea realizării unui design optim al izolatorilor de tip pendul cu frecare;
- Curba histeretică este stabilă;
- Costuri de realizare și întreținere sunt relativ scăzute;
- Efectele îmbătrânirii și temperatura nu afectează proprietățile mecanice ale izolatorului [17, 19, 86].

Principalul dezavantaj este reprezentat de degradarea suprafețelor de glisare după câteva cicluri de încărcare [86], dar, având în vedere că ele se pun în mișcare doar la apariția unui cutremur, atunci putem afirma că ele sunt proiectate pentru întreaga durată de viață a construcției [17].

Pentru exprimarea relației între forță și deplasare este utilizat, de asemenea, un model biliniar definit prin trei parametri: rigiditate inițială ( $k_1$ ), rezistență caracteristică ( $Q$ ) și deplasare maximă ( $u_{max}$ ).

Inițial, sistemul se comportă rigid la acțiunea unei forțe orizontale, până când valoarea acesteia depășește valoarea forței de frecare ( $F_f = \mu_f W$ ), după care creșterea forței este proporțională cu deplasarea, având ca factor de proporționalitate rigiditatea  $k_1$ .

Rezistența caracteristică ( $Q$ ) a izolatorului de tip pendul cu frecare este egală cu forța de frecare și poate fi definită ca fiind [17, 53]:

$$Q = \mu_f \cdot W \quad (2.24)$$

unde  $W$  este forța axială aplicată asupra izolatorului, iar  $\mu_f$  este coeficientul de frecare, dependent de viteza de alunecare și de forța axială, cu valori cuprinse între 3% și 12%, iar el poate fi definit ca fiind [17, 36, 72]:

$$\mu_f = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \cdot e^{-\alpha|u|} \quad (2.25)$$

în care  $\mu_{max}$  și  $\mu_{min}$  sunt coeficienții de frecare corespunzători vitezei minime și maxime,  $\dot{u}$  este viteza de deplasare a izolatorului, iar  $\alpha$  este un parametru care controlează intensitatea schimbării coeficientului de frecare de la  $\mu_{min}$  la  $\mu_{max}$ .

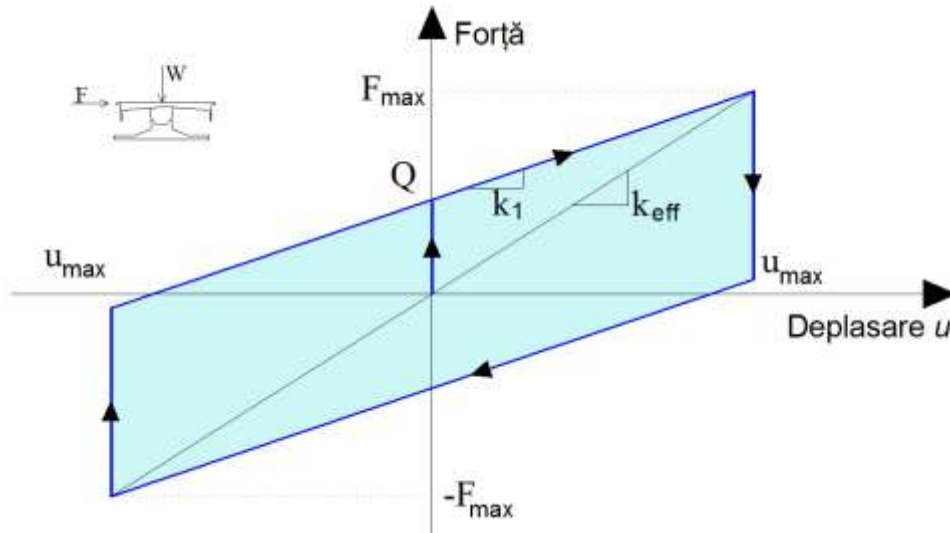


Fig. 2.10 Model biliniar forță-deplasare izolator FP

Rigiditatea izolatorului după începerea lunecării ( $k_1$ ) se determină cu relația [17]:

$$k_1 = \frac{W}{R} \quad (2.26)$$

unde  $R$  este raza de curbură a suprafeței concave a izolatorului.

Rigiditatea efectivă ( $k_{eff}$ ) a izolatorului de tip FP cu o suprafață de lunecare la deplasarea de proiectare  $u_{max}$  se determină utilizând relația [17, 93]:

$$k_{eff} = k_1 + \frac{Q}{u_{max}} = W \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu_f}{u_{max}} \right) \quad (2.27)$$

Amortizarea efectivă a izolatorului ( $\xi_{eff}$ ) este considerată ca fiind [17, 93]:

$$\xi_{eff} = \frac{2 \cdot \mu_f}{\pi \left( \frac{u_{max}}{R} + \mu_f \right)} \quad (2.28)$$

Perioada structurii izolate cu FP este dată de relația [14]:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu_f}{d_{max}} \right)}} \quad (2.29)$$

Se observă că perioada structurilor izolate cu acest sistem de pendul cu frecare (FP) nu depinde de masa structurii, ci de raza de curbură a suprafeței concave de lunecare.

- **Izolator de tip pendul cu frecvență variabilă (VFPI)**

Izolatorul de tip pendul cu frecvență variabilă (variable frequency pendulum isolator – VFPI) combină avantajele pe care le oferă izolatorii cu frecare (PF) și de tip pendul cu frecare (FP), dar elimină o parte dintre dezavantajele prezentate de aceste sisteme. Ca o consecință a faptului că suprafața de lunecare nu ar trebui să fie nici plană, nici circulară, s-a propus ca aceasta să fie derivată dintr-o elipsă, pentru a asigura o schimbare progresivă a perioadei. Geometria este dată de [46]:

$$y = b \left[ 1 - \frac{\sqrt{d^2 + 2dx \operatorname{sign}(x)}}{d + x \operatorname{sign}(x)} \right] \quad (2.30)$$

unde  $b$  și  $d$  sunt parametrii geometrici ai suprafeței care reprezintă semiaxa mică și valoarea inițială a semiaxe mari (pozitivă),  $\operatorname{sign}(x)$  este funcția de semn încorporată pentru a menține simetria față de axa verticală, iar  $x$  este deplasarea pe orizontală la un moment dat.

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \text{ – funcția signum (semn)}$$

Frecvența izolatorului este dată de relația [46, 116]:

$$\omega_b^2(x) = \frac{\omega_i^2}{(1+r)^2 \sqrt{1+2r}} \quad (2.31)$$

unde  $\omega_i^2 = gb/d$  este pătratul frecvenței inițiale a izolatorului la deplasare nulă

$$r = x \operatorname{sign}(x)/d$$

Perioada inițială a izolatorului VFPI este [101, 116]:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{d^2}{gb}} \quad (2.32)$$

- **Izolator conic de tip pendul cu frecare (CFPI)**

Suprafața de lunecare a izolatorului conic de tip pendul cu frecare (conical friction pendulum isolator - CFPI) este derivată din suprafața sferică a pendului cu frecare FPS [80], acestea fiind identice până la distanța  $d_b$  de axa verticală de simetrie, după care suprafața CFPI devine tangentă la suprafața sferică. Parametrii  $d_b$  și  $R$  sunt importanți pentru descrierea geometriei izolatorului de tip CFPI.

$$y(x) = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - x^2} & , |x| \leq d_b \\ c_1 + c_2(|x| - d_b) & , d_b < |x| \end{cases} \quad (2.33)$$

Unde  $c_1 = R - \sqrt{R^2 - d_b^2}$  și  $c_2 = d_b / \sqrt{R^2 - d_b^2}$

Frecvența izolatorului poate fi calculată ca fiind:

$$\omega_b = \sqrt{g\ddot{y}(x)} \quad (2.34)$$

Atunci când deplasarea izolatorului depășește valoarea lui  $d_b$ , frecvența izolatorului CFPI este zero, iar acest lucru duce la deplasări și accelerații mari. Chiar dacă se variază coeficientul de frecare, răspunsul CFPI nu poate fi controlat.

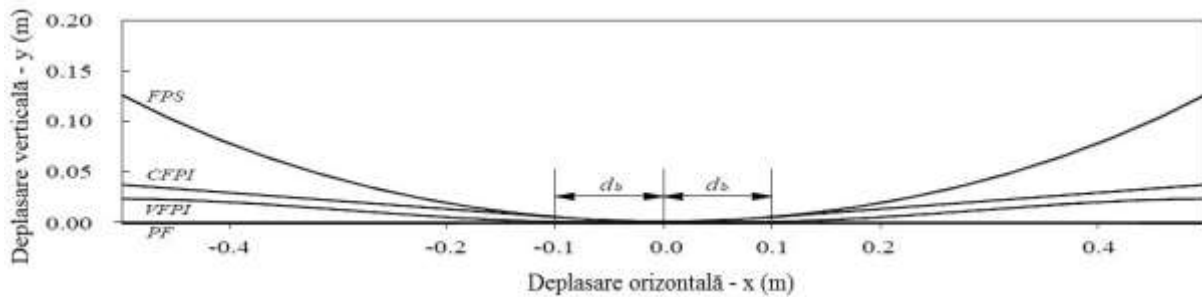


Fig. 2.11 Comparatie între formele PF, FPS, CFPI și VFPI [46]

- **Izolator de tip pendul cu frecare variabilă (VFPS)**

Acest sistem propus de Panchal și Jangid [102] este asemănător din punctul de vedere al alcătuirii cu pendulul cu frecare FPS, elementul de noutate fiind utilizarea unui coeficient de frecare variabil.

Ecuatia care definește legea de variație a coeficientului de frecare este [46, 102]:

$$\mu = (\mu_0 + a_1|x_b|)e^{-a_2|x_b|} \quad (2.35)$$

unde  $\mu_0$  este valoarea inițială a coeficientului de frecare,  $a_1$  și  $a_2$  sunt parametrii care descriu variația coeficientului de frecare de-a lungul suprafeței de alunecare,  $x_b$  este deplasarea izolatorului.

Rigiditatea inițială,  $k_i$ , poate fi scrisă ca fiind:

$$k_i = \frac{\mu_{max}W}{x_{b\ max}} \quad (2.36)$$

unde  $\mu_{max}$  este coeficientul de frecare maxim,  $x_{b\ max}$  este deplasarea maximă a izolatorului corespunzătoare coeficientului de frecare maxim,  $W = Mg$  este greutatea efectivă susținută de izolator. Perioada inițială a izolatorului este dată de :

$$T_i = 2\pi\sqrt{M/k_i} \quad (2.37)$$

Deoarece acest tip de dispozitiv este relativ greu de realizat, Calvi [11] propune dispozitive cu suprafață plană sau de tip pendul care să conțină inele cu coeficient de frecare diferit.

- **Izolator de tip pendul cu frecvență și frecare variabilă (VFFPI)**

Sistemul de izolare de tip pendul cu frecvență și frecare variabilă (Variable frequency and variable friction pendulum isolator- VFFPI) a fost propus de Krishnamoorthy, în 2010 [75]. Pentru a realiza curbura variabilă, raza izolatorului este descrisă printr-o funcție logaritmică, unde  $x$  este deplasarea sistemului:  $R(x) = C(e^x - 1)$ , în care  $C$  reprezintă o constantă a izolatorului. Pe măsură ce valoarea constantei  $C$  crește, se înregistrează o scădere a forței tăietoare de bază, iar comportarea izolatorului pentru valori mari ale lui  $C$  se apropie de cea a PF. Valoarea lui  $C$  se selectează ținând cont de avantajele sistemelor FPS și PF, astfel încât deplasarea reziduală să fie similară cu cea a FPS și forța tăietoare de bază să fie asemănătoare cu PF. Valoarea lui  $C$  este dată de ecuația (2.38), în care  $R$  reprezintă raza suprafeței de alunecare a unui sistem FPS [46].

$$C = 84(1 + 0,2R) \quad (2.38)$$

De asemenea, pentru a spori performanțele izolatorului, se variază și valoarea coeficientului de frecare de-a lungul suprafeței de alunecare. Legea de variație a coeficientului de frecare este dată de ecuația:

$$\mu_x = \sqrt{\left(0.8\mu + 0.1\frac{x}{R}\right)^2} \quad (2.39)$$

Se propune o variație a coeficientului de frecare cu maxim 20% față de valoarea inițială, astfel încât această variație mică să nu producă probleme de stabilitate [46].

Având în vedere că executarea efectivă a izolatorilor de tip VFPS și VFFPI este foarte greu de realizat, Malu și Murnal propun un izolator de tip pendul cu coeficient de frecare variabil, dar la care schimbarea de coeficient să se facă la puncte predefinite, astfel încât producerea lor să fie realizabilă la scară largă. Pentru a putea controla și limita deplasările sub acțiunea unui cutremur puternic, se prevede un coeficient de frecare crescut la extremitatea



izolatorului, iar în apropierea centrului de simetrie valoarea coeficientului de frecare se va diminua [46].

Există un interes crescut pentru sistemele de izolare adaptive care sunt capabile să asigure protecție structurală prin mijloace complet pasive, având următoarele atribute: amortizare mare și rigiditate la un nivel scăzut al forțelor exterioare (încărcări vânt, temperatură) sau al deplasărilor; amortizare și rigiditate scăzută la cutremure de intensitate moderată și capacitatea de a dezvolta amortizare și rigiditate mare la cutremure de intensitate ridicată sau deplasări mari. Aceste atribute se pot obține prin utilizarea unor izolatori de tip pendul cu frecare cu mai multe suprafețe sferice, care să-și modifice rigiditatea și proprietățile de amortizare în funcție de nivelul excitației la care sunt supuși [109]. Astfel, au apărut izolatorii de tip pendul dublu care au două suprafețe de lunecare, izolatorii de tip triplu-pendul cu patru suprafețe, dar au fost propuse sisteme de și mai mare complexitate cu un număr și mai mare de suprafețe de lunecare.

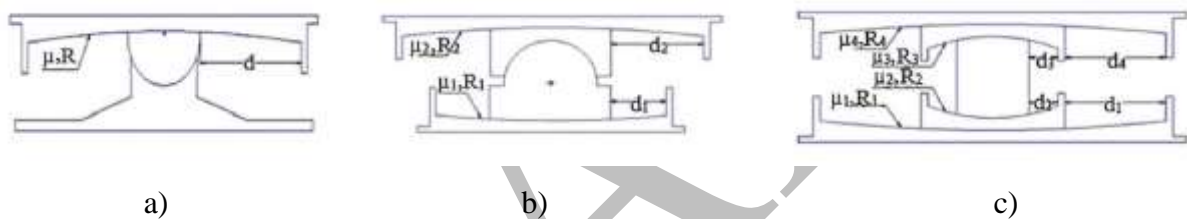


Fig. 2.12 Izolatori de tip pendul cu frecare având una (a), două (b), respectiv patru (c) suprafețe de lunecare [109]

## 2.6 Izolator de tip dublu pendul cu frecare (DCFP)

Izolatorul de tip dublu pendul cu frecare (Double Concave Friction Pendulum –DCFP) constă în utilizarea a două plăci concave între care este plasată o piesă metalică articulată (pivot). Placa superioară și cea inferioară pot avea aceleași raze de curbură sau pot fi de raze diferite, la fel ca și coeficienții de frecare ai celor două suprafețe de lunecare. Se recomandă utilizarea unei piese articulate între cele două plăci, datorită unei mai bune distribuții a presiunii pe acestea, dar și pentru a evita uzura pieselor și modificarea semnificativă a proprietăților frecării dintre piese. Acest concept nu este nou, un sistem asemănător fiind patentat în SUA încă din 1870 de către Touaillon [39].

Comparativ cu pendulul cu o singură suprafață de lunecare, izolatorul de tip DCFP, datorită deplasării simultane pe placa superioară și cea inferioară, poate să atingă aceeași deplasare orizontală, dar având dimensiunile efective ale izolatorului reduse, ceea ce implică și costuri de producție mai mici. De asemenea, faptul că lunecarea se desfășoară pe două suprafețe face ca uzura și variația coeficientului de frecare să fie mult reduse față de FP [37].

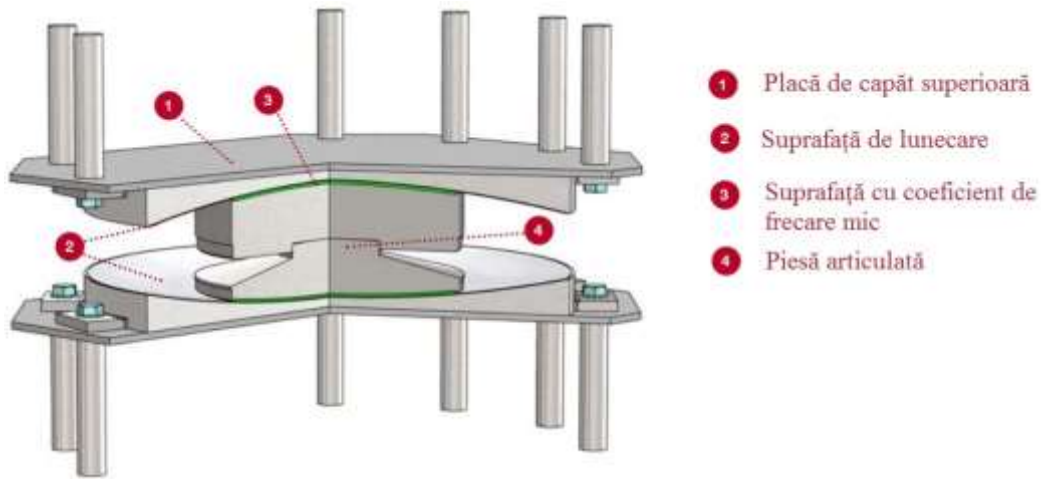


Fig. 2.13 Izolator de tip pendul cu frecare cu două suprafețe de alunecare [8]

Comportamentul adaptiv al pendulilor cu mai multe suprafețe concave este dat de multiplele posibilități de alunecare care pot să apară pe suprafețele concave. Astfel, se pot clasifica mișcările în diferite regimuri de mișcare. Se arată astfel că rigiditatea corespunzătoare fiecărui regim este invers proporțională cu suma razelor de curbura a suprafețelor pe care apare alunecarea în regimul respectiv. Ordinea regimurilor este dată de coeficientul de frecare al fiecărei suprafețe în parte și de raza acesteia [39].

Pentru pendulul cu două suprafețe de frecare (DCFP)

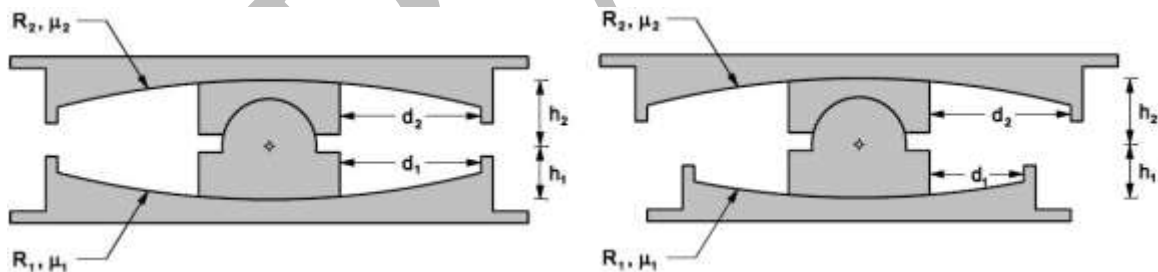


Fig. 2.14 Izolator DCFP- caracteristici geometrice [37]

Pentru determinarea regimurilor de mișcare și pentru trasarea curbelor histeretice, se impune ca izolatorul să îndeplinească următoarele condiții :

$$- \mu_1 < \mu_2 \quad (2.40)$$

$$- d_1 < \frac{R_{eff1}}{R_{eff2}} d_2 + (\mu_2 - \mu_1) R_{eff1} \quad (2.41)$$

### Regim I

Atunci când asupra izolatorului se acționează cu o forță  $F$ , iar suprafețele acestuia au coeficienți de frecare diferiți, alunecarea se produce pe suprafața cu coeficient mai mic, cu

condiția ca valoarea lui  $F$  să depășească valoarea forței de frecare a suprafeței respective:  $F_{f1} = \mu_1 W$  ( $\mu_1$  este coeficientul de frecare al suprafeței 1,  $W$  este încărcarea verticală suportată de izolator). Acest regim se menține atâta timp cât forța nu depășește valoarea forței de frecare de pe suprafața cu coeficient de frecare mai mare. În acest caz, rigiditatea va fi invers proporțională cu raza de curbură efectivă ( $R_{eff1} = R_1 - h_1$ ) [37].

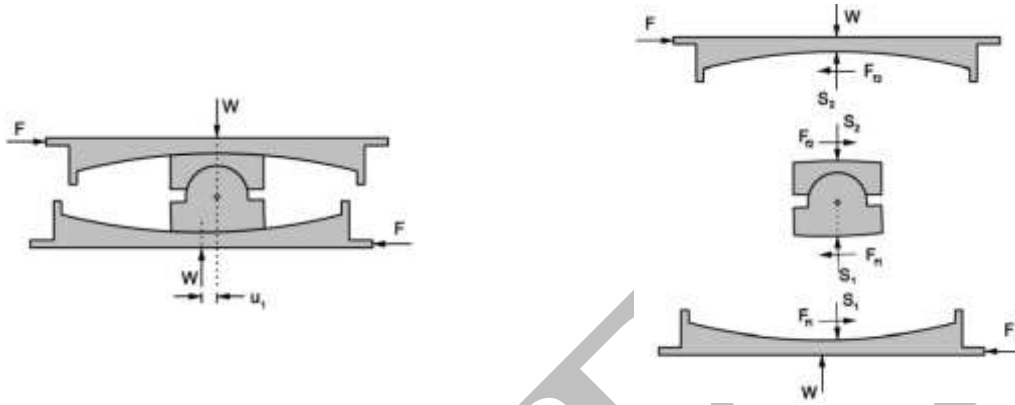


Fig. 2.15 DCFP – Deplasare Regim I [39]

Atunci când alunecarea se face doar pe suprafața 1 avem:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u + F_{f1} \quad (2.42)$$

Unde  $u$  este deplasarea totală,  $u = u_1 + u_2$  ( $u_1, u_2$ -deplasarea pe suprafața 1, respectiv 2; pentru regimul I avem  $u_2 = 0$ )

Ecuția (2.42) descrie, de asemenea, comportamentul histeretic al pendulului cu o singură suprafață de frecare (FP), care are aceeași rază efectivă și același coeficient de frecare cu al suprafeței 1 [39].

Relația (2.42) este validă până când se îndeplinesc condițiile:

$$F = F_{f2} \text{ și } u = u^* = (\mu_2 - \mu_1)R_{eff1} \quad (2.43)$$

Rigiditatea după inițierea alunecării pe suprafața cu coeficient de frecare mai mic, corespunzătoare regimului I este:

$$k_1 = \frac{W}{R_{eff1}} = \frac{W}{R_1 - h_1} \quad (2.44)$$

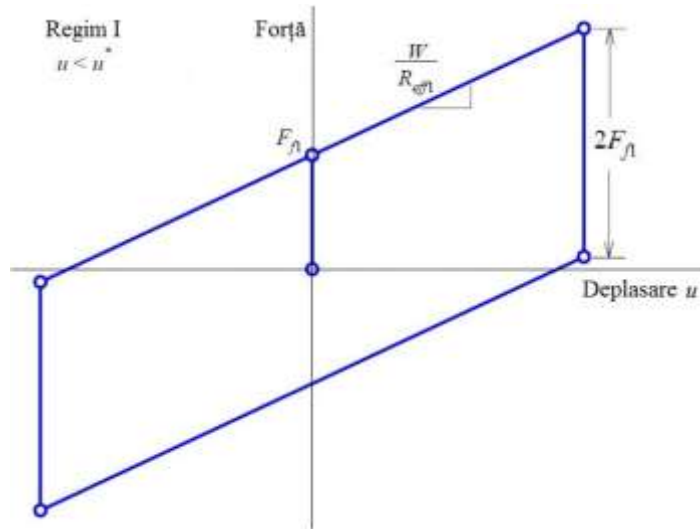


Fig. 2.16 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim I [37, 39]

### Regim II

Când forța orizontală depășește forța de frecare a suprafeței cu frecare mai mare ( $F \geq F_{f2} = \mu_2 W$ ) se inițiază mișcarea și pe suprafața 2, astfel încât se obține o mișcare simultană pe cele două suprafețe. În acest caz, rigiditatea este invers proporțională cu suma razelor de curbură a celor două suprafețe concave ( $R_{eff1} + R_{eff2} = R_1 + R_2 - h_1 - h_2$ ). Acest lucru se întâmplă la o deplasare  $u^*$  egală cu:

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)R_{eff1} \quad (2.45)$$

Când alunecarea se face simultan pe cele două suprafețe avem:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} u + \frac{F_{f1}R_{eff1} + F_{f2}R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (2.46)$$

Relația (2.46) este validă până când se îndeplinesc condițiile:

$$F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d1 + F_{f1} \quad (2.47)$$

$$u = u_{dr1} = d_1 \left( 1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_2 - \mu_1)R_{eff2} \quad (2.48)$$

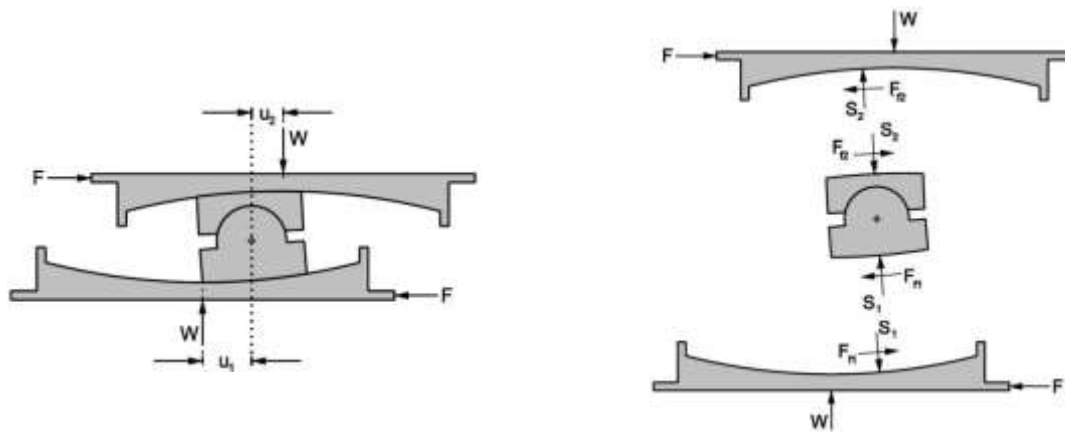


Fig. 2.17 DCFP – Deplasare Regim II [39]

Comportamentul în acest regim este denumit bilinear rigid și se observă o reducere a rigidității datorate schimbării regimului de mișcare, de pe o suprafață, la mișcarea pe ambele concavități.

Rezistența caracteristică în acest caz poate fi definită ca fiind:

$$Q = \mu_e W \quad (2.49)$$

unde :

$$\mu_e = \frac{\mu_1(R_1 - h_1) + \mu_2(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \quad (2.50)$$

Se poate observa că trecerea de la regimul I la regimul II se face cu o creștere a rezistenței caracteristice a izolatorului.

Rigiditatea corespunzătoare regimului II este:

$$k_3 = \frac{N}{R_1 - h_1 + R_2 - h_2} \quad (2.51)$$

Relația forță-deplasare va fi:

$$F = \left( \frac{W}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right) u + \left( \frac{F_{f1}(R_1 - h_1) + F_{f2}(R_2 - h_2)}{R_1 + R_2 - h_1 - h_2} \right) \quad (2.52)$$

Unde  $u_1$  și  $u_2$  sunt deplasările pe cele două suprafețe

$$u_1 = \left( \frac{F - F_{f1}}{W} \right) (R_1 - h_1) \quad (2.53)$$

$$u_2 = \left( \frac{F - F_{f2}}{W} \right) (R_2 - h_2) \quad (2.54)$$

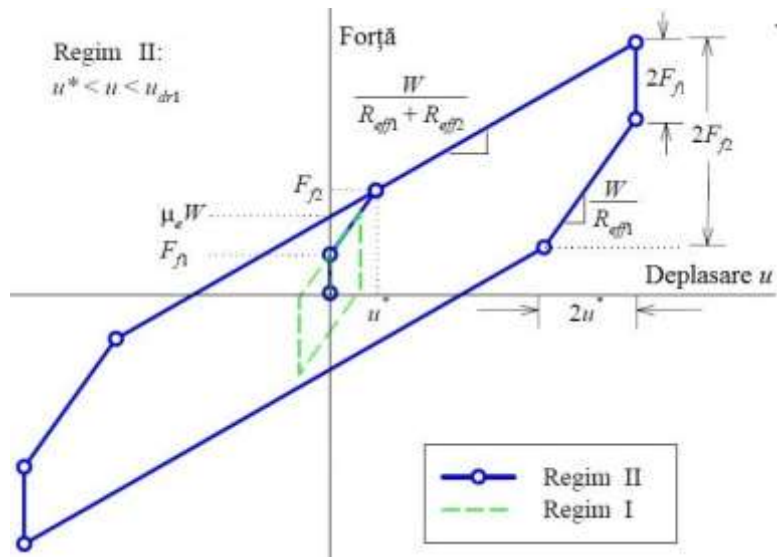


Fig. 2.18 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim II [37, 39]

### Regim III

Odată cu creșterea deplășărilor, pivotul ajunge în contact cu inelul metalic care delimitează suprafața de frecare. Proiectantul poate controla suprafața pe care pivotul să atingă mai întâi inelul, specificând valori adecvate pentru  $d_1$  și  $d_2$  [37].

În cazul de față s-a impus condiția ca pivotul să atingă întâi inelul suprafeței 1.

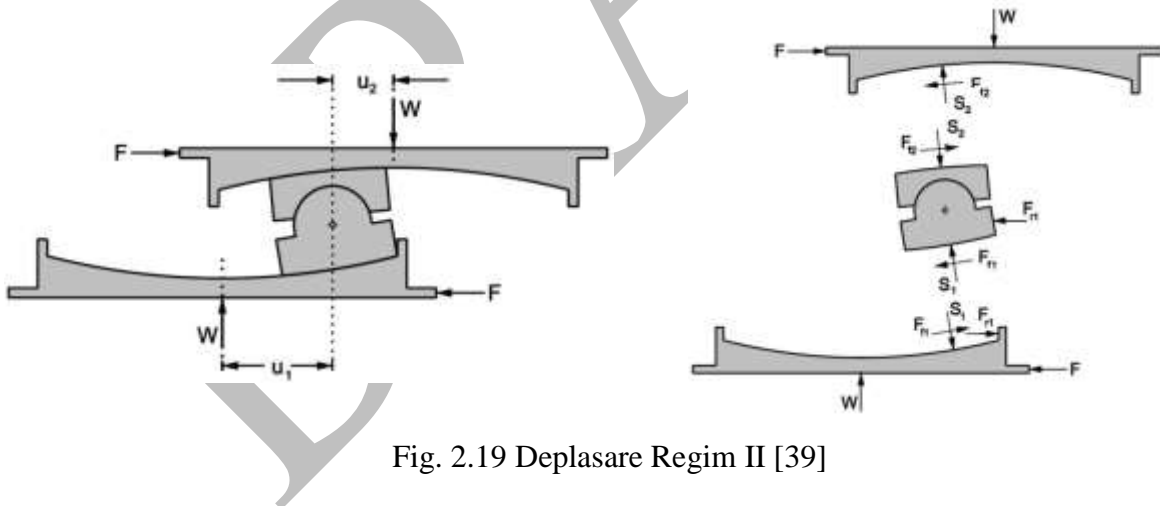


Fig. 2.19 Deplasare Regim II [39]

Odată ce piesa articulată atinge marginea suprafeței 1 și  $u_1 = d_1$ , deplasarea totală a izolatorului va fi:

$$u_{dr1} = d_1 \left( 1 + \frac{R_{eff2}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_2 - \mu_1) R_{eff2} \quad (2.55)$$

În momentul în care deplasarea totală depășește valoarea lui  $u_{dr1}$ , alunecarea se face numai pe suprafața 2. Drept consecință a contactului pivotului cu inelul suprafeței 1, apare o forță suplimentară  $F_{r1}$ , iar relația forță-deplasare pentru suprafața 1 devine:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (2.56)$$

unde  $F_{r1} = F - F_{dr1}$

Rigiditatea după atingerea inelului exterior al suprafeței 1 de alunecare este:

$$k_4 = \frac{N}{R_2 - h_2} \quad (2.57)$$

Amortizarea efectivă a izolatorului este:

$$\xi_{ef} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_d}{E_s} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_d}{\frac{1}{2} k_{ef} \cdot D_{max}^2} \quad (2.58)$$

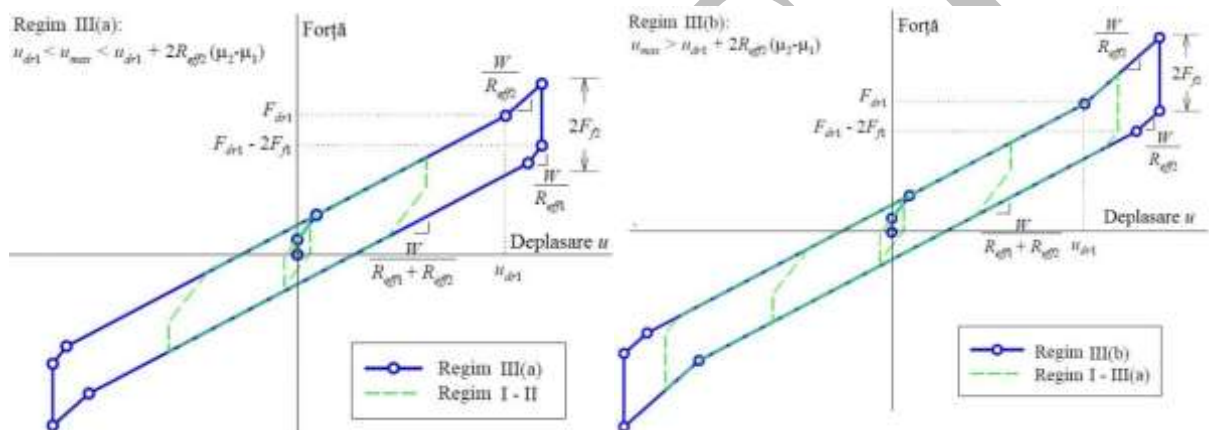


Fig. 2.20 Curba histeretică idealizată DCFP - Regim IIIa și IIIb [37, 39]

## 2.7 Izolator de tip triplu pendul cu frecare (TCFP)

Izolatorul de tip triplu pendul cu frecare (Triple Concave Friction Pendulum – TCFP) extinde definiția unui sistem adaptiv de izolare seismică, acest tip de izolator fiind complet pasiv și prezintă un comportament de amortizare și rigiditate adaptivă fără a fi utilizat împreună cu alte dispozitive. Prin comportament adaptiv se înțelege că rigiditatea și frecarea se schimbă la valori previzibile, la deplasări calculate și controlabile. Acest tip de izolator este derivat din FP, o tehnologie de protecție seismică matură, cu fiabilitate demonstrată, acest lucru făcând mult mai fezabilă punerea sa în operă [137].

Izolatorul este format din două plăci cu suprafața sferică poziționate la exterior, care conțin un al doilea set de piese cu dublă curbura, între care este poziționat un culisor rigid. Există astfel patru suprafețe de alunecare, iar deplasarea pe acestea este limitată prin prezența unor cercuri exterioare (inele) la limita concavităților. Obținem, așadar, un mecanism pe care

îl putem asemăna cu un DCFP așezat, la rândul lui, între două suprafețe de alunecare, iar modelul său mecanic poate fi asemănat cu cel dat de trei elemente de tip FP așezate în serie.

Izolatorul de tip TCFP prezintă mai multe faze de alunecare, iar acest lucru implică o relație forță-deplasare mult mai complexă decât alte dispozitive de izolare seismică utilizate în prezent [37]. Într-un astfel de mecanism se schimbă suprafața pe care se produce alunecarea odată cu creșterea deplasării. Cu cât crește deplasarea, se ating pe rând limitele suprafețelor de alunecare, obligând astfel sistemul să schimbe suprafața de alunecare, până în momentul în care se atinge deplasarea maximă admisă a izolatorului.



Fig. 2.21 Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de alunecare [33, 99]

Pendulul intern, mecanismul format din două piese în mijlocul cărora se află culisorul rigid, determină răspunsul izolatorului atunci când acesta este supus la excitații de intensitate redusă. Cele două suprafețe concave conținute de plăcile exterioare, atunci când sunt prevăzute cu raze și coeficienți de frecare diferiți, alcătuiesc două mecanisme de tip pendul, independente, care determină răspunsul în timpul excitațiilor de intensitate mică și mare. În consecință, caracteristicile pendulului intern sunt alese pentru a minimiza forța tăietoare de bază la acțiunea cutremurului de proiectare, iar cele ale suprafețelor sferice exterioare sunt alese astfel încât să minimizeze deplasările la acțiunea cutremurului maxim de pe amplasament. Atunci când un izolator TCFP este proiectat să reziste la acțiunea cutremurului maxim considerat pe amplasament, dimensiunile lui în plan vor fi reduse cu aproximativ 40% față de cele ale unui izolator cu o singură suprafață de alunecare [25, 145].

Curba histeretică pentru TCFP se trasează funcție de configurația izolatorului. Pentru curbele de mai jos, s-au stabilit următoarele ipoteze:

- Razele suprafețelor respectă condiția:  $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$ ;
- Coeficienții de frecare vor respecta condiția:  $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 = \mu_4$ , astfel încât izolatorul să prezinte rigiditate inițială mare, iar pe măsură ce amplitudinea deplasării va crește, aceasta să se diminueze;



- Capacitatea de deplasare a fiecărei suprafețe este selectată astfel încât la deplasări mari să avem o rigidizare graduală a izolatorului. Astfel, se impune condiția ca:  $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$  și  $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$ ;
- Se dorește ca alunecarea să înceapă întâi pe suprafața cu cel mai mare coeficient de frecare pentru a evita alternanțe între rigiditatea izolatorului prin atingerea inelelor. În termeni de deplasare se impune condiția ca:  $d_1 > (\mu_4 - \mu_1)R_{eff1}$  [39, 40].

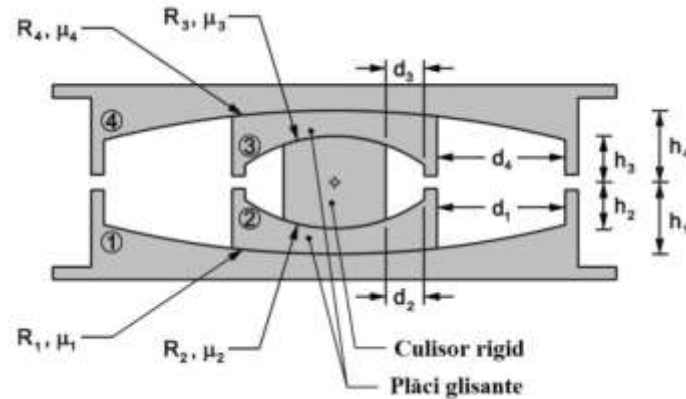


Fig. 2.22 Izolator TFP- caracteristici geometrice [40]

Asemănător cu descrierea etapelor de mișcare ale izolatorului DCFP, deplasarea laterală a izolatorului de tip TCFP poate fi surprinsă prin intermediul a cinci regimuri de mișcare.

### Regim I

În regimul I de mișcare, alunecarea se face numai pe suprafețele 2 și 3. Ieșirea din poziția de repaus se va produce atunci când forța laterală va depăși valoarea forței de frecare pentru suprafața cu cel mai mic coeficient de frecare. Așadar, alunecarea va începe pe suprafețele 2 și 3 atunci când :  $F = F_{f2} = F_{f3}$

Relația între forță și deplasare pentru regimul I este descrisă de ecuația [39, 40]:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad (2.59)$$

unde:  $u = u_1 + u_2$  este deplasarea totală exprimată ca fiind suma deplasărilor pe suprafețele 1 și 2;  $R_{eff2}, R_{eff3}$  sunt razele de curbură efective ale izolatorilor 2 și 3 ( $R_{eff2} = R_2 - h_2$ ;  $R_{eff3} = R_2 - h_3$ ), iar  $W$  este încărcarea verticală ce acționează asupra izolatorului.

Relația (2.59) este valabilă până când se îndeplinesc condițiile:

$$F = F_{f1} \text{ și } u = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3}$$

În mișcarea de revenire, izolatorul se descarcă cu  $2F_{f2}$  ( $= 2F_{f3}$ ), iar lunecarea este inițiată pe suprafețele 2, respectiv 3.

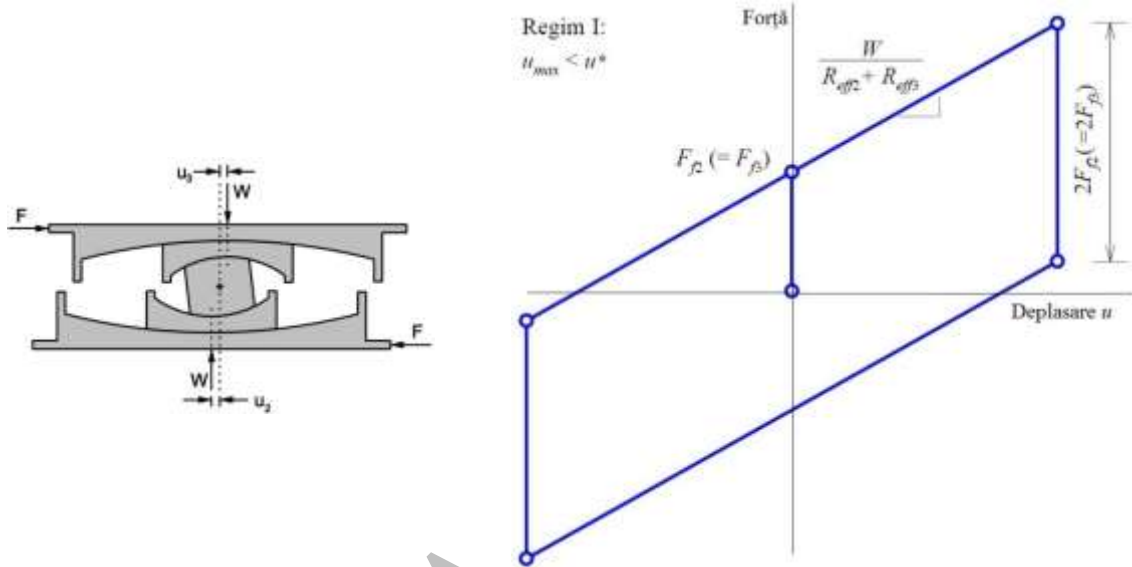


Fig. 2.23 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim I [39]

## Regim II

Regimul II debutează atunci când  $F = F_{f1}$ , ceea ce înseamnă că începe mișcarea pe suprafața 1 și ea încetează pe suprafața 2. Așadar, lunecarea în acest regim se va face doar pe suprafețele 1 și 3. Tranziția dintre cele două regimuri se face la deplasarea  $u^*$  [39, 40]:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3} \quad (2.60)$$

Relația între forță și deplasare pentru regimul II se poate determina utilizând ecuația:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (2.61)$$

Relația este valabilă până când se îndeplinesc condițiile:  $F = F_{f4}$  și  $u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$  și se trece la următorul regim.

La revenire, în primă fază, izolatorul se descarcă cu  $2F_{f2}$  ( $= 2F_{f3}$ ), după care mișcarea continuă pe suprafețele 2 și 3 pe o distanță de  $2u^*$ , până când descărcarea izolatorului va fi egală cu  $2F_{f1}$ . Descărcarea continuă cu lunecarea pe suprafețele 1 și 3 [39, 40].

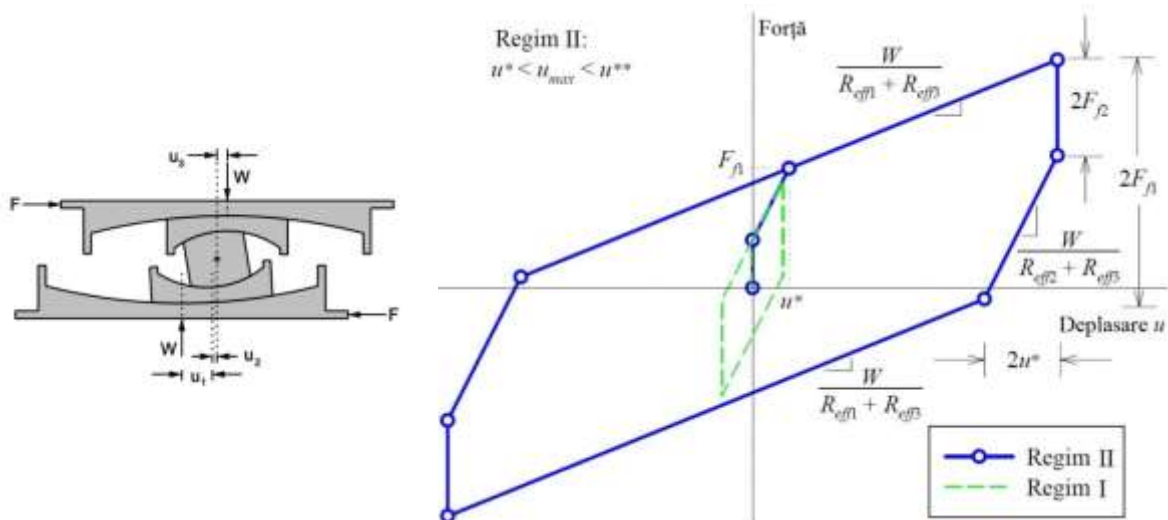


Fig. 2.24 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim II [39]

### Regim III

Regimul III este caracterizat de faptul că mișcarea încetează pe suprafețele 2 și 3, iar alunecarea se va face doar pe suprafețele 1 și 4. Trecerea de la regimul II se face prin începerea alunecării pe suprafața 4 și încetarea ei pe suprafața 3, adică atunci când se îndeplinește condiția ca  $F = F_{f4}$ . Acest lucru se întâmplă la o deplasare  $u^{**}$  dată de ecuația:

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (2.62)$$

Relația între forță și deplasare pentru regimul III este dată de:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}} \quad (2.63)$$

Relația este valabilă până când se îndeplinesc condițiile:  $F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$  și

$$u = u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left( 1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}).$$

La revenire, după o descărcare inițială egală cu  $2F_{f2}$  ( $= 2F_{f3}$ ), mișcarea se reia pe suprafața 2 și 3, urmata de mișcarea pe suprafețele 1 și 3, după care continuă pe suprafețele 1 și 4, conform Fig. 2.25.

Tranziția la regimul III este însoțită de o reducere a rigidității și o creștere a frecării efective [39, 40].

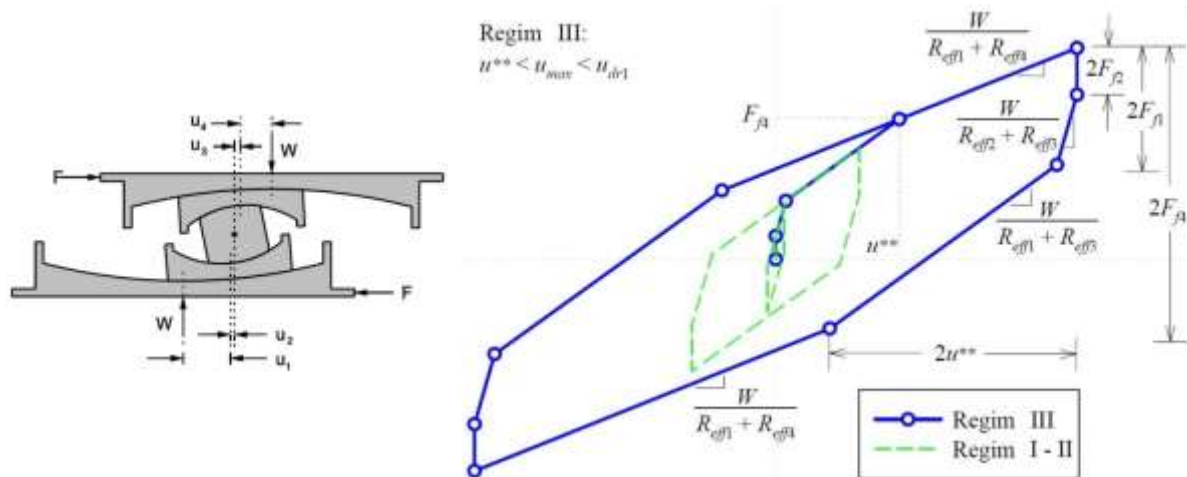


Fig. 2.25 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim III [39]

### Regim IV

Efectul de rigidizare al izolatoarelor de tip TCFP la deplasări mari este realizat prin oprirea mișcării pe suprafețele cu rază de curbură mare și prin forțarea începerii alunecării pe suprafețele cu rază mică. Regimul IV începe atunci când se atinge inelul care delimitează suprafața 1, astfel că se face tranziția de la alunecarea pe suprafața 1 și 4 la alunecarea pe suprafețele 2 și 4. În acest moment al mișcării, deplasarea  $u_1 = d_1$  (vezi Fig. 2.22). Tranziția dintre regimul III și IV se face la deplasarea totală  $u_{dr1}$  [39, 40]:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left( 1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (2.64)$$

Relația între forță și deplasare pentru regimul IV este dată de:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (2.65)$$

Relația este valabilă până când se îndeplinesc condițiile:

$$F = F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \text{ și}$$

$$u = u_{dr4} = u_{dr1} + \left[ \left( \frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left( \frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$$

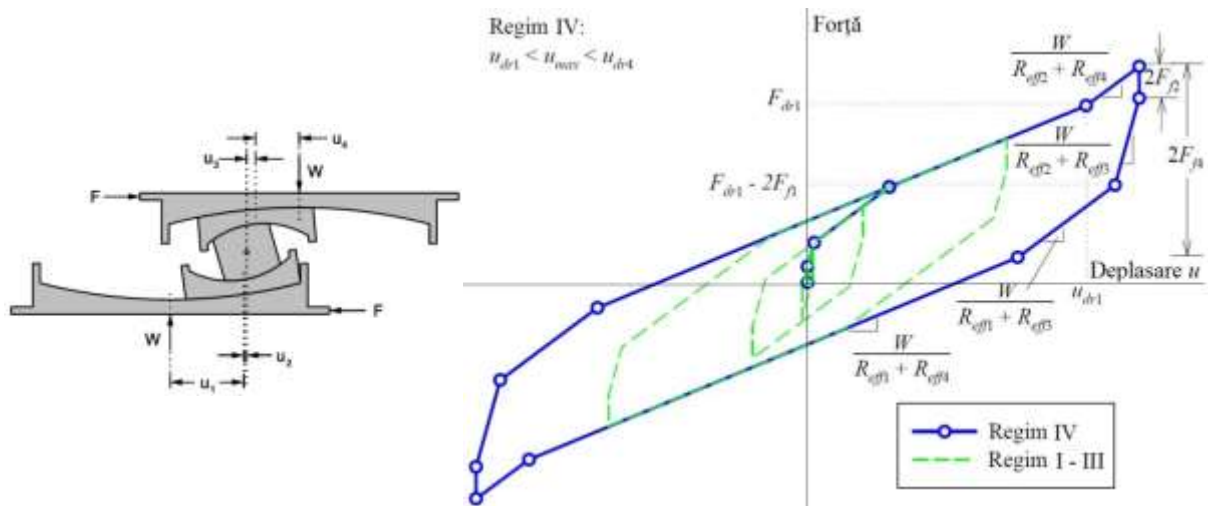


Fig. 2.26 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim IV [39]

### Regim V

În regimul V se atinge deplasarea maximă pe suprafața 4 ( $u_4 = d_4$ ), iar alunecarea se va face în continuare doar pe suprafețele 2 și 3, până la epuizarea capacității de deplasare laterală (atingerea inelelor de pe suprafețele 2 și 3). Schimbarea de regim se produce atunci când deplasarea maximă va fi [39, 40]:

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[ \left( \frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left( \frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (2.66)$$

Relația între forță și deplasare pentru regimul IV este dată de [39, 40]:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (2.67)$$

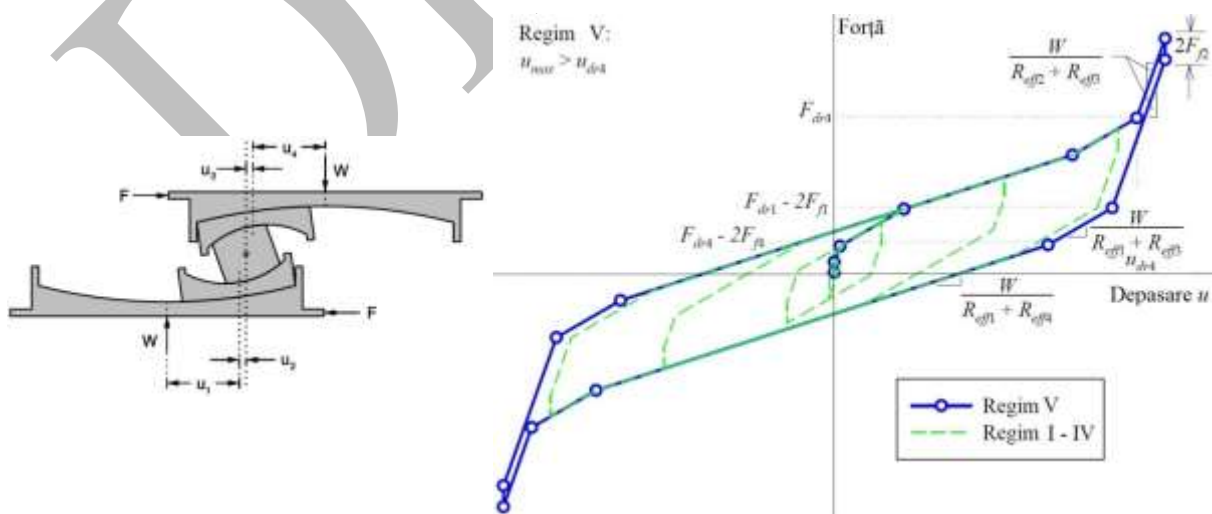


Fig. 2.27 Deplasare și curba histeretică idealizată TCFP - Regim V [39]

## 2.8 Izolator de tip pendul cu cale de rulare (XY-FP)

Încă de la introducerea izolării seismice, structurile izolate au fost astfel proiectate încât să fie evitate desprinderile dintre piesele din izolatorii de tip pendul cu frecare. Întinderile sunt indezirabile și în izolatorii care conțin elastomeri, datorită rezistenței mici a acestora la întindere, acest efect putând să afecteze integritatea sistemelor. Deseori se impun schimbări în sistemul structural de deasupra izolatoarelor tocmai pentru a evita ridicarea/întinderea acestora. Izolatorii cu cale de rulare sunt capabili să preia această forță de întindere, permițând tranziția continuă de la întindere la compresiune a forței axiale. Izolatorul poate avea proprietăți diferite ale frecării sub cele două tipuri de acțiuni [137].

Acești izolatori sunt formați din două grinzi metalice concave perpendiculare între ele, conectate printr-un element care permite apariția întinderii în mecanism și previne astfel desprinderea dintre piesele sale componente. Se impune condiția ca cele două piese să rămână perpendiculare în timpul deplasării, fiind permisă doar o rotire de  $4^\circ$  pentru preluarea efectelor torsiunii. Principalele proprietăți care disting acest izolator de cel de tip simplu pendul sunt: fixarea pe orizontală indiferent de poziție și capacitatea de a furniza rigidizare și disipare a energiei diferite pe cele două direcții ale izolatorului [112].

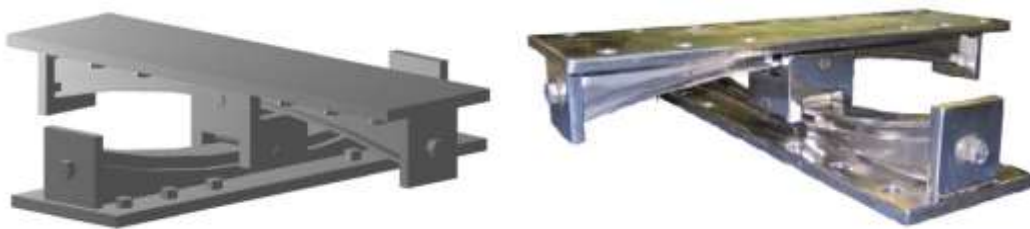


Fig. 2.28 Izolator de tip pendul cu cale de rulare [112]

## 2.9 Izolator glisant de tip Electricité-de-France (EDF)

Acest sistem a fost dezvoltat la începutul anilor 1970 de compania Electricité-de-France pentru a satisface nevoile de proiectare ale centralelor nucleare și sunt realizate să reziste la o accelerație maximă de vârf a terenului de maxim  $0,2g$ . În acest sens, el a fost implementat cu succes în centrale nucleare din Africa de Sud, Iran și Franța. Sistemul combină un reazem lamelar din neopren cu două plăci care permit alunecarea între ele. Una dintre plăci este realizată dintr-un aliaj de oțel și plumb, iar cealaltă din oțel inoxidabil, aceasta din urmă fiind conectată la suprastructură.

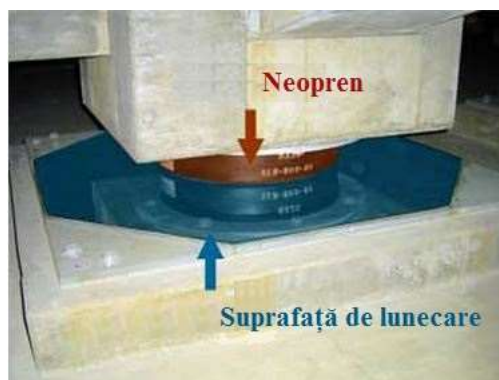


Fig. 2.29 Izolator glisant de tip Electricité-de-France (EDF)[9]

Această tehnică duală de izolare a fost concepută pentru cutremure de intensitate redusă, în acest caz deformările fiind concentrate doar în cauciucul lamelar. În timpul cutremurelor severe, placa de aliaj plumb-bronz și placa de oțel disipă energia indusă de seism prin frecare.

Coeficientul de frecare a suprafeței de lunecare este 0,2, iar elementul din neopren are o capacitate mică de deplasare pe orizontală, de aproximativ  $\pm 5$  cm [24, 57, 93].

În Fig. 2.30 este prezentat modul de lucru și posibilitățile de mișcare ale izolatorului, din poziția inițială, când structura nu este acționată de forțe orizontale (a), în timpul acțiunii seismice de intensitate redusă (b) și în cazul unui cutremur sever (c). Unul dintre dezavantajele acestui tip de izolator este că sistemul nu este prevăzut cu un mecanism care să îi asigure revenirea la poziția inițială după alunecarea plăcilor. Este recomandat ca acest dispozitiv să se folosească împreună cu sisteme care să facă posibilă readucerea lui la poziția inițială.

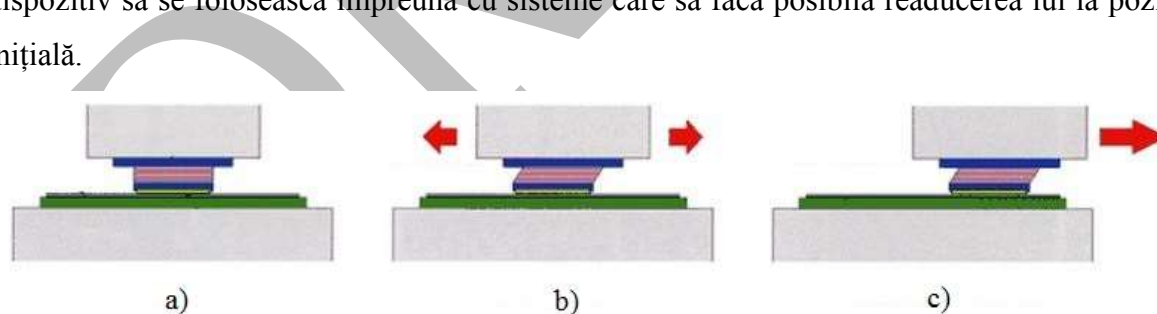


Fig. 2.30 Poziții ale izolatorului de tip Electricité-de-France (EDF) în timpul mișcării [9].

## 2.10 Izolator rulant liniar de tip șină (CLB)

Izolatorul liniar cu șină (Crossed Linear Bearing – CLB) a fost realizat de cercetătorii japonezi ca urmare a derulării unui program național pentru dezvoltarea unor sisteme antiseismice diversificate, axate pe caracteristicile specifice ale structurilor ce trebuie protejate. Sistemul de izolare este alcătuit din două mecanisme care culisează liniar, dispuse

perpendicular unul față de celălalt, pentru a permite o mișcare spațială a structurii izolate. Fiecare mecanism este compus din trei elemente principale: șinele, blocajul și elementele de rulare. Calea de rulare se obține prin culisarea blocajului pe șină prin intermediul bilelor poziționate între cele două elemente. Locașurile în care sunt poziționate bilele au formă concavă și astfel se obține o mai bună capacitate de preluare a încărcărilor verticale. Legătura între cele două mecanisme se face cu ajutorul unei garnituri din cauciuc care poate folosi și pentru a corecta anumite erori de planeitate ale elementelor structurale pe care le leagă [133, 135].

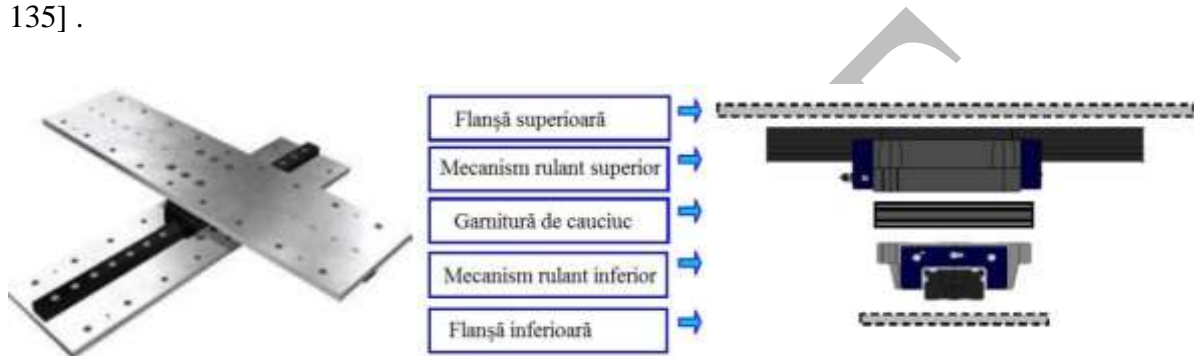


Fig. 2.31 Izolatorul rulant de tip șină (CLB)[135]

În Fig. 2.31 se prezintă curba histeretică în cazul unui izolator produs de firma THK Seismic Isolation System, încărcat cu o greutate de 592 kN, și se poate observa constanța coeficientului de frecare odată cu creșterea deplasării.

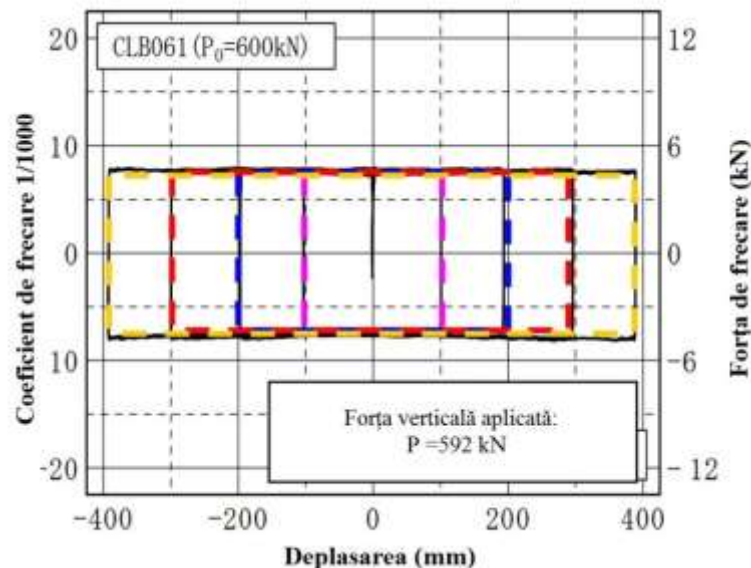


Fig. 2.32 Curba histeretică pentru izolatorul rulant de tip șină (CLB)[135]

Ulterior experimentelor s-a constatat că în urma influenței unor factori cum ar fi direcția, viteza de alunecare și temperatura aerului, variația maximă a coeficientului de frecare



este de 0,002 din valoarea sa nominală. Izolatorii sunt proiectați pentru a-și păstra eficiența pentru o perioadă îndelungată de timp dacă se urmează un proces de mentenanță corespunzător, care prevede inspecții periodice la un interval de 5 ani. Durata de viață în condiții optime este de 60 de ani, din cauza deteriorării garniturilor de cauciuc. Încercările de laborator pe masă vibrantă au arătat o reducere de aproximativ 8 ori a accelerației structurii izolate față de accelerația înregistrată la nivelul masei [135].



Fig. 2.33 Izolator tip șină și amortizor (CLB)[32]

Izolatorul este astfel conceput încât să reziste și la forțe de întindere. Sistemul CLB necesită dispozitive suplimentare pentru a readuce structura în poziția inițială după producerea unui seism, de aceea se recomandă utilizarea lui împreună cu amortizori vâscoși și/sau reazeme de cauciuc.

## 2.11 Izolator RoGlider

Izolatorul RoGlider™ a fost inventat de către cercetătorul William H. Robinson din Noua Zeelandă, în cadrul companiei Robinson Seismic Ltd., în anul 2004 [111] și a fost deja implementat în izolarea unor structuri din această țară. Izolatorul a fost dezvoltat ca o alternativă la izolatorul de tip LRB pentru structuri cu greutate redusă și deplasări mari. El este compus la capete din două plăci prevăzute cu o suprafață de alunecare la interior, iar între ele se află un element compus din straturi de cauciuc și lamele de oțel dispuse alternativ, asemănător cu dispunerea întâlnită la HDRB și LCB. Cele trei piese sunt acoperite cu două membrane care se leagă de plăcile de bază. Aceste membrane îndeplinesc, datorită elasticității lor, pe lângă rolul de a readuce mecanismul la forma sa inițială, și sarcina de a etanșeiza toate componentele izolatorului, protejând astfel suprafețele de alunecare de praf, coroziune, etc.

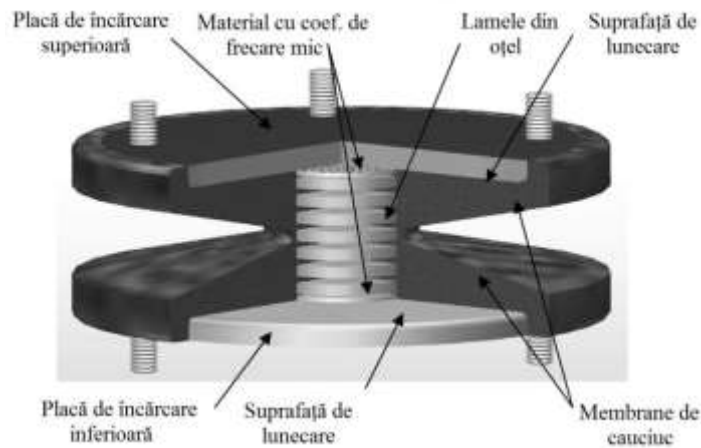


Fig. 2.34 Izolator RoGlider™ [110]

Una dintre lucrările în care acest izolator a fost implementat cu succes este clădirea spitalului din Wanganui, Noua Zeelandă. Această clădire a fost terminată în anul 2008 și a fost amplasată pe 97 de dispozitive de tip RoGlider™ cu un diametru de 650 mm, care preiau încărcări verticale de 20 tone, respectiv 40 tone. Deplasarea lor maximă este de 450 mm și au o rigiditate efectivă  $k_{eff} = 180 \text{ kN/m}$ , la un coeficient de frecare de aproximativ 11%, rezultând astfel o perioadă a structurii izolate de aproximativ 3s. Din costul total al construcției de aproximativ \$13,7 mil, procentul reprezentat de valoare izolatorilor a fost de 2% [22, 110].



Fig. 2.35 Izolator RoGlider™ instalat la spitalul din WANGANUI [110, 136]

## 2.12 Izolator de tip resort din oțel

În general, acest tip de dispozitiv este utilizat atunci când este necesară izolarea tridimensională a unei structuri sau echipament, cum este cazul generatoarelor din centralele electrice. Dispozitivele sunt compuse din mai multe resorturi elicoidale flexibile atât pe orizontală, cât și pe verticală. Din cauză că acest tip de izolator nu prezintă amortizare (nu reduce accelerațiile), el se folosește împreună cu alte dispozitive, cum ar fi amortizorii vâscoși sau reazeme din cauciuc lamelar atât pentru limitarea deplasărilor, cât și pentru evitarea rezonanței și a balansului. Principala utilizare a acestor mecanisme este de a izola

echipamentele care introduc vibrații în structură. Ele au fost utilizate în Argentina (2004) și SUA pentru izolarea bazei structurilor metalice din oțel.



Fig. 2.36 Izolator de tip resort din oțel și amortizor vâscos [129]

În ceea ce privește eficiența utilizării la izolarea în bază a structurilor cu acest tip de reazem, s-au înregistrat datele în urma producerii unui cutremur de magnitudine 5,7, din 2006, asupra unei clădiri de trei etaje din beton armat, situată în Mendoza, Argentina și s-a constatat o reducere a accelerațiilor orizontale înregistrate la nivelul acoperișului pe clădirea izolată cu 70% față de clădirea fixă (simulată). De asemenea, s-a constatat că s-a redus forța tăietoare cu 75% și momentul cu 90% față de aceeași structură, neizolată. Nu s-a observat o îmbunătățire semnificativă în reducerea accelerațiilor pe verticală. Pentru această structură au fost folosiți izolatori cu resorturi elicoidale din oțel produși de firma Gerb GmbH (Germania), împreună cu amortizori vâscoși [129]. În S.U.A., sistemul GERB a fost folosit la izolarea unei clădiri rezidențiale care a fost afectată de seismul din Northridge, California, din 1994. În acest caz, s-a înregistrat o amplificare a accelerațiilor, astfel încât valorile înregistrate la ultimul etaj al structurii au fost de 0,63g, comparativ cu accelerațiile estimate de 0,5g [83].

### 2.13 Izolator de tip roll-n-cage (RNC)

Izolatorul de tip roll-n-cage a fost patentat în anul 2008 în Spania de către cercetătorii de la Universitatea Tehnică din Catalonia, Barcelona și a pornit de la ideea maximizării decuplării dintre structură și fundație, avându-se în vedere că forța necesară pentru a pune în mișcare un mecanism care funcționează prin rotația elementelor sale este semnificativ mai mică decât forța necesară pentru mișcarea prin alunecare. Cea mai atractivă caracteristică a izolatorului este capacitatea sa de a permite transmiterea la suprastructură a unui procent mic din forța seismică de input.

Printre proprietățile mecanismului RNC se regăsesc următoarele: izolare uni și multidirecțională, disipare de energie, rezistență la întindere axială, mecanism gravitațional de recentrare, rezistență bună la compresiune a elementelor componente. Acest dispozitiv poate

acoperi o plajă largă de rigidizare și amortizare, el conține un mecanism de limitare a deplasărilor în timpul cutremurelor severe la o valoare prestabilită de proiectant.



Fig. 2.37 Izolator de tip roll-n-cage [58]

Componentele principale ale izolatorului sunt următoarele: placă de capăt superioară acoperită cu material tip neopren, prevăzută cu ancore (4), care se fixează de suprastructură (1); placă inferioară (2) acoperită cu neopren; miez rigid de formă cvasi-eliptică poziționat între cele două plăci (3); amortizori curbați din oțel prinși de cele două plăcuțe metalice (5); cilindru tubular realizat din cauciuc elastomeric armat care înfășoară miezul rigid și care este vulcanizat de cele două plăcuțe (6). Acest ultim element este prevăzut doar în cazul în care mecanismul este supus unei forțe mari de compresiune [57, 59].

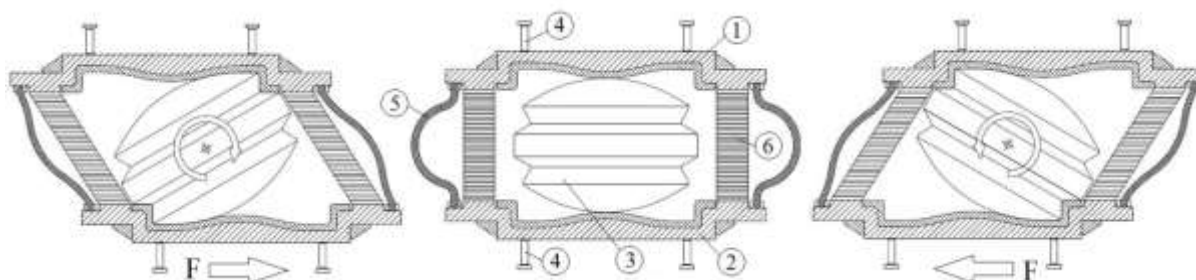


Fig. 2.38 Izolator de tip roll-n-cage: componente și poziții deformată [57]

Preluarea forțelor de întindere din izolator se face cu ajutorul amortizorilor din oțel, iar deplasarea pe verticală a structurii în timpul mișcării este împiedicată prin prevederea plăcilor de capăt cu curburi triple (Fig. 2.38). Rigiditatea inițială (necesară în cazul încărcărilor de serviciu, excitații mici) este asigurată atât de amortizorii din oțel, cât și de coeficientul de frecare mare dintre miezul rigid și neoprenul de pe plăcuțele de capăt. Mecanismul de recentrare se bazează pe forțele gravitaționale și pe forma miezului, momentul de revenire fiind direct proporțional cu deplasarea, excentricitatea miezului și greutatea suprastructurii.

Izolatorul a fost modelat cu succes în programul SAP2000, cu ajutorul elementelor de tip spring, gap și hook, iar diferența dintre rezultatele obținute prin modelarea în element finit și modelul matematic este de 3,3%. Prin utilizarea unui izolator de tip RNC s-a obținut o

reducere a accelerațiilor absolute cu valori cuprinse între 31% și 35%, în funcție de accelerogramele aplicate [58].

## 2.14 Izolator din aliaje cu memoria formei (SMA)

Aliajele cu memoria formei (Shape memory alloys - SMA) reprezintă o clasă de materiale care, în urma apariției unor tensiuni mari, pot să revină la forma inițială prin expunerea la temperaturi crescute (cunoscut ca efectul de memorie a formei) sau prin eliminarea eforturilor (efectul superelastice). Materialele SMA sunt caracterizate de proprietățile mecanice unice, datorită unei transformări de tip solid-solid între fazele aliajului. Dintre caracteristicile specifice acestor aliaje putem enumera: efectul de memorie a formei, efecte superelastice, relațiile dintre modulul lui Young și temperatură, capacitate crescută de disipare a energiei, amortizare histeretică, capacitatea de recentrare, rezistență bună la oboseală și o excelentă protecție la coroziune [26].

Avantajele dispozitivelor care conțin SMA sunt: durata de viață foarte mare fără a fi necesară mentenanță sau schimbarea după cutremure severe, rezistență crescută la îmbătrânire și coroziune, un bun control al forțelor și existența unui mecanism de recentrare [28, 29].

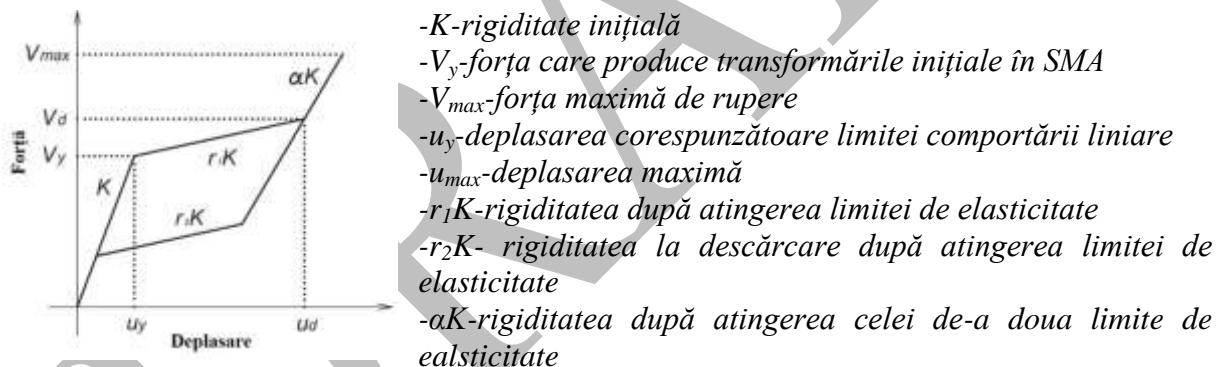


Fig. 2.39 Parametrii SMA pentru modelul superelastic [10]

Cel mai mare impediment în folosirea pe scară largă a acestor aliaje, pe lângă costurile foarte mari (care au scăzut de la 1100 \$/kg în anul 1996 la sub 70 \$/kg în anul 2010 datorită cererii crescute și a îmbunătățirii tehnicilor de fabricație) și prelucrarea dificilă (sudarea), îl reprezintă dependența proprietăților de temperatura exterioară datorită naturii termo-mecanice a materialului (în cazul temperaturilor extreme se pierde complet proprietățile de memorie a formei și superelasticitate). Utilizările aliajelor SMA în ingineria civilă sunt: producerea armăturilor în structurile de beton armat, a șuruburilor de la conexiunile metalice, a cablurilor pentru structuri post și pretensionate. Aplicațiile SMA în ingineria seismică sunt date de utilizarea lor la realizarea rigidizărilor cu brațe rigide, a amortizorilor și a izolatorilor [6, 26].

În realizarea izolării seismice a structurilor, materialele din aliaj cu memoria formei au fost utilizate împreună cu izolatorii deja consacrați, pentru a îmbunătăți răspunsul seismic al structurilor izolate sau pentru a corecta unele neajunsuri ale acestora. Astfel, Choi și Nam [18] propun un mod de a încorpora SMA în cadrul izolatorilor din cauciuc, Shook [126] propune un sistem hibrid compus din rezeme cu elastomer, pendul cu frecare, amortizori magnetoreologici și fire din SMA, iar Jalali [63] introduce un sistem (Smart Restorable Sliding Base Isolation System - SRSBIS) prin care decuplează structura cu ajutorul izolatorilor cu frecare orizontali și utilizează ca mecanism de recentrare fire din SMA dispuse orizontal, vertical și diagonal. Rezultatele obținute de Jalali în urma cercetărilor dovedește că sistemul SRSBIS prezintă o reducere a forței tăietoare de bază mai mare decât în cazul utilizării FPS [63].

Există studii care arată că folosirea unor elemente din SMA împreună cu izolatori de tip HDRB și LCRB la izolarea podurilor face ca pilonii să fie mai susceptibili la deteriorare (mai fragili) sub acțiunea cutremurelor de intensitate medie și ridicată, comparativ cu cazul în care se utilizează numai sisteme pasive de tipul HDRB și LCRB [5].

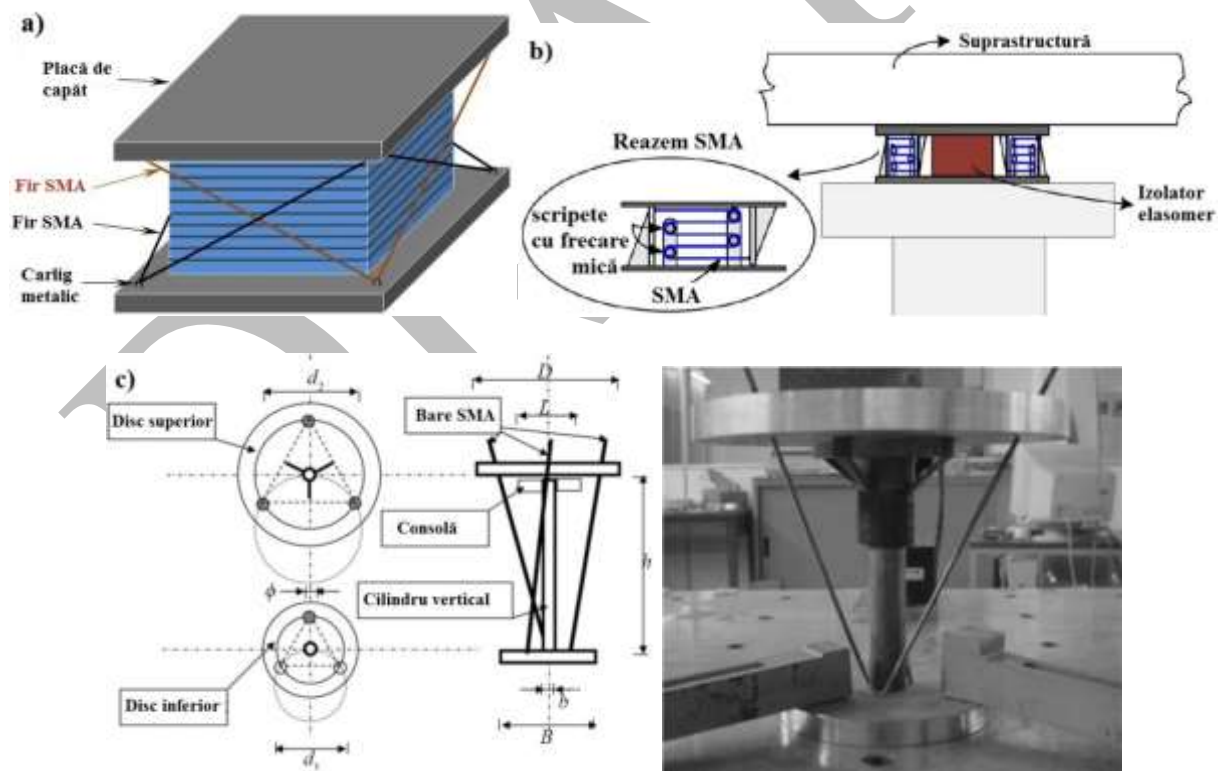


Fig. 2.40 Izolatori realizați cu SMA [13, 51, 100]

Casciati și Faravelli (2007) (Fig. 2.40- c) [13] prezintă și încercă în laborator un izolator compus din două discuri poziționate la capete, un cilindru cu o evazare în partea superioară, care are rolul de a prelua încărcările gravitaționale, și cel puțin trei bare înclinate

din SMA, prin care se limitează deplasările laterale, se face disiparea de energie și care servesc drept mecanism de recentrare. Dezfuli și Alam (2011) [51] (Fig. 2.40- a) introduc ca element suplimentar fire de SMA dispuse diagonal în jurul unui izolator din cauciuc natural (SMA-NRB) și în jurul unui dispozitiv HDRB (SMA-HDRB), o conformare asemănătoare cu cea a lui Xue și Li (2007) [148]. Aceștia din urmă au obținut, în urma simulării pe o structură reticulată de tip dom cu diametrul de 35,50 m, echipată cu acest sistem hibrid, reduceri ale deplasărilor, accelerațiilor și forțelor din interiorul elementelor mai importante decât prin simpla utilizare a reazemelor de cauciuc. Ozbulut și Hurlebaus (2011) (Fig. 2.40- b) folosesc, pe lângă un izolator cu frecare sau unul de cauciuc laminat, un sistem care utilizează fire de SMA trecute printr-o succesiune de scripeți cu frecare redusă.

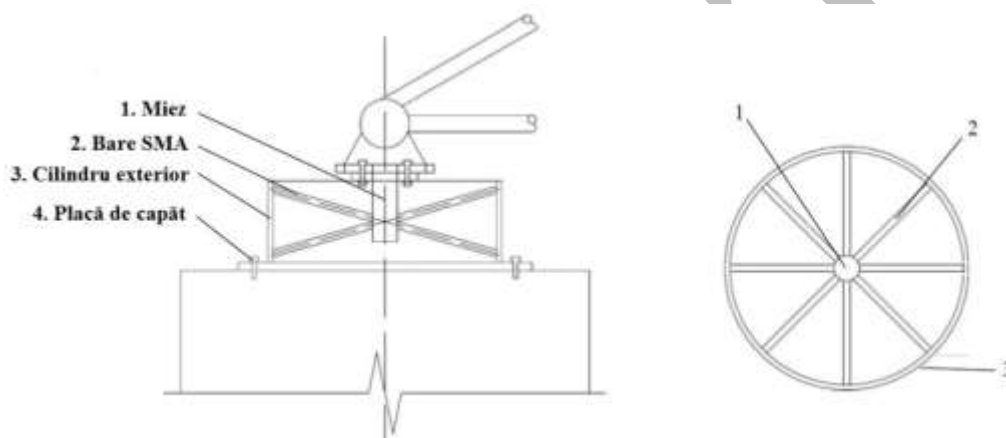


Fig. 2.41 Izolator superelastic SMA [27]

În Fig. 2.41 este prezentat prototipul propus de Ding Y. și Chen X. [27], alcătuit dintr-un miez central, bare SMA și un cilindru exterior care reazemă pe o placă de capăt. Transmiterea forțelor gravitaționale de la suprastructură se face prin miezul central, care produce deformare axială în barele din SMA și care, la rândul lor, descarcă pe cilindrul exterior prevăzut cu o placă de capăt. În timpul cutremurelor mici, izolatorul prezintă o rigiditate adecvată, iar barele SMA nu intră în curgere, pe când în timpul unui seism de intensitate moderată sau crescută, odată cu intrarea în curgere a barelor SMA, rigiditatea izolatorului scade, iar o parte din energia de input este preluată de izolator. După dispariția forței perturbatoare, datorită proprietății de superelasticitate a SMA, deformațiile izolatorului dispar și el revine la forma inițială. Această proprietate este folosită la mecanismul de recentrare. Acest tip de izolator este capabil de disiparea energiei atât pe orizontală, cât și pe verticală. Este propusă și varianta în care miezul se sprijină direct pe placa de bază, iar în acest caz ansamblul funcționează doar ca izolator orizontal [27].

Acest tip de izolator a fost propus și modelat pentru izolarea unei structuri reticulate din Xi'an, China, situată într-o zonă seismică caracterizată prin accelerație de 0,2g. Structura are o deschidere de 260 m x 80 m și o înălțime liberă de 26 m, iar izolarea este făcută la nivelul acoperișului. S-a efectuat o analiză de tip *time-history* în care au fost considerate trei accelerograme (EL-Centro, Parkfield, plus o accelerogramă artificială pentru zona Xi'an) și s-a observat o reducere a deplasărilor la partea superioară a stâlpului în cazul structurii izolate de 30%, respectiv 37% față de structura neizolată. De asemenea, s-a observat o reducere a eforturilor în barele tălpii superioare, mai ales în zona de rezemare a structurii reticulate, unde s-au înregistrat valori mai mici cu 40%-80% decât eforturile inițiale. Deplasările înregistrate de izolatori au fost mai mici decât deplasările maxime admise [27].

## 2.15 Alte tipuri de izolatori

### *Izolatorul elastic cu frecare (Resilient-friction base isolator – R-FBI)*

Izolatorul de tip R-FBI a fost propus de către Mostaghel în anul 1987 [91]. Acest tip de izolator este compus din straturi concentrice de plăci acoperite cu teflon, un miez central din cauciuc și mai multe miezuri din cauciuc amplasate radial în interiorul izolatorului [54]. Miezul central de cauciuc nu preia încărcări verticale și are rolul de a distribui deplasarea laterală pe înălțimea izolatorului la plăcile acoperite cu teflon, dar îndeplinește și rolul de dispozitiv de autocentrare. Frecarea dintre fețele plăcilor disipă energia, iar mecanismul are o rigiditate inițială. S-a demonstrat că acest tip de izolator se pretează la reducerea accelerațiilor structurilor sau echipamentelor ușoare [56].

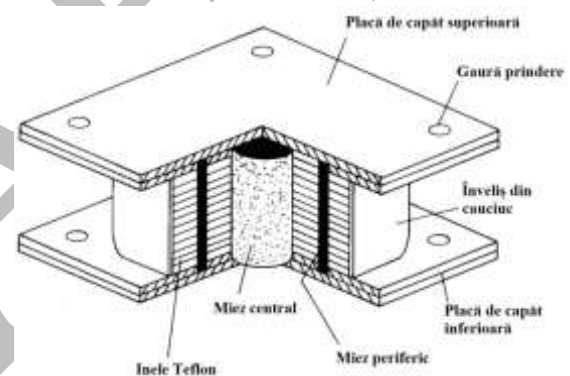


Fig. 2.42 Izolator R-FBI [118]

### *Izolatorul de tip Ball-N-Cone (BNC)*

Acest tip de izolator a fost patentat de către dr. Zoltan A. Kemeny [71] în S.U.A. și este compus din două plăci de sarcină cu suprafață conică, între care este așezată o bilă metalică. Cele două plăci sunt prinse cu șuruburi de elementele structurale pe care le separă. Conurile au un unghi superficial, iar axele lor verticale sunt coliniare și trec prin centrul bilei metalice atunci când izolatorul se află în poziție de repaus. La deplasare maximă, bila atinge



marginea conului, iar după încetarea perturbației, izolatorul revine la poziția inițială printr-un mecanism de recentrare gravitațional. Ele sunt folosite cu succes în protejarea echipamentelor de efectele seismului.

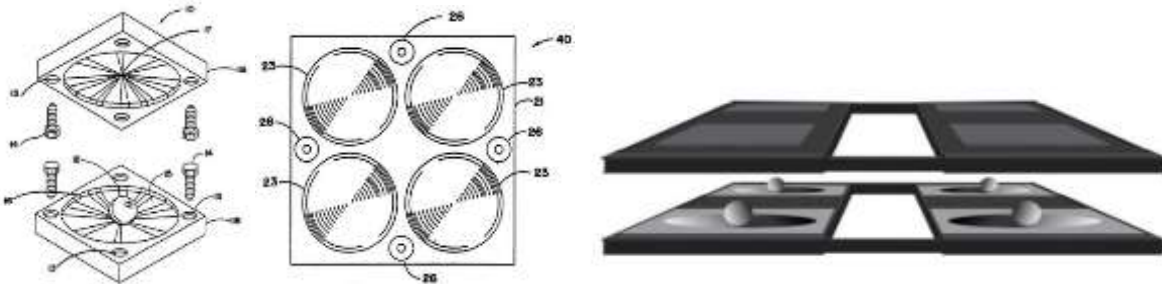


Fig. 2.43 Izolator Ball-N-Cone [71, 147]

#### *Izolatorul cu tije de rulare (Rolling rods)*

Sistemul de izolare cu tije de rulare a fost propus în anul 1993 de către Lin T.S. [79] și constă în introducerea între fundație și suprastructură a unor tije (bare) cilindrice cu un coeficient de frecare redus. Cum forța de frecare în mișcarea de rotație este foarte mică, modelul are nevoie de un aparat care să fixeze rolele atunci când asupra clădirii acționează doar vântul sau vibrații mici, dar care, la o anumită intensitate, să fie eliberate. Acest tip de izolator nu oferă și o amortizare structurii. Un mare inconvenient al acestui sistem este lipsa unui mecanism de recentrare, rezultând astfel deplasări reziduale după acțiunea unui seism. Pentru a elimina acest inconvenient, Jangid (1998) [65] propune în loc de forma circulară a roletelor, o formă eliptică care, cu ajutorul forței gravitaționale și al excentricității, să readucă structura la poziția inițială, dar observă că prin forma aleasă se introduce o accelerație verticală în structura izolată. Ca o alternativă a sistemului de recentrare, Jangid (2000) [64] propune adăugarea la soluția lui Lin a unui dispozitiv separat de recentrare și studiază influența coeficientului de frecare asupra răspunsului unei structuri echipate cu acest tip de izolator (Fig. 2.44 Izolator cu tije de rulare-model mecanic [64] Fig. 2.44).

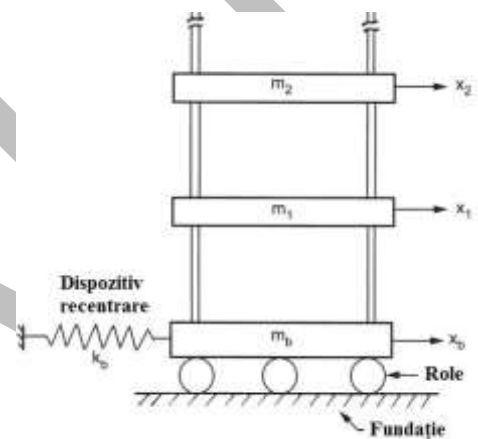


Fig. 2.44 Izolator cu tije de rulare-model mecanic [64]

#### *Izolator seismic 3D (3DSIS)*

Din cauza faptului că sistemele cunoscute de izolare pasivă aveau efect doar asupra componentelor orizontale ale cutremurelor și pentru că nu exista până în 2008 un sistem viabil

de izolare pe verticală, Takahashi O. și Aida H. [131] propun un sistem de izolare pasiv 3D (Three dimensional seismic isolation sistem – 3DSIS) care, ulterior, este implementat într-o structură de trei etaje din beton armat din Tokyo, finalizată în anul 2011 [90]. Sistemul constă în utilizarea unui izolator din cauciuc lamelar (HDRB), așezat pe un cadru metalic, care este susținut de mecanisme de tip resort pe bază de aer. Pentru suprimarea mișcărilor oscilatorii verticale diferite ale fiecărui punct de izolare, se folosesc amortizori vâscoși verticali, interconectați. În structura studiată s-au mai folosit amortizori vâscoși dispuși pe orizontală pentru completarea mecanismului de preluare a forțelor orizontale, dar și elemente de tip slider (bare din oțel care permit transmiterea forțelor tăietoare) care se pot deplasa pe verticală pentru a nu supraîncărca resorturile cu aer [131].

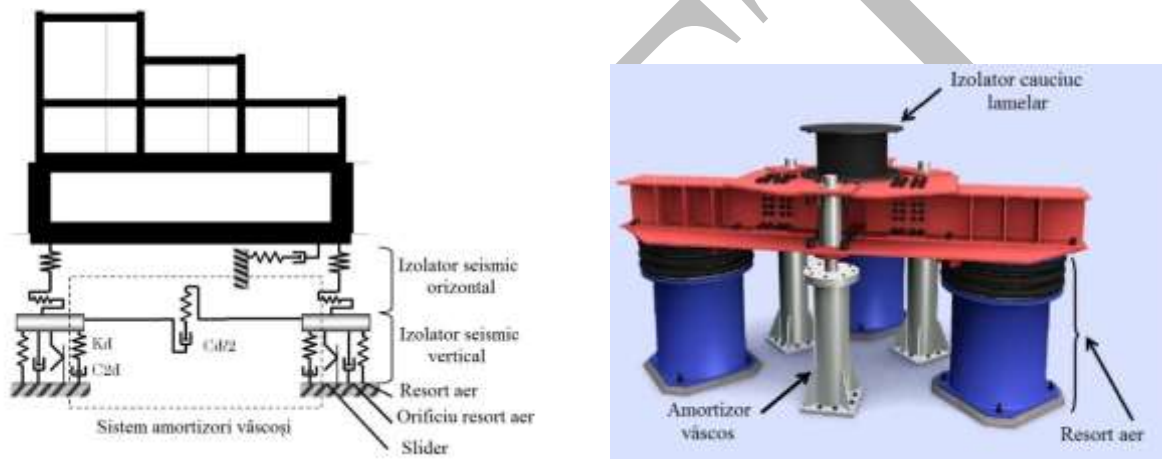


Fig. 2.45 Izolator 3DSIS [131]

Modelul analitic și componentele sistemului 3DSIS sunt prezentate în Fig. 2.45. După finalizarea elementelor de rezistență ale construcției s-a făcut un test in situ pentru determinarea vibrațiilor libere pe verticală ale structurii. Pentru acest lucru s-a ridicat structura (cu 10 mm, 30 mm, 50 mm) în patru puncte de rezemare cu ajutorul unor cricuri cu eliberare rapidă, după care acestea au fost înlăturate simultan. S-a obținut o perioadă proprie de 1,28s, comparabilă cu perioada de 1,284s obținută în urma simulărilor numerice. Pentru a studia balansul structurii, s-a ridicat suprastructura doar în două puncte de pe aceeași parte, după care s-au înlăturat cricurile. În acest caz s-a observat eficacitatea amortizorilor verticali și a interconectării acestora, care au limitat balansul structurii, prin compararea rezultatelor cu situația în care aceștia nu au fost echipați pe structură [90, 134].

### Izolator oscilant cu frecvență variabilă (VFRB)

Un izolator oscilant cu frecvență variabilă (Variable-frequency rocking bearing – VFRB) a fost propus și testat în laborator în China (2009). Dispozitivul de tip oscilant are o suprafață cu o curbură variabilă și prin alegerea corectă a geometriei suprafeței se pot obține rigidități și frecvențe diferite în timpul mișcării. Izolatorul este alcătuit dintr-o articulație sferică la partea superioară și un element cu o suprafață de oscilație de rază variabilă la partea inferioară (Fig. 2.46 a). Din punct de vedere geometric, suprafața de oscilație trebuie să fie concavă și simetrică față de verticală [81]. În timpul acțiunii seismice, dispozitivul va oscila după direcția cutremurului, față de poziția de echilibru, pe o placă de bază din cauciuc. Articulația sferică este formată dintr-un cap sferic din oțel prins într-o alveolă confecționată din alamă fixată prin intermediul unei plăci de structura izolată și este caracterizată printr-un coeficient de frecare  $\mu$ . Principalii parametri de proiectare sunt înălțimea  $h$ , raza  $r$  a capului sferic și funcția  $G(X)$  care definește suprafața de oscilație [81, 82].

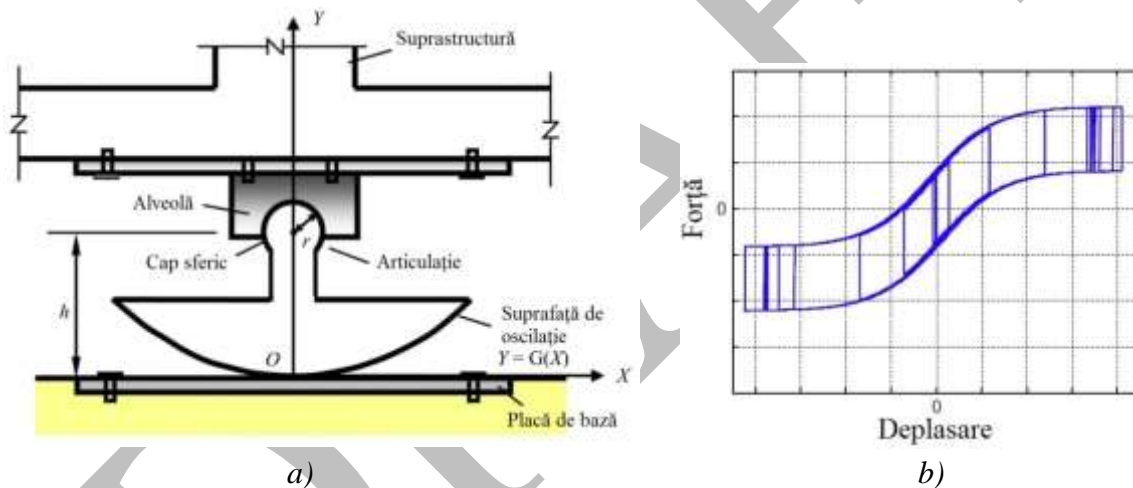


Fig. 2.46 Izolator VFRB [81]

Pentru menținerea stabilității se va alege raza de curbură a suprafeței de oscilație, astfel încât aceasta să fie mai mare decât înălțimea  $h$ . Se impune condiția ca frecarea dintre suprafața de oscilație și placa de bază să fie suficient de mare pentru a preveni alunecarea pieselor, astfel încât între ele să apară doar mișcare de rotire [81]. Încercările asupra modelului au arătat o curbă histeretică foarte apropiată față de curba teoretică prezentată în Fig. 2.46 b. În urma simulărilor în laborator și a comparațiilor făcute pe aceeași structură izolată pe rând cu FPS și VFRB, s-a constatat o reducere a deplasării cu 55% în cazul utilizării izolatorului oscilant, fără a crește semnificativ accelerațiile suprastructurii [82].

### 3. Structuri izolate seismic la nivelul acoperișului

În mod uzual, sistemele pasive de protecție seismică se poziționează la baza stucturii, pentru a oferi protecție întregii structuri. De multe ori, acest lucru nu este posibil din diverse considerente tehnice sau pentru că amplasarea sistemelor pasive la acest nivel necesită o investiție financiară inițială ridicată. În aceste situații se poate opta pentru o izolare doar a unei părți din suprastructură. Pentru structurile cu deschidere mare nivelul de izolare se poate alege la capătul superior al stâlpilor, astfel încât să se realizeze decuplarea acoperișului. Prin acest mod de izolare este îmbunătățit răspunsul structural al întregii clădiri prin creșterea perioadei proprii de vibrație, a accelerațiilor, prin diminuarea forței tăietoare de bază și a eforturilor din elementele acoperișului. La fel ca și în cazul structurilor izolate în bază, cele mai multe structuri echipate cu izolatori la nivelul acoperișului sunt întâlnite în zonele cu risc seismic ridicat, situate în apropierea principalelor falii tectonice: Japonia, Statele Unite ale Americii, Noua Zeelandă, China, Italia, Turcia etc.

Revista "Giornale del Genio Civile" din Italia, prezintă în ediția din mai 1956 o clădire cu funcțiune mixtă, precum de sală de sport, auditorium, sală de concert sau de expoziții, realizată la Matsuyama, Japonia. Acoperișul sălii este de formă circulară cu raza de 25 m și este sub forma unei calote sferice cu înălțimea de 6,70 m. Sala circulară se continuă cu o construcție alcătuită din doi pereți tangenți la cerc și un perete transversal, normal la axa clădirii. Grosimea calotei este de 12 cm în regiunea interioară, pe o lungime de 8,00 m (radial), iar aceasta crește progresiv până la reazem unde ajunge la 70 cm. Calota sferică reazemă pe 20 de stâlpi din beton armat, prin intermediul unor aparate de reazem prevăzute cu câte două rulouri de oțel cu diametrul de 36 mm și lungime de 100 mm. Rezemarea calotei pe cele 40 de rulouri permite deplasări și elimină eventuale acțiuni orizontale ale cupolei asupra punctelor de reazem [45].

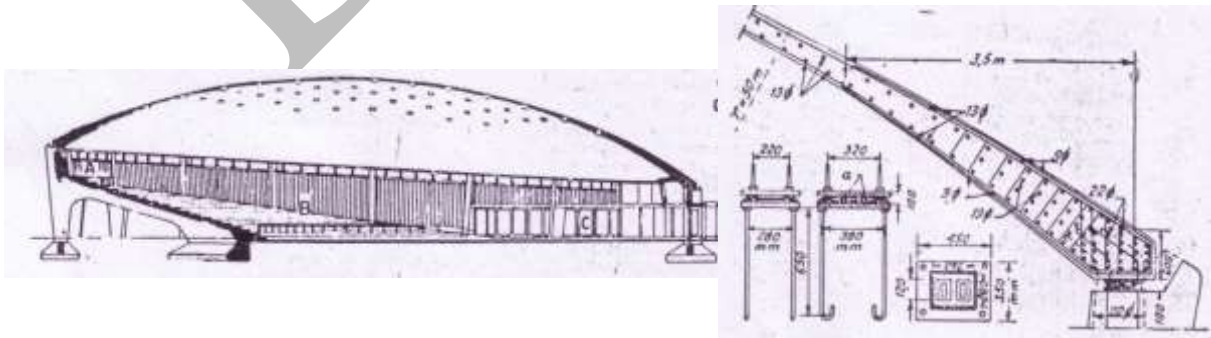


Fig. 3.1 Auditorium Matsuyama [45]

În anul 1995, la Vanadzor, în Armenia, se implementează izolarea pasivă la nivelul ultimului etaj pentru două clădiri de locuit. S-a propus adăugarea unui etaj suplimentar peste cele nouă etaje ale clădirilor existente din beton armat. Structura noului etaj cu dimensiuni de 19 m pe 19 m este din profile de oțel și este așezat pe un număr de 32 de izolatori de tip HDRB. În urma izolării seismice a ultimului nivel, s-a constatat o reducere a forței tăietoare cu un factor de 1,97 și o reducere de 2,2 ori a deplasărilor la nivelul etajului 9. În anul 2014, Melkumyan [85] propune o soluție asemănătoare pentru o structură în cadre din beton armat cu 12 niveluri, construită în anul 1989. Ultimul planșeu va fi decuplat de restul structurii, ridicat, iar la capetele stâlpilor vor fi introduși izolatori seismici de tip HDRB. Astfel, ultimul nivel se va comporta ca o masă adăugată, dar fără a introduce elemente care să adauge greutate structurii. În urma izolării, perioada structurii a crescut de la 0,66s la 0,77s, reducerea forțelor tăietoare în bază este de 76% [85].



Fig. 3.2 Structură de nouă etaje - Armenia

Roberto Villaverde [142] prezintă în lucrarea sa din anul 1998 o cercetare privind răspunsul unei structuri în cadre, izolate la nivelul acoperișului. Soluția propusă constă în utilizarea unui sistem compus din reazeme de cauciuc combinate cu amortizori vâscoși. Principalele avantaje prezentate pentru acest tip de sistem față de sistemele cu masă adăugată sunt: realizarea amortizării fără a introduce greutate suplimentară în structură, spațiul de pe acoperiș rămâne liber și poate fi utilizat și în alte scopuri, construcția este relativ simplă, nu necesită utilizarea elementelor care să limiteze deplasarea masei, poate fi utilizată cu succes la izolarea clădirilor existente, deoarece nu introduce masă suplimentară și are mecanism propriu de recentrare.

Structura studiată de Roberto Villaverde este compusă dintr-un cadru metalic plan cu o singură deschidere de 7,22 m (23,7 ft) și cinci niveluri. Pentru izolare se folosesc patru reazeme elastice din cauciuc și doi amortizori vâscoși. Greutatea totală a acoperișului este de

311 kN (69,91 kip) și reprezintă aproximativ 16% din greutatea întregii structuri. Se observă o creștere a perioadei proprii în modul 1 de vibrație, de la 0,466s (în cadrul structurii convenționale) la 0,549s (în cadrul structurii cu izolatori și amortizori la nivelul acoperișului). Structura este calculată în cazul în care asupra ei acționează un seism care are accelerograma egală cu cea a seismului Loma Prieta, din anul 1989, pe direcția E-V, scalată cu diferiți factori. Pentru un factor de scalare de 1,5 s-a obținut o reducere a deplasărilor de nivel de 77%, de la 14 cm (5,55 in) la 3,2 cm (1,29 in) [142].

Același autor continuă studiile și, în anul 2000, prezintă rezultatele obținute în urma simulării unei structuri cu 13 etaje din beton armat, situată în California, la cutremurul Northridge din anul 1994 [141]. Sistemul este izolat utilizând același principiu ca și cel descris mai sus, iar în acest caz se obține o reducere a deplasării relative de nivel de 35,7% pe direcția longitudinală și de 39,8% pe direcție transversală. Deplasarea maximă a izolatoarelor este de 0,59 m pe direcția longitudinală și de 0,75 m pe cealaltă direcție.

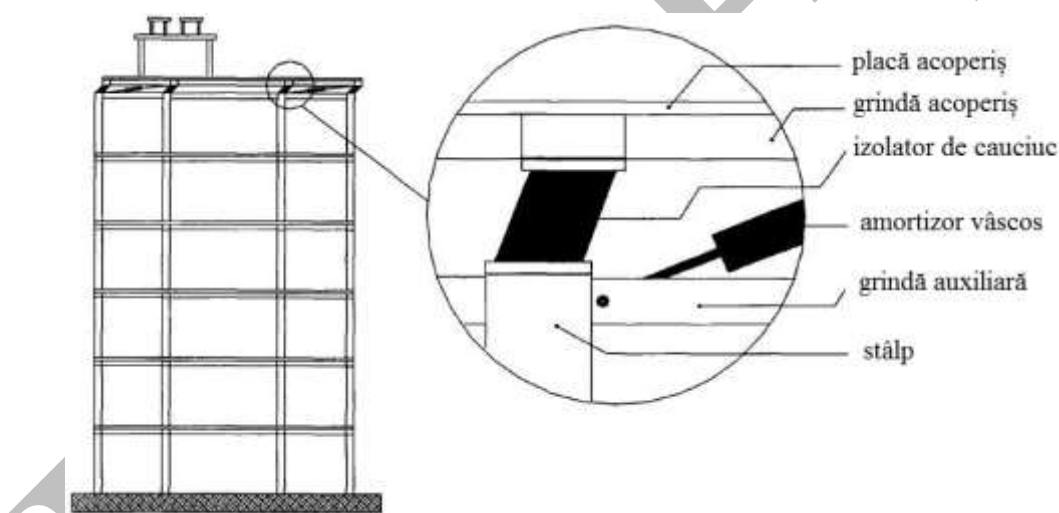


Fig. 3.3 Izolare seismică acoperiș - R. Villaverde [142]

În anul 2004, s-a inaugurat în China, la Shanghai, un nou circuit internațional de curse auto, al cărui centru de presă este izolat seismic. Structura acestuia este alcătuită din două corpuri de beton armat a câte 8 etaje, cu o înălțime de 31,6 m, care încorporează și tribune. Aceste două corpuri sunt unite la partea superioară printr-o structură din oțel care este rezemată pe patru dispozitive de izolare seismică, câte două pe fiecare corp [53]. Grinda principală a structurii metalice are o deschidere de 91,30 m și o înălțime de 12,40 m, iar la capete are două console a câte 26,91 m și 17,41 m [16]. Mecanismul de izolare este rezultat în urma combinării a două tipuri de izolatori. Acesta conține 4 izolatori elastomerici poziționați la colțurile dispozitivului și un izolator cu frecare (pot-bearing) poziționat în centru.

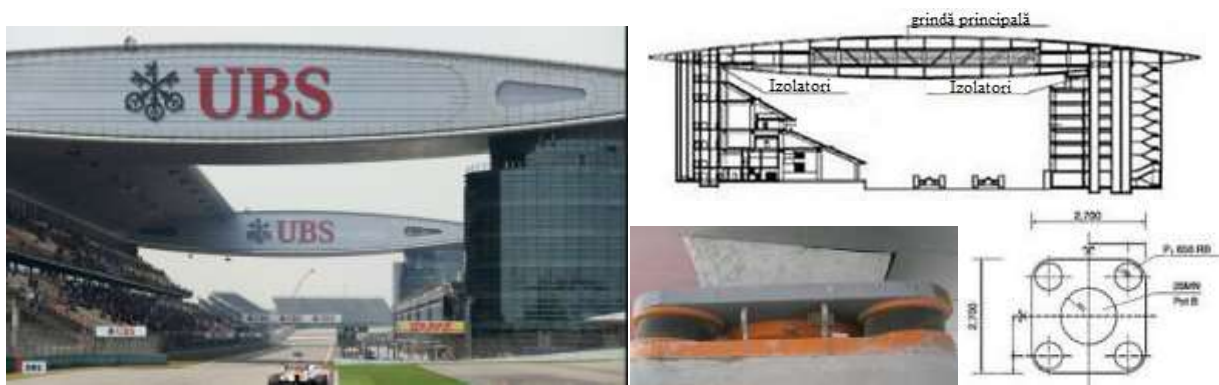


Fig. 3.4 Shanghai International Circuit [16, 122, 125]

În anul 2005 a fost finalizată construcția unui acoperiș peste curtea hotelului Plaza din Caserta, Italia. Structura de formă pătrată este poziționată peste curtea interioară și este susținută pe cele patru părți de structuri din beton armat, care alcătuiesc corpurile hotelului. Structura de rezistență este compusă din arce pe două direcții, cu deschiderea de 58.52m și respectiv 58,42 m, cu o săgeată de 6,45 m. Structura reticulată pe un singur strat este completată de tiranți diagonali în planul acoperișului. Legătura dintre acoperiș și cele patru corpuri care delimitează structura metalică este realizată prin intermediul a trei grinzi cu zăbrele din oțel și a unei grinzi din beton precomprimat. Accelerația terenului în zona Napoli, unde este situată construcția, este de 0,25g. Pentru a evita legarea celor patru corpuri în eventualitatea unui cutremur sau a unor variații importante de temperatură, s-a propus introducerea unor aparate de reazem pe trei dintre cele patru părți de susținere a structurii acoperișului. Astfel, toată încărcarea seismică de la nivelul acoperișului va fi transmisă prin intermediul grinzii de beton precomprimate doar unuia dintre corpuri. Aparatele de reazem alese au în compoziție material cu frecare mică din PTFE (politetrafluoretilenă), cu o deplasare maximă admisă de 0,60 m [47].

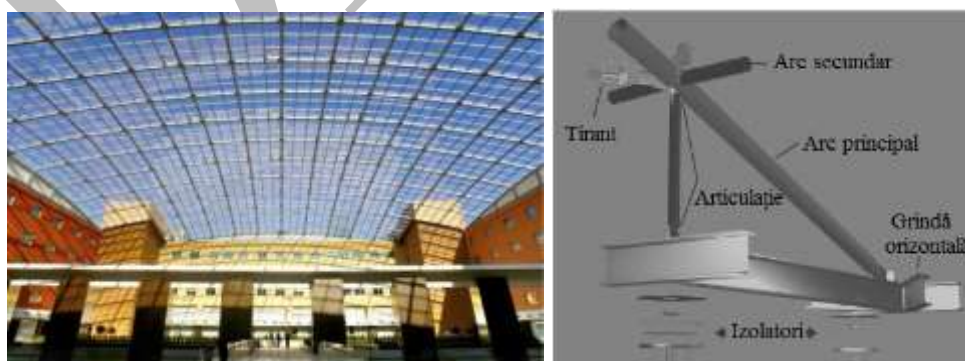


Fig. 3.5 Hotel Plaza, Caserta [23, 47]

### 3.1 Kyoto Aquarena

Kyoto Aquarena este o arena de sport acoperită, finalizată în anul 2002, situată în vecinătatea Parcului Sportiv Nishikyogoku din Kyoto, Japonia. Acest complex se compune din: piscină adiacentă, o parcare, poligon de tras cu arcul și alte facilități, care au fost așezate într-un cerc în jurul clădirii care găzduiește piscina principală. Piscina principală are dimensiuni olimpice, fiind alcătuită dintr-o porțiune de 50,00 m lungime (care poate fi transformată în patinoar pe timp de iarnă) și o secțiune de scufundări. Structura de rezistență care susține acoperișul este realizată din beton armat prefabricat, precomprimat. Restul elementelor structurale, exceptând acoperișul, au fost realizate din beton armat monolit [67, 68].



Fig. 3.6 Kyoto Aquarena [77]

Acoperișul are o formă bob de mazăre, cu dimensiuni în plan de aproximativ 110 m pe 60 m, și este poziționat la o înălțime de 18,5 m. Greutatea totală a acoperișului este de 14014 kN. Sistemul constructiv constă în utilizarea pe direcția scurtă a grinzilor macaz, care au o deschidere maximă de aproximativ 57,00 m. Talpa superioară a grinzii macaz este construită dintr-un profil H alcătuit, cu dimensiunile de 588 mm\*300 mm, iar cei doi tiranți pretensionați care compun talpa inferioară au diametrul de 42,5 mm. Elementele structurale ale acoperișului au fost realizate din oțel galvanizat, din pricina vulnerabilității elementelor la coroziune, în special datorată vaporilor de clor. Grinzile macaz lucrează foarte bine la preluarea forțelor verticale, dar își pot pierde stabilitatea laterală în cazul apariției unor încărcări mari pe această direcție. Pentru a limita forțele din seism pe direcția transversală, au fost plasați izolatori seismici în punctele de sprijin ale acoperișului pe structura de beton prefabricat și s-a obținut astfel o reducere a vibrațiilor în structura metalică. Acest lucru a permis proiectanților să reducă secțiunile elementelor constitutive ale acoperișului, dar și ale elementelor de susținere. S-a constatat că această soluție este eficientă pentru păstrarea proprietăților grinzii macaz și pentru menținerea stabilității [67, 68].



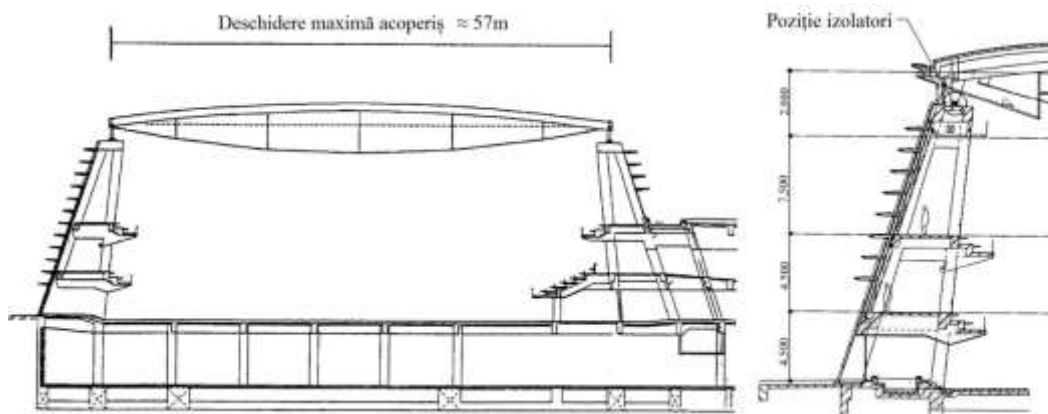
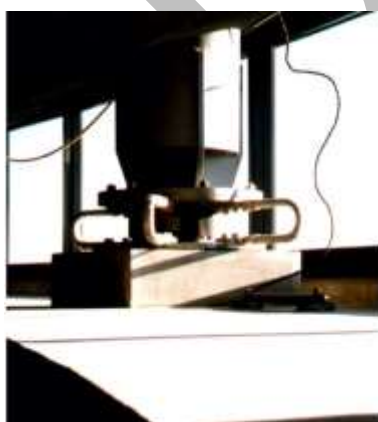


Fig. 3.7 Kyoto Aquarena-secțiuni [68]

Pentru izolarea seismică a acoperișului au fost combinate trei tipuri de dispozitive, astfel încât să se obțină o perioadă de vibrație cât mai mare a structurii metalice. Primul tip constă în utilizarea unui mecanism compus dintr-un amortizor histeretic în formă de U, împreună cu un izolator din cauciuc natural laminat (Fig. 3.8 A). Al doilea tip constă în folosirea singulară a unui izolator din cauciuc laminat (Fig. 3.8 B), iar al treilea dispozitiv constă în utilizarea unui sistem de izolare orizontal cu frecare mică, asemănător cu PF. Izolatorii din cauciuc au fost aleși astfel încât să aibă un modul de forfecare cât mai mic ( $0,34 \text{ N/mm}^2$ ), iar factorul de formă de 33,3 și respectiv 5,3 pentru izolatorul secundar. Amortizorii histeretici în formă de U sunt realizați din oțel SN490B, iar testele efectuate pe aceștia arată că ei prezintă o capacitate de absorbție a energiei care nu depinde aproape deloc de temperatura, mărimea și direcția deformației sau de alți parametri. Izolatorii au fost plasați alternativ în locații bine calculate (Fig. 3.9), astfel încât deformațiile amortizorilor la încărcările din vânt să nu depășească limita elastică și pentru a conferi o perioadă de vibrație cât mai mare structurii [67, 68].



A- Amortizor și izolator



B- izolator cauciuc laminat



C- izolator orizontal cu frecare

Fig. 3.8 Kyoto Aquarena - tipuri izolatori [67]

Simularea numerică (bazată pe metoda Newmark cu  $\beta=1/4$ ) s-a făcut utilizând programul ADINA 7.1 și ținând cont de următoarele condiții: masa structurii s-a considerat ca fiind masă concentrată în fiecare nod, stâlpii au fost considerați ca fiind încastrați la bază, iar coeficientul de amortizare a fost de 0,02 [67].

S-au efectuat simulări numerice atât pe structura izolată, cât și pe cea echipată cu izolatori și amortizori. S-a efectuat o analiză de tip *time-history* și s-au folosit accelerogramele utilizate în mod regulat în Japonia (Kobe 1995, El Centro 1940, Taft 1952, Hachinohe 1968). Perioada structurii inițiale s-a determinat ca fiind de 0,88s, iar aceasta a crescut în urma izolării acoperișului până la 1,3 s pentru deformații mici și 2,2 s pentru deformații mari ale izolatoarelor, respectiv ale amortizorilor. Structura izolată nu prezintă deformații importante ale elementelor acoperișului în timpul cutremurului orizontal, în comparație cu structura neizolată, care prezintă deformații mari pe verticală [67, 68].

Principalele diferențe observate între structura neizolată și cea izolată sunt reducerea semnificativă a accelerațiilor pe structura izolată datorită coeficientului mare de amortizare și reducerea deformațiilor verticale ale grinzii principale datorită forțelor orizontale, cu 1/3 înspre capătul grinzii și 1/5 în mijlocul acesteia, față de structura neizolată. Deformația orizontală maximă înregistrată a izolatorului în urma analizelor este de 19,4 cm și îi corespunde o deformație de forfecare de 285%. Proiectarea izolatoarelor pentru acoperișuri cu o perioadă de vibrație mare este mai dificilă decât în mod normal, datorită greutatei relativ mici a structurii, acesta fiind și principalul impediment în utilizarea acestor sisteme. În schimb, datorită greutatei verticale mai mici, costul izolatoarelor este mai mic decât atunci când aceștia sunt plasați la nivelul fundației [67, 68].

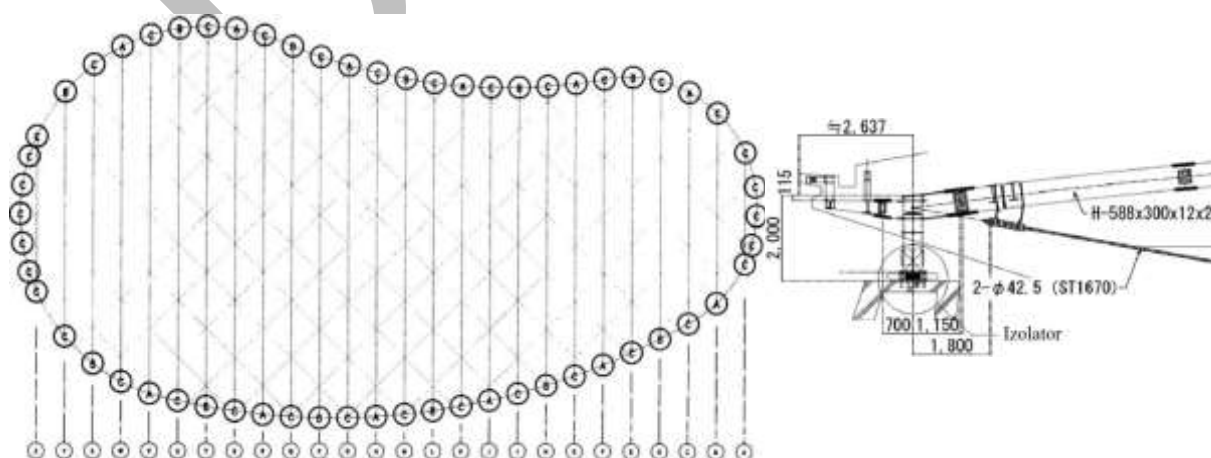


Fig. 3.9 Kyoto Aquarena - Poziționare izolatori [68]

### 3.2 Terminal Ataturk International Airport

Aeroportul Internațional Ataturk din Turcia este situat pe partea europeană a orașului Istanbul, la circa 25 km depărtare de centrul acestuia. Noua clădire a terminalului are trei etaje, iar structura de rezistență este formată din cadre de beton armat cu un acoperiș din grinzi de oțel. Dimensiunile în plan ale noului terminal sunt de 240 m x 168 m și a fost împărțit în unități cu dimensiunile de 48 m x 48 m, separate prin rosturi de dilatare de 50 mm. Planșeele sunt de tip dală din beton armat, iar distanța dintre stâlpi pe primele două etaje este de 12,00 m. Acoperișul este realizat din grinzi cu zăbrele spațiale pe două direcții, cu o deschidere de 24,00 m. Grinzile au fost inițial echipate cu rosturi de dilatare pentru a putea prelua efectele provenite din variațiile de temperatură, dar acestea nu erau aliniate cu cele din structura de beton de mai jos.



Fig. 3.10 Terminal Ataturk [60, 62]

În anul 1999, când încă terminalul era în faza de construcție, structura a fost supusă cutremurului din 19 august din Izmir. În timpul acestui cutremur a fost înregistrată o accelerație orizontală maximă a terenului de 0,1g și de 0,05g pe verticală. Inspecția ulterioară a relevat părți ale elementelor de rezistență care au suferit deteriorări. Printre acestea se numără flambajul barelor longitudinale de la baza stâlpilor de la al treilea nivel, crăpături în nodurile cadrelor de beton, dislocarea stratului de beton de la capătul stâlpilor care susțin acoperișul și alunecarea acestuia din axul stâlpilor. S-au efectuat studii ulterioare pe un cadru de 48,00 m, care a fost supus analizelor de tip pushover, conform FEMA 273 din anul 1997, iar spectrul a fost modificat la cererea beneficiarului și scalat cu 50% față de cel prevăzut de normativul turcesc din anul 1997 pentru amplasamentul respectiv. Ulterior, s-au luat măsuri de reabilitare structurală, printre care contravântuirea unor cadre, reparația și reconstrucția stâlpilor de la ultimul nivel, eliminarea rosturilor de dilatare dintre etajele doi și trei pentru creșterea redundanței. Nu a fost necesară niciun fel de intervenție asupra grinzilor de beton [21].

În ceea ce privește acoperișul, s-au evaluat posibilele soluții, dar pentru că adăugarea de amortizori ar fi presupus adăugarea de elemente suplimentare, iar izolarea în bază nu mai era posibilă în acel stadiu al lucrărilor, s-a optat pentru introducerea de izolatori seismici în punctele de reazem ale structurii metalice. Au fost aleși izolatori de tip pendul cu frecare pentru a limita deplasarea laterală a acoperișului și pentru a diminua forțele orizontale pe care acesta le introduce în stâlpii de la etajul superior. Pe baza razei de curbura a izolatorului s-a calculat o perioadă de 3,00 s pentru structura metalică. Coeficientul de frecare al suprafeței de alunecare este 0,09, iar capacitatea maximă de deplasare laterală este de 26 cm [21].



Fig. 3.11 Terminal Atatürk – izolatori seismici [21]

Ulterior, s-au făcut analize static și dinamic neliniare pe structura reabilitată, prin care s-a demonstrat eficacitatea sistemelor implementate. Eforturile maxime în stâlpii de la ultimul nivel se încadrează în limitele maxime admise, iar deplasarea maximă a izolatorului în cazul celor 20 de accelerograme studiate nu este mai mare de 19 cm [21].

### 3.3 Terminal Sabiha Gökçen International Airport

Noul terminal al aeroportului internațional Sabiha Gökçen din Istanbul este situat pe continentul asiatic și a fost dat în folosință în anul 2009, în urma unei investiții totale de \$250.000.000. Pe lângă terminalul internațional cu o suprafață de 160000 m<sup>2</sup>, au mai fost construite un hotel, parcări etajate și un terminal VIP. Din cauza faptului că este poziționat foarte aproape de falia Anatoliei de Nord și de falia Marmara, dar și datorită pierderilor enorme suferite în urma cutremurului de la Kocaeli din anul 1999, noul terminal este considerat ca fiind un punct operațional strategic în eventualitatea unui viitor seism. Astfel, el a fost proiectat pentru a fi la un nivel operațional conform ASCE, care înseamnă că nu au voie să se producă nici un fel de degradări structurale în urma unui cutremur cu perioada de recurență de 475 ani (DBE). Nivelul de siguranță pentru cutremurul maxim considerat pe

amplasament (MCE), cu o perioadă de recurență de 2475 de ani, implică degradări doar la elementele nestructurale și foarte puțin ale elementelor structurale, dar care să nu afecteze activitățile desfășurate în clădire și să permită ca aceasta să fie utilizată ca centru de urgență [150].



Fig. 3.12 Terminal Sabiha Gökçen [114, 115]

Pentru a putea satisface aceste cerințe, soluția clasică de structură fixă nu a fost considerată ca fiind fezabilă și, astfel, s-a optat pentru introducerea izolatorilor seismici pasivi. În acest sens, s-au evaluat patru variante de izolatori: dublu pendul cu frecare- DCFP, triplu pendul cu frecare TCFP, izolator din cauciuc cu miez de plumb – LCRB și izolatori cu amortizare mare HDRB. Proiectarea bazată pe performanță s-a făcut conform ASCE 7-05, deoarece codul turcesc TEC 98/07 nu prevedea criteriile de performanță.

Dimensiunile în plan ale terminalului sunt de 160 m x 272 m, iar înălțimea totală este de 32,50 m. Clădirea are patru etaje cu o înălțime de 6,00 m. Structura este din beton armat, elemente compozite și planșee mixte din oțel-beton. Acoperișul metalic este alcătuit din grinzi parabolice din oțel cu deschideri de 32,00 m și 48,00 m, poziționate la o distanță de 8,00 m între ele. Un număr de 252 de elemente de tip triplu pendul cu frecare (TCFP) este folosit pentru a decupla structura metalică și compozită de cea de beton armat. Structura a fost modelată în SAP2000 v11, iar pentru acest lucru s-au utilizat următoarele simplificări: structura acoperișului a fost modelată ca masă echivalentă, dar, ulterior, a fost analizată separat; plăcile au fost modelate ca părți ale elementelor compozite, și nu ca elemente de tip *shell*. Pe structură s-au făcut analize de tip *time-history* și cu spectru de răspuns [150].

Pentru modelarea izolatorilor s-a recomandat ca perioada structurii izolate să fie cel puțin de trei ori mai mare decât perioada structurii fixe, care a fost calculată ca fiind de 0,8s. Încărcarea verticală maximă pe izolatori a fost de 5350 kN. S-au utilizat TCFP cu o perioadă teoretică de 3s și o deplasare maximă de 345 mm. Amortizarea efectivă a izolatorilor este de 38% pentru DBE și 30% pentru MCE [150].

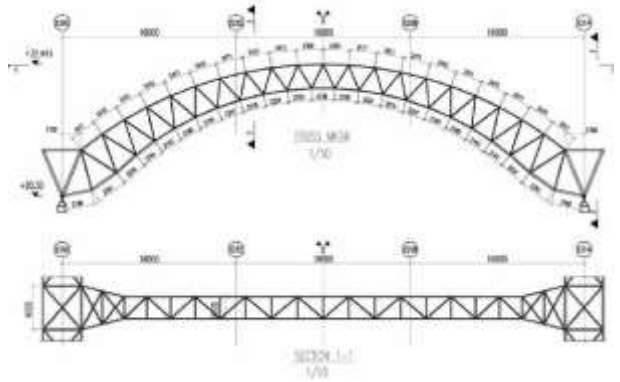


Fig. 3.13 Sabiha Gökçen – structură acoperiș [150]

În urma analizelor pe structura izolată și pe cea neizolată s-a observat o importantă reducere a deplasărilor relative de nivel, de la 2% la 0,3% pentru MCE. Reducerea accelerațiilor la partea superioară a structurii este semnificativă, de la 2g la 0,2g. De asemenea, s-a înregistrat o economie de materiale în urma izolării seismice, datorită reducerii dimensiunilor atât a elementelor de beton, cât și a celor de oțel. Se minimizează degradările elementelor nestructurale și acestea nu mai trebuie înlocuite în cazul producerii MCE. Deplasarea maximă aproximată pentru izolatorii utilizați în cadrul acestui proiect este de 297 mm, mai mică decât deplasarea lor maximă de proiectare (345 mm). În plus, a fost studiată și influența schimbării parametrilor izolatorilor în timpul ciclurilor de mișcare și, astfel, s-a constatat o reducere a deplasărilor cu maxim 20%, căreia îi corespunde o creștere a eforturilor de 5% în elementele structurii [150].

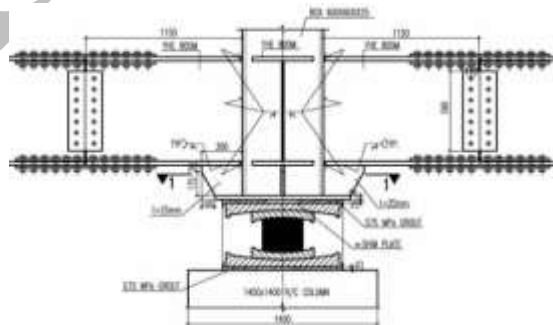


Fig. 3.14 Sabiha Gökçen – izolatori seismici [150]

Per ansamblu, structura izolată seismic s-a încadrat în obiectivele de performanță impuse prin reducerea forței tăietoare de bază cu 80% față de structura neizolată, reducerea deplasărilor relative de nivel cu 83% și diminuarea cu 90% a accelerațiilor [150].

### 3.4 Hangar Istanbul

Hangarul face parte din ansamblul aeroportului Sabiha Gökçen din Istanbul, Turcia. Acesta are o formă rectangulară cu dimensiuni în plan de 110 m x 144 m, iar înălțimea totală a celor trei etaje este de 30,20 m. Cele două etaje ale subsolului sunt înalte de 7,00 m, respectiv 4,20 m și au ca elemente structurale verticale stâlpi și diafragme din beton armat. Sistemul structural la parter constă în dispunerea unor stâlpi metalici zăbreliți la exterior, pe care se sprijină acoperișul și fațada. În axul de simetrie transversal se găsesc stâlpi sub forma de I din beton armat. Înălțimea liberă a parterului este de 19 m. Sistemul structural al acoperișului constă în dispunerea la o distanță de 12,00 m a unor grinzi cu zăbrele plane cu deschidere de 70,00 m și o înălțime de 5,00 m [124].

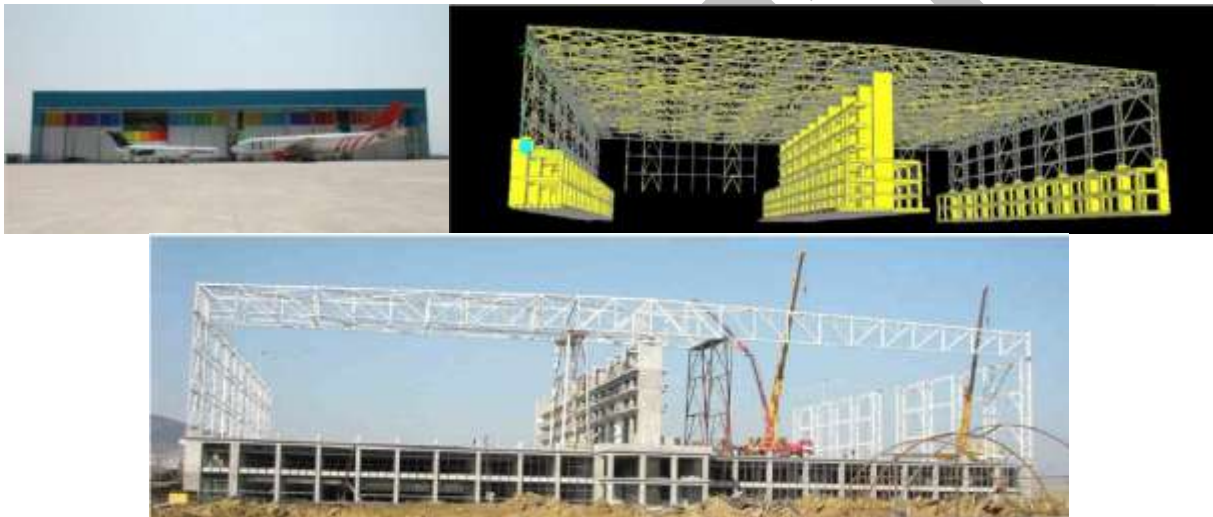


Fig. 3.15 Hangar Istanbul [96, 124]

Sistemul de izolare constă în combinarea a două tipuri de izolatori plasați la partea superioară a stâlpilor de la parter: HDRB și LCRB. Izolatorii de tip HDRB sunt plasați deasupra stâlpilor metalici și sunt în număr de 20, iar cei de tip HCRB, în număr de 10, sunt plasați la partea superioară a stâlpilor din beton armat din axul de simetrie. Izolatorii sunt proiectați în așa fel încât structura aflată sub nivelul de izolare să se comporte elastic. Răspunsul seismic a fost determinat atât utilizând spectrul de răspuns, cât și efectuând o analiză de tip *time-history*. Pentru aceste analize s-a utilizat programul SAP2000. Studiul bazat pe o analiză în domeniul elastic a arătat o creștere a perioadei principale de vibrație de la  $T=0,79s$  în cazul structurii neizolate, la  $T=2,1s$  în cazul structurii echipate cu izolatori seismici la nivelul acoperișului. Pentru proiectarea preliminară s-a ales o perioadă efectivă de 2s și o amortizare de 31% pentru cutremurul de proiectare, respectiv 2,5s și 19% pentru cutremurul maxim considerat pe amplasament. Dimensiunea izolatorilor, atât a celor HDRB,

cât și a celor LCRB este de 650 mm x 650 mm, au o înălțime de 300 mm, iar rigiditățile lor sunt: 920 kN/m, respectiv 1300 kN/m. Pentru a dovedi eficiența implementării soluției de izolare, s-au efectuat analize neliniare statice și dinamice, în urma cărora s-a constatat o reducere a forței tăietoare de bază în stâlpi cu aproape 75% [124].

Construcția are o suprafață desfășurată de 45000 m<sup>2</sup>, 15000 m<sup>2</sup> pe nivel. Greutatea celor 30 de stâlpi care susțin acoperișul este de 2000t.

În timpul acțiunii vântului, mișcarea acoperișului este împiedicată, în principal, de miezul de plumb din componența reazemelor de tip LCRB. Izolatorii au fost proiectați astfel încât, în cazul în care ușa hangarului rămâne deschisă în timpul unei furtuni cu vânt puternic, aceștia să poată să preia și forțele de întindere care apar din ridicarea acoperișului.

Izolatorii preiau și dilatarea termică care apare în elementele de rezistență ale acoperișului metalic. Astfel, s-a putut renunța la prevederea unui rost seismic, ceea ce a însemnat că s-a renunțat la dublarea fermei din rost și, prin urmare, s-a făcut o economie de material de aproximativ 100 de tone.



Fig. 3.16 Hangar Istanbul – Poziționare izolatori [61]

### 3.5 Seahawk Stadium

Stadionul echipei de fotbal american, Seattle Seahawks, numit CenturyLink Field a fost construit între anii 2000 și 2002 și a purtat denumirea de Seahawks Stadium. Arena are o capacitate de 67000 de locuri, iar investiția totală în complexul sportiv a fost de \$430.000.000. Datorită solului moale și dificil din zonă, fundația stadionului este alcătuită din 1700 de piloți de 15-20 m adâncime. Stadionul este în formă de U, peluza din nord fiind lăsată aproape în totalitate liberă. Structura de rezistență și gradenele sunt realizate din beton armat. Acoperișul metalic are o suprafață de 19.000 m<sup>2</sup>, acoperă numai tribunele și reazemă pe trei părți pe structura din beton armat. Partea liberă dinspre teren este susținută de un arc cu



înălțimea de 61 m și cu deschiderea de 220 m (720 ft), care se sprijină pe stâlpi de beton armat. Arcul principal este metalic și are o secțiune dreptunghiulară cu o lățime de 1,20 m (4 ft) și înălțime care variază de la 1,50 m (6 ft) la cheie până la 6,00 m (20 ft) la nașteri. Atârnată de arcul principal, prin intermediul unor elemente metalice dreptunghiulare cu rol de tirant în formă de V așezate la 10,00 m (34 ft) distanță, este suspendată o grindă cu zăbrele spațială. Această grindă susține grinzile transversale care alcătuiesc restul structurii de rezistență a acoperișului. Arcul principal este post tensionat prin intermediul unor tendoane [139].



Fig. 3.17 Seahawk Stadium [15, 139]

Fiecare arc este izolat prin intermediul unui pendul cu frecare unidirecțional, poziționat pe un stâlp de beton armat. Fiecare izolator este încărcat cu o forță verticală de 13300 kN. Stadionul a fost proiectat să reziste unui cutremur de magnitudine 7, provocat de falia din Seattle care trece pe sub amplasament și unui cutremur cu magnitudinea de 9.0 grade pe scara Richter, produs în zona de subducție din apropierea coastei oceanice. Deplasarea maximă a acoperișului față de partea superioară a stâlpilor este de 60 cm (24 in). Deplasările structurii metalice datorate variației de temperatură sunt de 20cm (8 in) [139].

Introducerea izolatorilor pentru decuplarea structurii metalice a acoperișului a dus la economii substanțiale, de \$1.000.000 la stâlpii care susțin acoperișul, \$500.000 pentru realizarea fundațiilor și de \$1.000.000 prin reducerea greutății elementelor de rezistență ale acoperișului [139].

Sistemul a fost testat pe 30 de accelerograme cu ajutorul programului SAP2000, iar în timpul construcției a fost supus și cutremurului Nisqually, iar comportarea sa a fost conform predicțiilor [74, 128].

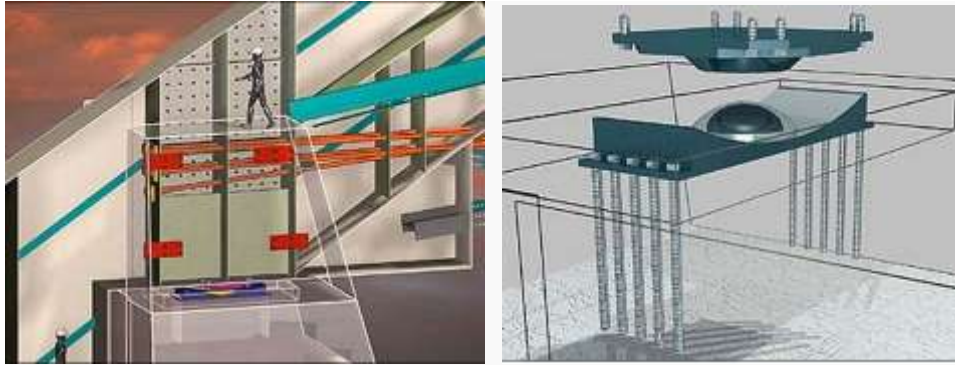


Fig. 3.18 Seahawk Stadium – Izolator [128]

### 3.6 Sală de sport Halkapinar

Halkapinar Arena (Halkapinar Spor Salonu) este o sală de sport cu o capacitate de 10.000 de locuri, situată în orașul Izmir, din Turcia. Arena a fost construită în anul 2005 pentru universiada de vară din acel an, după care a găzduit o mulțime variată de evenimente sportive. Dimensiunile în plan ale clădirii sunt de 109 m x 189 m, iar structura de oțel a acoperișului are lungimea de 110 m și o lățime de 90 m. Fundația este de tip radier, iar structura de rezistență a celor trei etaje și a gradenelor este formată din cadre de beton armat. Structura este divizată în 15 corpuri despărțite prin rosturi.

Acoperișul este realizat din grinzi cu zăbrele spațiale de secțiune triunghiulară cu latura de 6,00 m, așezate pe o singură direcție la o distanță de 12,22 m și cu o deschidere de 80,00 m, legate între ele prin intermediul unor pane cu pereți subțiri. Greutatea totală a acoperișului este de 940 tone, iar înălțimea în punctele de rezemare este de 21,20 m. Cele 10 grinzi principale sprijină pe 20 de stâlpi cu dimensiunile de 80 cm x 180 cm. Dispozitivele de izolare seismică pentru această structură au fost poziționate între partea superioară a structurii de beton și acoperișul metalic. Fiecare capăt al celor 10 grinzi metalice principale este poziționat pe un izolator din elastomer, iar suplimentar sunt montați pentru fiecare punct de rezemare câte doi amortizori vâscoși, unul pe fiecare direcție. Astfel, izolarea seismică se face prin dispunerea unui număr de 20 de izolatori din elastomer și a unui număr de 40 de amortizori. Amortizarea rezemelor din elastomer (EB) este de doar 5%, astfel că se impunea utilizarea de amortizori vâscoși (VD) pentru a crește energia disipată și pentru a limita deplasările [31].



Fig. 3.19 Halkapinar Arena [49, 50]

Perioada primului mod de vibrație în cazul structurii izolate cu EB+VD este de 0,94s, mai mare decât perioada structurii neizolate de 0,86s. S-au studiat efectele izolării seismice asupra stâlpilor care susțin structura acoperișului și s-a constatat reducerea forței tăietoare în stâlpi pe direcția transversală de la 2400 kN pentru structura neizolată la 1500 kN pentru cea izolată, iar pe direcția longitudinală de la 430 kN la 380 kN. De asemenea, s-a constatat o reducere a momentului încovoietor de la 1400 kNm la 1200 kNm pe o direcție și de la 18000 kNm până la 12000 kNm pe cealaltă direcție.

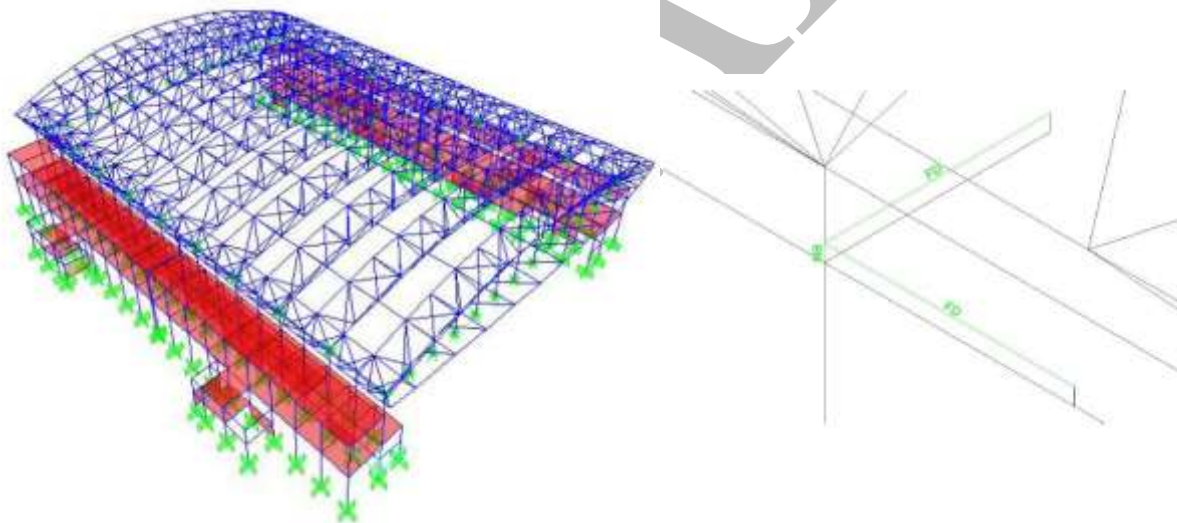


Fig. 3.20 Halkapinar Arena - model [31]

### 3.7 Centru regional de protecție civilă din Umbria

Regiunea Umbria este situată în centrul Italiei și este una dintre cele mai importante zone seismice din această țară. Din acest motiv, a fost implementat un proiect pentru construcția unui centru regional de protecție civilă și de management în situații de urgență în localitatea Foligno. Centrul are o suprafață totală de 35 de hectare și este compus din 11 clădiri, printre care un centru operațional, o clădire administrativă, un centru de servicii,

depozite, o stație de pompieri și o clădire pentru protejarea patrimoniului național. Majoritatea acestor structuri sunt izolate seismic datorită importanței crescute pe care o are centrul în cazul producerii unor dezastre naturale [103, 104].

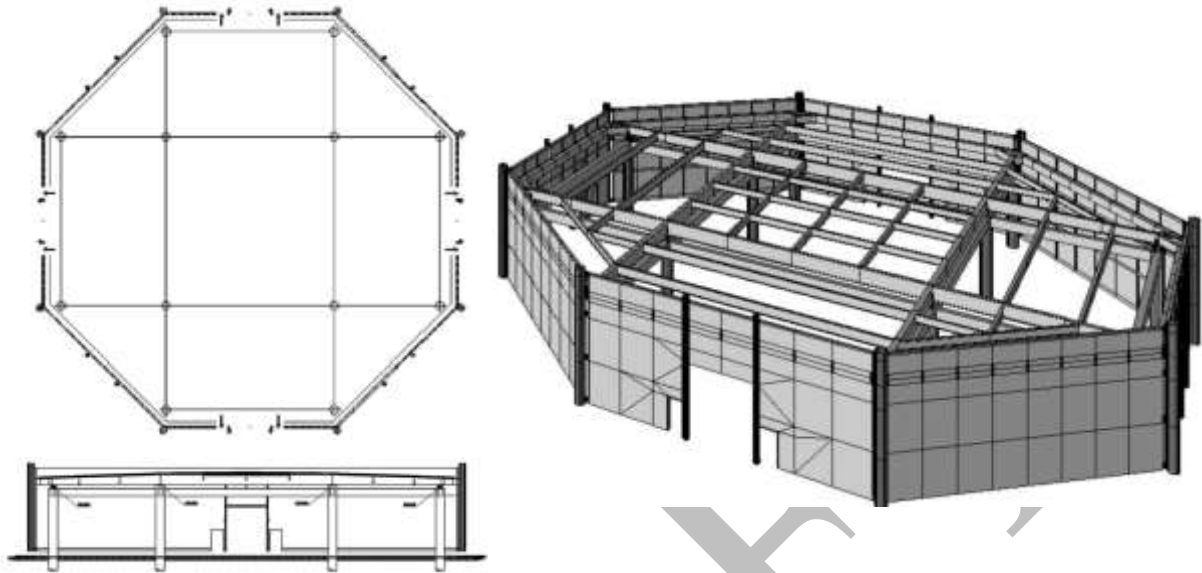


Fig. 3.21 Centru regional de protecție civilă, Umbria [104]

Clădirea pentru protejarea patrimoniului național care face parte din acest complex este un depozit care adăpostește echipament de intervenție în caz de urgență și are ca rol adăpostirea elementelor de patrimoniu în caz de cutremur. Construcția, finalizată în anul 2008, cu o suprafață de  $2000 \text{ m}^2$ , este de formă octogonală cu latura de 20m și are o înălțime liberă de 6,00 m. Structura este realizată din cadre de beton armat monolit. Acoperișul este susținut de 12 stâlpi de beton armat, de formă circulară, cu diametrul de 1,00 m, și este realizat din profile de oțel. Distanțele dintre stâlpi și încărcarea mare aplicată pe placa de beton fac relativ imposibilă și ne fezabilă izolarea seismică tradițională în bază, astfel încât să se decupleze întreaga structură. Așadar, s-a optat pentru introducerea izolatorilor la capătul superior al stâlpilor care susțin acoperișul. Sistemul de izolare include elemente care permit deplasarea pe orizontală (PF), plasate pe capătul celor patru stâlpi interiori și izolatori elastometrici cu miez de plumb, LRB, cu diametrul de 600 mm, poziționați pe cei opt stâlpi perimetrali. Obiectivele urmărite pentru maximizarea performanțelor sistemului de izolare sunt: reducerea distanței dintre centrul maselor și centrul de rigiditate (realizat printr-o conformare cât mai simetrică a structurii și o dispunere optimă a izolatorilor), reducerea variației forței verticale care acționează asupra izolatorilor și crearea unui nivel rigid în dreptul structurii acoperișului [104].

Accelerația terenului pentru care a fost calculată structura este de 0,49g pentru o perioadă de recurență de 475 de ani. S-au efectuat analize atât pe modelul izolat la nivelul acoperișului, cât și pentru cel fără izolatori, și s-a constatat că, în cazul producerii unui seism important, pentru primul caz nu se vor înregistra deteriorări importante nici la structura de rezistență, și nici la elementele de închidere, nivel de siguranță imposibil de păstrat pentru cazul structurii neizolate. Prin introducerea izolatorilor s-a crescut perioada structurii de la 0,46s la 2,61s, a scăzut forța tăietoare la partea superioară a stâlpilor de la 882 kN la 145 kN și a momentului în fundații de la 5135 kNm la 570 kNm. De asemenea, s-a redus deplasarea laterală în dreptul acoperișului de la 52,9 mm la 5,5 mm [104].

### 3.8 Palas Mall

Clădirea Palas Mall din Iași face parte din complexul Palas, situat în centrul istoric al orașului, în zona fostei Curți Domnești. Construcția complexului Palas din Iași a început în anul 2007 și a fost finalizată în anul 2012, ca urmare a unei investiții totale de circa 250 de milioane de euro. Complexul cuprinde, pe lângă centrul comercial, și cea mai înaltă clădire din Iași, care are 18 niveluri supraterane și o înălțime de 70,00 m, un supermarket, cinematografe și centre business.



Fig. 3.22 Palas Mall - Iași [48]

Structura reticulată care alcătuiește acoperișul principal are o suprafață de 7290 m<sup>2</sup> și este de formă pentagonală, cu latura cea mai mare de 85,83 m. Structura acoperișului se sprijină pe laturile pentagonului pe mai multe corpuri de clădire, realizate din cadre de beton armat fiind susținută de stâlpi cu secțiune circulară. Acoperișul se sprijină în centru pe 8 stâlpi de secțiune dreptunghiulară.

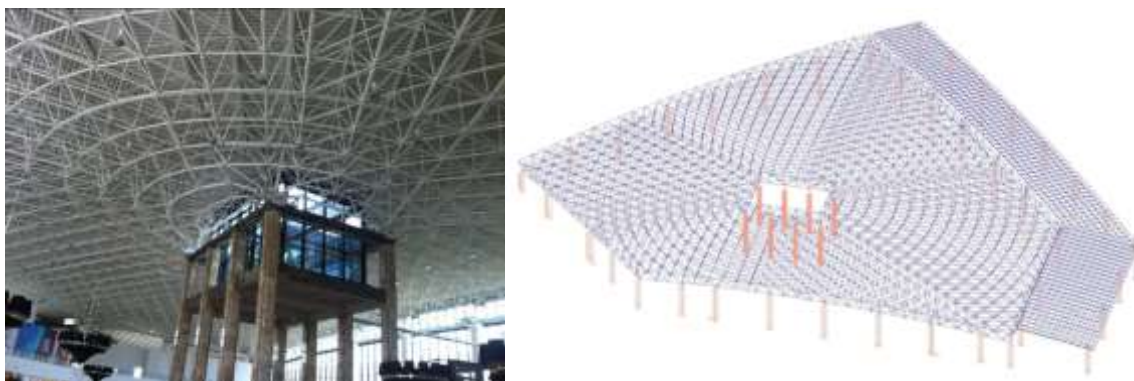


Fig. 3.23 Palas Mall – structură acoperiș [48]

Datorită faptului că structura reticulată a cupolei acoperișului reazemă pe mai multe corpuri de clădire și datorită deschiderii mari, a fost necesară utilizarea izolării seismice a acesteia față de corpurile din beton armat, prin utilizarea izolatoarelor seismice de tip FPS, cu o deplasare maximă de 350 mm. Datorită geometriei, rezultă diferențe mari între reacțiunile verticale și, implicit, rigidități orizontale neuniforme. Pentru a înlătura acest neajuns, se folosesc izolatoare cu frecare diferită, respectiv 1%, 3% și 12%. Izolatorii seismici de tip FPS modifică și fracțiunea din amortizarea critică, astfel că pentru o frecare de 12% s-a obținut o amortizare de 36.8 % , pentru frecare de 3% amortizarea este de 16.3 % , iar pentru frecare 1%, amortizarea este de 6.5 %. Prin izolarea seismică a structurii reticulate a acoperișului s-a crescut perioada proprie de vibrație a acestuia până la  $T=2.5s$  [43].

Deoarece forțele din vânt care acționează asupra acoperișului sunt importante, iar valoarea suucțiunii aplicate pe acesta este mare, s-a înglobat un mecanism care previne ridicarea acoperișului în dreptul pendulilor cu frecare, dar care să nu afecteze proprietățile acestora.

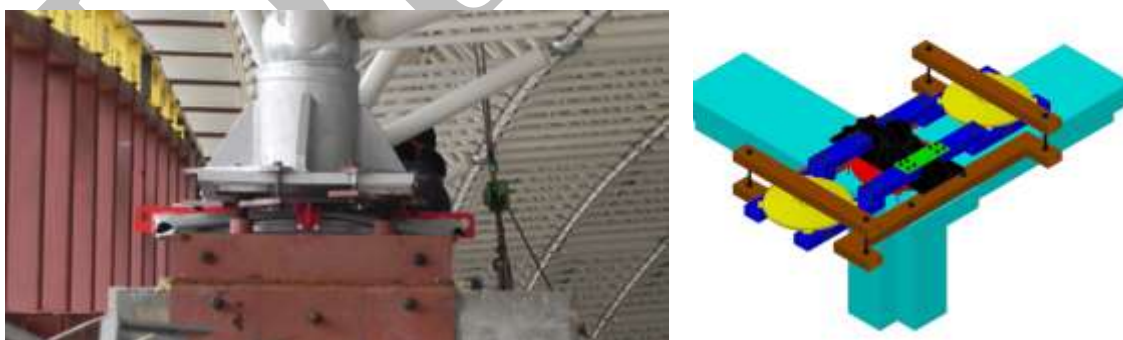


Fig. 3.24 Palas Mall – izolatoare FPS [48]

## 4. Studii numerice asupra comportării structurilor cu deschidere mare echipate cu izolatori seismici la nivelul acoperișului

### 4.1 Descrierea problemei și obiectivele analizei

Prezentul capitol cuprinde studii numerice asupra răspunsului seismic al structurilor cu deschidere mare, echipate cu izolatori seismici la nivelul de rezemare a acoperișului pe structura de beton. Pentru studiul comportării acestor tipuri de structuri au fost propuse trei modele cu deschideri de 40 m, 60 m, respectiv 80 m. Elementele structurale principale ale acoperișului sunt de tip grindă cu zăbrele care au deschiderile amintite mai sus, iar stâlpii de susținere sunt realizați din beton armat.

Proiectarea structurilor s-a făcut astfel încât să fie respectate prevederile normativului P100-1/2013 [140], dar și ale Eurocodului EC3 și EC8 pentru îndeplinirea condițiilor stării de rezistență SLS și SLU.

După definirea cazurilor de încărcare, a combinațiilor și după atribuirea parametrilor și poziției pentru modelarea izolatoarelor, s-a studiat comportarea structurii printr-un calcul modal neliniar de tip *time-history* (fast Nonlinear Analysis - FNA). Izolatorii au fost definiți ca elemente de tip *link*, care sunt modelate ca elemente finite cu un comportament neliniar. Elementele care alcătuiesc structura de rezistență a acoperișului au fost proiectate astfel încât să lucreze în domeniul elastic [12, 37, 121].

Un prim obiectiv este validarea prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor antiseismice pasive în îmbunătățirea răspunsului seismic al structurilor cu deschidere mare, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona Vrancea. Amplasarea dispozitivelor nu se va face în mod tradițional la baza structurii, ei fiind plasați la partea superioară a elementelor din beton care susțin structura acoperișului cu deschidere mare.

Pentru evidențierea eficienței metodei de izolare pasivă a structurilor cu deschidere mare prin amplasarea izolatoarelor între acoperiș și elementele de susținere a acestuia, s-a studiat un set de parametri reprezentativi ce caracterizează răspunsul seismic al acestor structuri. Rezultatele studiilor numerice pentru cele trei tipuri de structuri analizate se referă la relațiile forță-deplasare la nivelul izolatorului, cu precizarea deplasărilor pe cele două direcții, variația accelerațiilor laterale, a forței seismice de bază, deplasarea la partea superioară a stâlpului, variația componentelor statice ale răspunsului seismic, precum momentele și forțele tăietoare dezvoltate în încastrare, modificarea perioadei structurii. Sunt prezentate comparativ

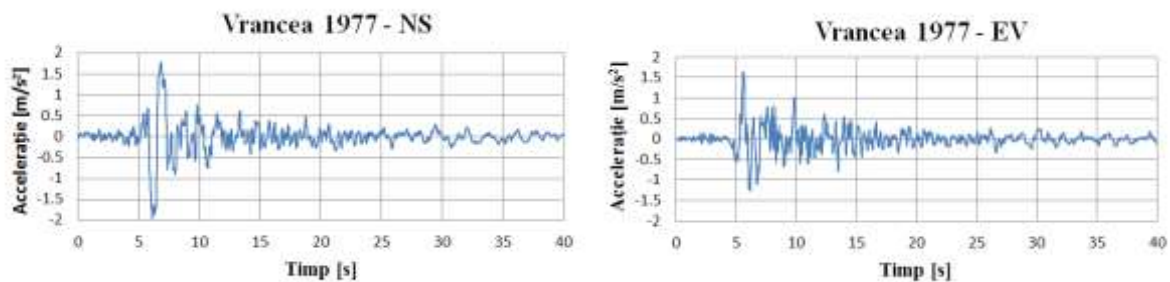
rezultatele obținute pe structura de bază cu cele din analiza structurilor echipate pe rând cu unul dintre cele trei sisteme de izolare studiate. Rezultatele sunt prezentate pentru fiecare tip de structură (Str40m, Str60m, Str80m), iar ulterior sunt prezentate date comparative pentru toate modelele studiate.

Un alt obiectiv este acela de a observa efectul pe care îl are utilizarea izolatorilor asupra eforturilor din elementele care alcătuiesc structura de rezistență a acoperișului, în principal atunci când acesta este supus acțiunii seismice și variației de temperatură. Acest lucru conduce la studiul posibilităților de reducere a greutateii structurii metalice tocmai din aceste considerente. Momentan, în literatura de specialitate nu există un studiu extins publicat pentru acest tip de structuri amplasate pe teritoriul României și expuse sursei Vrancea.

## 4.2 Solicitarea seismică

Dintre toate regiunile României care determină gradul de seismicitate al țării, zona Vrancea este cea mai importantă și este responsabilă pentru producerea a peste 90% dintre cutremurele înregistrate. Această zonă este responsabilă și pentru producerea celor mai importante cutremure care au avut loc pe teritoriul țării, inclusiv cel din anul 1802, care se presupune că a avut o magnitudine de 7,9 grade pe scara Gutenberg-Richter. Au urmat o serie de evenimente seismice puternic resimțite, ale căror accelerații au fost înregistrate și astfel s-au obținut primele și cele mai valoroase seturi de accelerograme din România. Conform normativului P100-1/2013, cele trei structuri analizate sunt amplasate în zona seismică cu o accelerație a terenului  $a_g=0,3g$  și o perioadă de colț  $T_c=1,6s$ .

Solicitarea seismică considerată pentru structurile studiate este atât de tip accelerogramă, cât și de tip spectru de răspuns, în conformitate cu prevederile normativului P100-1/2013. Accelerogramele sunt compatibile cu spectrul elastic de răspuns pentru amplasamentul considerat (amortizarea elastică de 5%). Pentru analiza de tip *time-history* s-au utilizat trei dintre cele mai importante seturi de accelerograme înregistrate pe teritoriul României.





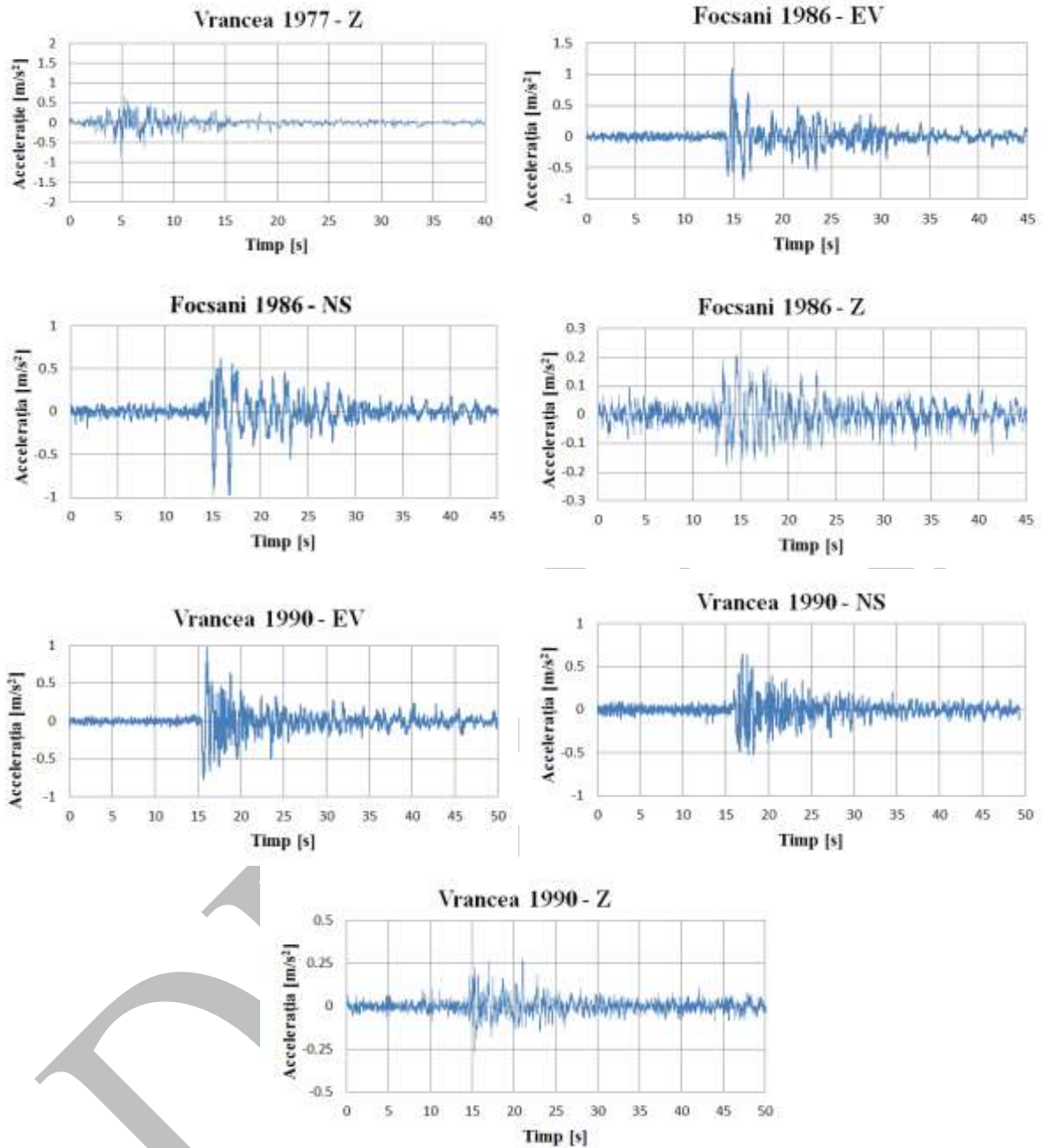


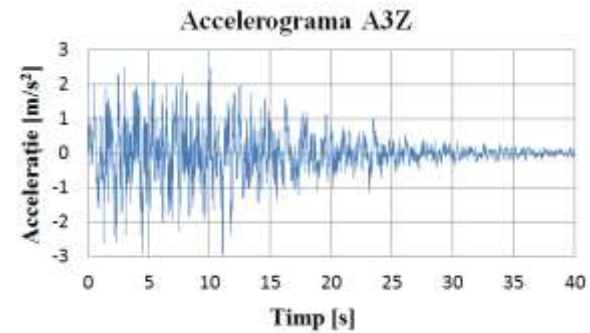
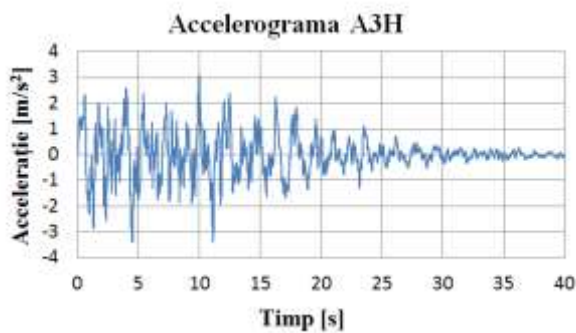
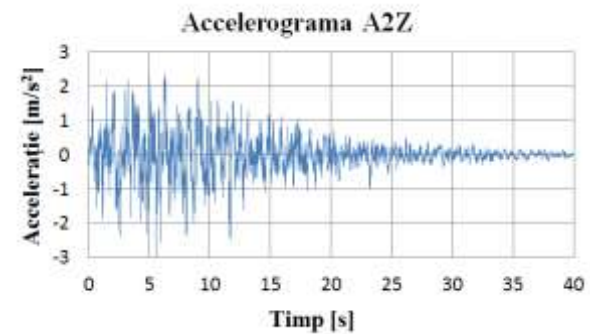
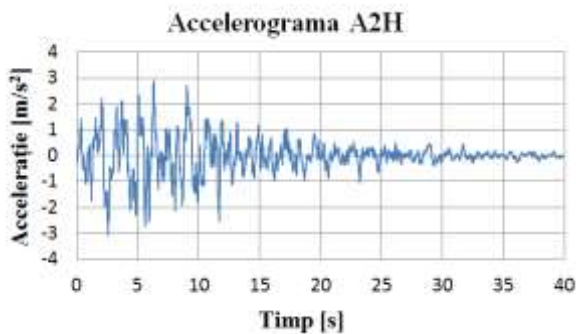
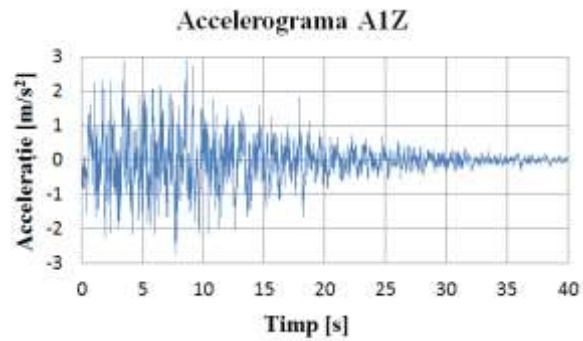
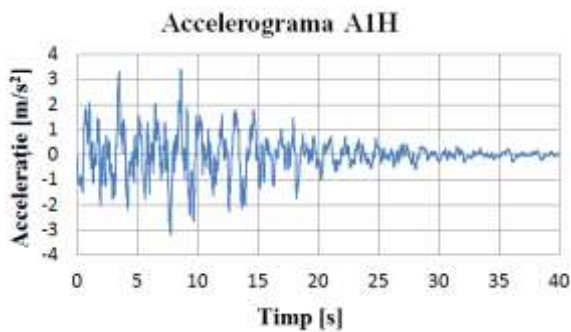
Fig. 4.1 Accelerograme înregistrate

Pe lângă cele trei seturi de accelerograme înregistrate, s-au generat și patru seturi de accelerograme artificiale. Conform normativului P100-1/2013 [140], accelerogramele artificiale se generează pe baza spectrului elastic al accelerațiilor absolute în amplasament, astfel încât spectrul de răspuns elastic al acestora să fie apropiat de spectrul țintă de răspuns elastic. În generarea accelerogramelor artificiale s-au respectat prevederile codului, adică:

- un număr de minim 3 accelerograme generate artificial
- media aritmetică a valorilor accelerațiilor de vârf ale accelerogramelor să nu fie mai mică decât valoarea  $a_g$  pentru amplasament;

- valorile spectrului mediu calculat prin medierea aritmetică a ordonatelor spectrelor elastice de răspuns ale accelerațiilor absolute corespunzând tuturor accelerogramelor artificiale generate trebuie să nu fie mai mici cu mai mult de 10% din valoarea corespunzătoare a spectrului elastic de răspuns în amplasament  $S_e(T)$ , pentru domeniul de perioade cuprins între  $0,2T_1$  și  $2T_1$ , unde  $T_1$  este perioada fundamentală de vibrație a structurii.

Pe baza spectrelor de răspuns pentru componentele orizontale și verticale ale mișcării terenului pentru amplasamentul considerat ( $a_g=0,3g$  și  $T_c=1,6s$ ), s-a generat un set de 4 accelerograme artificiale cu ajutorul programului SeismoArtif [123]. Pentru aceste accelerograme s-a considerat o durată de 40 de secunde pentru acțiunea seismică, la un pas de 0,01 s. Accelerogramele astfel generate respectă regulile prevăzute atât în P100-1/2013, cât și în secțiunea 3.2.3.1.2 din EC8.



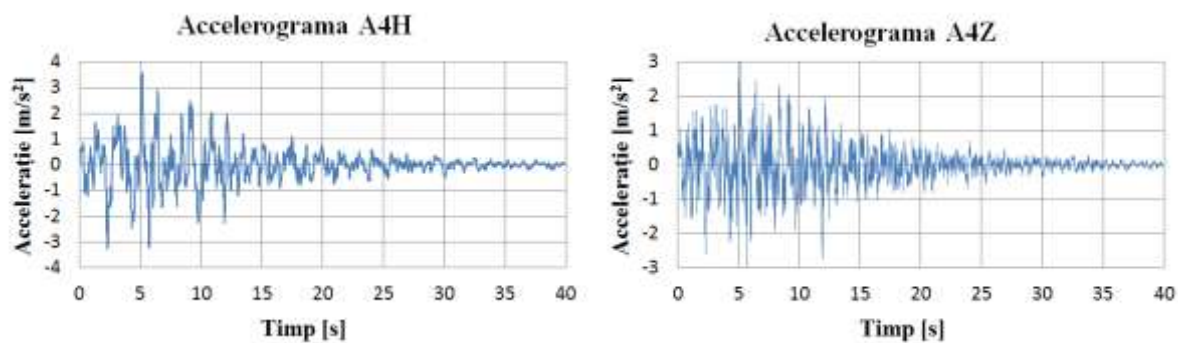


Fig. 4.2 Accelerograme artificiale - componente orizontale și verticale

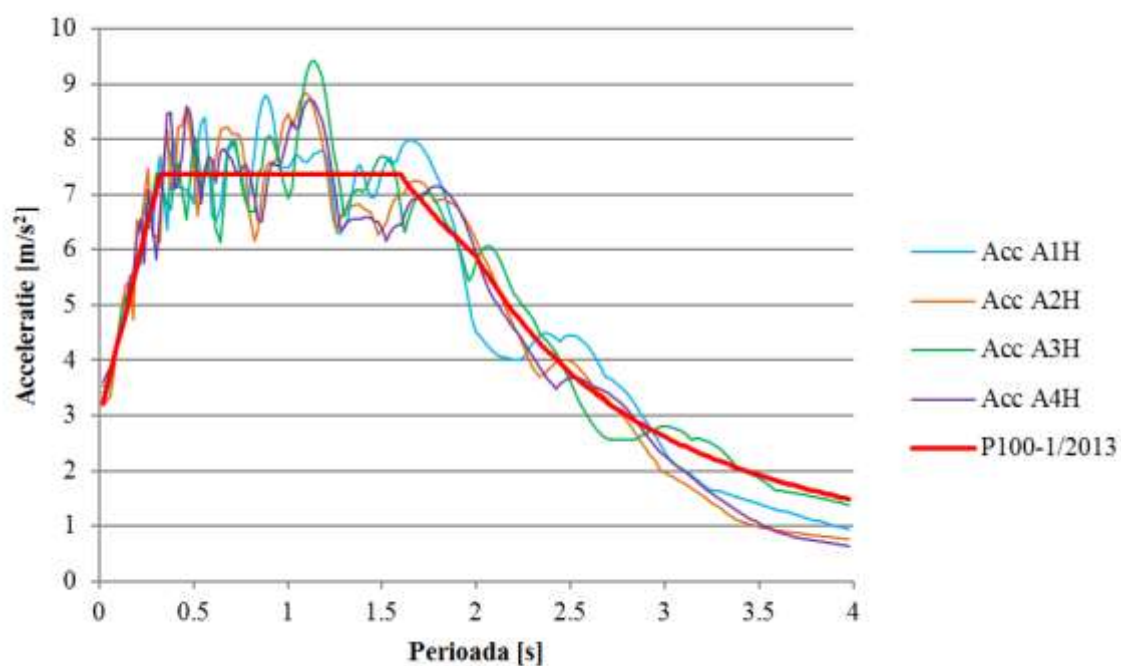


Fig. 4.3 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor generate artificial și cel conform P100-1/2013

Figura de mai sus prezintă spectrele de răspuns elastic ale celor patru accelerograme generate artificial pentru componentele orizontale ale mișcării (A1H, A2H, A3H, A4H), comparativ cu spectrul de răspuns elastic pentru accelerații al amplasamentului considerat. De asemenea, pentru fiecare set, s-au generat și accelerogramele corespunzătoare direcției verticale. Se consideră spectrele determinate pentru o amortizare de 5% din amortizarea critică.

**Tabel 4.1**

Acțiunile seimice orizontale utilizate în analiza de tip time-history

Nr	Cod	Nume	Direcție	Accel max. (m/sec <sup>2</sup> )	Detalii
1	Vr77	Vrancea 1977	NS	3,22	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 04.03.1977 și scalate pe spectru
			EV	3,38	
2	Fo86	Focșani 1986	NS	4,01	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 31.08.1986 și scalate pe spectru
			EV	3,37	
3	Vr90	Vrancea 1990	NS	4,02	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 30.05.1990 și scalate pe spectru
			EV	3,88	
4	A1	Accel. artificială 1	orizantal	3,43	Acel. generate artificial
5	A2	Accel. artificială 2	orizantal	3,10	Acel. generate artificial
6	A3	Accel. artificială 3	orizantal	3,40	Acel. generate artificial
7	A4	Accel. artificială 4	orizantal	3,57	Acel. generate artificial

În Fig. 4.4 sunt prezentate spectrele de răspuns elastic ale celor trei accelerograme înregistrate considerate (Vrancea 77-NS, Focșani 86-NS și Vrancea 90-EV), comparativ cu spectrul de răspuns elastic pentru accelerații al amplasamentului ales. Sunt evidențiate atât spectrele înregistrate, cât și cele scalate, astfel încât să fie compatibile cu spectrul de răspuns. Se consideră spectrele determinate pentru o amortizare de 5% din amortizarea critică. Pentru realizarea analizei de tip *time-history* s-au scalat pentru toate cele trei cutremure vrâncene importante și accelerogramele înregistrate pe celelalte direcții orizontale, dar și cele pe verticală.

Deoarece, conform cerințelor fundamentale privind izolarea bazei prevăzute în P100-1/2013 [140], dispozitivele de izolare trebuie realizate cu un grad de siguranță superior celui utilizat la proiectarea structurii, se amplifică acțiunea seismică aplicată fiecărui dispozitiv cu un factor  $\gamma_x=1,2$ .

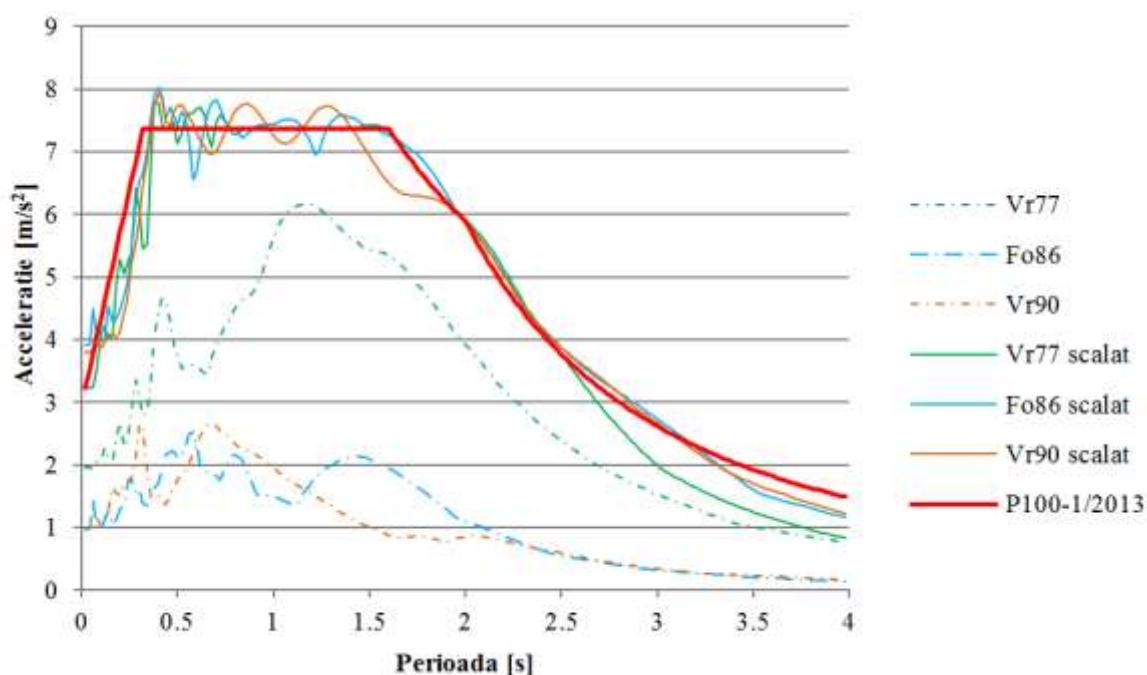


Fig. 4.4 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor înregistrate și scalate comparativ cu P100-1/2013

Având în vedere faptul că structurile studiate au deschideri mari, care pot fi sensibile la deplasări pe verticală, s-a ținut cont de influența componentei seismice pe această direcție. De asemenea, s-a studiat și influența pe care această componentă o are asupra sistemelor de izolare studiate. Însurubarea efectelor componentelor acțiunii seismice s-a făcut în conformitate cu prevederile P100-1/2013, iar efectele datorate combinației elementelor orizontale și a componentei verticale ale acțiunii seismice se pot calcula utilizând următoarele combinații:

$$0,30E_{Edx} \text{ "+" } 0,30E_{Edy} \text{ "+" } E_{Edz}$$

$$E_{Edx} \text{ "+" } 0,30E_{Edy} \text{ "+" } 0,30E_{Edz}$$

$$0,30E_{Edx} \text{ "+" } E_{Edy} \text{ "+" } 0,30E_{Edz}$$

unde :

“+” înseamnă a se combina cu,

$E_{Edx}$  - reprezintă efectele acțiunii datorate aplicării mișcării seismice pe direcția axei orizontale X alese pentru structură,

$E_{Edy}$  - reprezintă efectele acțiunii datorate aplicării mișcării seismice pe direcția axei orizontale Y alese pentru structură,

$E_{Edz}$  - reprezintă efectele acțiunii datorate aplicării componentei verticale a acțiunii seismice

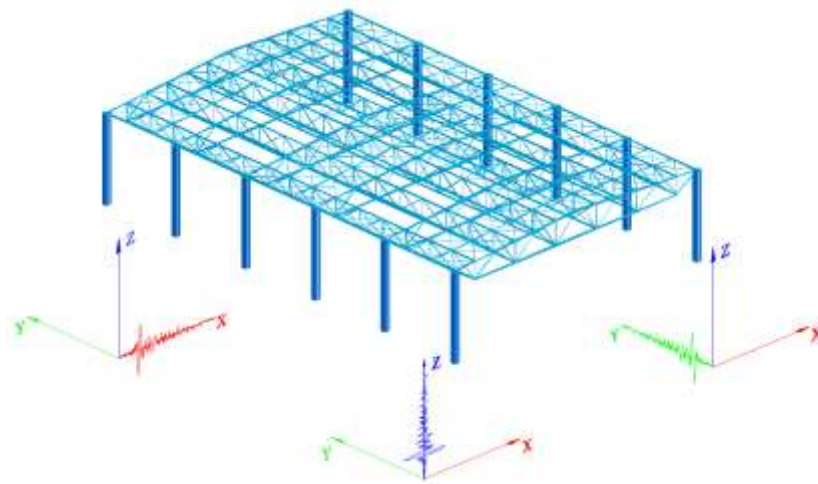


Fig. 4.5 Direcțiile componentelor acțiunii seismice pentru accelerogramele utilizate

Analiza dinamică neliniară (*time-history*) s-a efectuat cu ajutorul programului SAP2000. În aceste analize nu s-a ținut cont de influența condițiilor de teren asupra acțiunii seismice.

### 4.3 Structură cu deschidere de 40 m (Str40m)

- **Descrierea structurii**

Prima structură propusă pentru calcul are o deschidere de 40 m a grinzii principale. Aceste elemente sunt de tip grindă plană cu zăbrele și au o înălțime maximă la mijlocul deschiderii de 3,50 m.

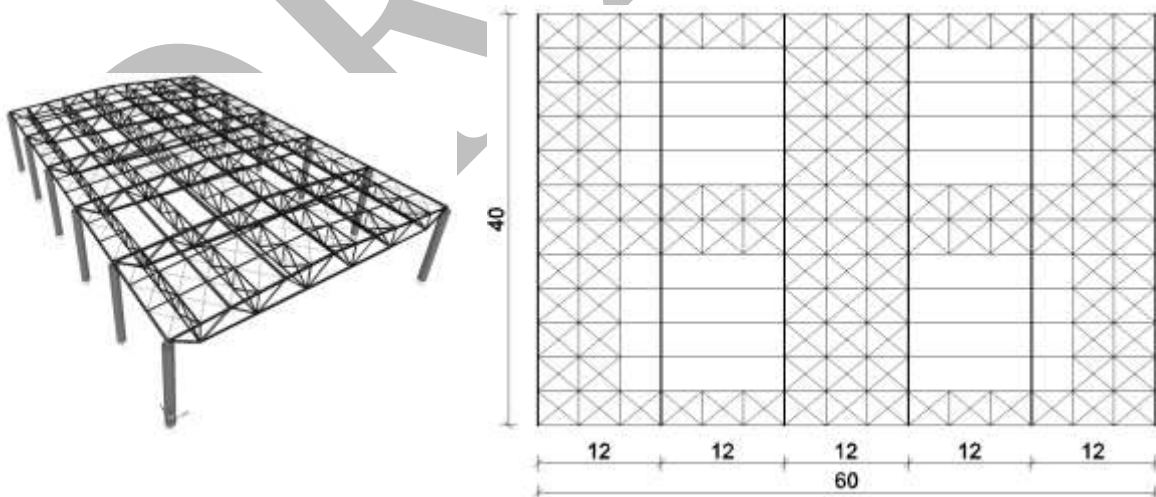


Fig. 4.6 Structura cu deschidere de 40m (Str40m)

Cele șase grinzi principale sunt dispuse la o distanță de 12,00 m una față de cealaltă. Rigidizarea pe direcție longitudinală se face cu ajutorul unor grinzi zăbrelite cu o deschidere de 12,00 m, care reazemă pe grinzile principale în nodurile acestora. Rigidizarea în plan a acoperișului se face cu ajutorul tiranților a căror dispunere se poate observa în Fig. 4.6. Cei

doisprezece stâlpi de susținere a acoperișului sunt realizați din beton de clasă C25/30, iar secțiunea lor este de formă circulară, cu un diametru de 110 cm. Aceștia se consideră a fi încastrați în fundații, iar la structura de referință, prinderea elementelor acoperișului de stâlpii de susținere se consideră a fi articulată.

- **Caracteristicile sistemului de izolare**

În mod clasic, izolarea în bază presupune dispunerea unor elemente de izolare seismică, active sau pasive la nivelul de legătură a suprastructurii cu infrastructura. Soluția propusă pentru acest studiu presupune doar decuplarea structurii acoperișului prin amplasarea izolatorilor pasivi la nivelul superior al stâlpilor de susținere a acestuia.

Pentru fiecare tip de structură analizată s-au implementat trei sisteme separate de izolare. Fiecare dintre aceste sisteme este bine documentat în literatura de specialitate, utilizarea lor este larg răspândită, iar ele și-au dovedit eficiența de-a lungul timpului. Utilizarea și prescripțiile pentru aceste tipuri de izolatori pasivi sunt prevăzute în normele europene EN 15129- Dispozitive antiseismice și EN 1337-2 pentru izolatori cu frecare, respectiv EN 1337-3 pentru izolatori elastomerici din cauciuc.

Pentru primul mod de izolare s-a adoptat soluția utilizării izolatorilor din cauciuc cu amortizare mare (High Damping Rubber Bearings-HDRB), în paralel cu izolatorii simpli cu frecare (PF), elemente de tip *pot bearings* multidirecționale, caracterizate printr-un coeficient de frecare foarte mic. În urma consultărilor pe care autorul tezei le-a avut cu echipa de proiectare a producătorului dispozitivelor de izolare, s-a convenit ca în calculul numeric să nu se negligeze capacitatea de disipare a energiei pe care o au echipamentele de tip *pot bearing*. Pentru a face referire la acest sistem de izolare, în continuare se va folosi acronimul HDRB.

Pentru dimensionarea izolatorilor s-a pornit de la o perioadă țintă a sistemului de izolare. Astfel, pentru izolarea structurii cu sisteme de tip HDRB și LRB, utilizând formula (2.14) prezentată în capitolul 2, s-a calculat o rigiditate efectivă  $k_{eff}$  a sistemului de izolare egală cu 2,88 kN/mm. În continuare, s-a optat pentru utilizarea unui număr de 4 izolatori de tip HDRB, suficient pentru a satisface condițiile de izolare impuse. S-a studiat modul de amplasare a izolatorilor, astfel încât să nu fie afectate modurile fundamentale de vibrație ale structurii, iar efectele datorate torsiunii să fie minime.

**Tabel 4.2**

Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str40m

Tip izolator	Diametru cauciuc	Înălțime totală	Dimensiune totală în plan	Diametru miez plumb	Grosime strat cauciuc	Factor de formă	Rigiditate verticală	Rigiditatea efectivă orizontală	Forța de curgere
	D	H <sub>tot</sub>	LxL	d <sub>plumb</sub>	t <sub>r</sub>	S	K <sub>v</sub>	k <sub>eff</sub>	F <sub>y</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]
HDRB	950	561	1000x1000	-	396	21.4	972	0.72	120
LRB	750	600	800x800	110	384	22.6	519	0.7	155

Același număr de izolatori și aceeași amplasare au fost utilizate și în cazul izolării cu dispozitive de tip LRB. Modul de dispunere a dispozitivelor de tip HDRB și LRB pentru Str40m este prezentat în *Fig. 4.8 b*). Alegerea sistemelor de izolare și dimensionarea izolatoarelor s-a făcut de către autorul tezei în colaborare cu membri ai biroului de proiectare din cadrul firmei TENSACCAI din Milano, care este producător de dispozitive pasive de izolare. Principalele caracteristici pentru izolatoare de tip HDRB și LRB sunt prezentate în tabelul 4.2. Pe baza acestora, au fost calculate restul proprietăților utilizate în programul SAP2000 pentru modelarea acestor elemente.

Pentru situația în care izolarea seismică se face cu ajutorul dispozitivelor de tip pendul cu frecare (Friction Pendulum - FP), s-a considerat pentru aceștia o rază de curbura de 4,00 m și o deplasare de proiectare de 0,458m. Astfel, s-au calculat cu ajutorul relației (2.27) o valoare pentru rigiditatea efectivă a izolatoarelor  $k_{eff}=0,194 \text{ kN/mm}$ . Astfel, pentru acești parametri, se obține conform relației (2.28) o amortizare efectivă a izolatoarelor  $\xi_{eff}=19\%$ .

Pentru o valoare constantă a presiunii dintre suprafața tratată cu politetrafluoren (PTFE sau Teflon) și piesa din oțel, dependența coeficientului de frecare în funcție de viteza de deplasare este dată de ecuația (2.25) prezentată în capitolul 2:

$$\mu_f = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \cdot e^{-\alpha|u|}$$

În urma consultărilor cu producătorul echipamentelor de izolare, s-a ales o valoare pentru parametrul care controlează intensitatea schimbării coeficientului de frecare de la  $\mu_{min}$  la  $\mu_{max}$  de  $\alpha=0,2$ . În acest caz se obțin următoarele valori pentru coeficienții de frecare:



$\mu_{min} = 0,015$  și  $\mu_{max} = 0,055$ . Nu s-a ținut cont de influența temperaturii asupra coeficientului de frecare. Dependența de viteză a coeficientului de frecare este prezentată în figura de mai jos.

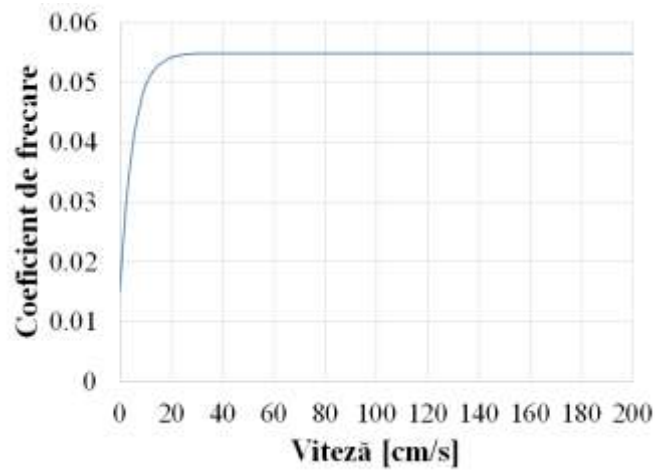


Fig. 4.7 Dependența de viteză a coeficientului de frecare pentru FP

În general, dispozitivele de izolare seismică de tip pendul cu frecare nu pot fi utilizate în paralel cu alte tipuri de asemenea elemente, cum ar fi izolatori PF, HDRB sau LRB și datorită faptului că deplasarea acestora se face și pe verticală, nu doar pe orizontală. Implicit, s-au amplasat izolatori de tip FP în fiecare punct de rezemare, conform Fig. 4.8 a.

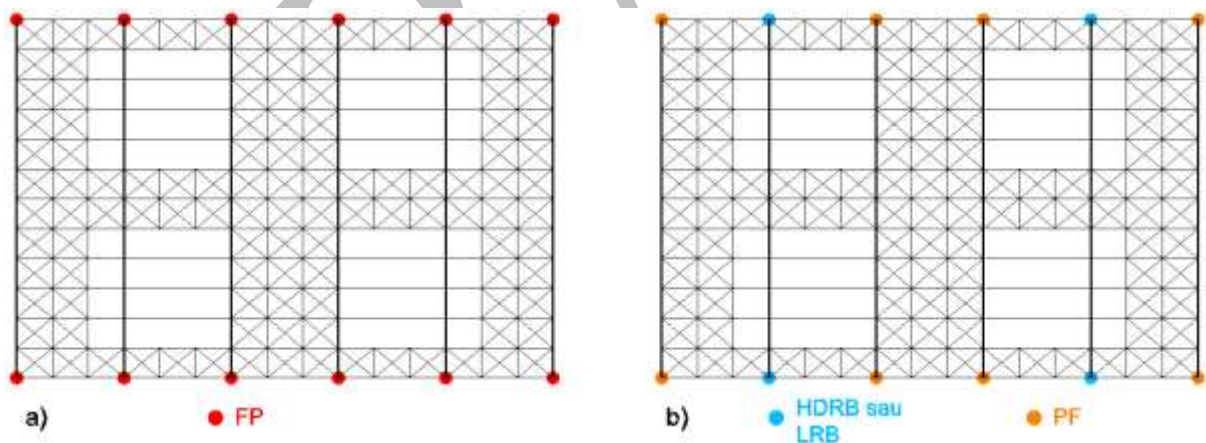
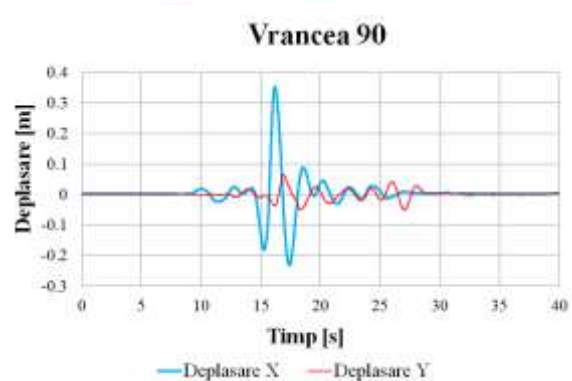
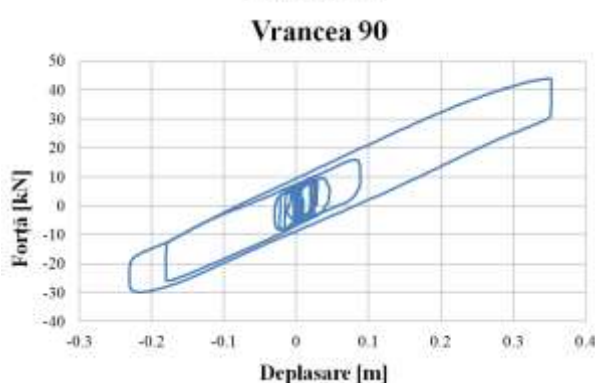
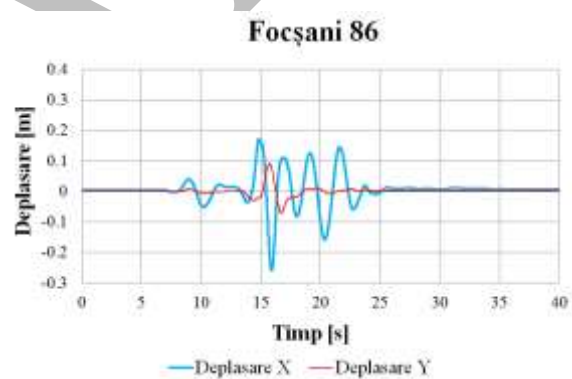
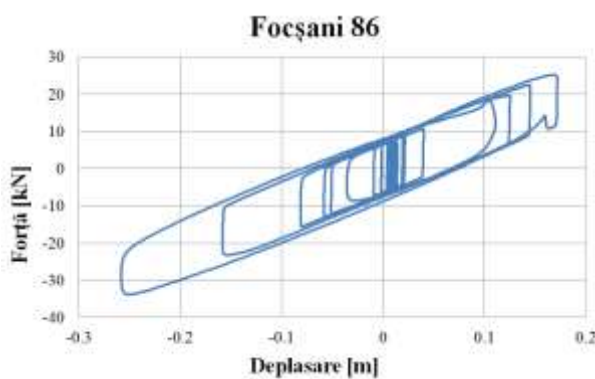
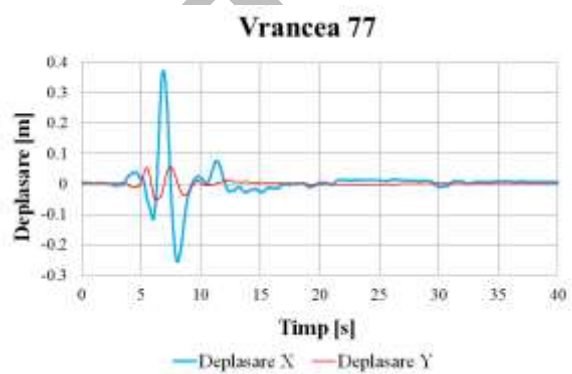
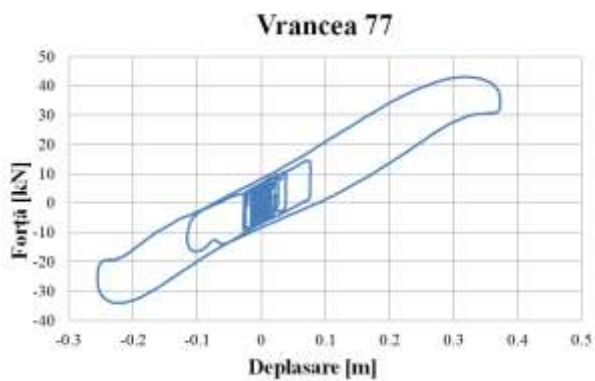


Fig. 4.8 Dispunerea în plan a izolatoarelor în cazul structurii cu deschidere de 40 m

Indiferent de modul de izolare considerat, s-a stabilit ca poziție pe verticală a izolatoarelor, capătul superior al stâlpilor de beton armat, în nodurile care fac legătura dintre aceștia și structura acoperișului.

- **Răspunsul seismic al structurii Str40m**

Sunt prezentate curbele histeretice forță-deplasare la nivelul izolatorului, care sunt relevante în aprecierea capacității de disipare a energiei în fiecare dintre cazurile de mai jos, încărcate pe rând cu cele șapte acțiuni seismice prezentate mai sus. Curbele histeretice prezentate mai jos sunt cele extrase pe direcția cadrului transversal (direcția X conform Fig. 4.5). Sunt relevante, de asemenea, deplasările izolatorului pe cele două direcții și se va urmări ca acestea să nu depășească capacitatea de deplasare prevăzută prin proiectare.



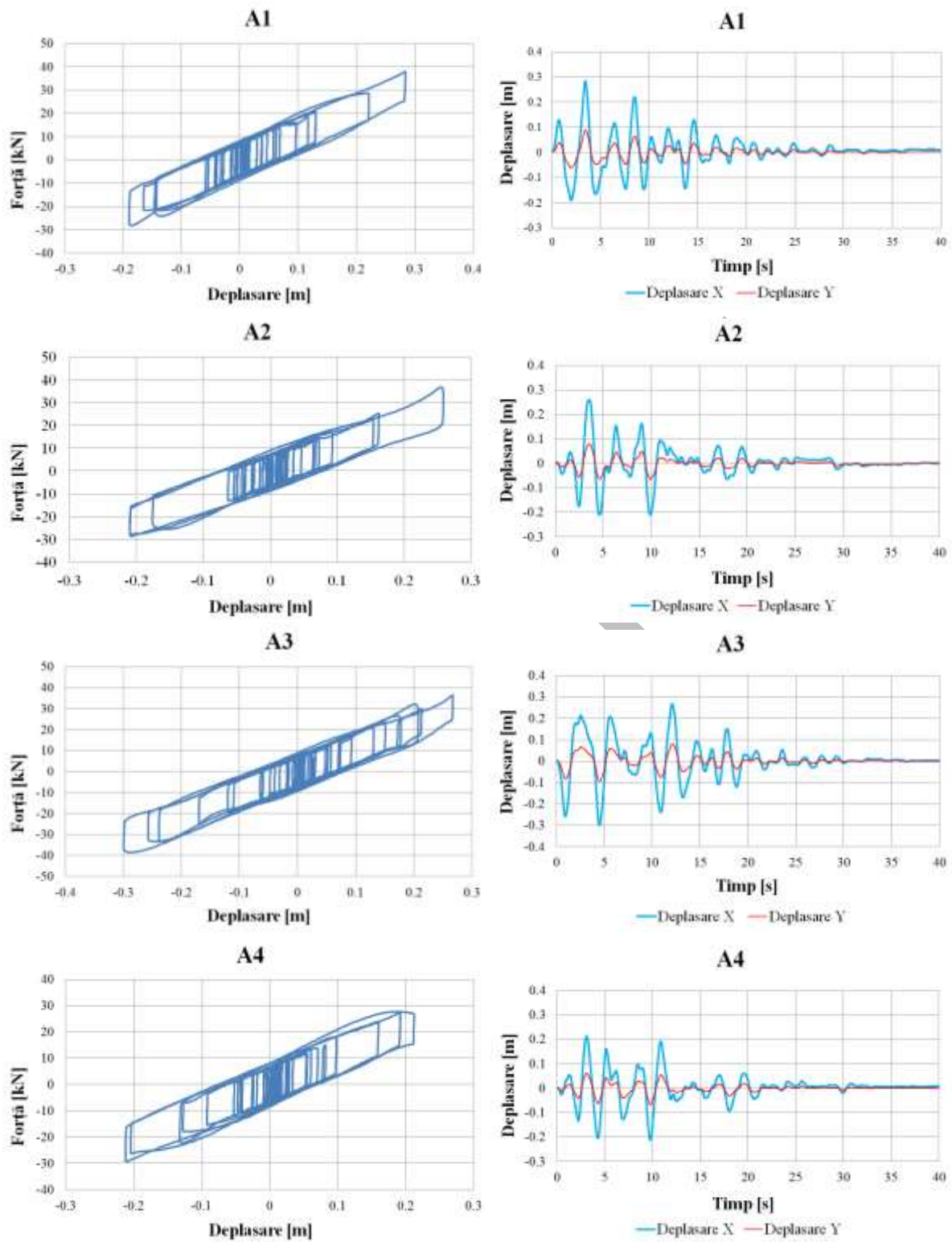
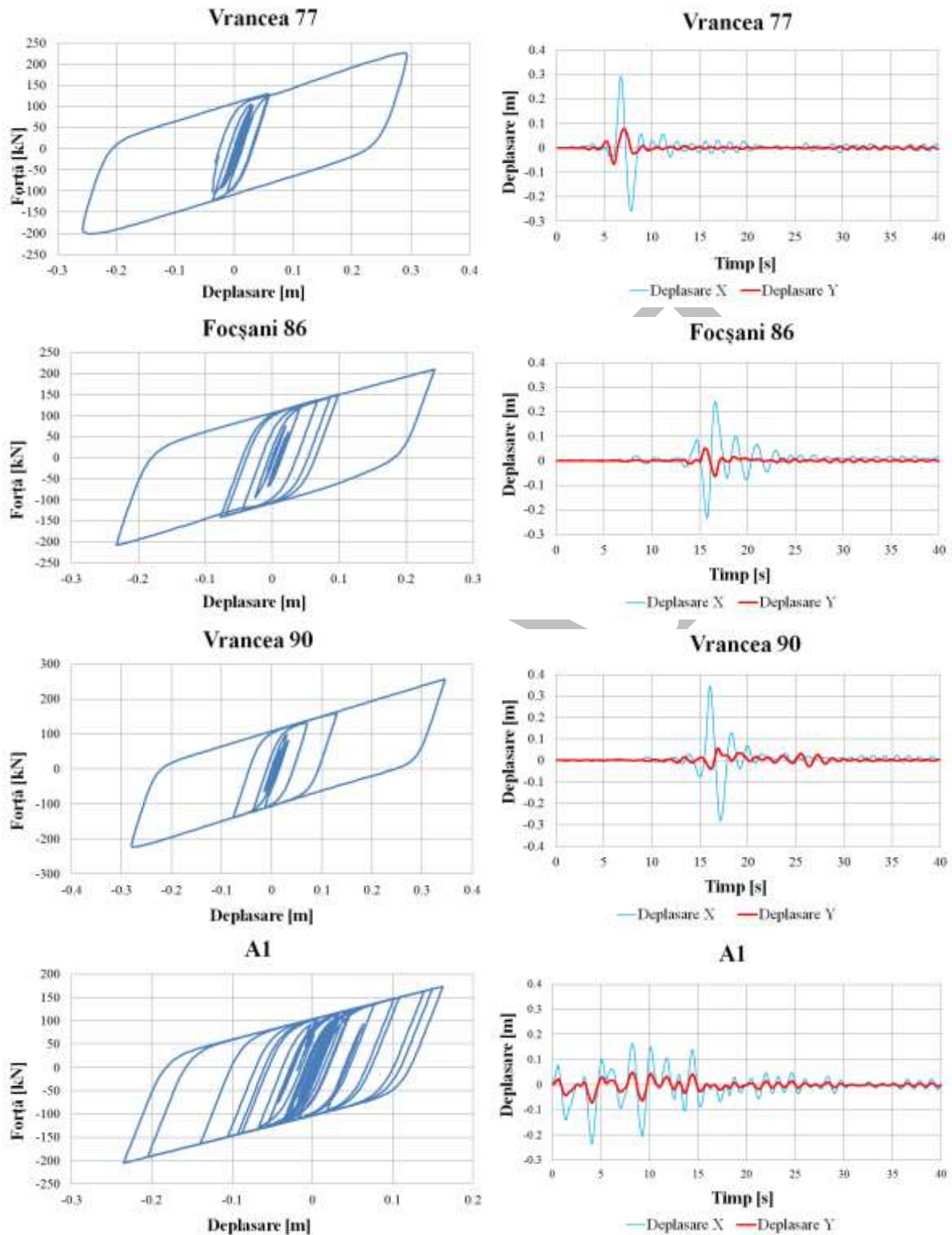


Fig. 4.9 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP

Parametrii amintiți mai sus sunt prezentați în Fig. 4.10 și Fig. 4.11 în cazul utilizării izolatoarelor de tip HDRB, și respectiv LRB.



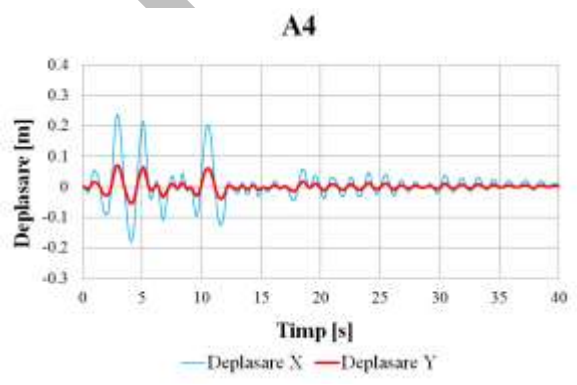
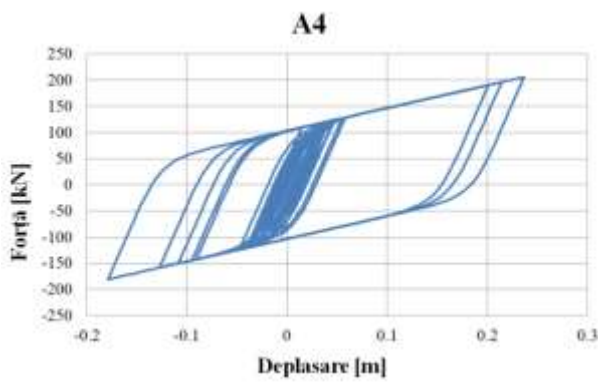
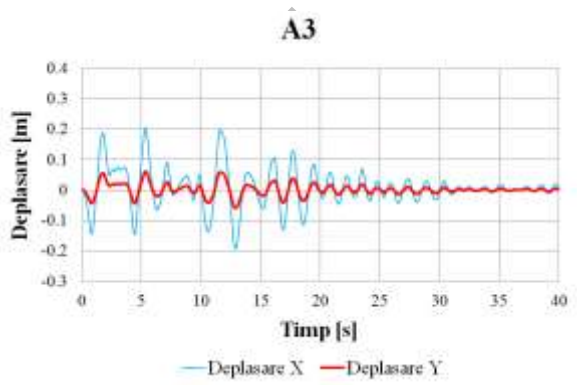
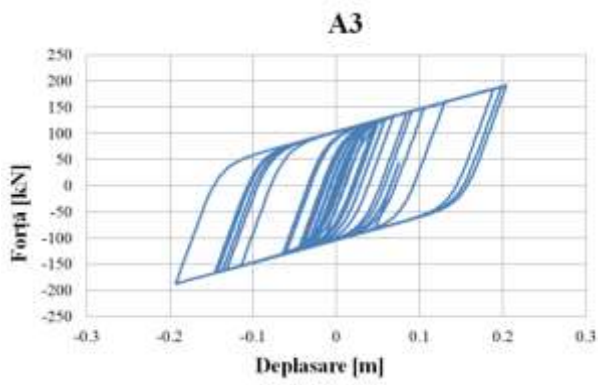
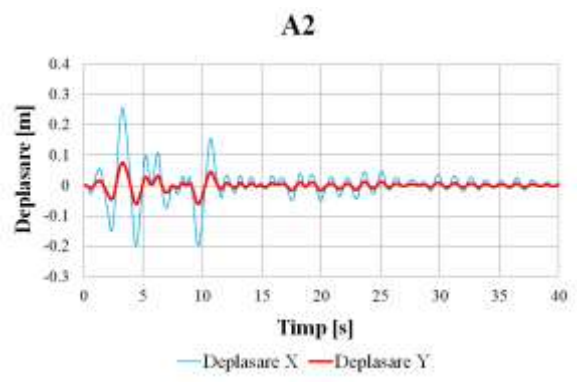
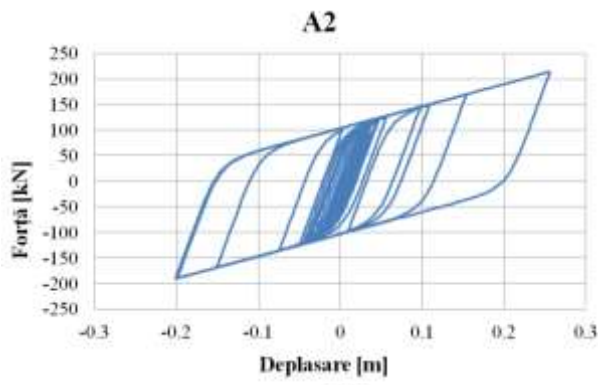
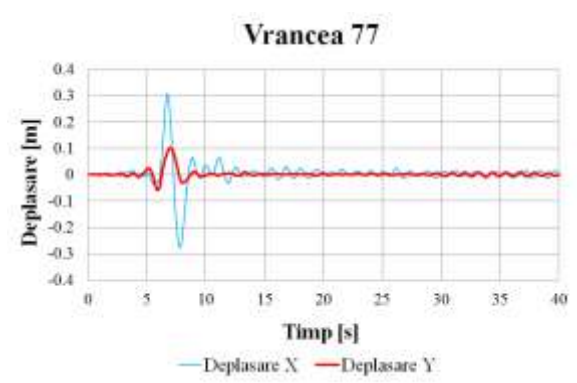
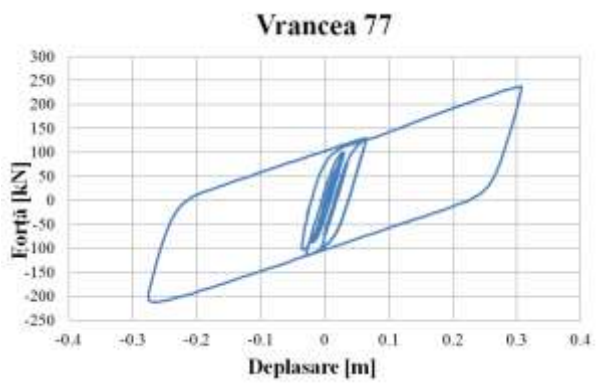
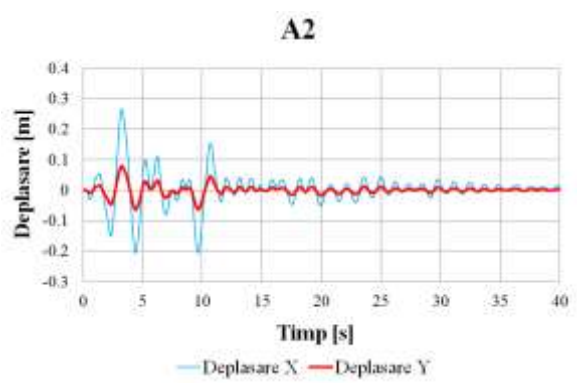
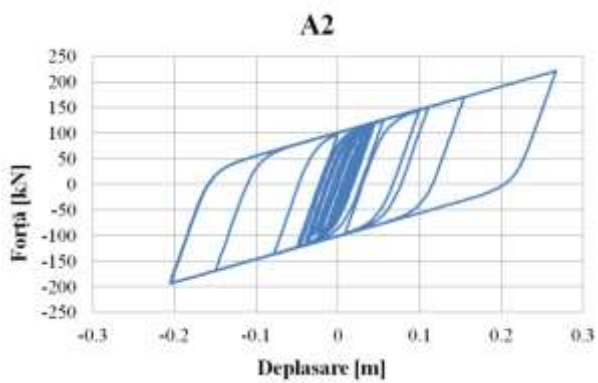
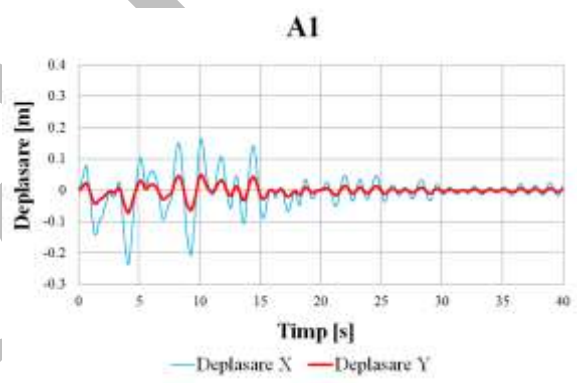
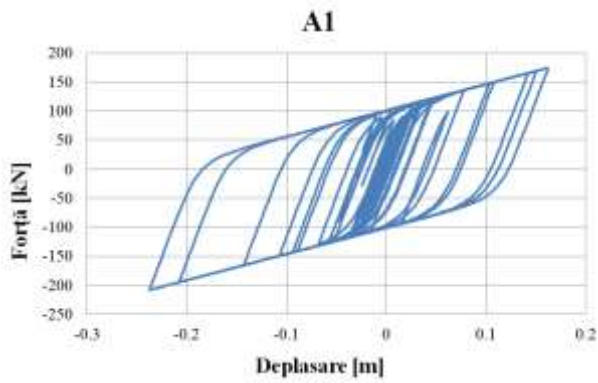
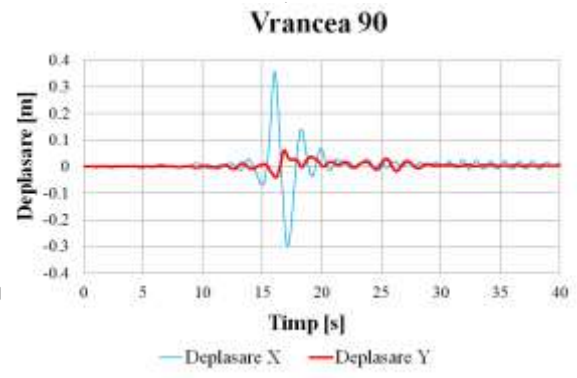
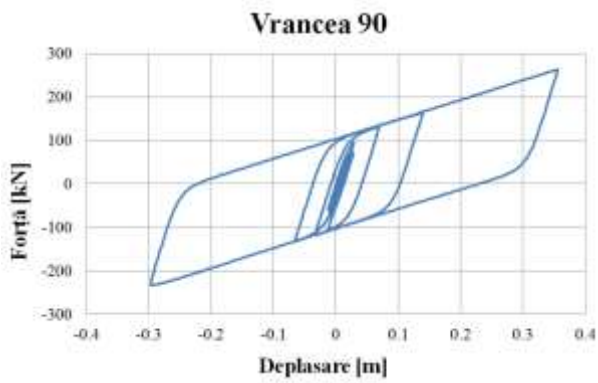
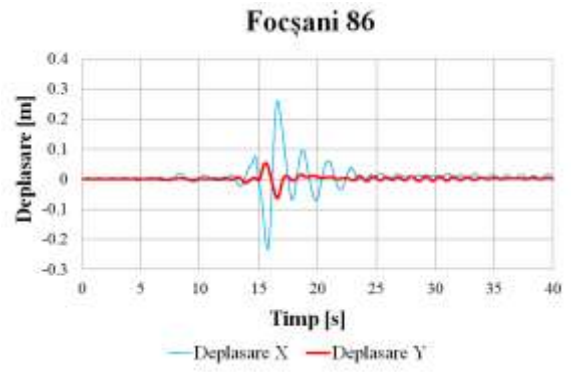
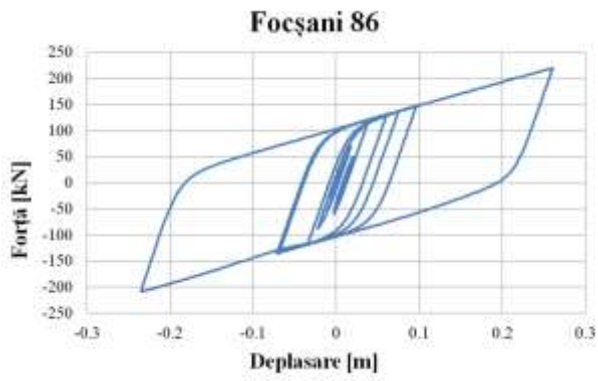


Fig. 4.10 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB





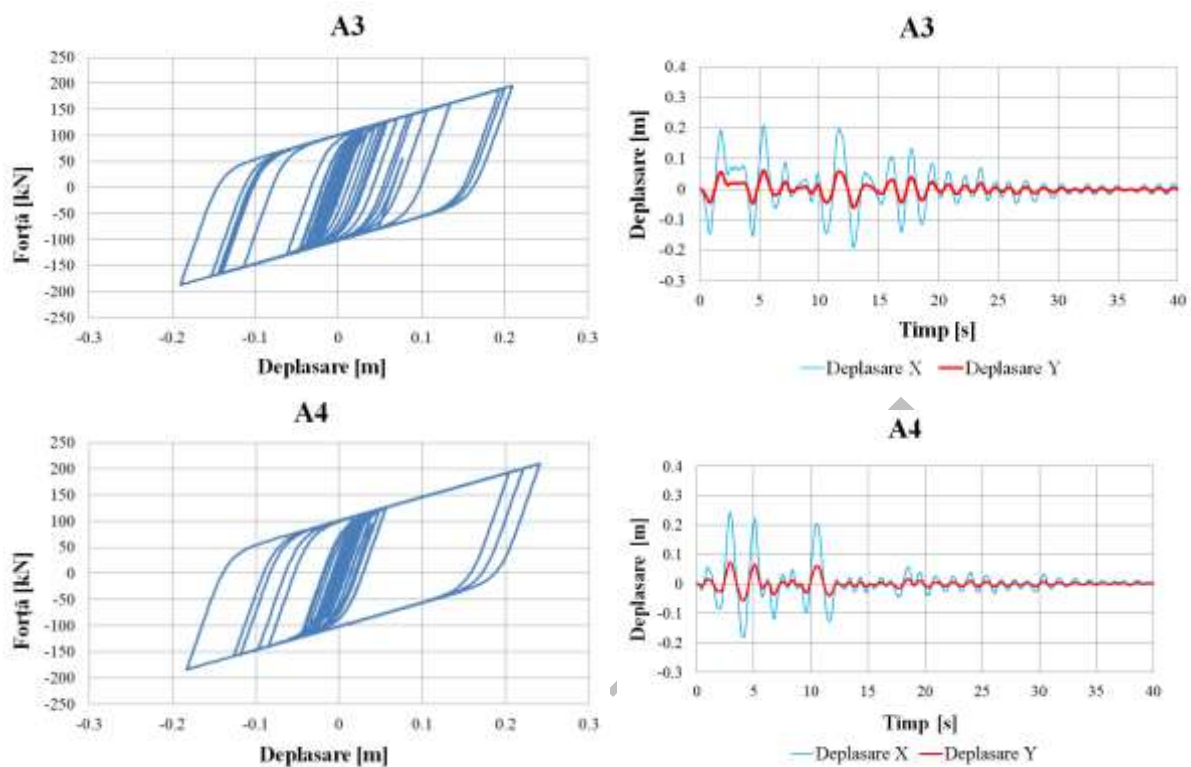


Fig. 4.11 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB

Una dintre cele mai importante consecințe ale izolării seismice este creșterea perioadelor proprii. Acestei modificări de perioadă i se datorează și evoluția celorlalți parametri ai răspunsului seismic, precum accelerația, deplasarea, forța tăietoare de bază.

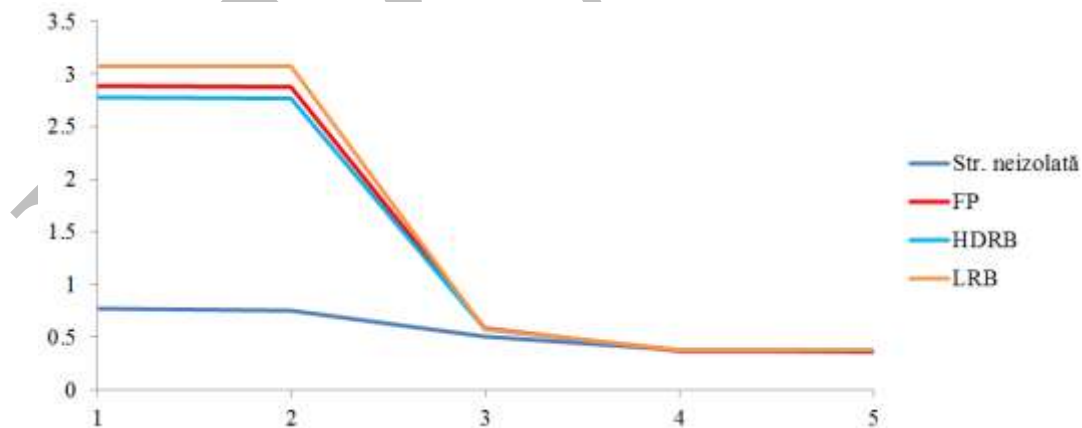


Fig. 4.12 Perioadele proprii de vibrație ale structurii

Unul dintre parametrii studiați a fost accelerația la nivelul acoperișului, deasupra sistemului de izolare. Graficele de mai jos prezintă variația acestor accelerații pe direcția X în cazul acțiunii celor șapte încărcări seismice pentru toate cele patru cazuri studiate.

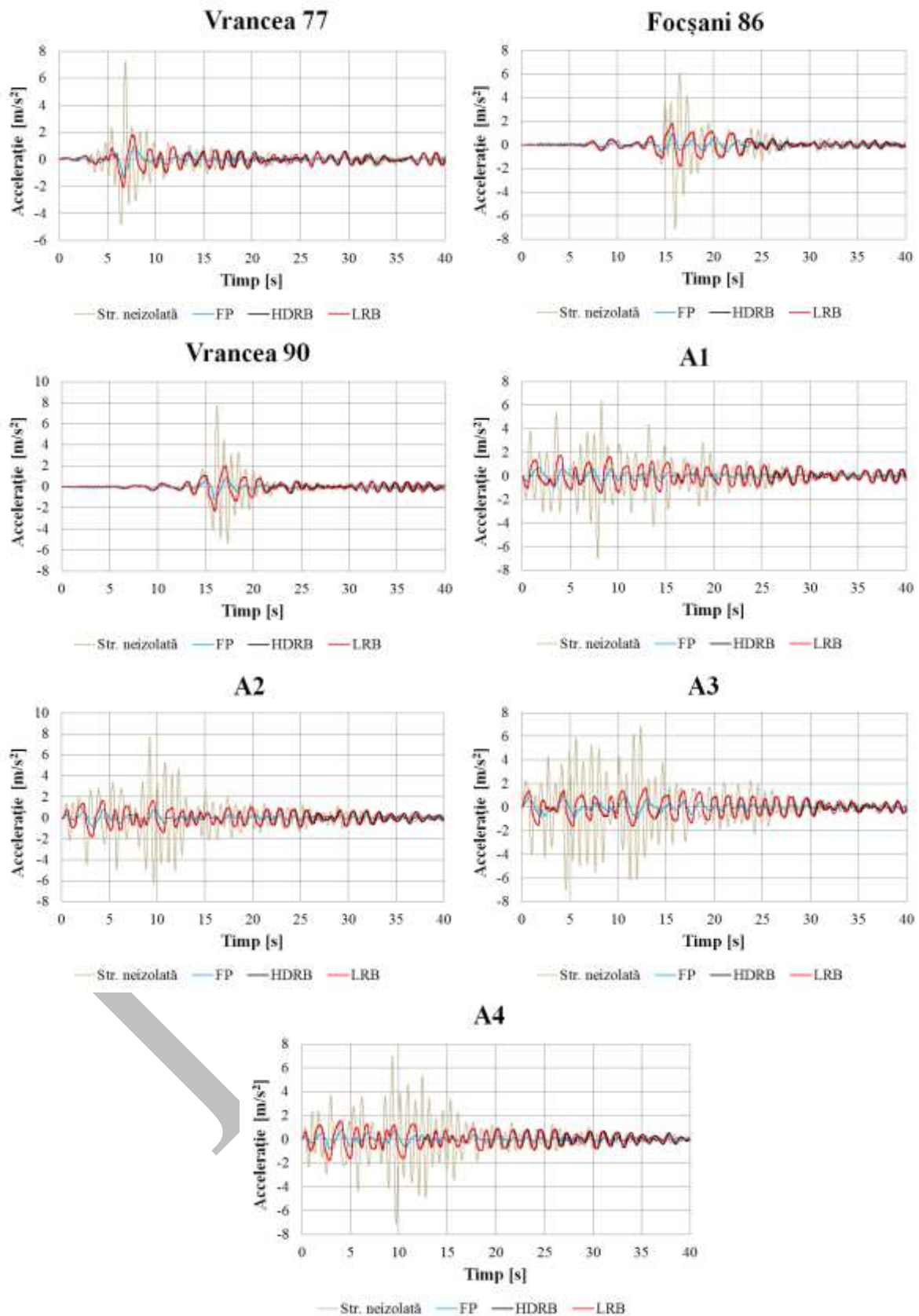


Fig. 4.13 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului

Forța seismică în bază reprezintă unul dintre parametrii studiați pe baza simulărilor efectuate, el fiind unul dintre cei esențiali în evaluarea răspunsului seismic al structurilor



echipate cu izolatori seismici pasivi [107]. Variația acestei forțe pentru fiecare încărcare seismică și pentru fiecare caz este prezentată în figura de mai jos.

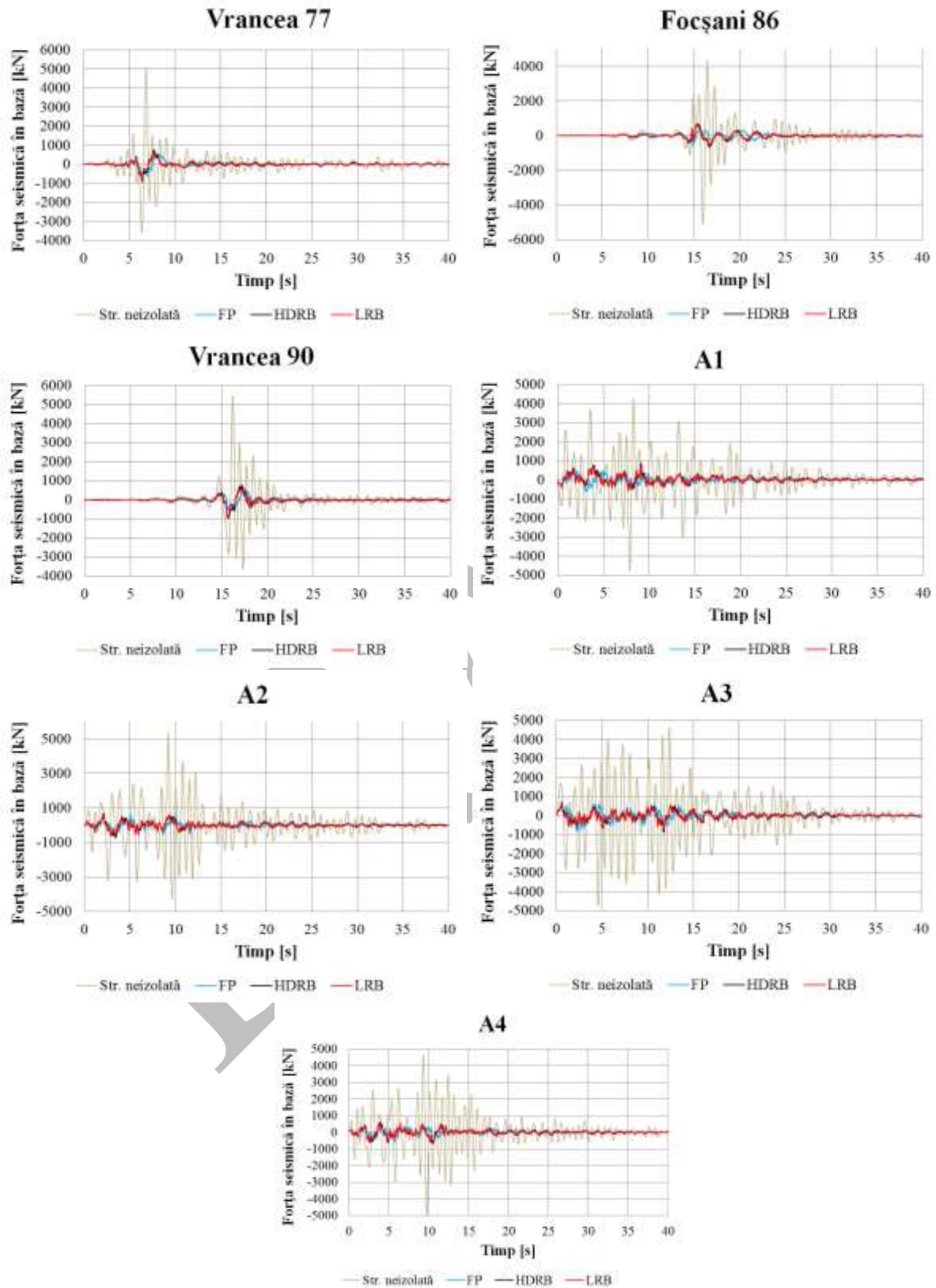


Fig. 4.14 Variația forțelor seismice în bază

Pentru a evalua răspunsul seismic al stâlpilor, autorul consideră oportună studierea unor parametri cum ar fi momentul încovoietor și forța tăietoare care apare pe aceștia la nivelul încastrării în fundații. Astfel, sunt prezentate comparativ valorile acestor parametri în tabelele de mai jos.

**Tabel 4.3**

Valorile momentului încovoietor maxim la baza stâlpului pentru Str40m

Acțiune seismică	Moment maxim la baza stâlpului (kNm)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	4536	912	2690	1944
Focșani 86	4719	621	2233	1872
Vrancea 90	4848	865	2763	2551
A1	4765	697	2125	1671
A2	4847	636	2356	1914
A3	4679	722	1886	1690
A4	4698	523	2177	1733

**Tabel 4.4**

Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului pentru Str40m

Acțiune seismică	Forța tăietoare maximă la baza stâlpului (kN)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	378	73	215	177
Focșani 86	393	50	179	150
Vrancea 90	404	69	221	204
A1	397	56	170	134
A2	403	51	189	154
A3	390	58	151	121
A4	392	42	175	139

Elementele structurale ale acoperișului au fost dimensionate cu ajutorul modului integrat din programul SAP2000, conform normelor prevăzute în SR EN 1993 (Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel). Pentru elementele care alcătuiesc talpa superioară și inferioară a grinzilor cu zăbrele principale s-a optat pentru alegerea secțiunilor dintr-o bază de date care conține profile de tip HEA. Secțiunile montanților și ale diagonalelor grinzilor principale sunt realizate din profile de tip țevă dreptunghiulară. S-a făcut dimensionarea elementelor de oțel ale acoperișului pentru structura de bază și pentru fiecare tip de izolare în parte. Soluțiile finale s-au verificat și din punctul de vedere al săgeții totale. Rafinarea

modelului și calculul efectiv al secțiunilor s-a făcut utilizând rezultatele analizei spectrale, fără a ține cont de rezultatele analizei de tip *time-history* și s-a urmărit ca structura de oțel a acoperișului să rămână în domeniul elastic de comportare. Greutățile structurii acoperișului obținute în urma acestei dimensionări sunt prezentate în tabelul de mai jos.

**Tabel 4.5**

Greutatea structurii acoperișului pentru Str40m

	Str. neizolată	Tipul de izolare		
		FP	HDRB	LRB
Greutate structură metalică acoperiș (tone)	117.05	113.32	113.12	113.24

#### 4.4 Structură cu deschidere de 60 m (Str60m)

- **Descrierea structurii**

Cea de-a doua structură studiată are deschiderea grinzii principale de 60 m, iar înălțimea maximă la mijlocul deschiderii este de 3,50 m. Cele șase grinzi principale sunt dispuse la o distanță de 12,00 m una față de cealaltă, ca și în cazul structurii cu deschidere de 40 m. Rigidizarea pe direcție longitudinală se face cu ajutorul unor grinzi cu zăbrele cu o deschidere de 12,00 m, care descarcă pe grinzile principale, și cu ajutorul panelor. Rigidizarea în plan a acoperișului se face cu ajutorul tiranților a căror dispunere se poate observa în Fig. 4.15. Stâlpii de susținere a acoperișului sunt în număr de 12 și sunt realizați din beton de clasă C25/30, iar secțiunea lor este de formă circulară, cu diametrul de 130 cm.

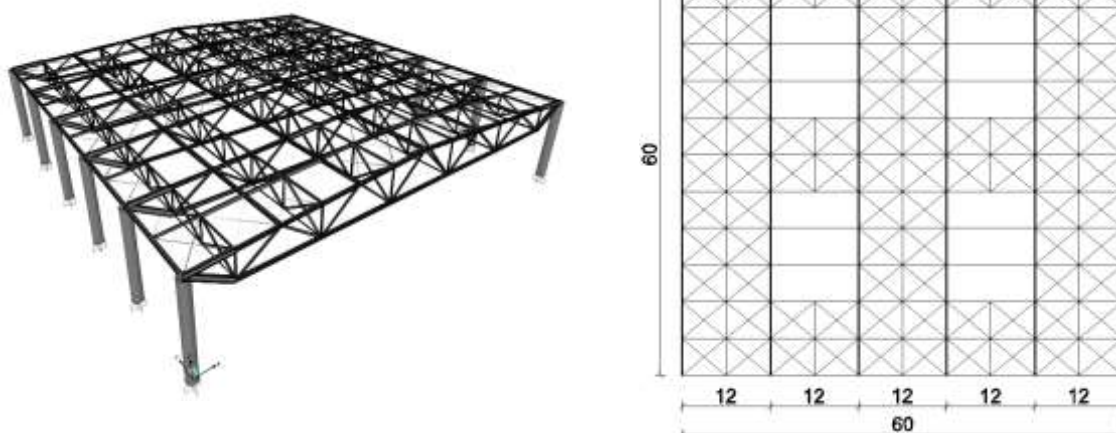


Fig. 4.15 Structura cu deschidere de 60m (Str60m)

- **Caracteristicile sistemului de izolare**

În cazul structurii cu deschidere de 60 m (Str60m) s-au ales pentru decuplarea elementelor acoperișului de stâlpii de beton aceleași sisteme de izolare ca și în cazul Str40m. S-au folosit izolatori de tip pendul cu frecare pentru primul caz, izolatori de cauciuc HDRB în combinație cu elemente de tip PF pentru al doilea caz și izolatori din cauciuc cu miez de plumb LRB în paralel cu elemente de tip PF pentru cel de-al treilea. Perioada țintă aleasă pentru sistemul de izolare în cazul utilizării HDRB și LRB este de 1,5s. S-a utilizat un număr de patru izolatori de cauciuc pentru fiecare caz, iar restul elementelor sunt de tip PF. Dispunerea acestora s-a făcut conform Fig. 4.16 b). Rigiditatea efectivă  $k_{eff}$  a sistemului de izolare a fost calculată ca fiind de 3,18 kN/mm.

**Tabel 4.6**

Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str60m

Tip izolator	Diametru cauciuc	Înălțime totală	Dimensiune totală în plan	Diametru miez plumb	Grosime strat cauciuc	Factor de formă	Rigiditate verticală	Rigiditatea efectivă orizontală	Forța de curgere
	D	H <sub>tot</sub>	LxL	d <sub>plumb</sub>	t <sub>r</sub>	S	K <sub>v</sub>	k <sub>eff</sub>	F <sub>y</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]
HDRB	950	549	1000x1000	-	363	21.4	1060	0.78	129
LRB	750	645	800x800	115	344	22.6	576	0.8	170

Pentru situația în care izolarea seismică se face cu ajutorul dispozitivelor de tip pendul cu frecare (Friction Pendulum - FP), s-a considerat pentru aceștia o rază de curbura de 4,00 m. Astfel, s-a calculat cu ajutorul relației (2.27) o valoare pentru rigiditatea efectivă a izolatorului  $k_{eff}=0,227 \text{ kN/mm}$ . Astfel, pentru acești parametri, se obține conform relației (2.28) o amortizare efectivă a izolatorului  $\xi_{eff}=19\%$ . În urma consultărilor cu producătorul echipamentelor de izolare, s-a ales o valoare pentru parametrul care controlează intensitatea schimbării coeficientului de frecare de la  $\mu_{min}$  la  $\mu_{max}$  de  $\alpha=0,2$ . Prin urmare, se obțin următoarele valori pentru coeficienții de frecare la viteză minimă și maximă a izolatorului:  $\mu_{min} = 0,015$  și  $\mu_{max} = 0,055$ . Valoarea parametrului  $\alpha$  care controlează intensitatea schimbării coeficientului de frecare între valoarea minimă și maximă este 0,2, iar dependența de viteză a coeficientului de frecare este prezentată în Fig. 4.7. Izolatorii de tip FP au fost

dispuși în fiecare punct de reazem al structurii metalice pe stâlpii de beton, conform Fig. 4.16 a).

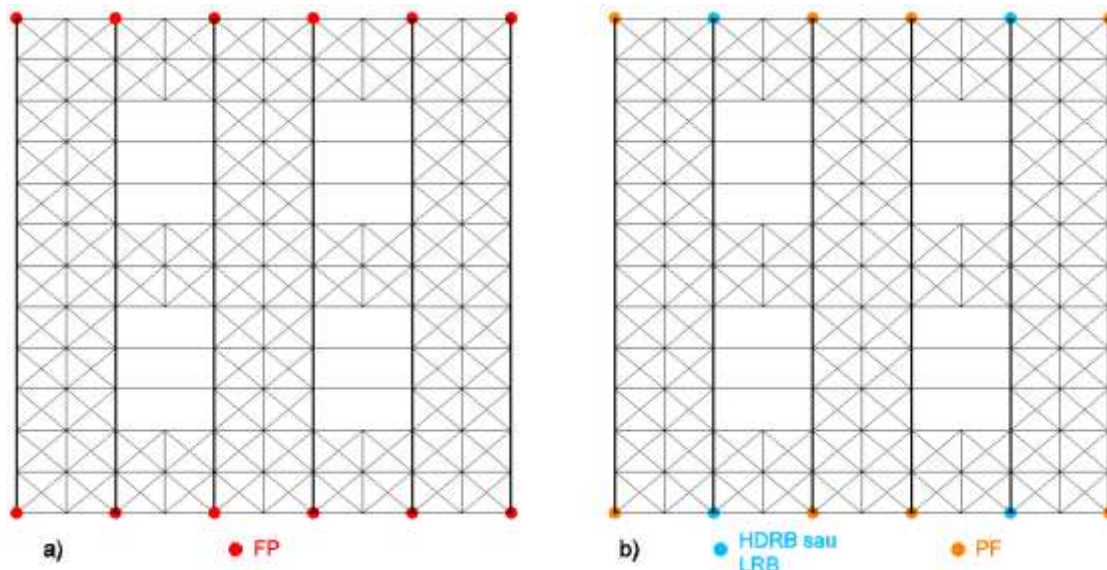
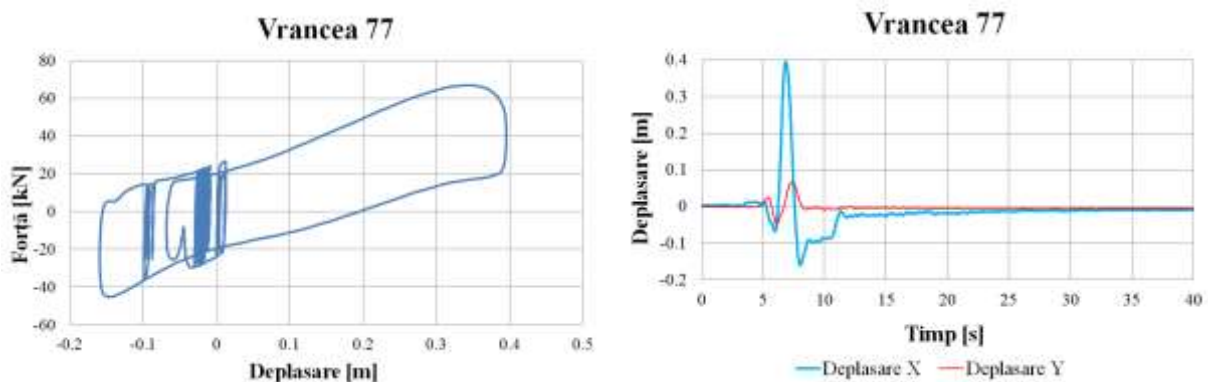
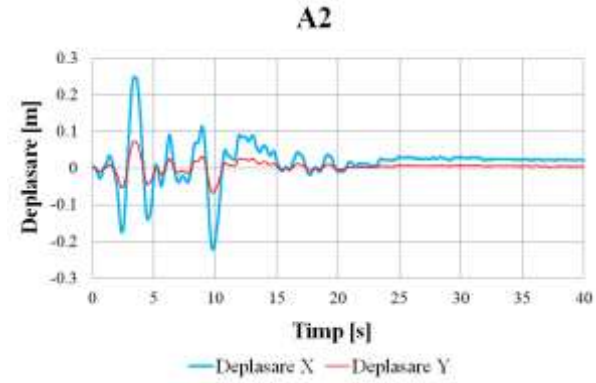
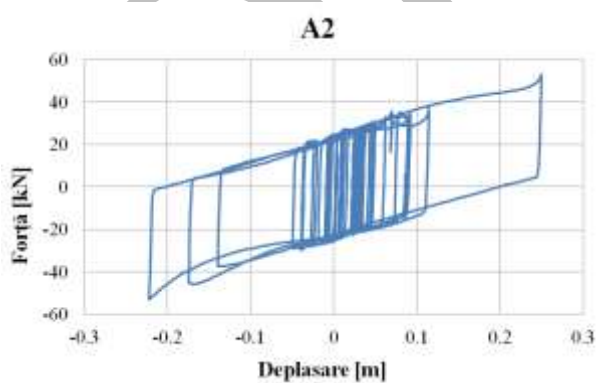
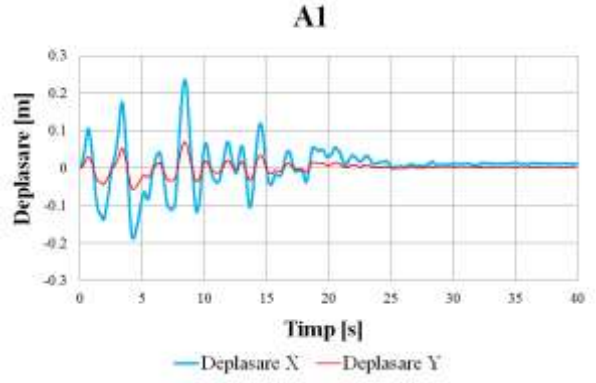
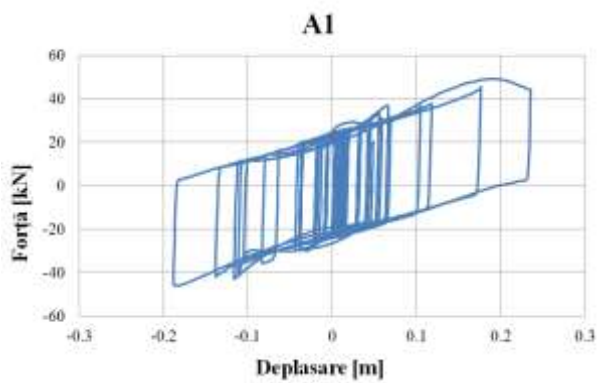
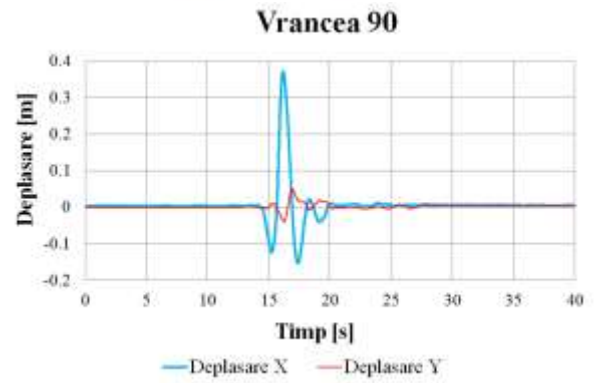
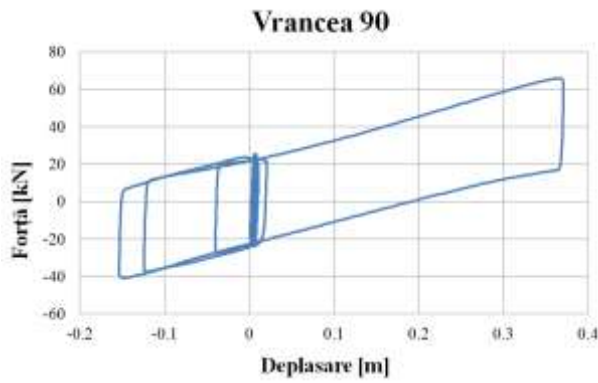
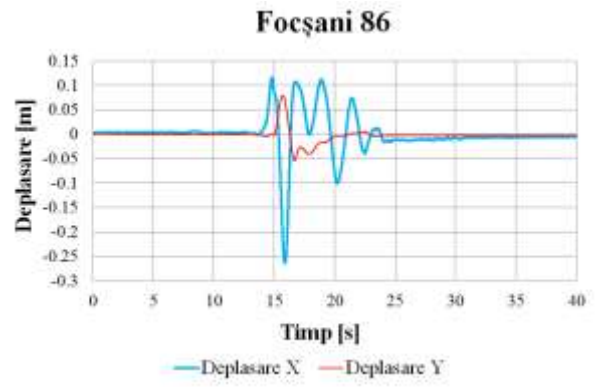
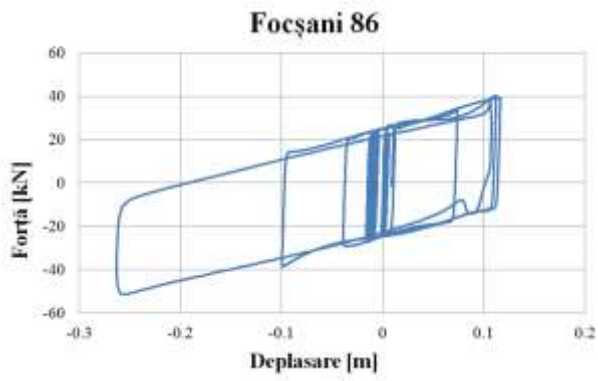


Fig. 4.16 Dispunerea în plan a izolatorilor în cazul structurii cu deschidere de 60 m

• **Răspunsul seismic al structurii Str60m**

Figura de mai jos prezintă curbele histeretice forță-deplasare la nivelul izolatorului și răspunsul în deplasări a structurii cu deschidere de 60 m, echipate succesiv cu cele trei tipuri de izolare seismică precizate și supuse celor șapte cutremure propuse pentru actualul studiu. Se urmărește ca deplasările maxime ale izolatorului să nu depășească valorile calculate și specificate de către producător.





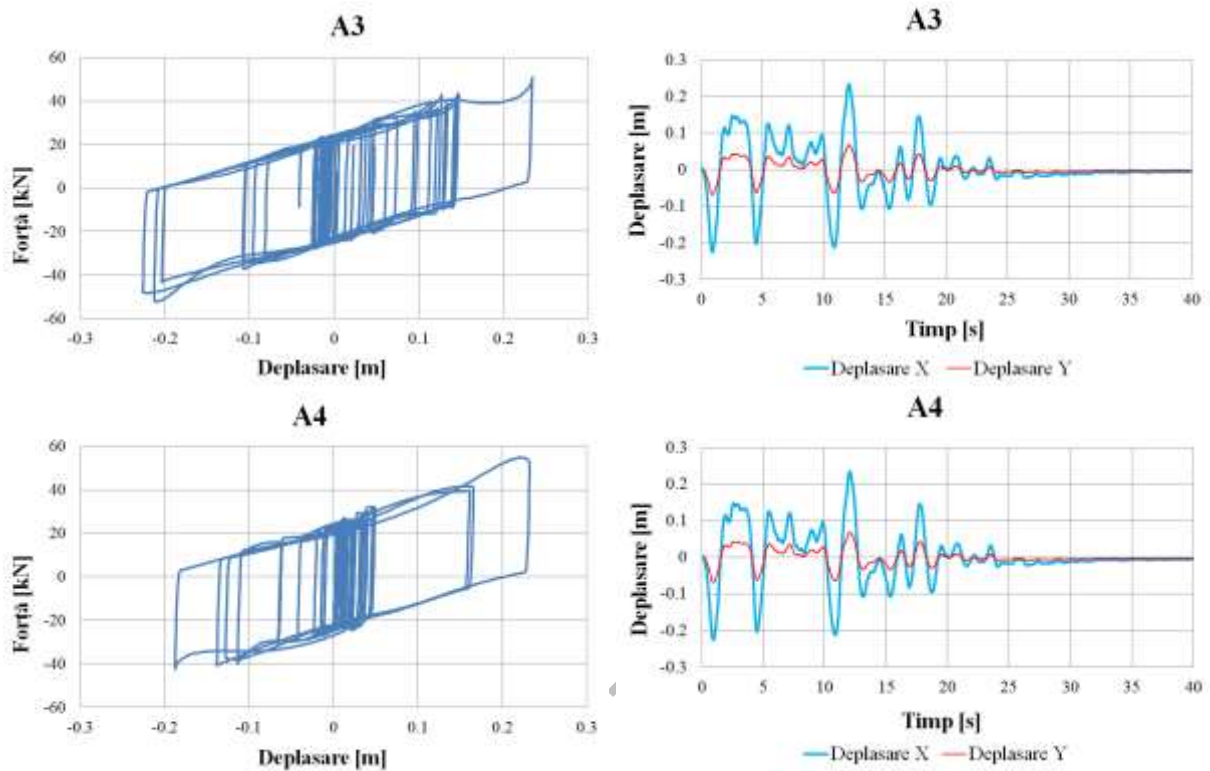
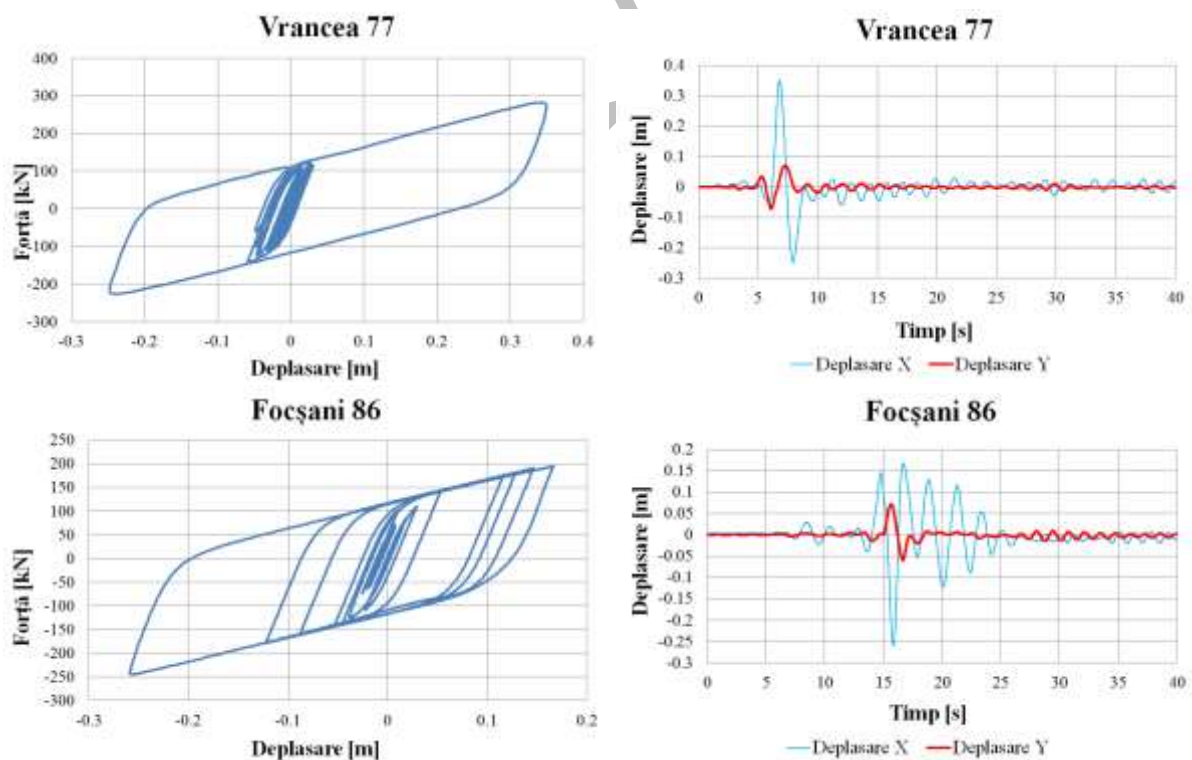
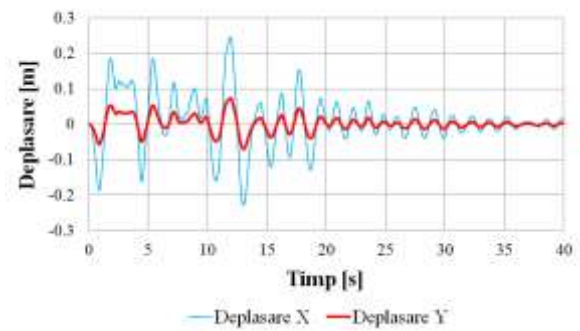
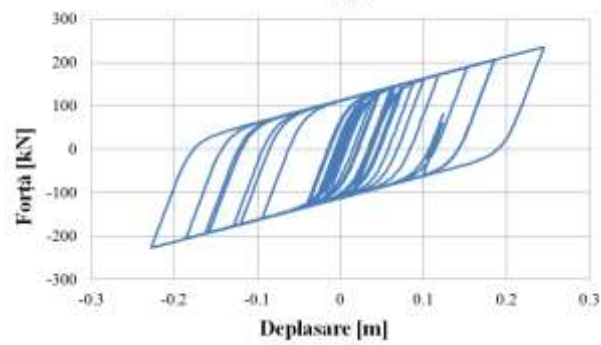
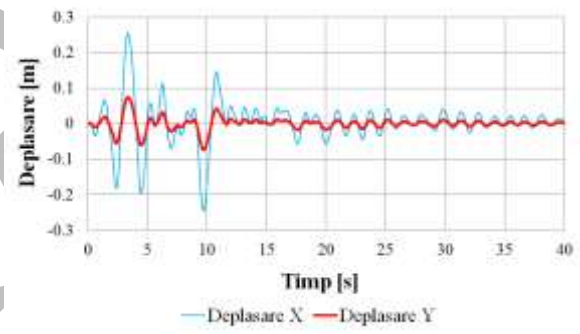
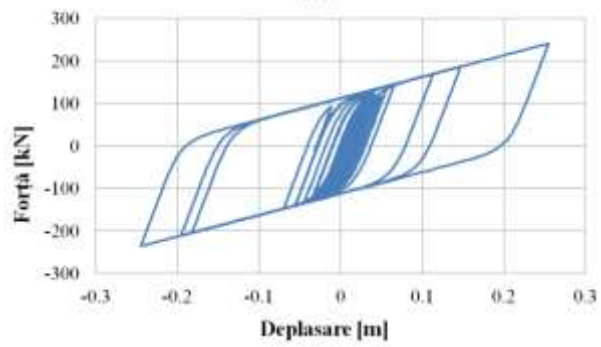
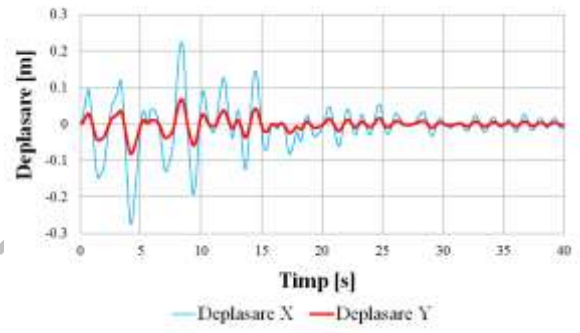
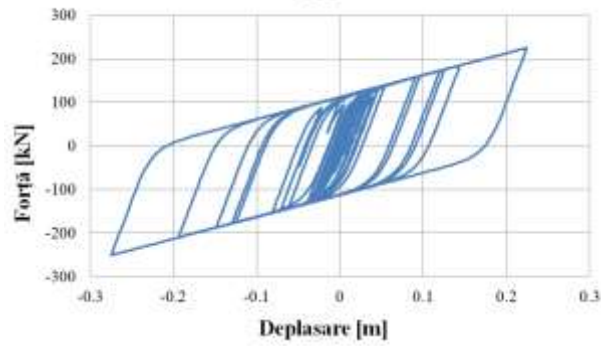
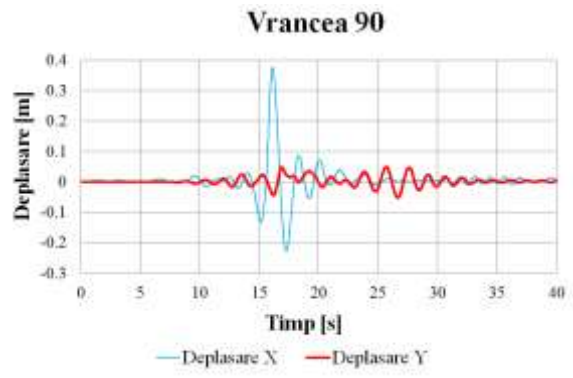
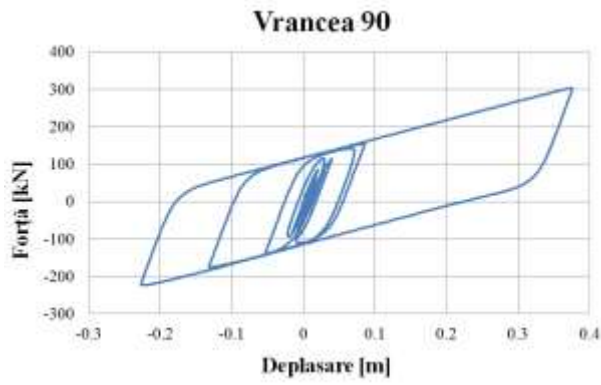


Fig. 4.17 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP

Graficele expuse în figura de mai jos prezintă relațiile forță-deplasare pe direcția X și deplasările maxime ale izolatorului atât pe direcția X, cât și pe Y, în cazul în care structura este echipată cu sisteme de tip HDRB.







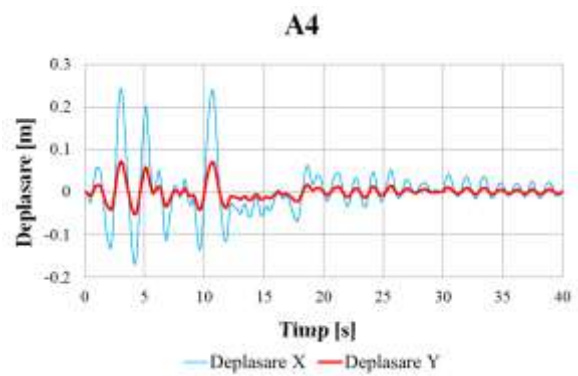
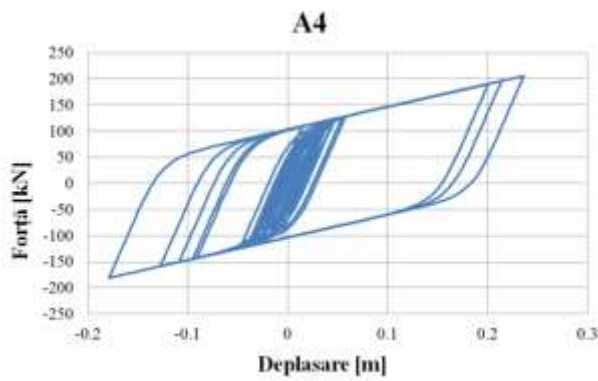
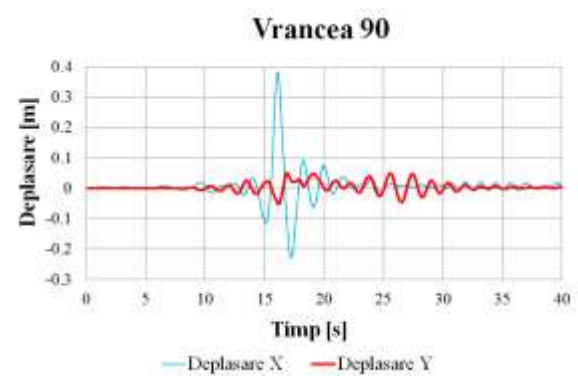
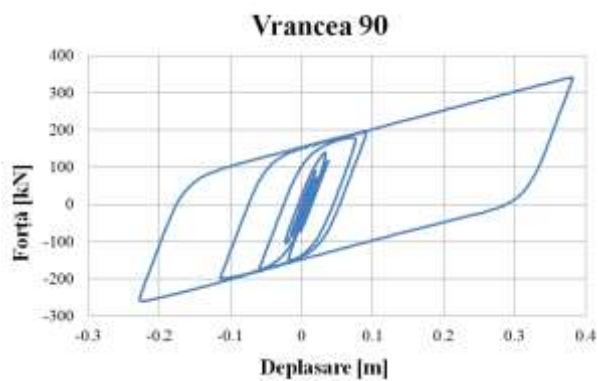
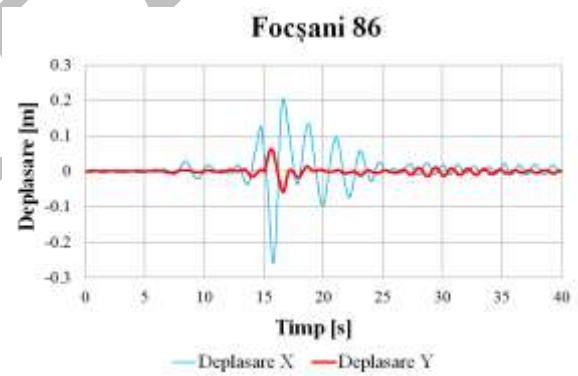
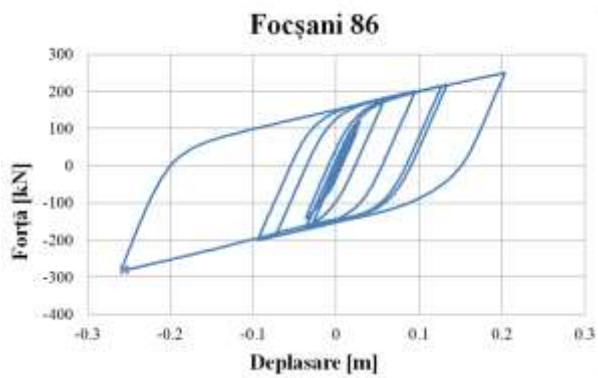
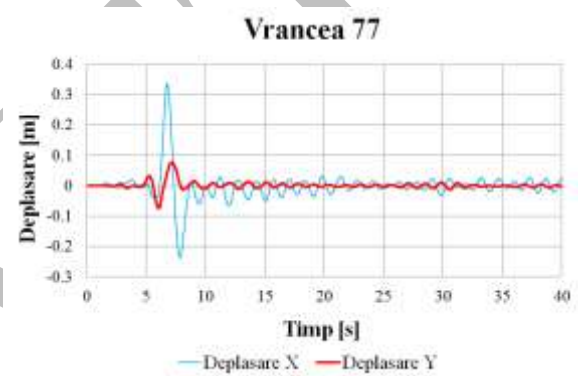
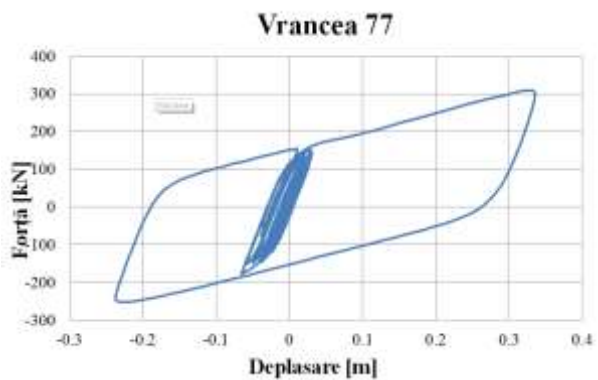


Fig. 4.18 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB

Pentru cazul utilizării izolatorilor de tip LRB, curbele histeretice și deplasările la nivelul izolatorului pe cele două direcții sunt prezentate în Fig. 4.19.



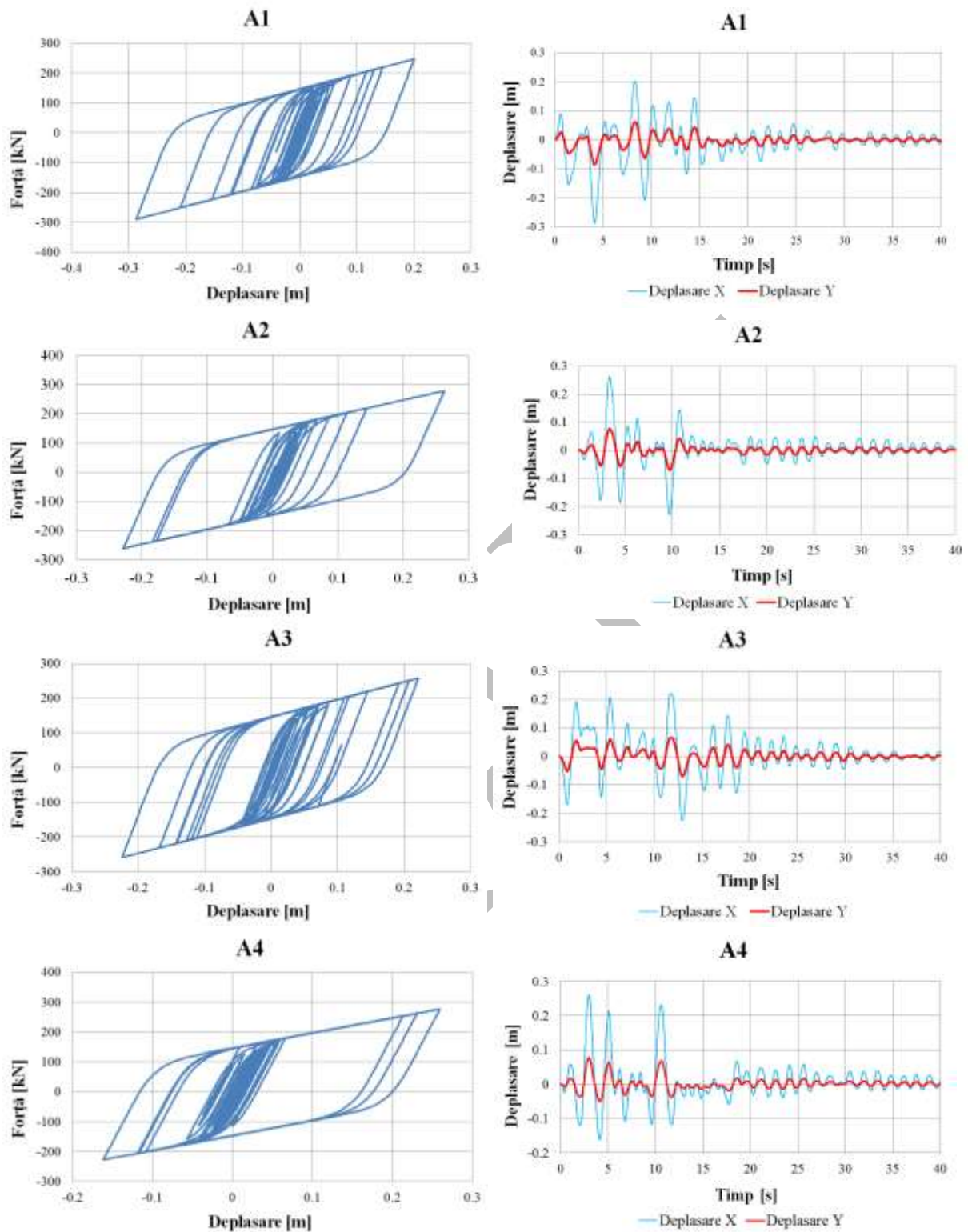


Fig. 4.19 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB

Evoluția perioadelor structurii neizolate și în fiecare caz de izolare în parte este prezentată în graficul de mai jos.

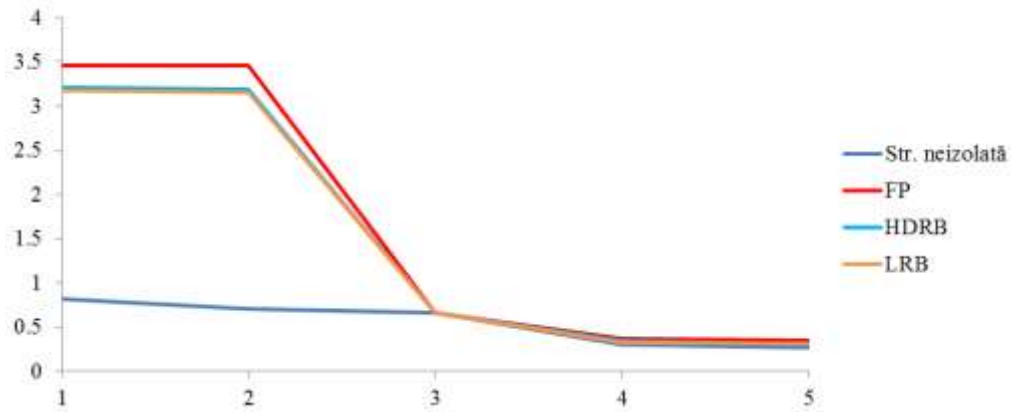
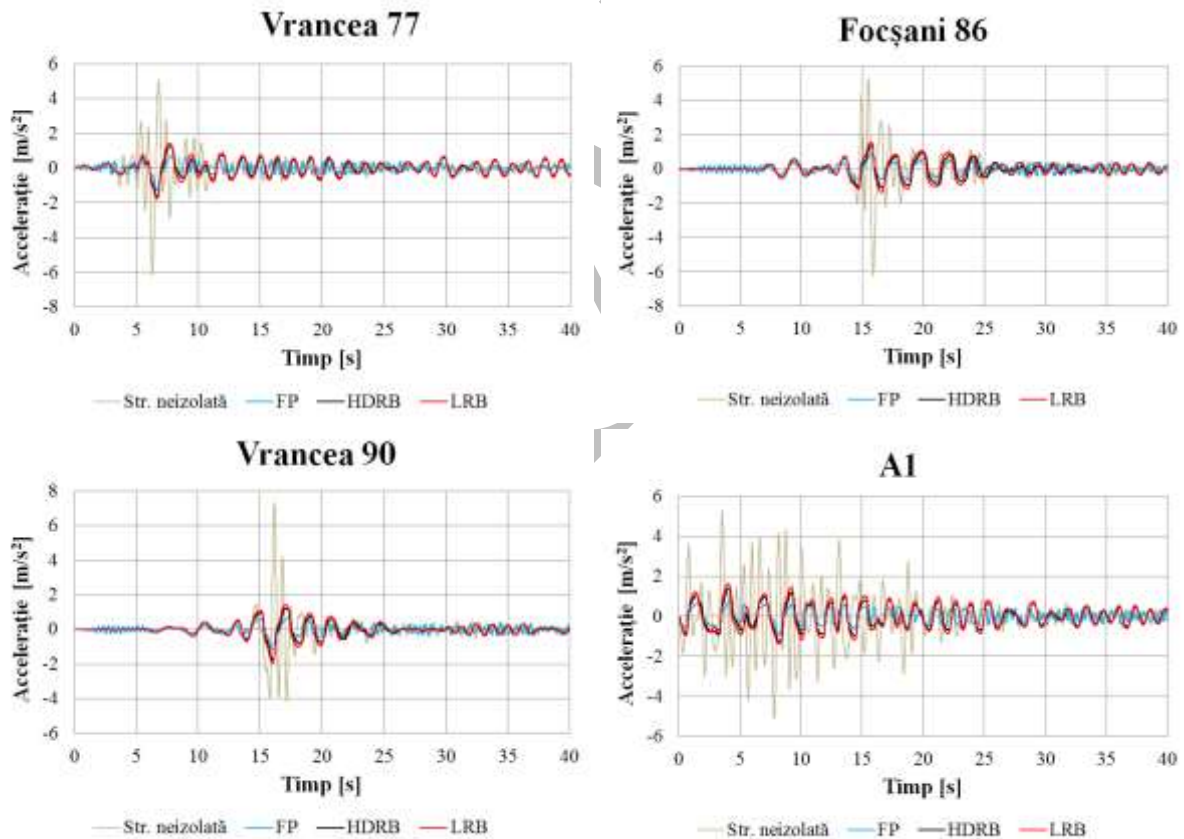


Fig. 4.20 Perioadele proprii de vibrație ale structurii

Unul dintre parametrii studiați a fost accelerația la nivelul acoperișului, deasupra sistemului de izolare. Graficele de mai jos prezintă variația acestor accelerații pe direcția X în cazul acțiunii celor șapte încărcări seismice pentru toate cele patru cazuri studiate.



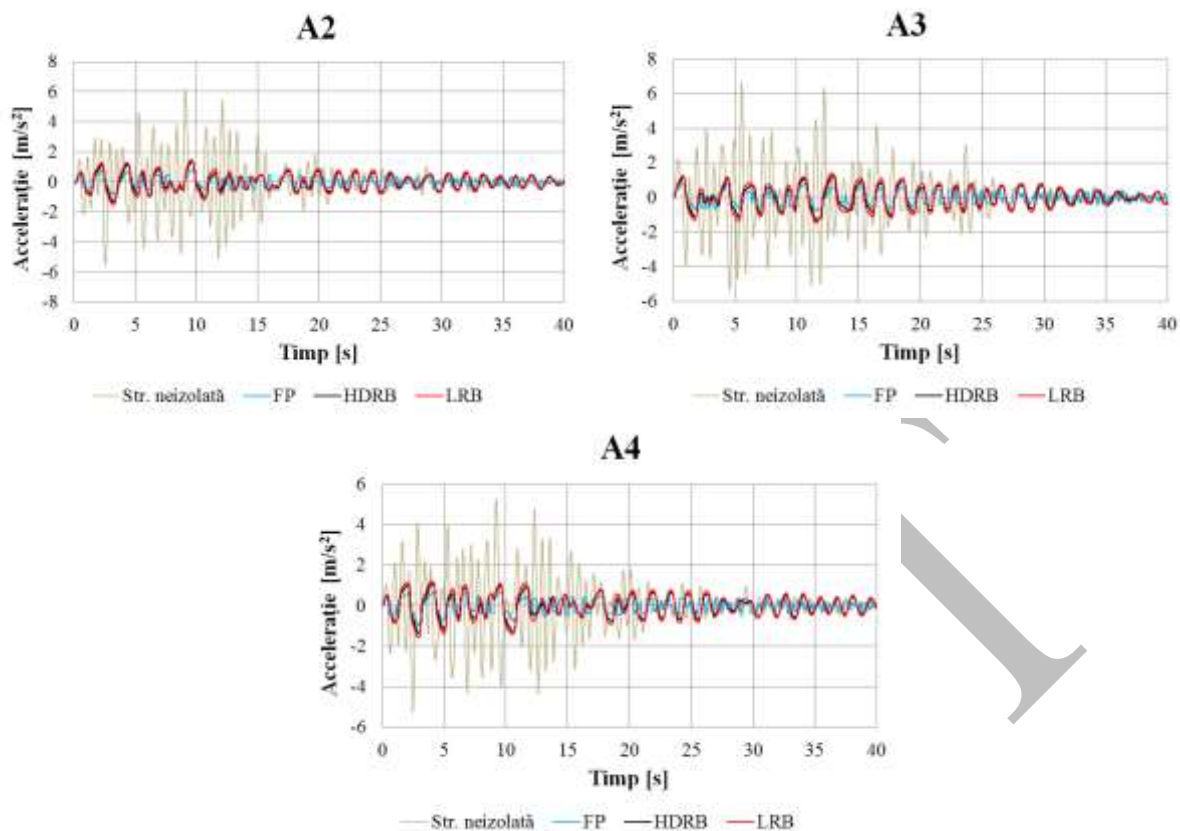
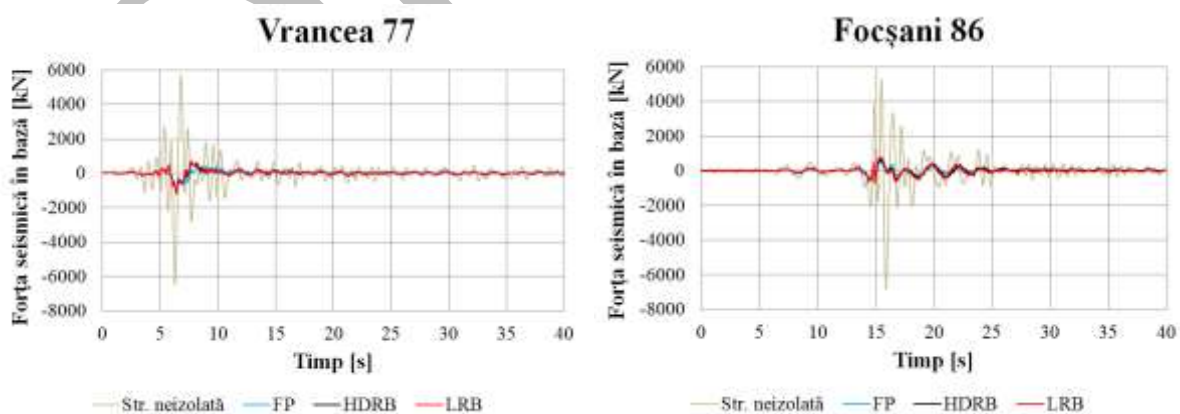


Fig. 4.21 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului

Forța seismică în bază reprezintă unul dintre parametrii studiați pe baza simulărilor efectuate, acesta fiind unul dintre parametrii esențiali în evaluarea răspunsului seismic al structurilor echipate cu izolatori seismici pasivi. Variația acestei forțe pentru fiecare încărcare seismică și pentru fiecare caz este prezentată în figura de mai jos.



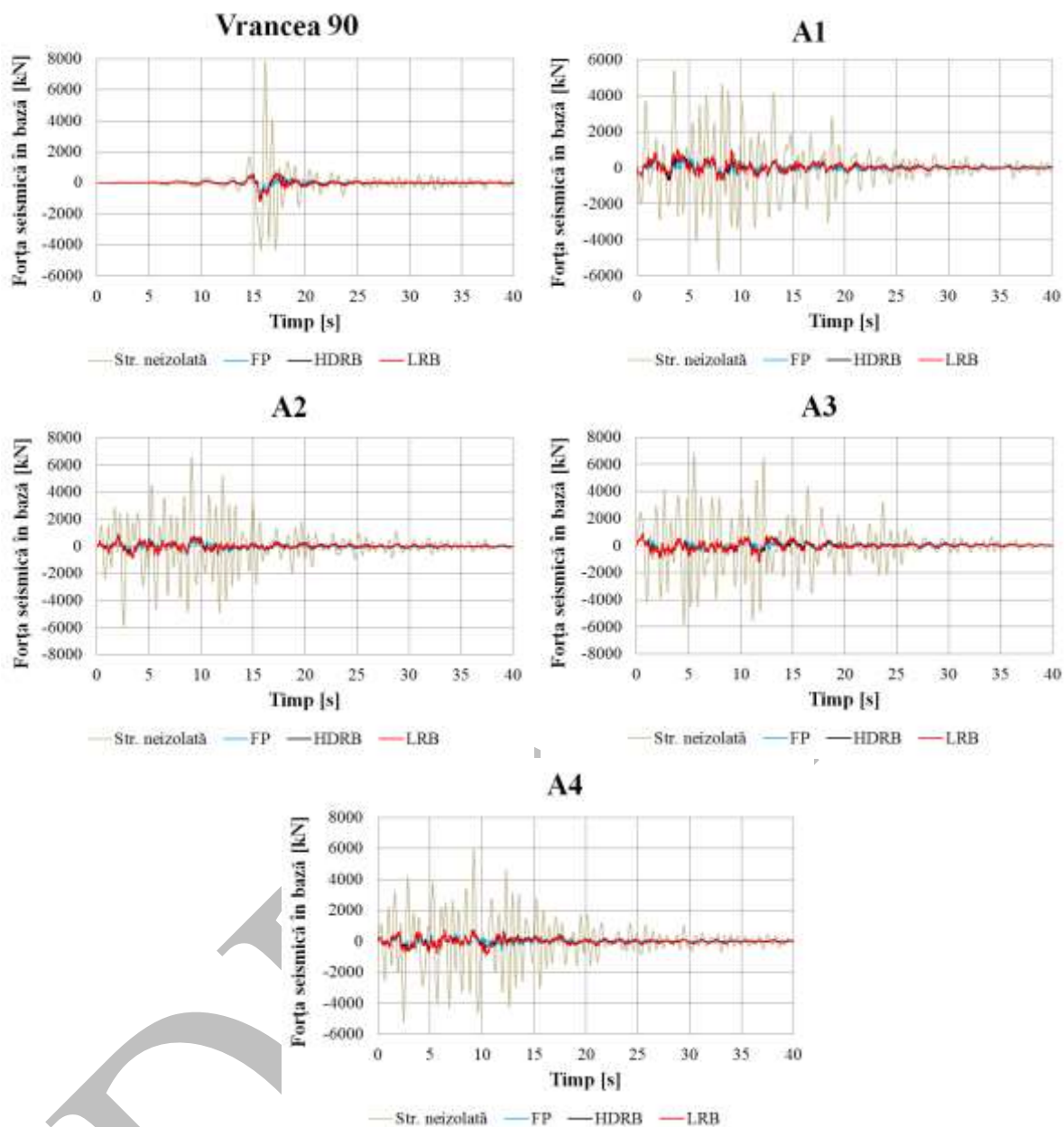


Fig. 4.22 Variația forțelor seismice în bază

Și pentru cazul Str60m s-a evaluat răspunsul seismic la nivelul stâlpilor de beton, prin compararea parametrilor statici de răspuns: momentul încovoietor și forța tăietoare.

**Tabel 4.7**

Valorile momentului încovoietor la baza stâlpului pentru Str60m

Acțiune seismică	Moment maxim la baza stâlpului (kNm)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	6175	1025	3450	3403
Focșani 86	6371	677	2542	2602
Vrancea 90	6835	963	3715	3868
A1	5678	611	2700	2887

A2	5771	650	2517	2667
A3	6239	609	2425	2255
A4	5160	604	2397	2636

**Tabel 4.8**

Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului pentru Str60m

Acțiune seismică	Forța tăietoare maximă la baza stâlpului (kN)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	515	82	276	272
Focșani 86	530	54	203	208
Vrancea 90	570	77	297	309
A1	473	60	216	231
A2	480	52	201	213
A3	520	49	194	180
A4	430	48	192	211

Dimensionarea din punctul de vedere al secțiunilor elementelor care alcătuiesc structura de rezistență a acoperișului s-a făcut automat, cu ajutorului modulului integrat din programul SAP2000. S-au utilizat profile de tip HEA pentru tălpile grinzilor cu zăbrele și profile laminate de tip țevă dreptunghiulară pentru restul elementelor, mai puțin pentru tiranți. Greutățile obținute în urma acestei dimensionări sunt prezentate în tabelul de mai jos.

**Tabel 4.9**

Greutatea structurii acoperișului pentru Str60m

	Tipul de izolare			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Greutate structură metalică acoperiș (tone)	209.14	200.86	200.86	200.79

#### 4.5 Structură cu deschidere de 80 m (Str80m)

- **Descrierea structurii**

Cea de-a doua structură modelată are o deschidere de 80 m a grinzii principale. În total, există șase grinzi principale dispuse la o distanță interax de 12,00 m. Pe direcție longitudinală sunt dispuse opt grinzi cu zăbrele cu rol de rigidizare, care sunt prinse articulat de grinzi principale. Acoperișul este rigidizat la partea superioară cu un sistem de tiranți dispuși precum

în Fig. 4.23. Diametrul stâlpilor de susținere este de 150 cm, iar la structura de referință prinderea acoperișului de aceștia se consideră a fi articulată.

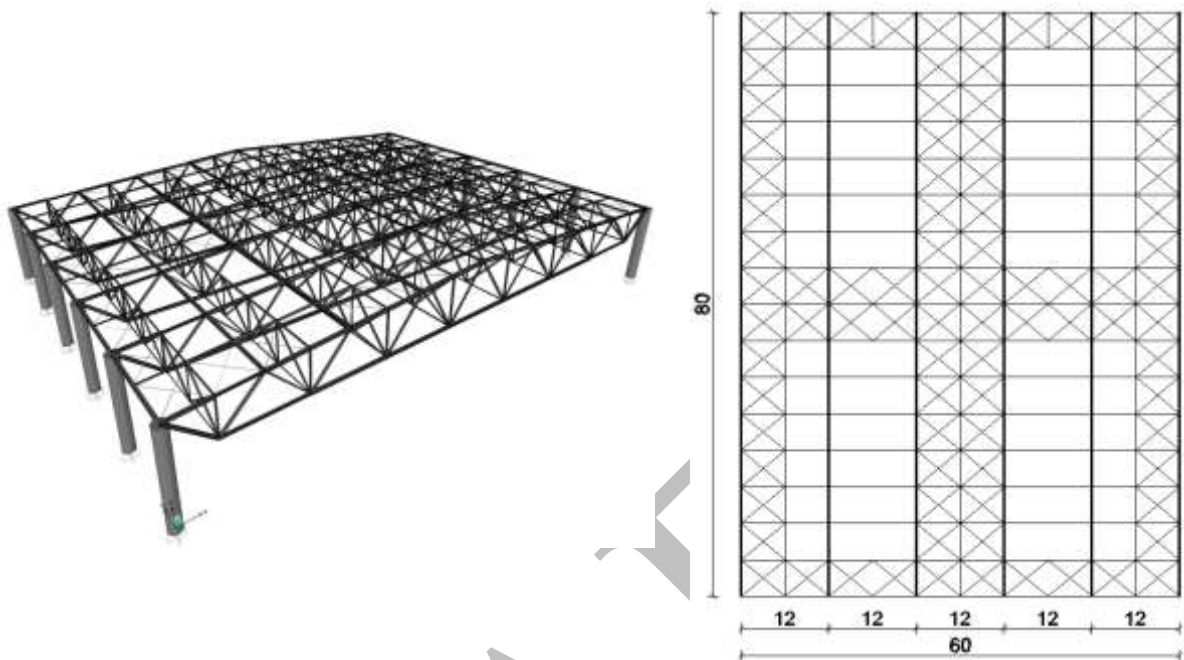


Fig. 4.23 Structura cu deschidere de 80m (Str80m)

- **Caracteristicile sistemului de izolare**

Pentru izolarea structurii cu deschidere de 80 m (Str80m) s-au folosit aceleași trei tipuri de sisteme prezentate anterior la Str40m și Str60m, adică izolatori de tip pendul cu frecare în primul caz, izolatori de cauciuc HDRB respectiv LRB în combinație cu elemente de tip PF pentru al doilea și al treilea caz. Perioada ținută aleasă pentru sistemul de izolare în cazul utilizării HDRB și LRB este de 1.5s. S-au utilizat un număr de șase izolatori de cauciuc în combinație cu șase dispozitive de tip PF pentru fiecare caz, iar dispunerea acestora este prezentată în Fig. 4.24 b. Rigiditatea efectivă  $k_{eff}$  a sistemului de izolare a fost calculată la o valoare de 2,88 kN/mm.

Dispozitivele de tip FP utilizate pentru Str80m au o rază de curbură de 4,00 m și o rigiditate efectivă a izolatorului  $k_{eff}=0,357 \text{ kN/mm}$ . Valorile pentru coeficienții de frecare la viteză minimă și maximă a izolatorului sunt:  $\mu_{min} = 0,015$  și  $\mu_{max} = 0,055$ , iar  $\alpha=0,2$ . Izolatorii de tip FP au fost dispuși în fiecare punct de reazem al structurii metalice pe stâlpii de beton, conform Fig. 4.16 a.

**Tabel 4.10**

Caracteristicile izolatoarelor de tip HDRB și LRB utilizați pentru Str80m

Tip izolator	Diametru cauciuc	Înălțime totală	Dimensiune totală în plan	Diametru miez plumb	Grosime strat cauciuc	Factor de formă	Rigiditate verticală	Rigiditatea efectivă orizontală	Forța de curgere
	D	H <sub>tot</sub>	LxL	d <sub>plumb</sub>	t <sub>r</sub>	S	K <sub>v</sub>	k <sub>eff</sub>	F <sub>y</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]
HDRB	950	561	1000x1000	-	396	21.4	972	0.72	120
LRB	750	600	800x800	110	384	22.6	519	0.7	155

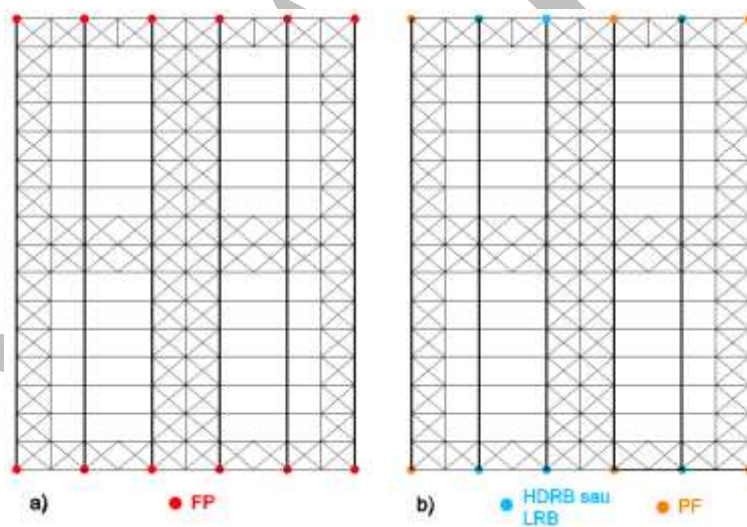
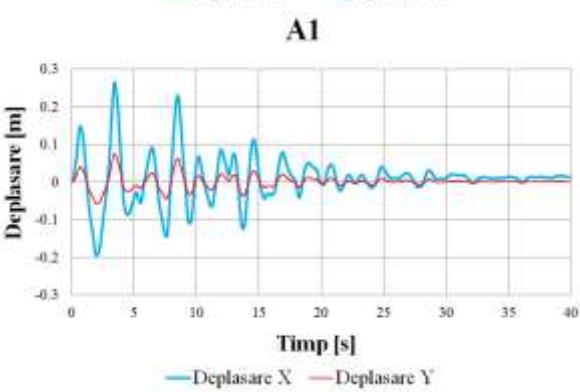
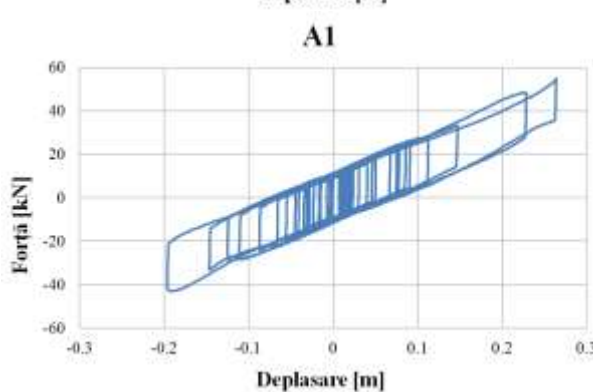
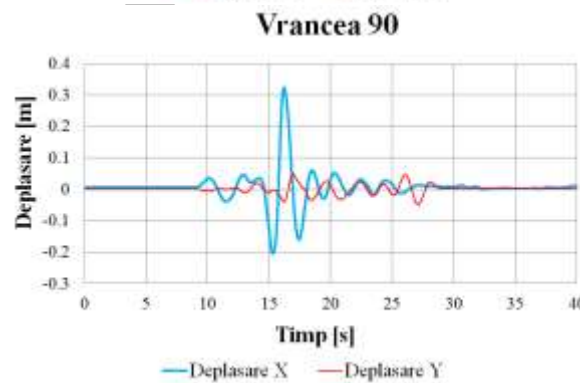
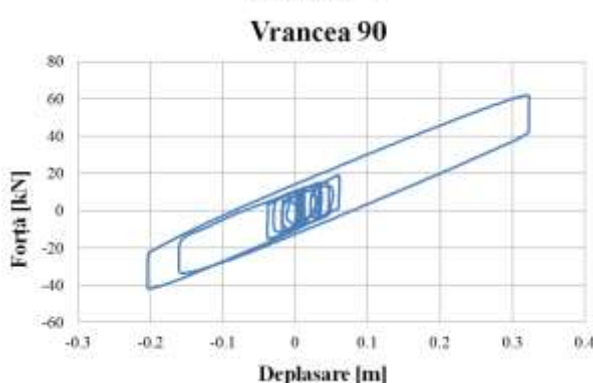
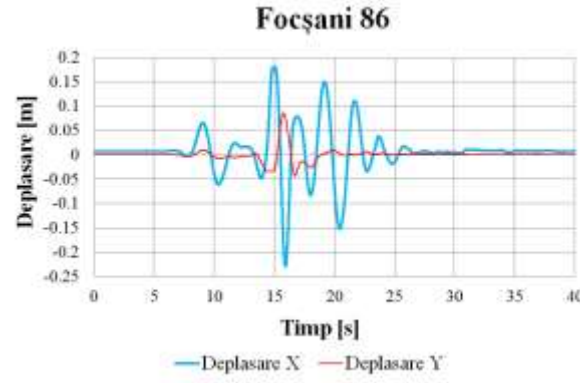
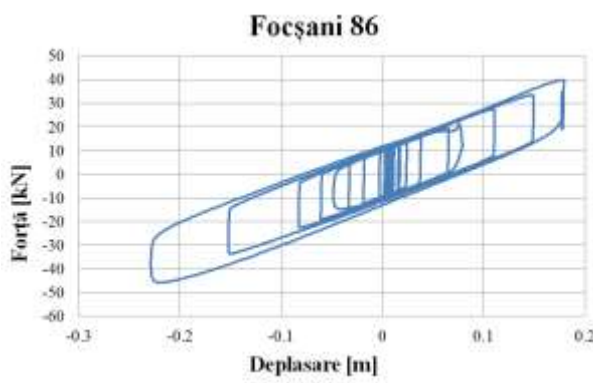
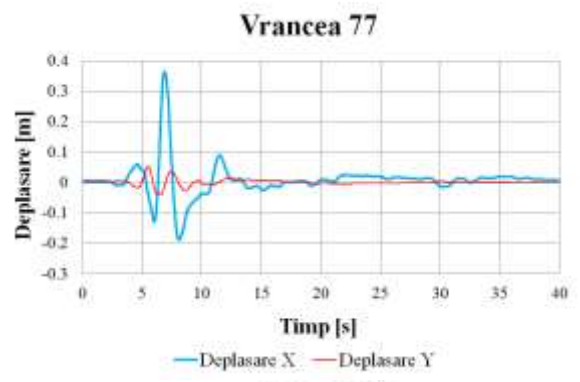
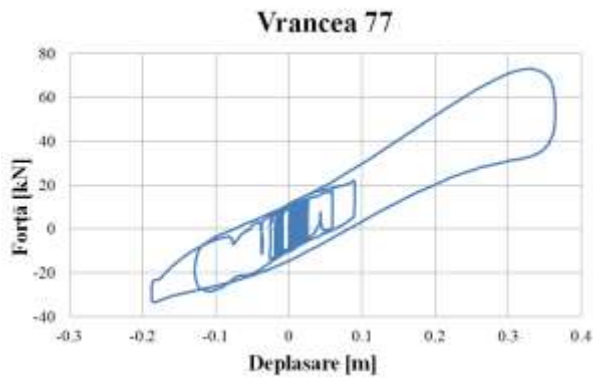


Fig. 4.24 Dispunerea în plan a izolatoarelor în cazul structurii cu deschidere de 80 m

• **Răspunsul seismic al structurii Str80m**

Parametrii reprezentați prin curbele histeretice forță-deplasare la nivelul izolatorului și deplasarea acestuia pe orizontală sunt definitorii în studiul răspunsului seismic al acestor tipuri de structuri. Pentru structura cu deschiderea acoperișului de 80 m și echipată cu izolatoare de tip FP, curbele histeretice și graficele deplasării la nivelul izolatoarelor în funcție de timp sunt prezentate în Fig. 4.25.





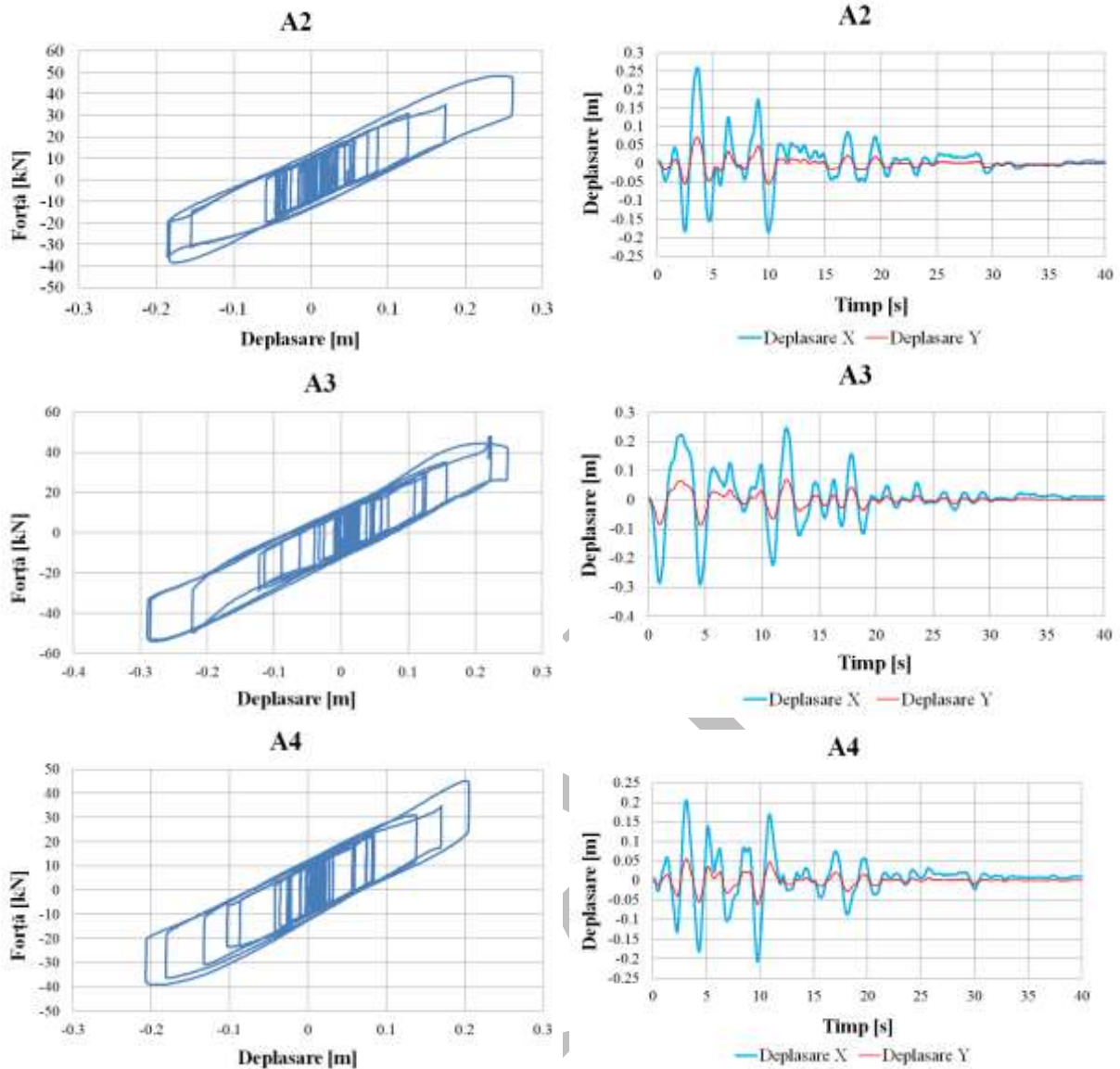
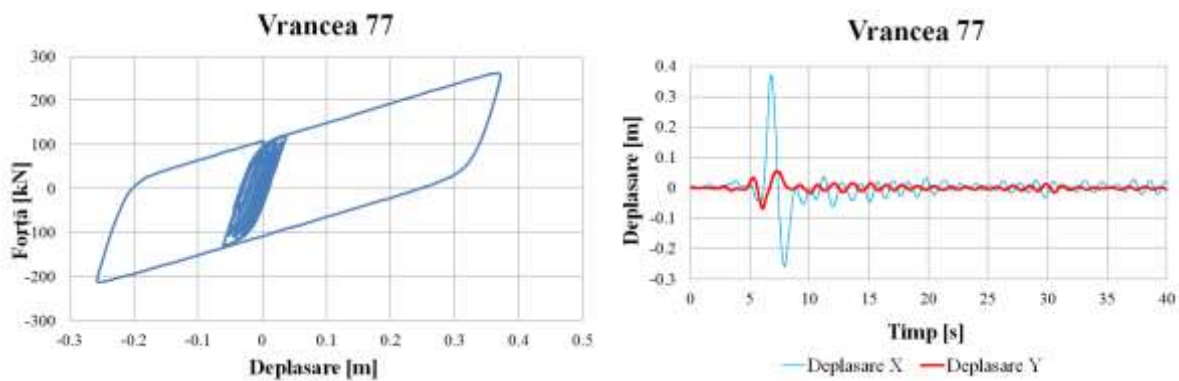
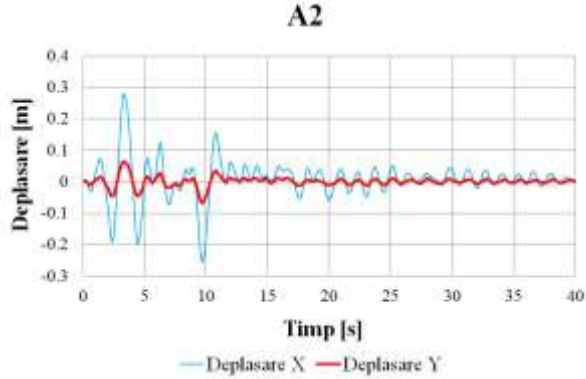
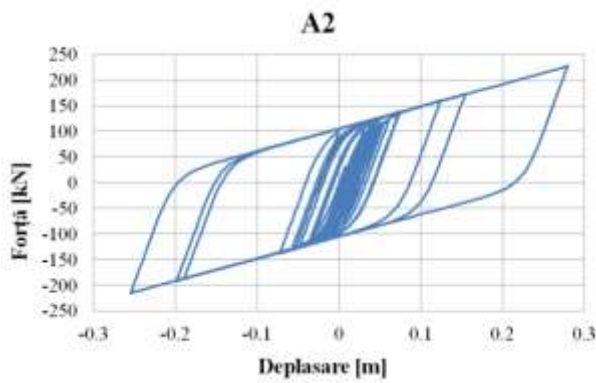
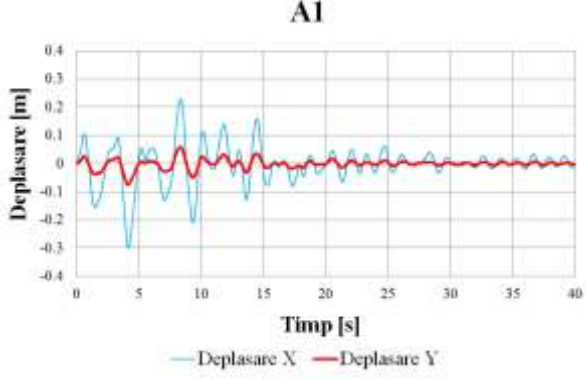
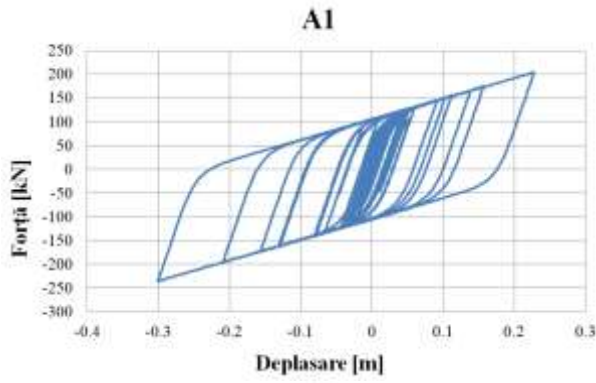
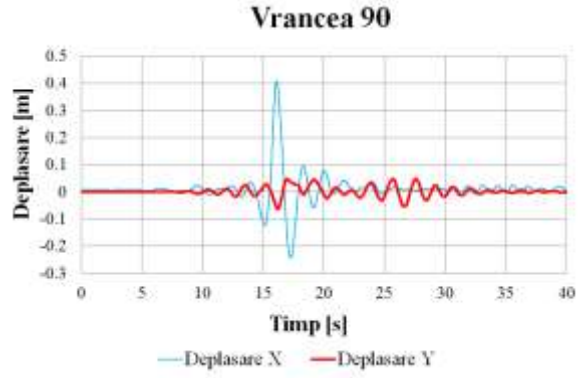
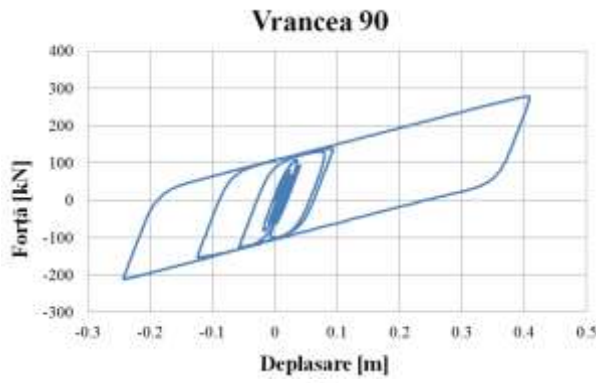
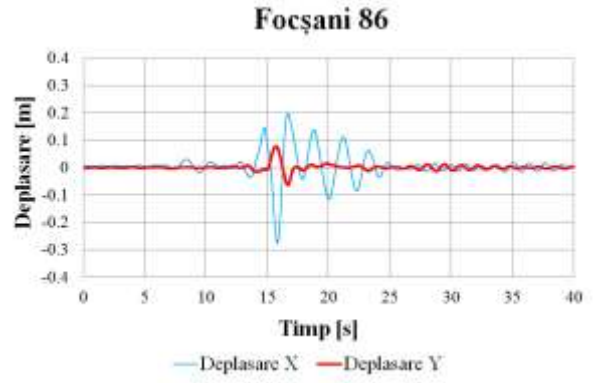
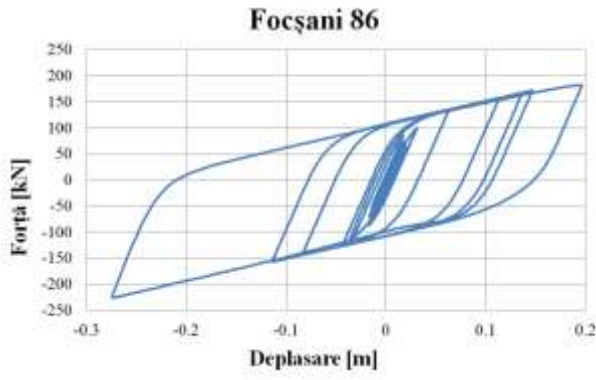


Fig. 4.25 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP

Graficele expuse în figura de mai jos prezintă relațiile forță-deplasare pe direcția X și deplasările maxime ale izolatorului atât pe direcția X, cât și pe Y, în cazul în care structura este echipată cu sisteme de tip HDRB.





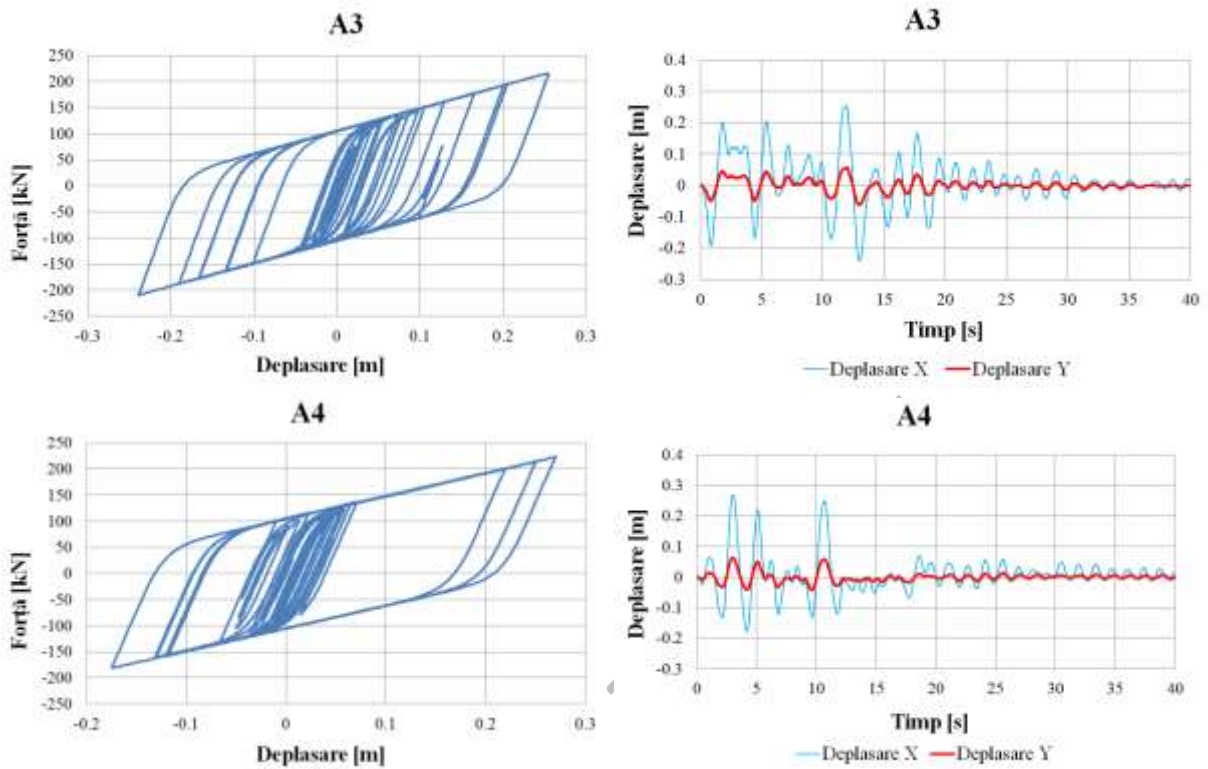
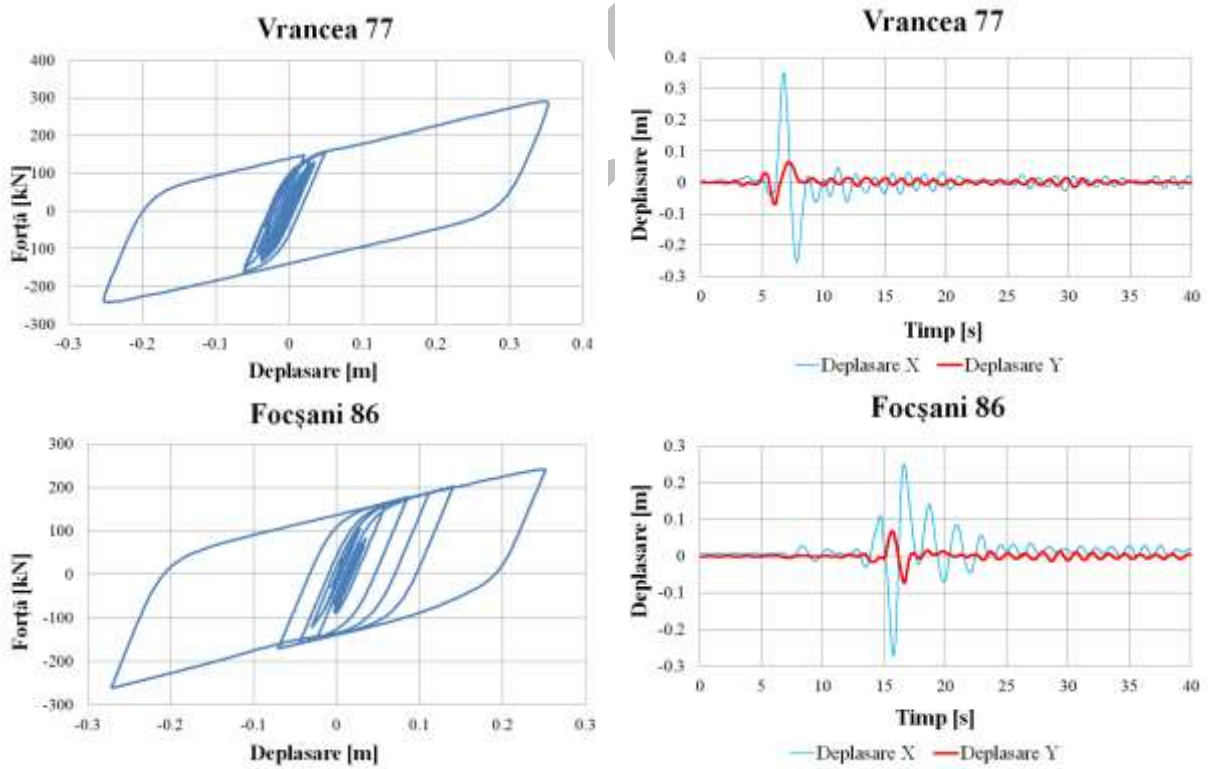
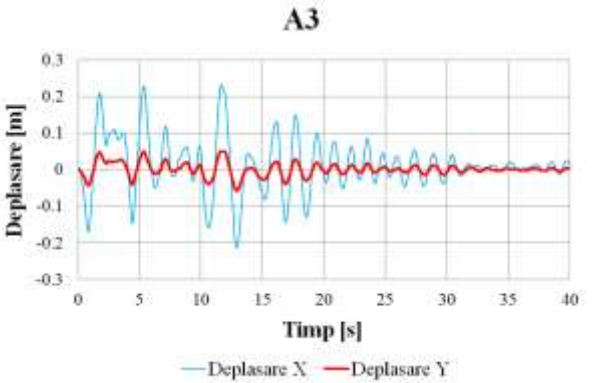
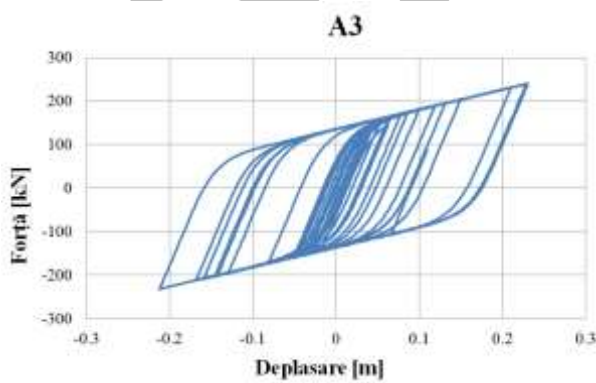
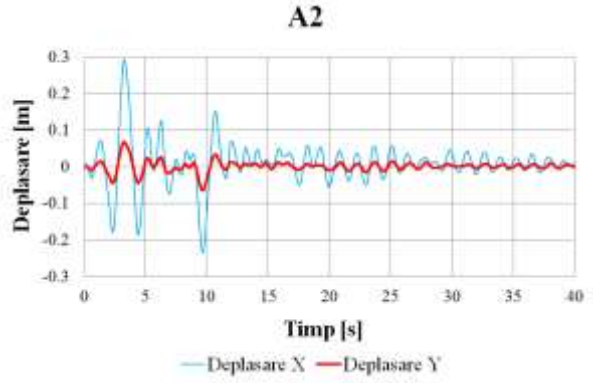
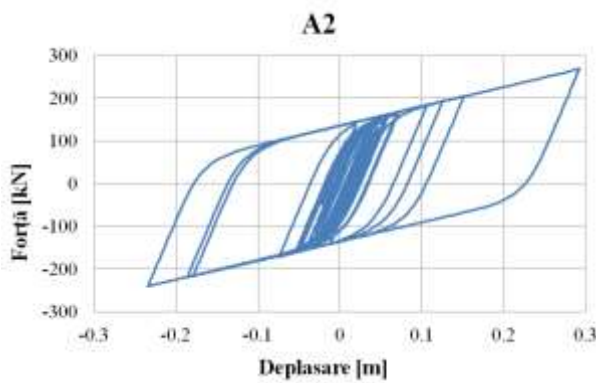
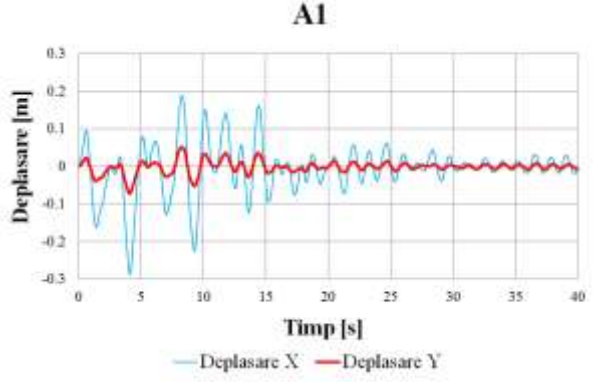
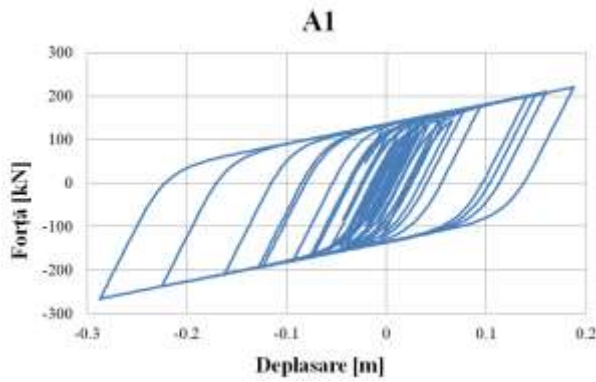
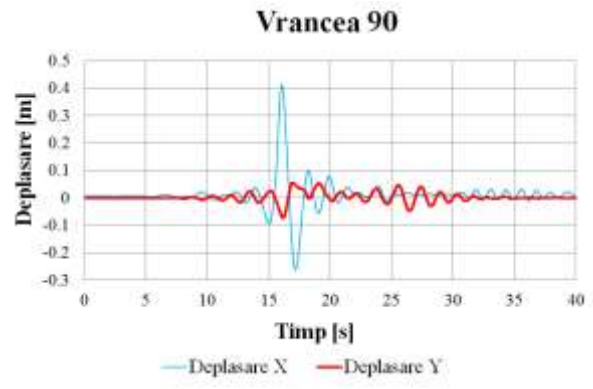
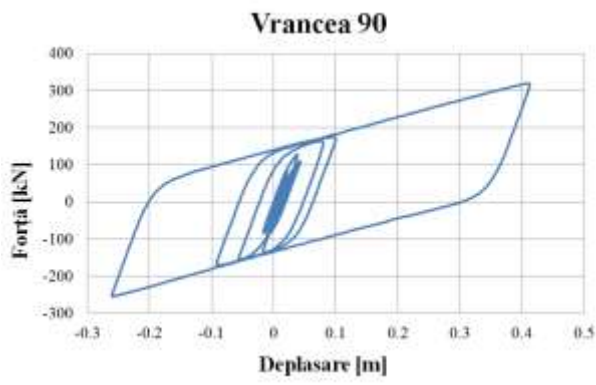


Fig. 4.26 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB

Pentru cazul utilizării izolatorilor de tip LRB, curbele histeretice și deplasările la nivelul izolatorului pe cele două direcții sunt prezentate în Fig. 4.19.





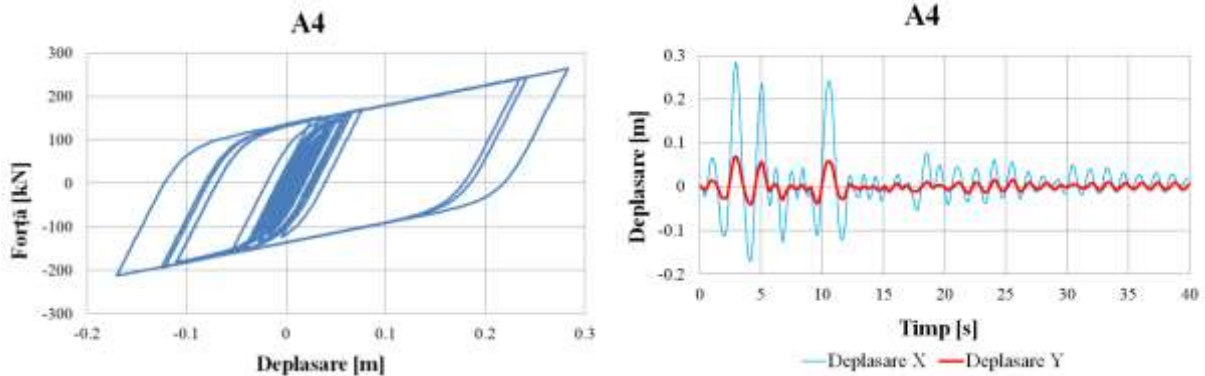
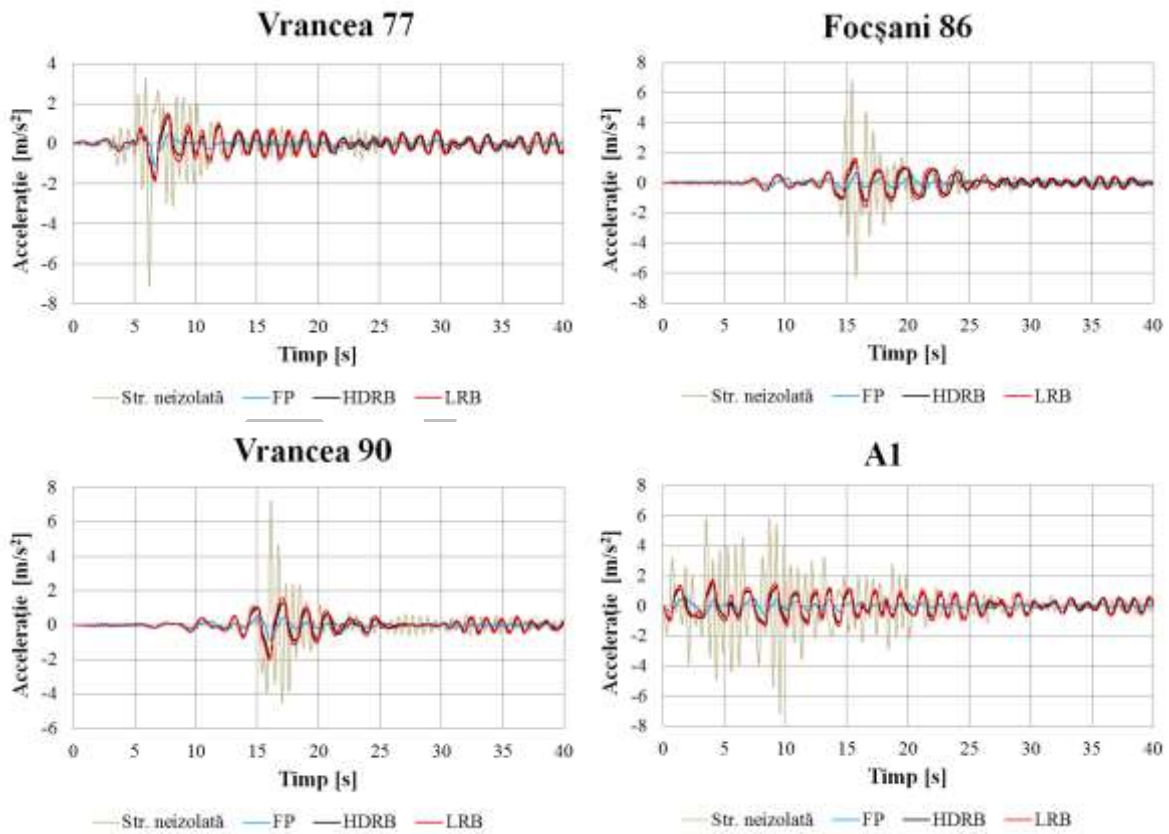


Fig. 4.27 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB

Unul dintre parametrii studiați a fost accelerația la nivelul acoperișului, deasupra sistemului de izolare. Graficele de mai jos prezintă variația acestor accelerații pe direcția X în cazul acțiunii celor șapte încărcări seismice, pentru toate cele patru cazuri studiate.



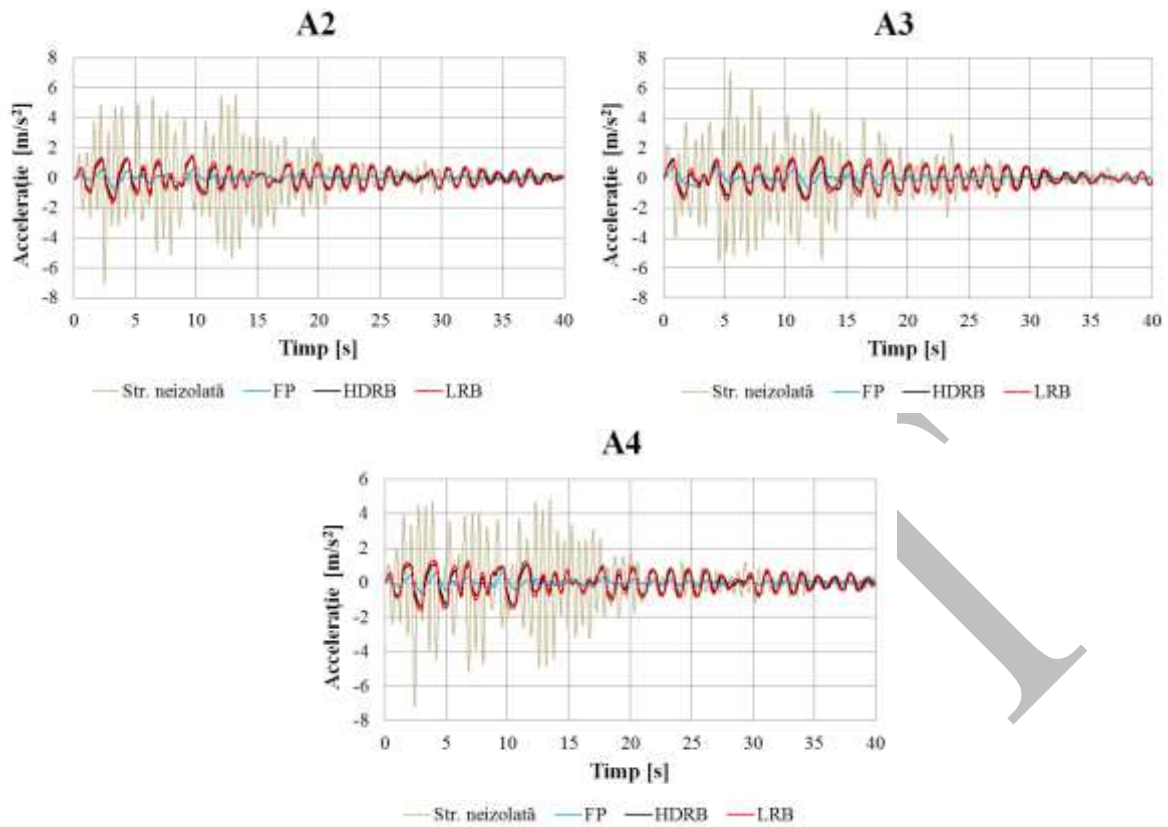
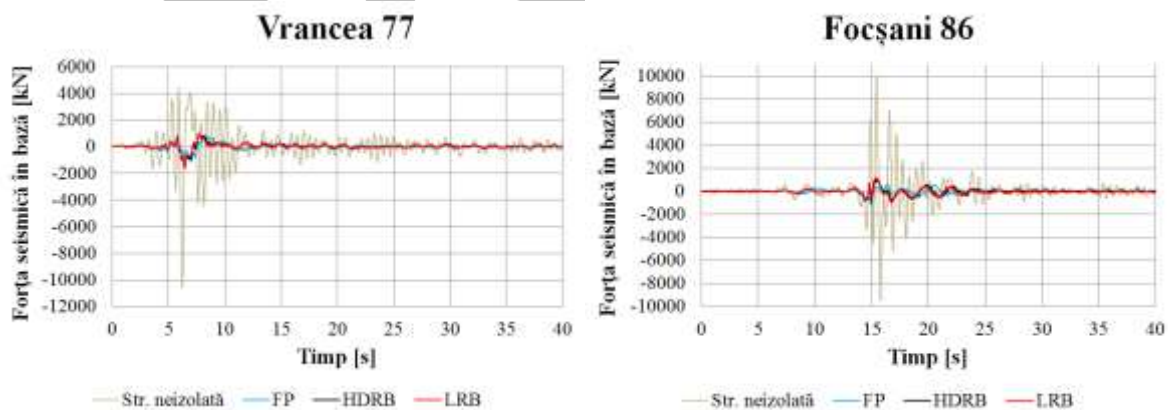


Fig. 4.28 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului

Forța seismică în bază reprezintă unul dintre parametrii studiați pe baza simulărilor efectuate, acesta fiind unul dintre parametrii esențiali în evaluarea răspunsului seismic al structurilor echipate cu izolatori seismici pasivi. Variația acestei forțe pentru fiecare încărcare seismică și pentru fiecare caz este prezentată în figura de mai jos.



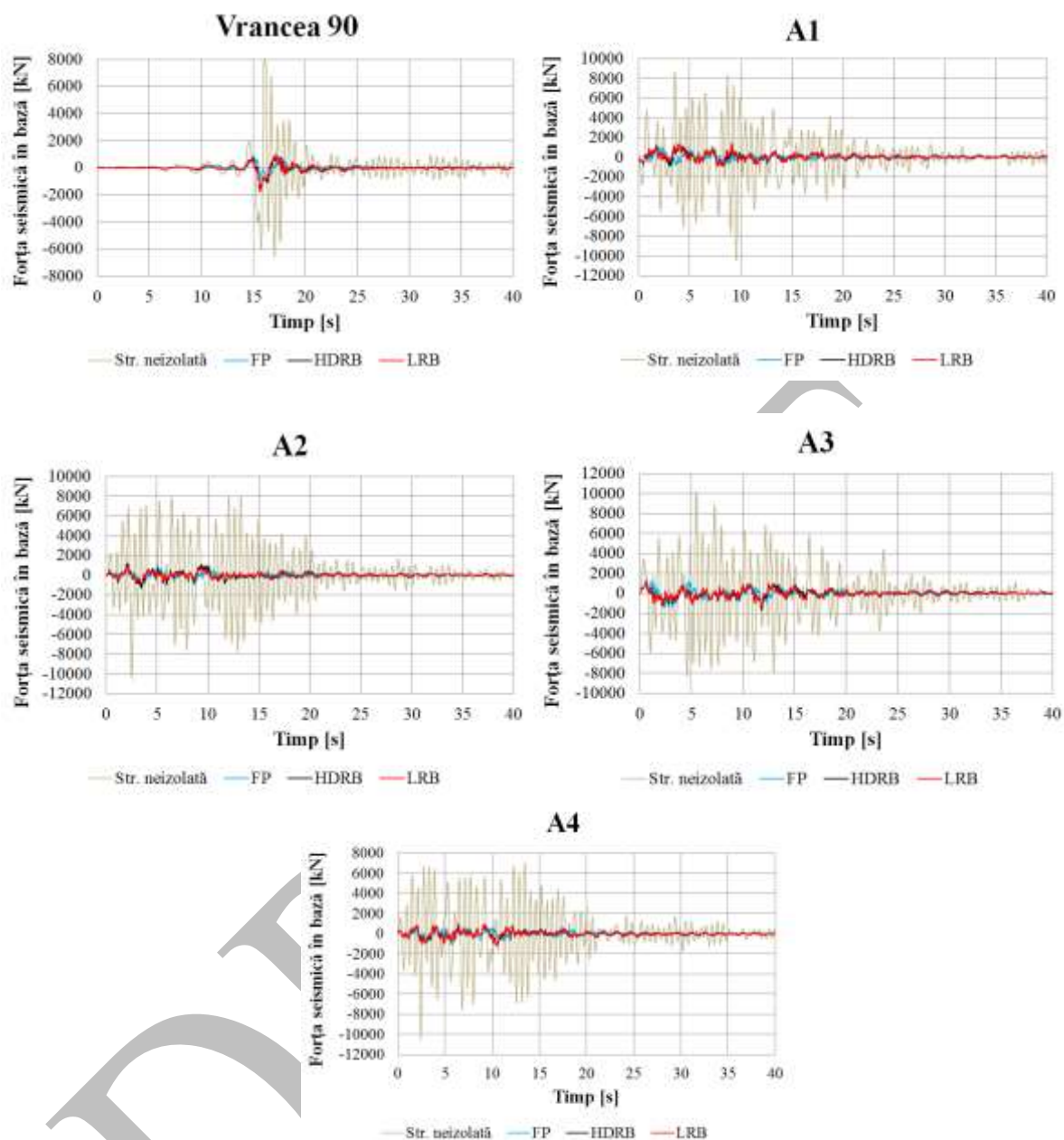


Fig. 4.29 Variația forțelor seismice în bază

Tabel 4.11

Valorile momentului încovoietor la baza stâlpului pentru Str80m

Acțiune seismică	Moment maxim la baza stâlpului (kNm)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	10560	1616	3322	3068
Focșani 86	9733	1010	2446	2350
Vrancea 90	9011	1436	3657	3588
A1	9763	1175	2683	2490
A2	10034	1160	2503	2546
A3	8889	1280	2285	2010
A4	10714	916	2420	2463



**Tabel 4.12**

Valorile forței tăietoare la baza stâlpului pentru Str80m

Acțiune seismică	Forța tăietoare maximă la baza stâlpului (kN)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	880	132	270	250
Focșani 86	811	82	198	191
Vrancea 90	750	117	297	291
A1	813	96	218	203
A2	858	94	203	207
A3	741	90	186	164
A4	892	75	197	200

Elementele structurale ale acoperișului au fost dimensionate cu ajutorul modului integrat din programul SAP2000, conform SR EN 1993. Condițiile în care s-a făcut această dimensionare sunt identice cu cele din cazul Str40m și Str60m. Greutățile obținute în urma acestei dimensionări sunt prezentate în tabelul de mai jos.

**Tabel 4.13**

Greutatea structurii acoperișului pentru Str80m

Greutatea structurii metalice a acoperișului (tone)	Tipul de izolare			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
	281.11	268.10	267.73	267.70

Modificarea perioadelor structurii după izolare se poate observa în figura de mai jos.

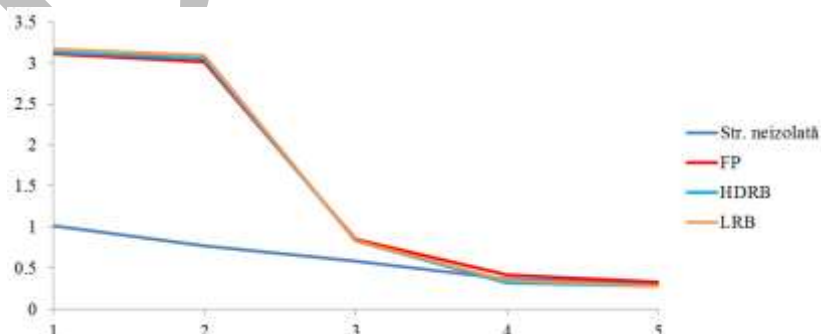


Fig. 4.30 Perioadele proprii de vibrație ale structurii

#### 4.6 Analiza comparativă a rezultatelor obținute pe modelele studiate

Unul dintre parametrii esențiali în proiectarea antiseismică a structurilor este perioada proprie de vibrație. Creșterea perioadei proprii face ca structurile să iasă complet din zona de rezonanță cu oscilațiile predominante ale terenului. Acest lucru se obține prin alegerea caracteristicilor potrivite pentru dispozitivele de izolare utilizate. Astfel, nivelul accelerațiilor preluate de structura izolată va fi mult redus în comparație cu structura neizolată.

**Tabel 4.14**

Perioadele proprii de vibrație ale structurilor și ale cutremurelor studiate

Tip str.	Fo86NS, Fo80EV, Vr90NS, Vr90EV	Structura neizolată	Vr90NS, Vr90EV, A1H, A2H, A3H, A4H	Structură cu FP	Structură cu HDRB	Structură cu LRB
40m		0.77s		2.89s	2.78s	3.07s
60m	0.32s÷0.61s	0.82s	0.78s÷1.16s	3.45s	3.21s	3.17s
80m		1.02 s		3.11s	3.13s	3.17s

Acestei creșteri a perioadei  $i$  se datorează scăderea valorilor accelerațiilor din încărcarea seismică la care este supusă structura. Implicit, acest fapt conduce la o scădere a forței tăietoare de bază și la scăderea eforturilor secționale la baza stâlpilor. Parametrii prezentați mai sus sunt extrem de relevanți în evaluarea răspunsului structurilor la acțiuni seismice.

În tabelul de mai jos sunt prezentate procentual valorile accelerațiilor măsurate într-un punct situat la partea superioară a acoperișului în comparație cu valorile accelerațiilor înregistrate pe structurile de bază în cazul acțiunii celor șapte cutremure considerate.

**Tabel 4.15**

Ponderea accelerațiilor pe structura izolată din valoarea accelerațiilor pe structura de bază

		Vrancea 77	Focsani 86	Vrancea 90	A1	A2	A3	A4
Str40m	FP	18%	10%	16%	16%	13%	14%	12%
	HDRB	28%	25%	29%	23%	24%	24%	25%
	LRB	28%	25%	29%	22%	24%	24%	25%
Str60m	FP	17%	11%	14%	15%	13%	13%	12%
	HDRB	26%	22%	24%	27%	22%	19%	25%

	LRB	29%	25%	26%	31%	25%	22%	30%
	FP	16%	10%	12%	10%	10%	11%	9%
Str80m	HDRB	24%	21%	25%	22%	20%	19%	19%
	LRB	26%	24%	28%	24%	24%	21%	23%

Reducerea accelerațiilor la nivelul acoperișului depinde mult de caracteristicile sistemului de izolare ales și de încărcarea seismică. Astfel, în cazul Str40m, avem o diminuare a valorilor de vârf ale accelerației în cazul utilizării sistemului cu penduli cu frecare, cuprinse între 82% și 90%, iar pentru HDRB și LRB între 72% și 78%. Nu s-au constatat diferențe importante între valorile obținute în cazul utilizării sistemelor de izolare din cauciuc pe această structură. În cazul Str60m, reducerile sunt cuprinse între 83% și 88%, cu o medie valorilor mai mare decât în cazul structurii Str40m. De asemenea, se înregistrează o scădere procentuală a valorilor accelerațiilor pentru cazul utilizării sistemelor de tip LRB și HDRB. Pentru Str80m s-au înregistrat reduceri ale accelerațiilor maxime mai mari procentual decât în cazul celorlalte două structuri. Se poate observa o mai bună reducere a accelerațiilor în cazul echipării structurii cu elemente de tip HDRB față de cazul utilizării LRB.

Prin faptul că izolatorii sunt capabili să dezvolte deformații mari în plan orizontal se produce o diminuare semnificativă a forței seismice de bază. Reducerea valorilor acestui parametru de răspuns seismic este un pilon important al proiectării pe bază de performanțe seismice. Pentru cele trei structuri studiate, acționate pe rând de cele șapte cutremure, se observă o scădere a forței seismice de bază pe direcția X, cu valori cuprinse între 80% și 90%.

Momentul încovoietor și forța tăietoare care apar pe stâlpii de beton armat la nivelul încastrării în fundații, reprezintă un set de parametri care au un rol deosebit de important în predimensionarea și proiectarea acestora. În urma simulărilor, s-a constatat o reducere a acestor parametri pentru situațiile în care pentru cele trei structuri sunt utilizați izolatori de tip FP, cu valori cuprinse între 80% și 90% față de cele înregistrate în cazul structurilor de bază. În acest caz, procentele nu variază substanțial în funcție de tipul structurii (de deschiderea acoperișului). Pentru situațiile în care se utilizează izolatori de tip HDRB și LRB, valorile înregistrate pe structurile studiate supuse cutremurelor considerate în analiză, acești parametri se reduc cu minim 40% și maxim 77%. Se observă o reducere cu atât mai mare a momentului și a forței tăietoare, cu cât deschiderea acoperișului este mai mare, astfel că pentru Str80m diminuarea valorilor este cuprinsă între 60% și 77%, pentru Str60m între 43% și 63%, iar pentru Str40m între 40% și 62%.

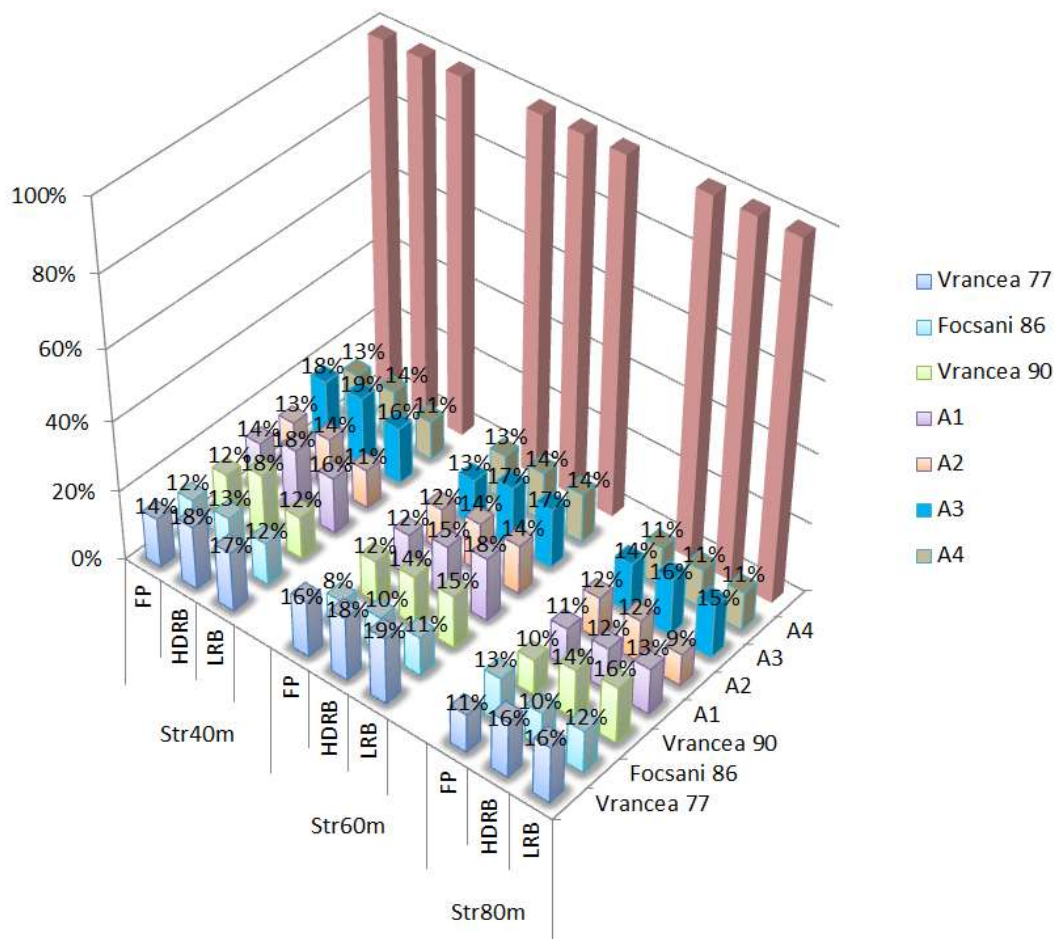


Fig. 4.31 Valoarea procentuală a forței seismice de bază în cazurile de izolare

Sub aspectul consumului de oțel necesar pentru realizarea structurii metalice a acoperișurilor cu deschidere mare pentru cele trei structuri studiate, s-a observat o reducere a necesarului de material. După cum s-a precizat anterior, optimizarea și alegerea secțiunilor s-a făcut automat cu ajutorul modulului specializat implementat în programul SAP2000. Criteriile după care s-a făcut această dimensionare corespund întocmai cu exigențele Eurocode 3. S-au luat în considerare atât încărcarea seismică cu spectre de răspuns, cât și variația de temperatură asupra elementelor de oțel. Astfel, s-a observat o diferență foarte mică a variației greutății structurii metalice între cazurile în care aceasta este izolată prin una dintre cele trei metode studiate. Dacă se compară aceste greutăți cu cele obținute pe structurile de bază, se constată reduceri de 3,2% în cazul Str40m, 3,9% în cazul Str60m și 4,6% în cazul Str80m. Aceste scăderi nu sunt spectaculoase, dar ținând cont de cantitatea de oțel relativ mare, economiile pot deveni semnificative.

Unul dintre beneficiile utilizării dispozitivelor antiseismice este reducerea deplasării din încărcarea seismică a stâlpilor de beton în dreptul capătului superior. Înregistrarea acestor date se face în punctul aflat imediat sub nivelul de izolare, iar graficul deplasărilor în timp sub

acțiunea seismică Vrancea 77 scalată pe spectrul de răspuns, pentru cele trei structuri prevăzute cu cele trei tipuri de izolatori, se poate observa în figura de mai jos.

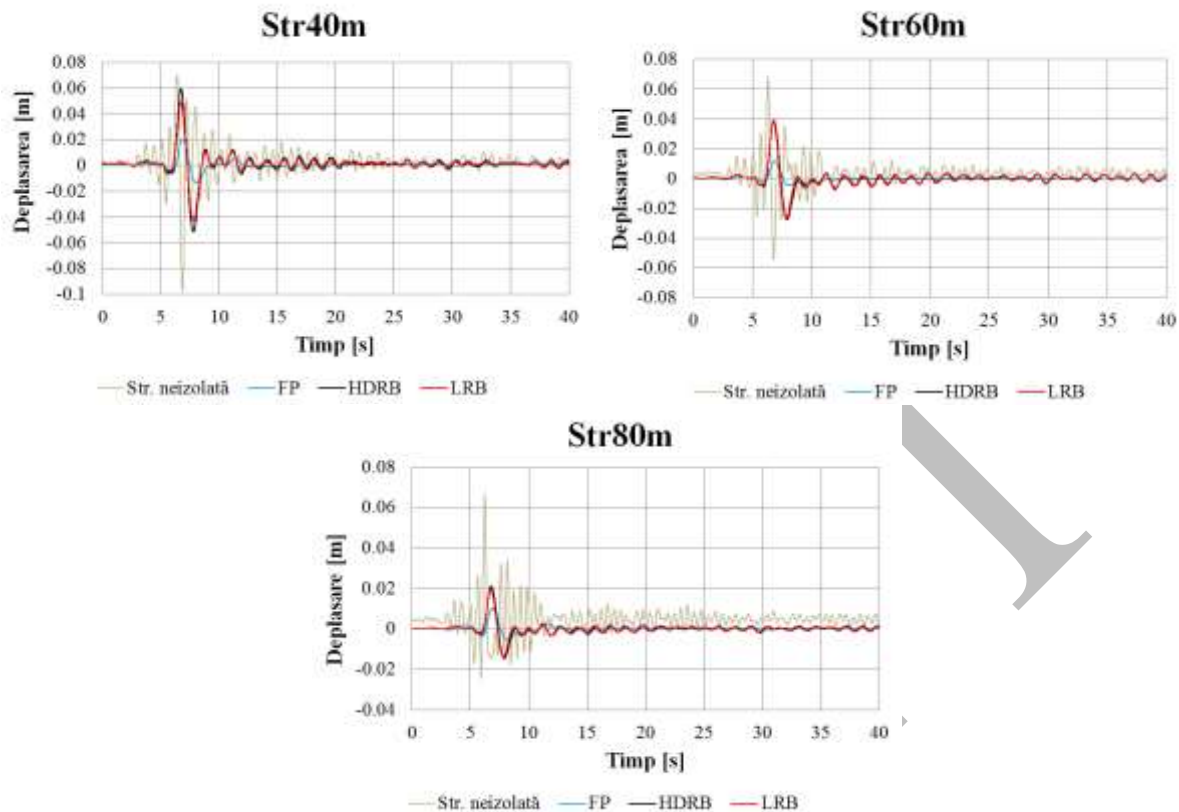


Fig. 4.32 Deplasarea capătului superior al stâlpului pentru cele trei structuri sub acțiunea Vrancea 77

Tabelul de mai jos prezintă media aritmetică a reducerilor deplasărilor maxime obținute pe cele trei structuri, luând în calcul toate cele șapte cutremure prezentate.

**Tabel 4.16**

Reducerea medie a deplasărilor la nivelul superior al stâlpilor

Tip str.	Structură cu FP	Structură cu HDRB	Structură cu LRB
40m	79%	39%	50%
60m	83%	43%	45%
80m	84%	68%	70%

De menționat este că datele prezentate mai sus, în legătură cu reducerea deplasării laterale a stâlpilor, sunt pe direcția cadrului principal (direcția X). De asemenea, trebuie precizat că aceste valori corespund stâlpilor pe care sunt montate echipamente de tip FP, HDRB și LRB, nu și stâlpilor prevăzuți cu izolatori de tip PF. După analiza parametrilor statici asociați elementelor din beton se poate efectua o reducere de secțiune și de armătură în acești stâlpi, lucru care conduce la o diminuare a costurilor, care se adaugă reducerii cantității

de oțel necesare realizării structurii acoperișului și, astfel, se evidențiază unul dintre beneficiile utilizării protecției seismice pasive pe structurile studiate prin utilizarea tipurilor de izolare precizate mai sus.

Unul dintre obiectivele acestui capitol este evidențierea efectului componentei verticale a încărcării seismice asupra răspunsului structurilor cu deschidere mare izolate seismic cu dispozitive pasive dispuse la nivelul acoperișului. În consecință, s-au comparat pentru fiecare structură și fiecare tip de izolare, formele curbelor histeretice obținute atunci când este prezentă sau nu accelerograma verticală.

Ecuția forță-deplasare a pendulului cu frecare este descrisă cu ajutorul următoarei relații:

$$F = \frac{W}{R_{eff}}u + \mu W sgn(\dot{u}) \quad (4.1)$$

unde  $\dot{u}$  reprezintă componenta orizontală a vitezei.

Ecuția forță-deplasare a pendulului cu frecare atunci când este supus unei acțiuni seismice și cu componenta verticală se modifică după cum urmează:

$$F = \left(1 + \frac{\ddot{u}_v}{g}\right) \left[\frac{W}{R_{eff}}u + \mu W sgn(\dot{u})\right] \quad (4.2)$$

unde  $\ddot{u}_v$  reprezintă accelerația verticală.

În acest caz, se înregistrează o variație a încărcării verticale asupra izolatorului datorată accelerației verticale, ceea ce conduce la schimbarea valorii forței de frecare, dar și a forței care tinde să readucă dispozitivul la poziția inițială. Această modificare a presiunii pe care o exercită elementul pe suprafața de lunecare conduce la schimbarea coeficientului de frecare. Prezența componentei verticale în excitația seismică are efecte asupra formei curbei histeretice a izolatorului, acesta având un aspect mai vălurit decât în situația în care avem doar componente orizontale ale unei seismice. În figura *Fig. 4.33* sunt prezentate curbele histeretice ale izolatorului de tip pendul cu frecare (FP) pentru structura cu deschidere de 80 m supusă la acțiunea seismică Vrancea 77 și A1 atât în cazul existenței componentei verticale, cât și atunci când aceasta lipsește. Cu cât frecvența componentei verticale este mai apropiată de frecvența componentei orizontale, cu atât efectul acesteia asupra răspunsului structurii izolate este mai puternic. Se poate observa o diferență mai mare între cele două curbe histeretice în cazul acțiunii Vrancea 77, deoarece cele două mișcări sunt în fază, iar vârfurile mișcării pe cele două direcții se produc în același timp, ceea ce înseamnă că efectele lor coincid. Același lucru se poate observa și în cazul structurilor de 40 m, respectiv 60 m

echipate cu FP și supuse acțiunii seismice Vrancea 77 scalată pe spectrul de răspuns. În cazul în care structurile sunt supuse celorlalte încărcări seismice, înregistrate sau generate artificial, se poate observa că efectul componentei verticale este mai scăzut. Din Fig. 4.33 se poate observa că efectul componentei verticale asupra formei curbelor histeretice ale izolatorului de tip pendul cu frecare este mai pronunțată pe măsură ce crește deschiderea acoperișului.

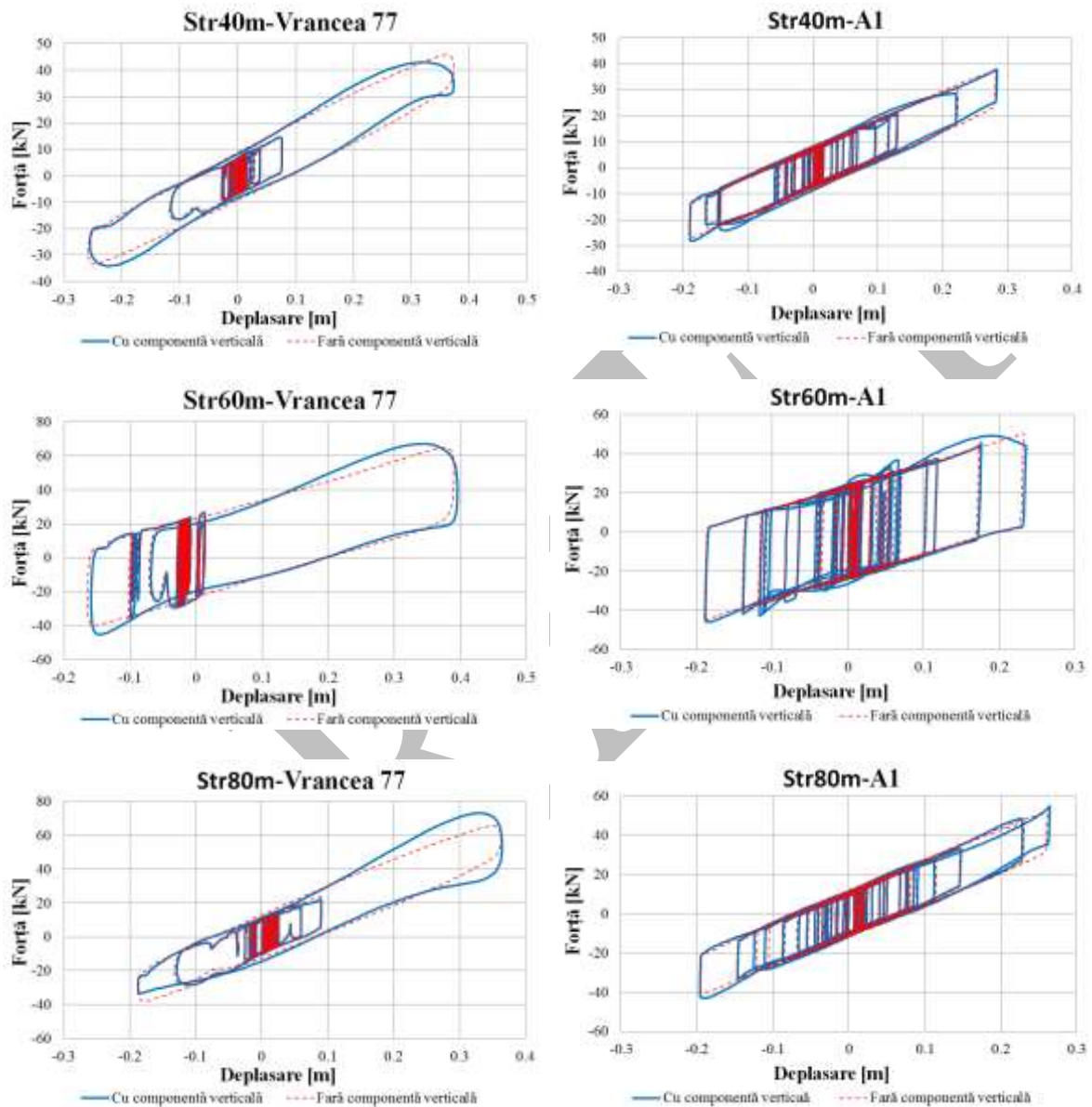


Fig. 4.33 Efectul componentei verticale asupra curbelor histeretice ale izolatorului de tip FP

Variația deplasării izolatorului de tip FP datorată aportului componentei seismice verticale este nesemnificativă, iar deformațiile structurii nu sunt nici ele influențate. Sistemul format din aceste pendule tinde să se deplaseze simultan și astfel se anulează practic torsiunea structurii. Se va studia cu atenție cazul în care apare o desprindere a pieselor care alcătuiesc sistemul de tip pendul cu frecare datorate întinderii care apare în izolator ca urmare a

componentei verticale. Aceste situații pot să apară mai ales dacă forța verticală din gruparea seismică are valoare redusă, caz în care se vor studia soluții pentru a se evita această situație.

Acțiunea componentei verticale a unei seismice asupra sistemului echipat cu izolatori de tip HDRB și LRB nu este semnificativă și este foarte puțin sesizabilă în forma curbelor histeretice.

Pentru structurile studiate s-a făcut și o evaluare a capacității de disipare a energiei cu ajutorul elementelor de izolare pasivă folosite în prezentul studiu. Astfel, s-au extras valori pentru energia de input seismic ( $E_i$ ) în cazul fiecărei structuri și în cazul fiecărei acțiuni seismice și s-a înregistrat în fiecare situație energia disipată doar de elementele de tip *link* cu ajutorul cărora au fost modelați izolatorii ( $E_d$ ). Obiectivul este ca mare parte din energia de input să fie disipată de aceste elemente, iar astfel să rezulte valori mai mici ale energiilor cinetice, de deformație elastică etc.

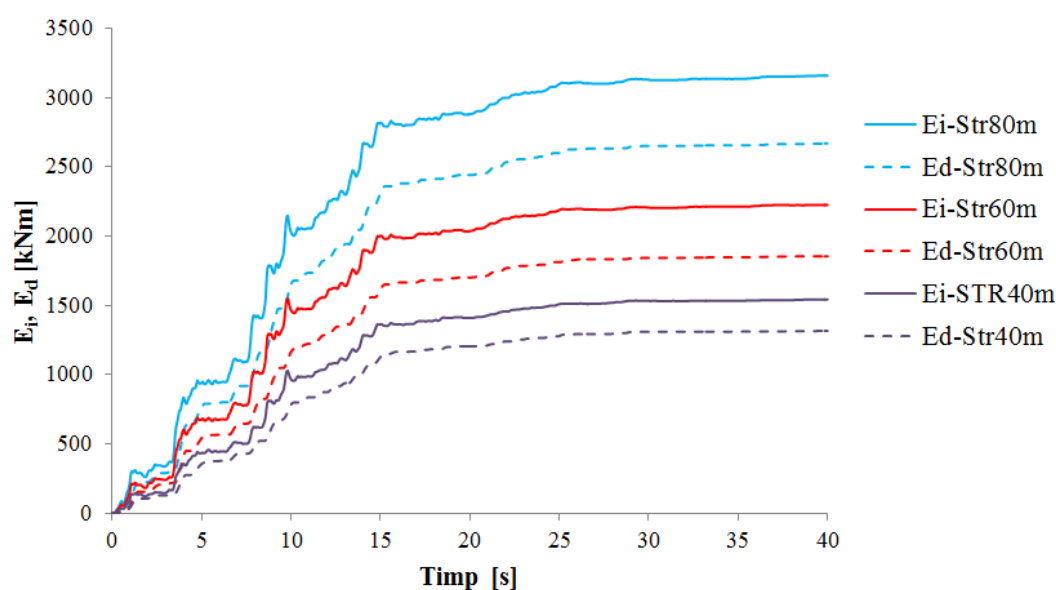


Fig. 4.34 Variația energiilor  $E_i$ ,  $E_d$  în cazul acțiunii cutremurului A1 pentru structurile echipate cu sisteme LRB

Pentru structurile echipate cu izolatori de tip LRB, energia disipată de aceștia ( $E_d$ ) reprezintă 85% din energia de input ( $E_i$ ) în cazul Str40m, 83% în cazul Str60m și 80% în cazul Str80m. În cazul structurilor cu dispozitive HDRB, energia disipată reprezintă 79% din energia de input în cazul Str40m, 77% în cazul Str60m și 75% în cazul Str80m. Pentru izolatorii selectați, în cazul celor trei structuri se remarcă o diminuare a energiei disipate odată cu creșterea deschiderii acoperișului. Se poate observa o ușoară creștere a energiei disipate de



izolatori în cazul în care se folosesc dispozitive de tip LRB, față de situația în care se utilizează HDRB. Compararea ariilor curbelor histeretice ale dispozitivelor antiseismice din cauciuc (Fig. 4.35) confirmă faptul că pentru aceeași structură se înregistrează o mai bună disipare a energiei în cazul utilizării izolatorilor LRB decât în cazul HDRB.

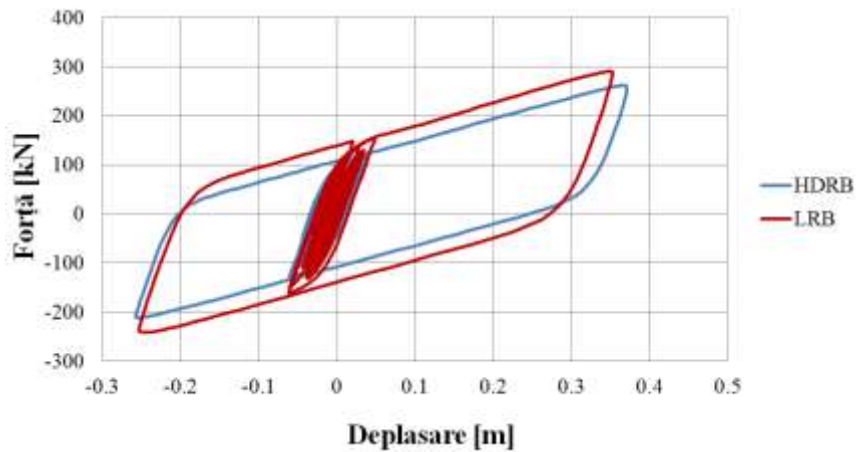


Fig. 4.35 Curbele histeretice ale izolatorilor HDRB și LRB pentru Str80m în cazul acțiunii cutremurului Vrancea 77

Obiectivul principal al acestui capitol îl constituie prezentarea numerică comparativă a parametrilor asociați vibrațiilor induse seismic structurilor echipate cu izolatori seismici amplasați la nivelul acoperișului. Rezultatele obținute sunt prezentate numeric și grafic în același timp, într-o manieră comparativă cu rezultatele corespunzătoare structurilor fără izolatori seismici. Parametrii corespunzători comportării dinamice sunt astfel prezentați încât să fie evidențiat rolul și efectul izolatorilor seismici în timpul acțiunii cutremurului. Sunt arătate astfel două seturi principale de parametri corespunzători comportării dinamice:

- setul parametrilor cinematici evidențiați prin deplasări laterale și accelerații;
- setul parametrilor statici, forța tăietoare seismică de bază, momentul încovoietor și forța tăietoare pe stâlp.

Valorile numerice obținute evidențiază efectul pozitiv asupra comportării seismice al structurilor cu deschidere mare, ca urmare al amplasării izolatorilor pasivi la nivelul acoperișului.

## 5. Studiu de caz: Sala de sport multifuncțională Slatina

Capitolul prezintă o soluție de proiectare pentru structura noii săli de sport din municipiul Slatina. Proiectul inițial prevede prinderea articulată a structurii de rezistență a acoperișului pe stâlpii de beton armat. Deși nu este amplasată în una dintre cele mai importante zone seismice conform normativului P100-1/2013, s-a studiat posibilitatea și oportunitatea introducerii unui nivel de izolare antiseismică situat imediat sub nivelul acoperișului. S-au propus trei tipuri de sisteme de izolare pasivă, folosind elemente caracteristice cu o mare răspândire și a căror utilizare este prevăzută în normativele în vigoare. Astfel, s-a optat pentru utilizarea dispozitivelor de tip pendul cu frecare (friction pendulum - FP), a izolatorilor din cauciuc de tip HDRB și a celor de tip LRB. Rezultatele obținute fac referire la parametrii obținuți atât pentru structura de referință, cât și pentru structura echipată cu fiecare dintre cele trei tipuri de sisteme prezentate anterior. Procesul de "izolare în bază" prevede în mod frecvent plasarea nivelului de izolare între infrastructură și suprastructură, iar efectele asupra părții izolate sunt bine cunoscute și documentate în literatura de specialitate. Pentru acest studiu de caz s-a ales amplasarea nivelului de izolare la capătul superior al stâlpilor din beton, în mod special datorită arhitecturii construcției, luând în considerare numărul mult mai mic de echipamente necesare, dar și considerând efectul pe care îl are asupra elementelor neizolate, în principal a stâlpilor care susțin structura acoperișului. Din punct de vedere tehnologic, este recomandată amplasarea izolatorilor astfel încât accesul pentru procesele de monitorizare, întreținere și schimbare să fie cât mai facil și cu costuri cât mai reduse.

### 5.1 Descrierea structurii

Sala de sport multifuncțională cu 3000 de locuri este situată în municipiul Slatina, județul Olt. Regimul de înălțime a structurii este P+E+S, iar suprafața construită va fi de 7158,5 m<sup>2</sup>, cu o suprafață desfășurată de 11242,1 m<sup>2</sup> și o înălțime maximă de 18,5m. La parter, construcția va cuprinde suprafața de joc, care va fi închisă perimetral cu gradene din beton armat. Sporturile care vor putea fi practicate în această sală sunt gimnastica, hocheiul, baschetul, handbalul, voleiul și altele. De asemenea, la parter sunt prevăzute vestiare, săli de forță și fitness, cabinete medicale, spații comerciale și spații tehnice. La etajul I, situat la cota +4,10 m, se vor regăsi foaierele publicului, zona VIP și tot de aici se va face și accesul la gradene. Subpanta, situată la cota +10,00 m va conține boxele comentatorilor și cabinetele operatorilor [113].

Fundația este de tip radier general cu grinzi dispuse pe ambele direcții. Radierul are grosimea de 40 cm, iar grinzile de fundare sunt de secțiune 70x120 cm, respectiv 200x120 cm. Adâncimea de fundare este variabilă, de la -0,85 m în zona terenului de handbal, până la -1,95 m în rest. Pentru realizarea elementelor infrastructurii se va folosi beton de clasă C16/20 și armătură din oțel de tip PC52, respectiv OB37 [113].

Elementele verticale ale suprastructurii sunt realizate din beton armat monolit și au secțiunile de 50x50 cm, 60x60 cm, 70x70 cm. Stâlpii care susțin grinzile principale ale acoperișului, au secțiune circulară cu diametrul de 160 cm. Planșeele sunt de tip dală cu grosimea de 25 cm [87].

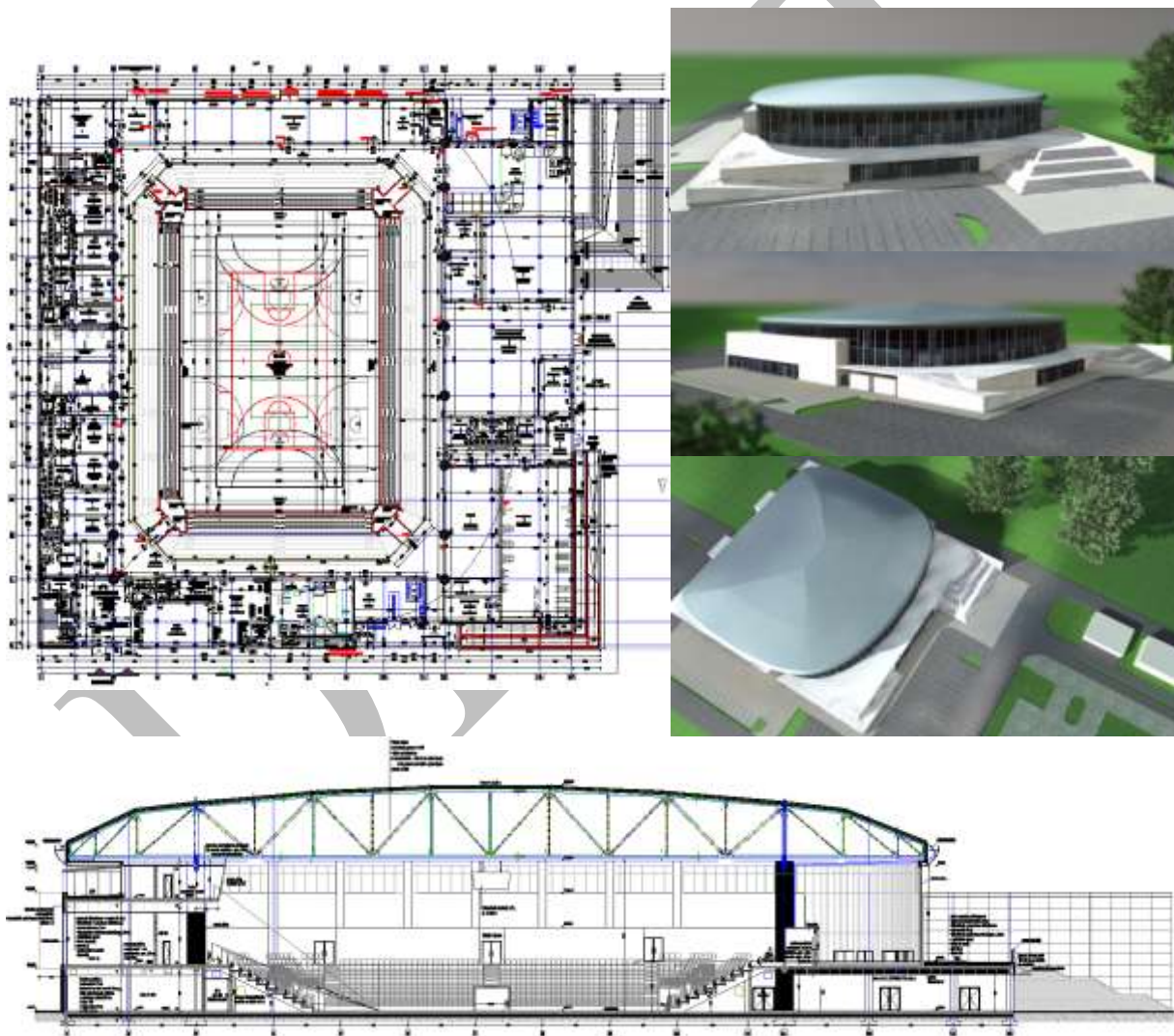


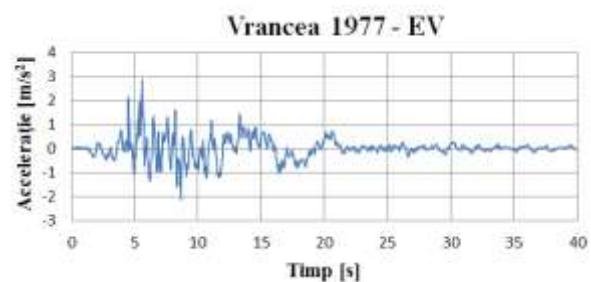
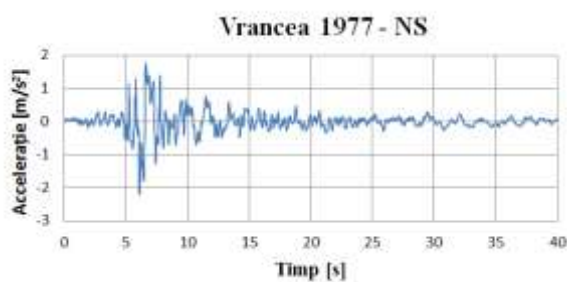
Fig. 5.1 Sala de sport din Slatina

Tribunele au structură în cadre de beton armat. Grinzile de gradină sunt alcătuite din elemente prefabricate, pe care se vor monta gradenele.

Acoperișul are o forma dreptunghiulară în plan, cu colțurile rotunjite și dimensiuni de 83,00 m x 76,00 m. Suprafața acoperișului este de 5733 m<sup>2</sup> și este alcătuit din elemente plane realizate din oțel. Cele șase grinzi cu zăbrele plane constituie lementele principale de rezistență ale acoperișului, cu o deschidere de 52,40 m interax și prevăzute la ambele capete cu console de lungime variabilă, în funcție de forma în plan a acoperișului. Lungimea consolelor variază între 12,30 m și 7,11 m, înălțimea maximă a grinzilor variază între 5,80 m și 4,10 m, iar distanța dintre acestea este de 11,00 m. Acestea sunt așezate pe câte doi stâlpi din beton armat cu diametrul de 160 cm. Între grinzile principale sunt poziționate la o distanță de aproximativ 5,24 m, pane de tip grindă cu zăbrele cu deschiderea de 11,00 m și înălțimea de 1,10 m.

## 5.2 Solicitarea seismică

Conform normativului P100-1/2013, obiectivul este amplasat în zona seismică caracterizată de o accelerație a terenului  $a_g=0,2g$  și o perioadă de colț  $T_c=1,0s$ . Solicitarea seismică considerată este atât de tip accelerograme, cât și spectru de răspuns, în conformitate cu prevederile normativelor în vigoare. Accelerogramele selectate sunt compatibile cu spectrul elastic de răspuns pentru amplasamentul considerat (amortizarea elastică de 5%). Pentru analiza de tip *time-history* s-au utilizat înregistrările a trei seturi de accelerograme a unor cutremure care au avut loc pe teritoriul României. Cu ajutorul programului SeismoMatch, s-au scalat aceste acțiuni, astfel încât ele să fie compatibile cu spectrul de răspuns. În urma acestei operații s-au obținut următoarele seturi de accelerograme:



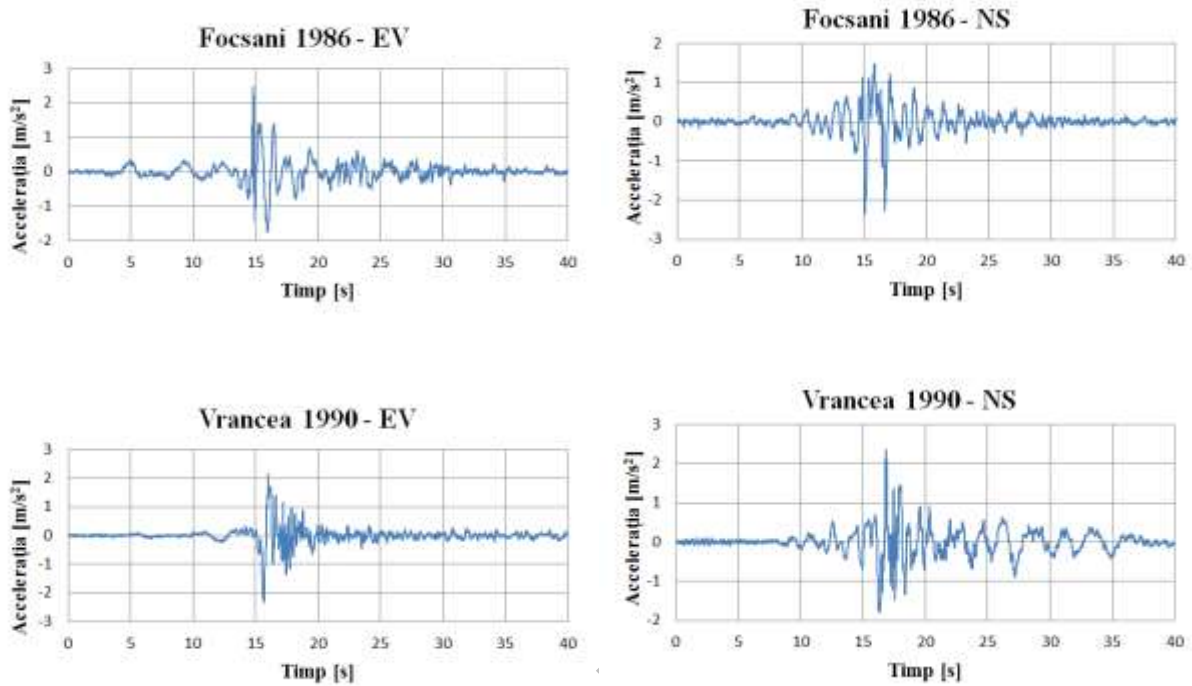


Fig. 5.2 Variația în timp a accelerațiilor pentru cutremurele scalate conform spectrului considerat pe amplasament

Spectrele de răspuns elastic ale celor trei acceleroграme înregistrate utilizate (Vrancea 77, Focșani 86 și Vrancea 90) sunt prezentate comparativ cu spectrul de răspuns elastic pentru accelerații al amplasamentului ales.

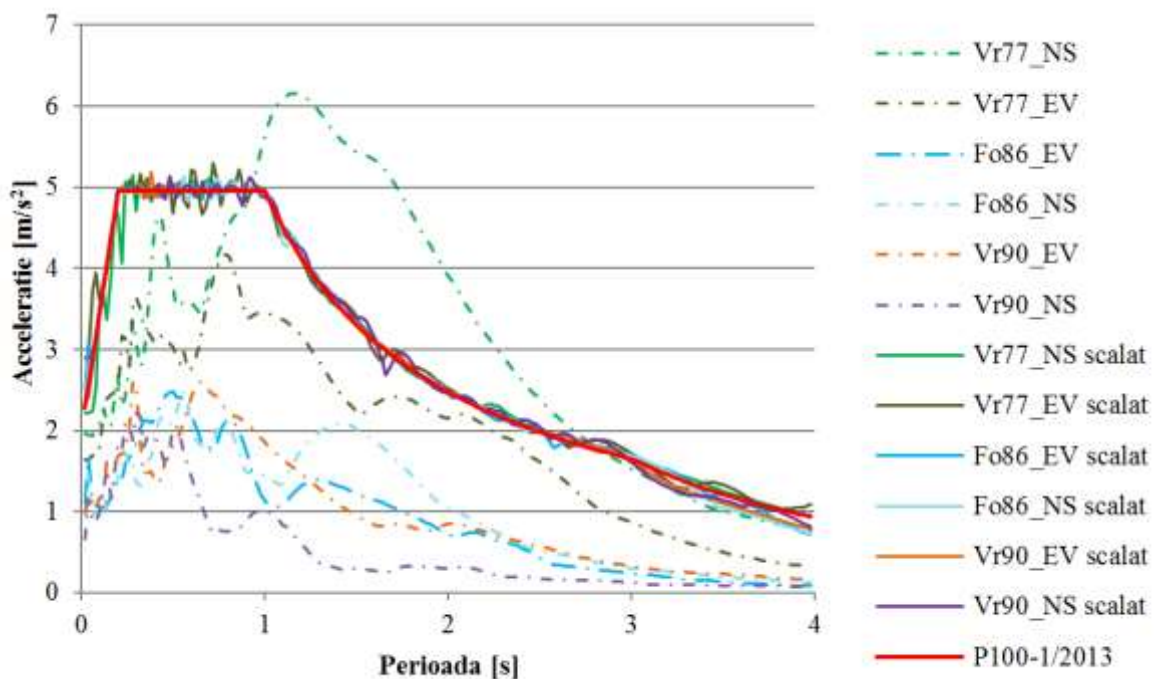
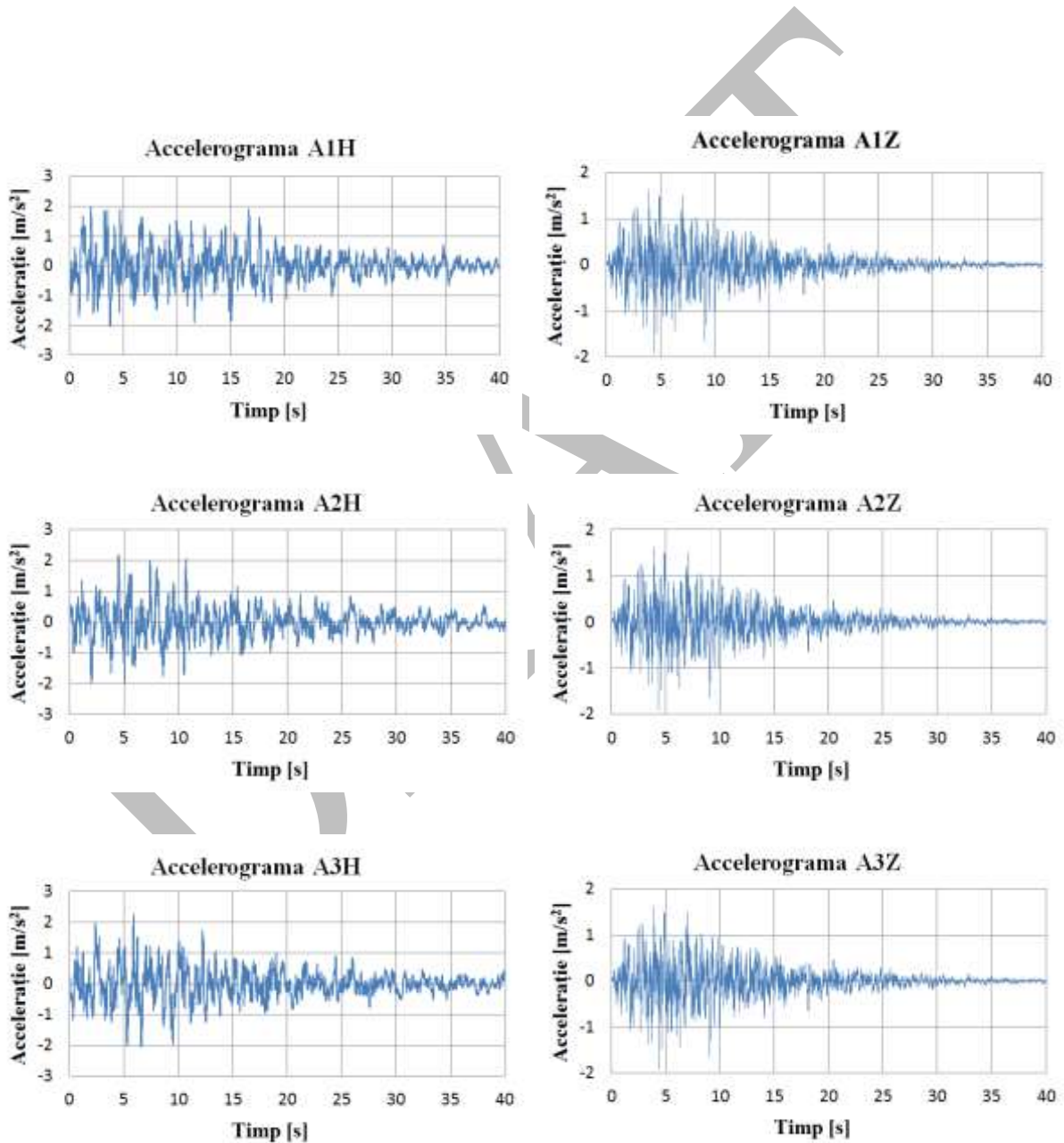


Fig. 5.3 Spectrele de răspuns ale accelerogramelor înregistrate și ale celor scalate conform spectrului de răspuns considerat conform P100-1/2013

Pe baza spectrelor de răspuns pentru componentele orizontale și verticale ale mișcării terenului pentru zona Slatina ( $a_g=0,2g$  și  $T_c=1,0s$ ), s-a generat un set de 4 accelerograme artificiale cu ajutorul programului SeismoArtif [123]. Durata acțiunii seismice este de 40 de secunde, iar pasul este de 0,01s. Accelerogramele astfel generate respectă regulile prevăzute atât în P100-1/2013, cât și în secțiunea 3.2.3.1.2 din EC8.



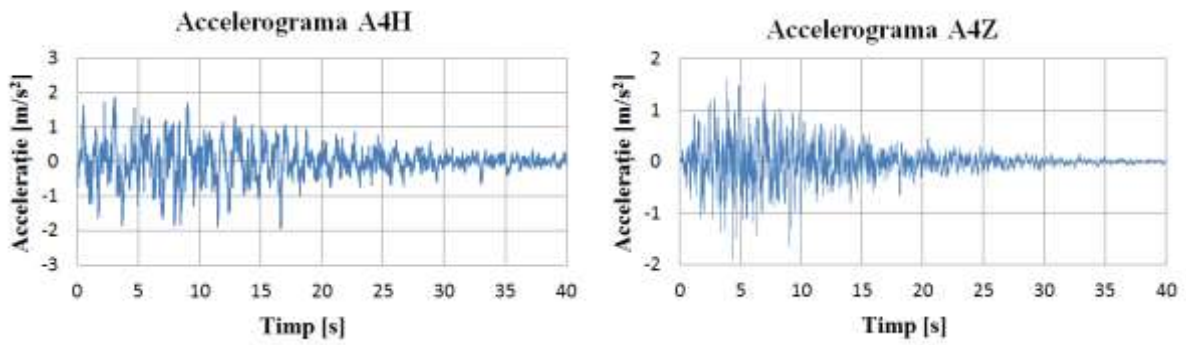


Fig. 5.4 Accelerograme artificiale - componente orizontale și verticale

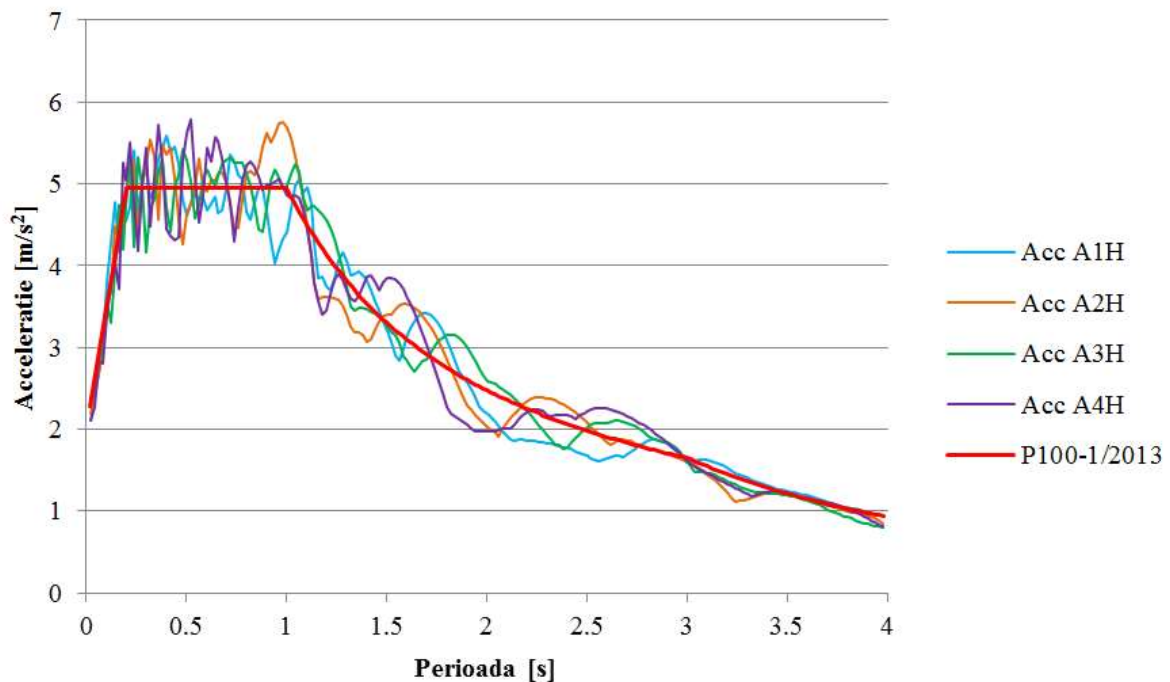


Fig. 5.5 Spectrul de răspuns elastic al accelerogramelor generate artificial și cel conform P100-1/2013

În combinarea acțiunilor seismice după cele trei direcții s-a ținut cont de prevederile normativului de seism în vigoare, prevederi care sunt prezentate și în cadrul capitolului 4.2 din prezenta lucrare.

**Tabel 5.1**

Acțiunile seismice orizontale utilizate în analiza de tip time-history

Nr	Cod	Nume	Direcție	Accel max. (m/sec <sup>2</sup> )	Detalii
1	Vr77	Vrancea 1977	NS	2,18	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 04.03.1977 și scalate pe spectru
			EV	2,87	

2	Fo86	Focșani 1986	NS	2,46	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 31.08.1986 și scalate pe spectru
			EV	2,35	
3	Vr90	Vrancea 1990	NS	2,33	Accel. înregistrate la INCERC București în data de 30.05.1990 și scalate pe spectru
			EV	2,34	
4	A1	Accel. artificială 1	orizontal	2,03	Accel. generate artificial
5	A2	Accel. artificială 2	orizontal	2,17	Accel. generate artificial
6	A3	Accel. artificială 3	orizontal	2,24	Accel. generate artificial
7	A4	Accel. artificială 4	orizontal	1,92	Accel. generate artificial

Primul caz de izolare luat în considerare este acela în care se folosesc dispozitive de tip pendul cu frecare (Friction Pendulum - FP). Dispozitivele alese au o înălțime de 90 mm, un diametru de 520 mm, iar raza de curbură a concavității este de 4,00 m. Cu ajutorul relației (2.27) s-a calculat o valoare pentru rigiditatea efectivă a izolatorului  $k_{eff}=0,194 \text{ kN/mm}$ , căreia îi corespunde o deplasare maximă de 0,25 m. Cum coeficientul de frecare este dependent de viteză s-a ales, în urma consultării cu specialiștii firmei furnizoare, o valoare de 0,2 pentru parametrul de control al schimbării acestui coeficient. Astfel, coeficientul de frecare variază între  $\mu_{min} = 0,015$  și  $\mu_{max} = 0,055$ , iar graficul acestei variații este prezentat în Fig. 4.7. În cazul acestui sistem de izolare este necesar ca toate punctele de reazem al acoperișului să fie prevăzute cu dispozitive de tip FP.

**Tabel 5.2**

Caracteristicile izolatorilor de tip HDRB și LRB utilizați pentru structura din Slatina

Tip izolator	Diametru cauciuc	Înălțime totală	Dimensiune totală în plan	Diametru miez plumb	Grosime strat cauciuc	Factor de formă	Rigiditate verticală	Rigiditatea efectivă orizontală	Forța de curgere
	D	H <sub>tot</sub>	LxL	d <sub>plumb</sub>	t <sub>r</sub>	S	K <sub>v</sub>	k <sub>eff</sub>	F <sub>y</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]
HDRB	450	314	500x500	-	170	22	516	0.34	32
LRB	500	345	550x550	60	180	24,1	560	0.56	57

Pentru cazurile de izolare în care s-au folosit dispozitive din cauciuc de tip HDRB și LRB s-a calculat o rigiditate efectivă  $k_{eff}$  a sistemului de izolare egală cu 3,34 kN/mm. S-a



decis ca pentru acest studiu să se folosească un număr diferit de dispozitive pentru cele două cazuri. În cazul întâi, al utilizării izolatorilor de tip HDRB, s-au folosit 10 dispozitive cu o rigiditate efectivă de 0,34 kN/mm, care au fost dispuse conform Fig. 5.6 a. Pentru decuplarea completă a acoperișului de stâlpii de beton în dreptul nivelului de izolare, sistemul a fost completat cu elemente de tip *pure friction* (PF) cu frecare foarte mică, care nu au rolul de a disipa energia seismică, ci doar de a transmite mai departe încărcările verticale și de a permite deplasarea pe orizontală. Pentru al treilea caz de izolare considerat s-au folosit dispozitive de tip LRB în combinație cu elemente de tip *pure friction* (PF). S-au utilizat 6 dispozitive de tip LRB cu o rigiditate efectivă de 0,56 kN/mm, care au fost dispuse conform Fig. 5.6 b. Principalele caracteristici pentru izolatorii de tip HDRB și LRB sunt prezentate în tabelul de mai jos. Pe baza acestora au fost calculate toate celelalte proprietăți utilizate în programul SAP2000 pentru modelarea acestor elemente.

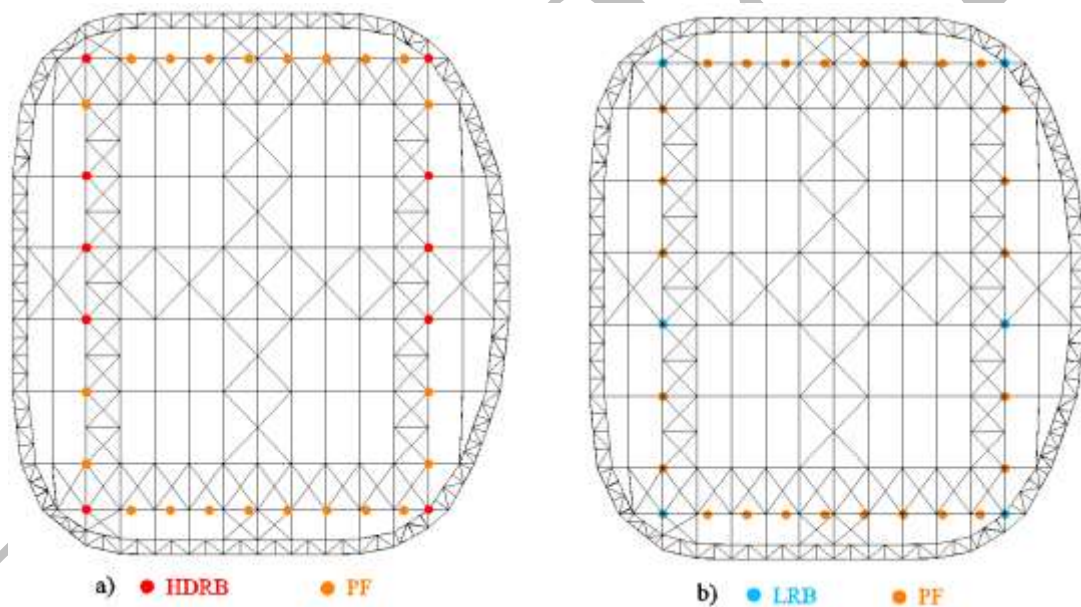
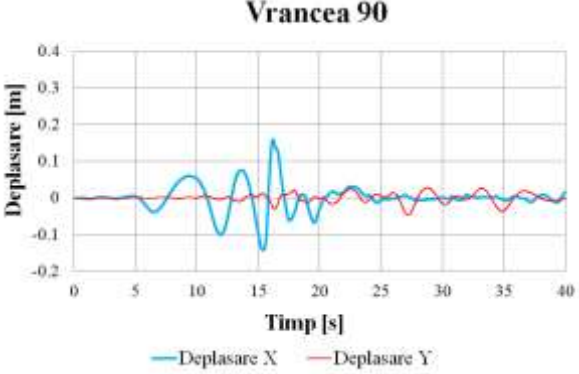
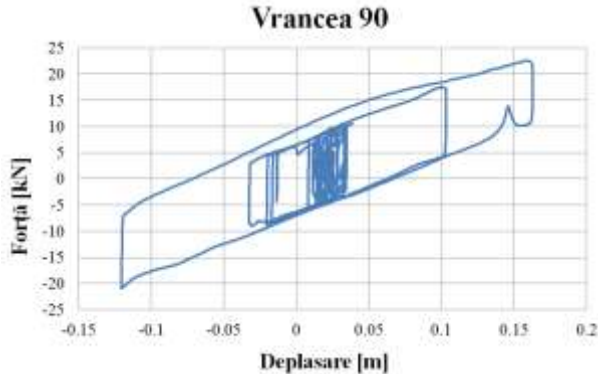
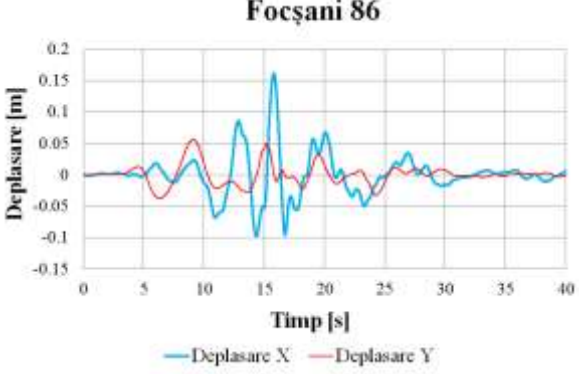
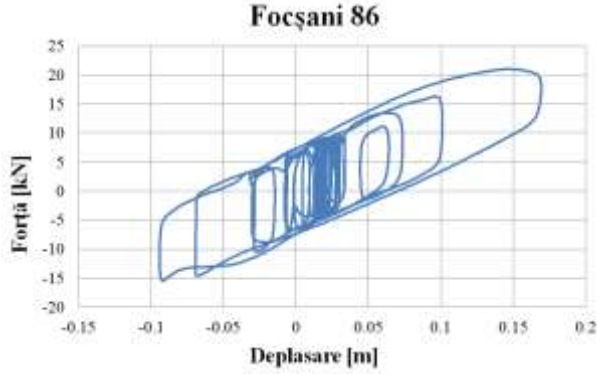
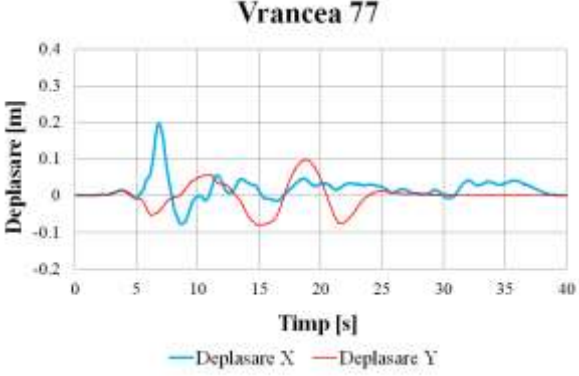
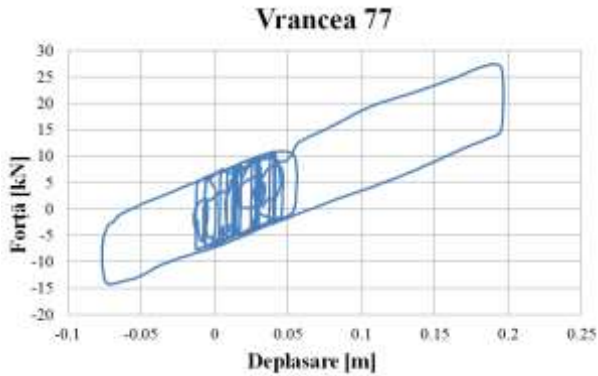


Fig. 5.6 Poziționarea în plan a izolatorilor pentru cazurile de izolare cu HDRB și LRB

### 5.3 Răspunsul seismic al structurii

În acest tip de studiu sunt relevante valorile și forma curbelor histeretice forță-deplasare ale izolatorilor cu ajutorul cărora se poate calcula și vizualiza capacitatea de disipare a energiei a elementelor de izolare și a sistemului per ansamblu. Deoarece modelul considerat este unul spațial, în urma evaluării se obțin curbe histeretice pe ambele direcții, unde X este considerată direcția cadrului transversal, iar Y direcția longitudinală. S-a observat că sunt mai relevante curbele obținute pe direcție transversală, iar graficele acestora în cazul acțiunii celor șapte tipuri de solicitări seismice prezentate anterior, sunt prezentate în Fig. 5.7. În graficul

care prezintă deplasarea izolatorului simultan pe cele două direcții orizontale în timpul fiecărei acțiuni seismice se poate observa ca valoarea acestora să nu depășească deplasările maxime admise calculate pentru fiecare tip de izolator în parte. Graficele de mai jos prezintă atât curbele histeretice, cât și deplasarea izolatorilor de tip FP utilizați în primul caz de izolare propus. În primul caz de izolare este de interes observarea influenței componentei verticale din acțiunea seismică în fiecare situație, deoarece, datorită schimbării greutateii verticale care acționează pe izolatorii de tip FP, se produce o schimbare a coeficientului de frecare și astfel este afectată curba idealizată.



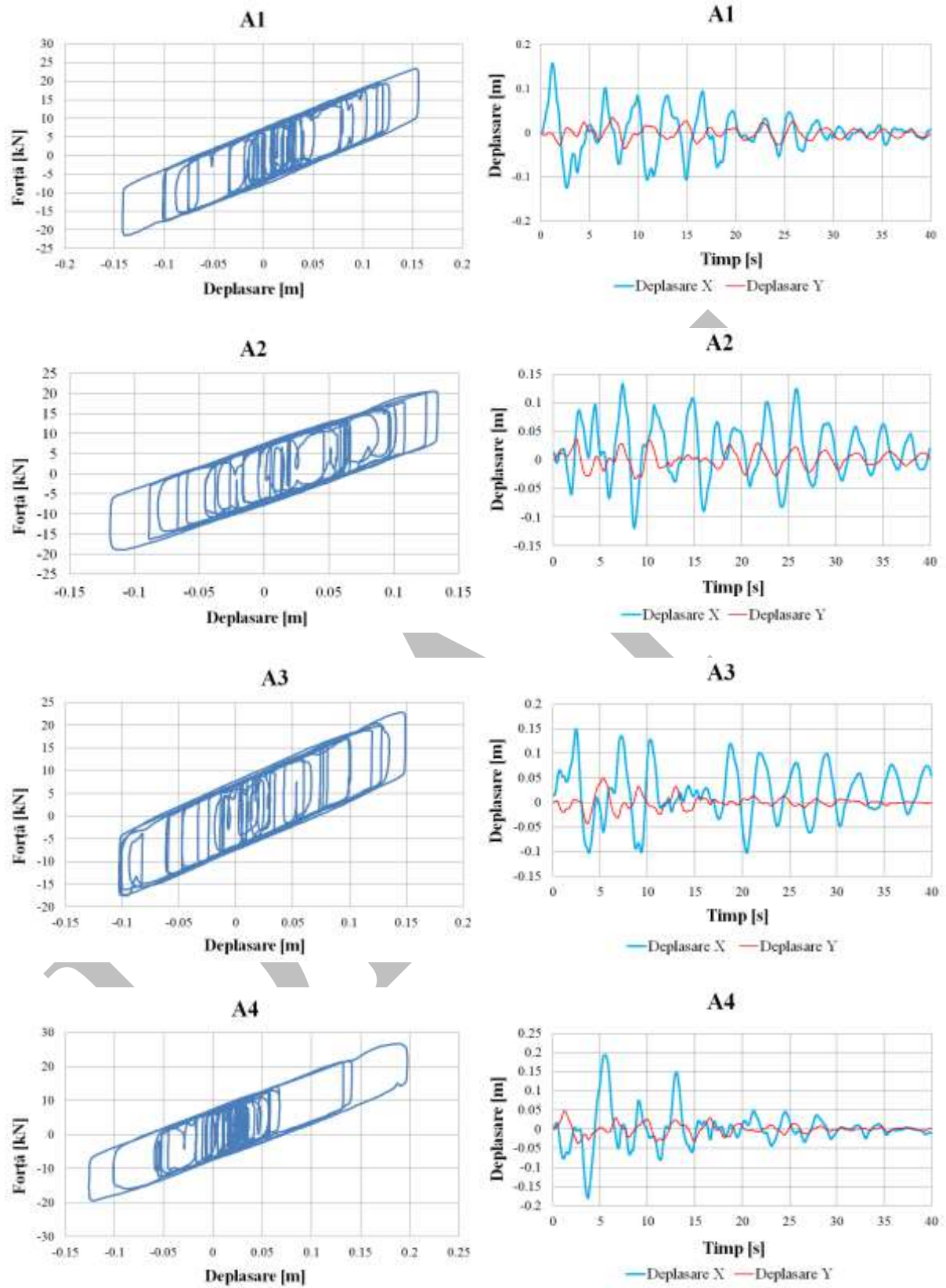
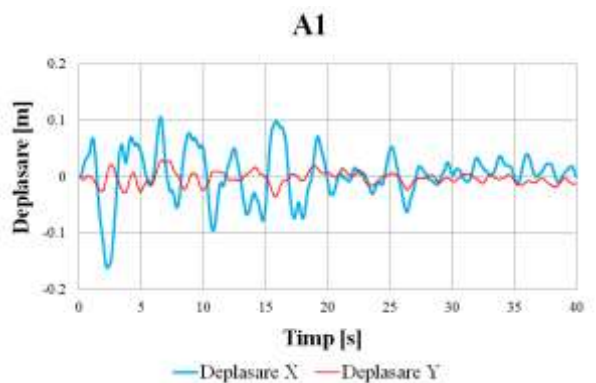
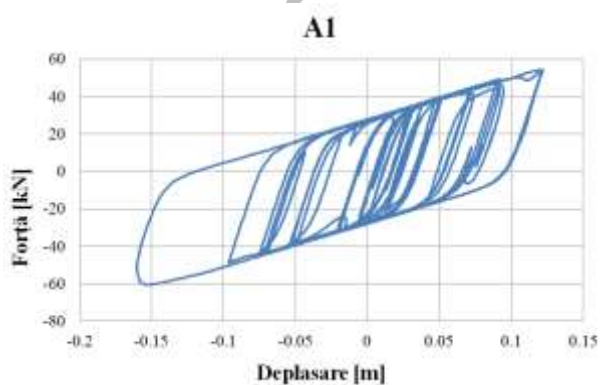
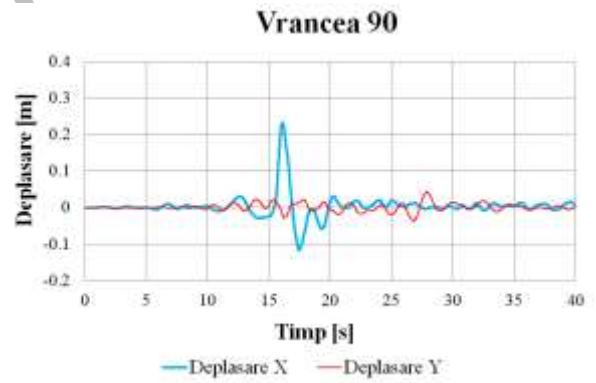
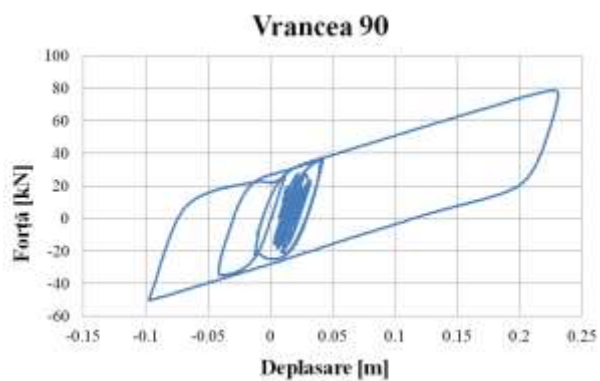
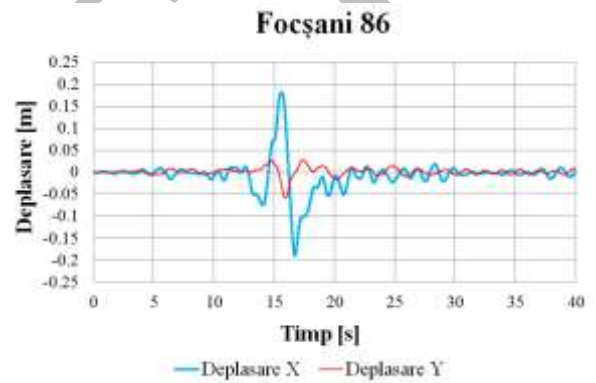
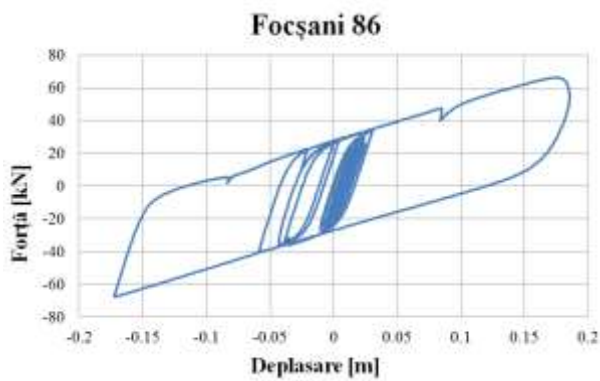
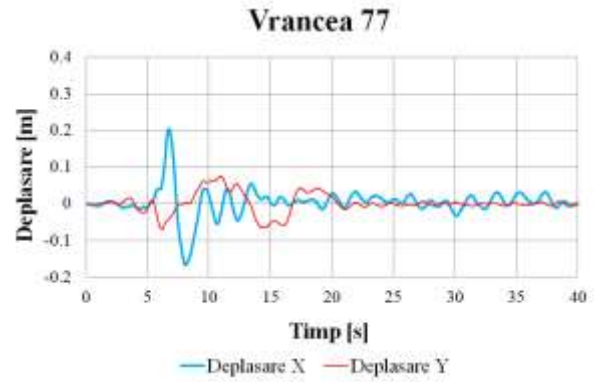
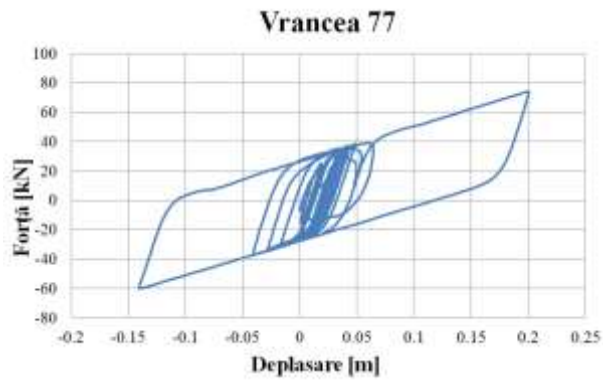


Fig. 5.7 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip FP

Și în cazul utilizării dispozitivelor de izolare de tip HDRB se poate observa curba histeretică și deplasarea maximă a acestora care se încadrează în parametri stabiliți de furnizor și de proiectant.



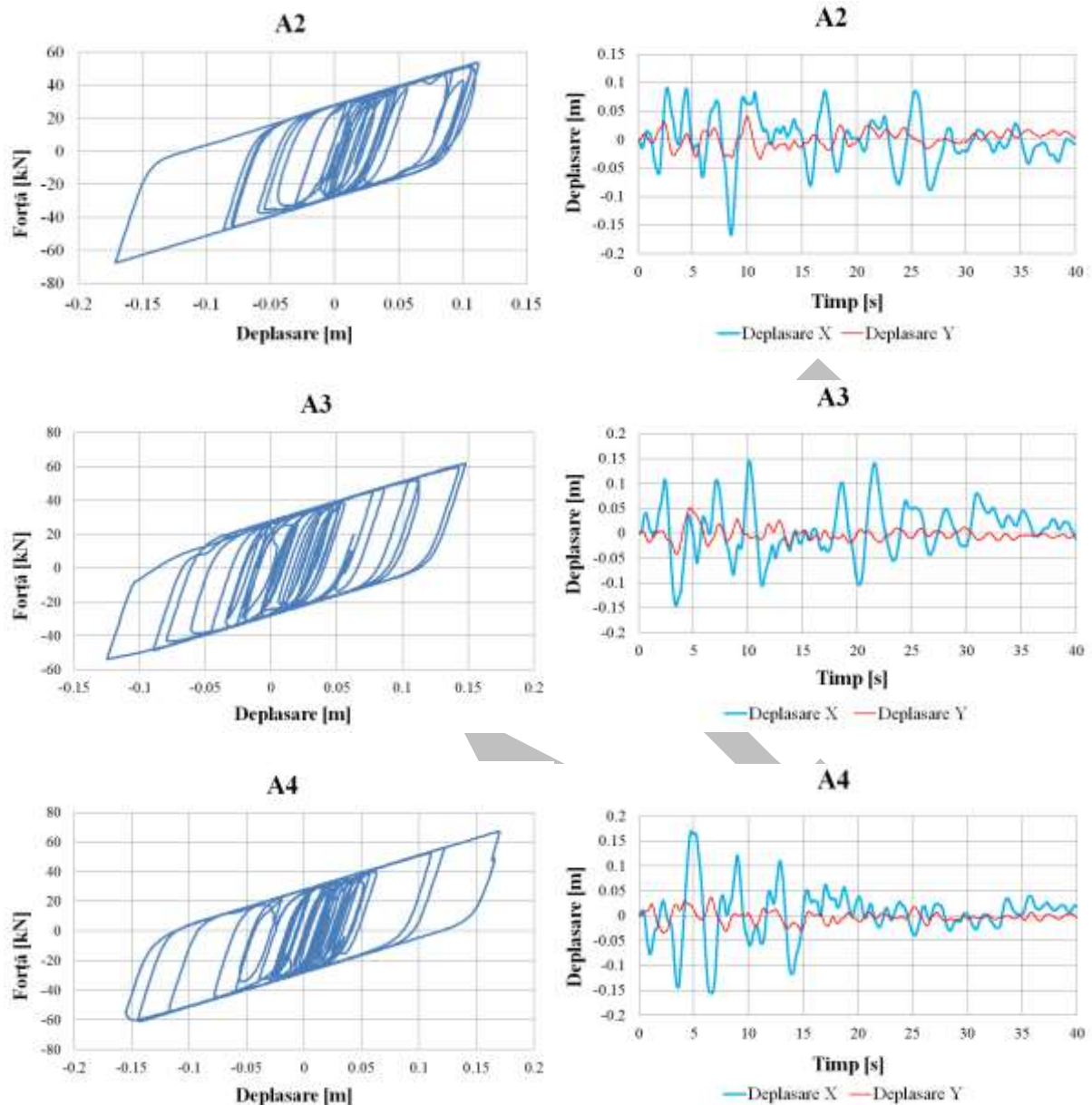
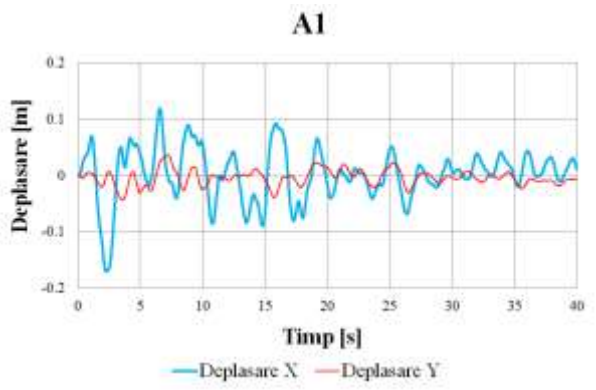
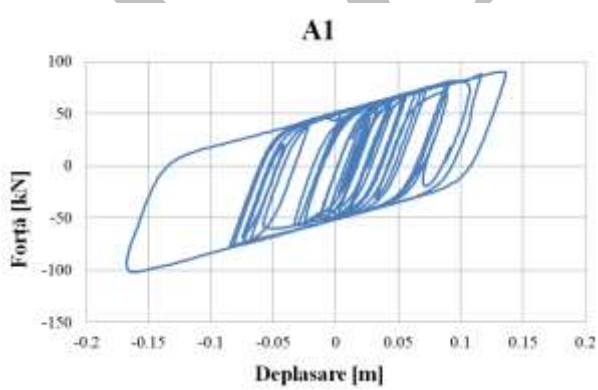
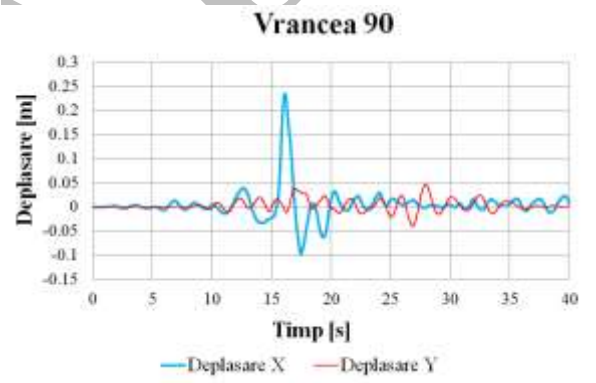
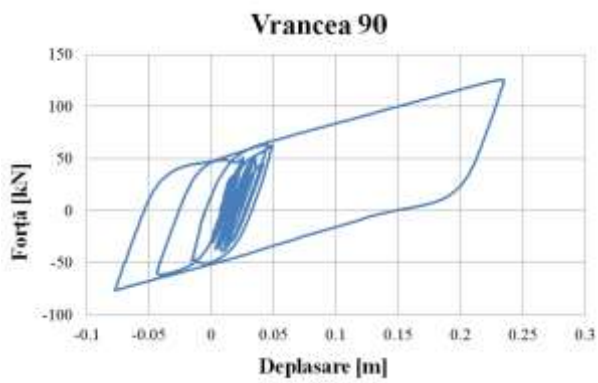
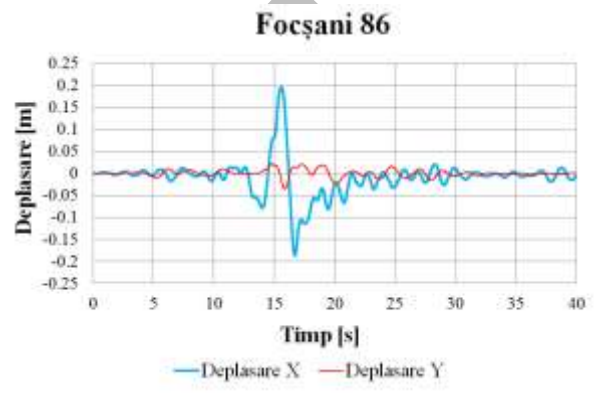
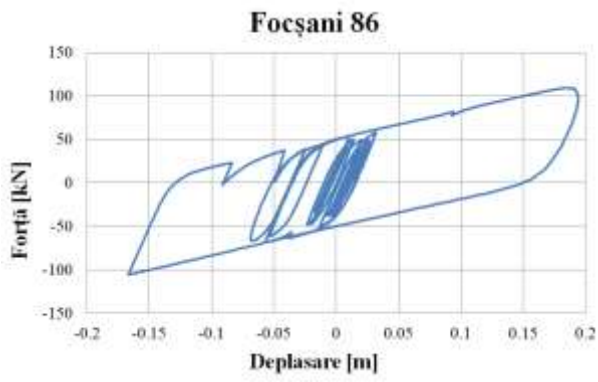
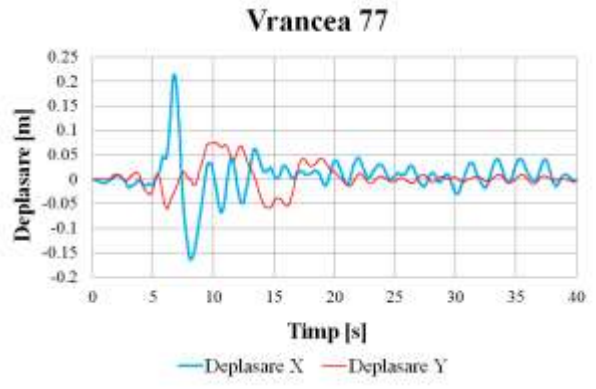
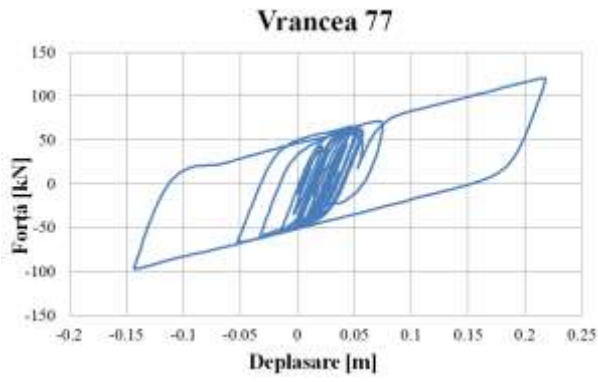


Fig. 5.8 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip HDRB

Deoarece numărul de izolatori de tip HDRB a fost intenționat ales diferit față de numărul de dispozitive de tip LRB, nu ar fi corect să se compare datele obținute pentru fiecare izolator, ci doar caracteristicile întregului sistem de izolare. Curbele forță-deplasare pe direcția cadrului transversal și deplasările pe cele două direcții în cazul celui de-al treilea sistem de izolare propus sunt prezentate în figura de mai jos pentru fiecare acțiune seismică în parte.



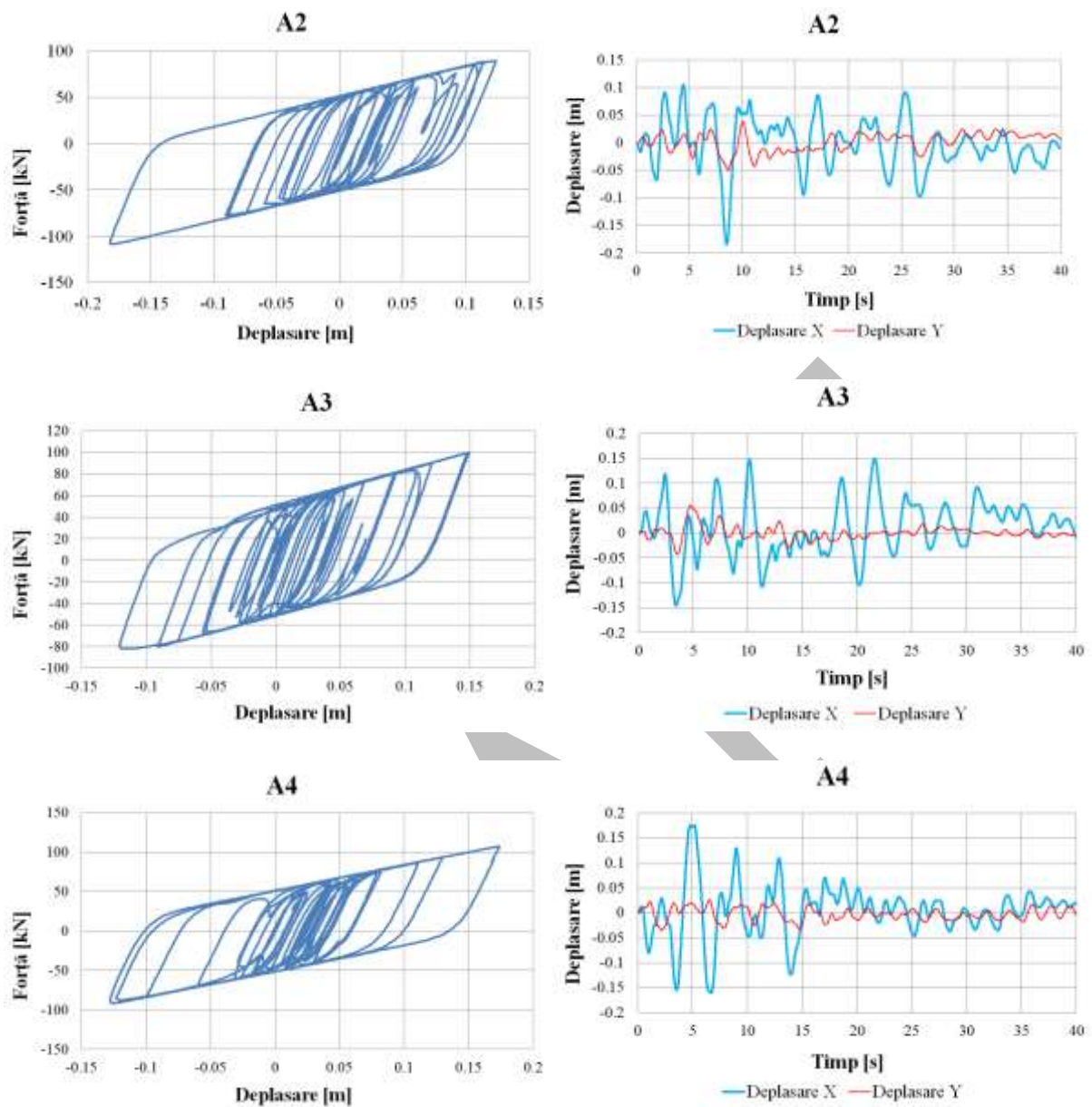


Fig. 5.9 Curbele histeretice și răspunsul în deplasări al izolatorului de tip LRB

Unul dintre efectele cunoscute și așteptate în cazul izolării în bază este reducerea accelerațiilor structurii situate deasupra sistemului de izolare. Și în cazul izolării seismice doar a acoperișului se poate observa această scădere a valorilor accelerațiilor, fapt prezentat cu ajutorul graficelor de mai jos pentru fiecare caz de izolare și acțiune seismică în parte.

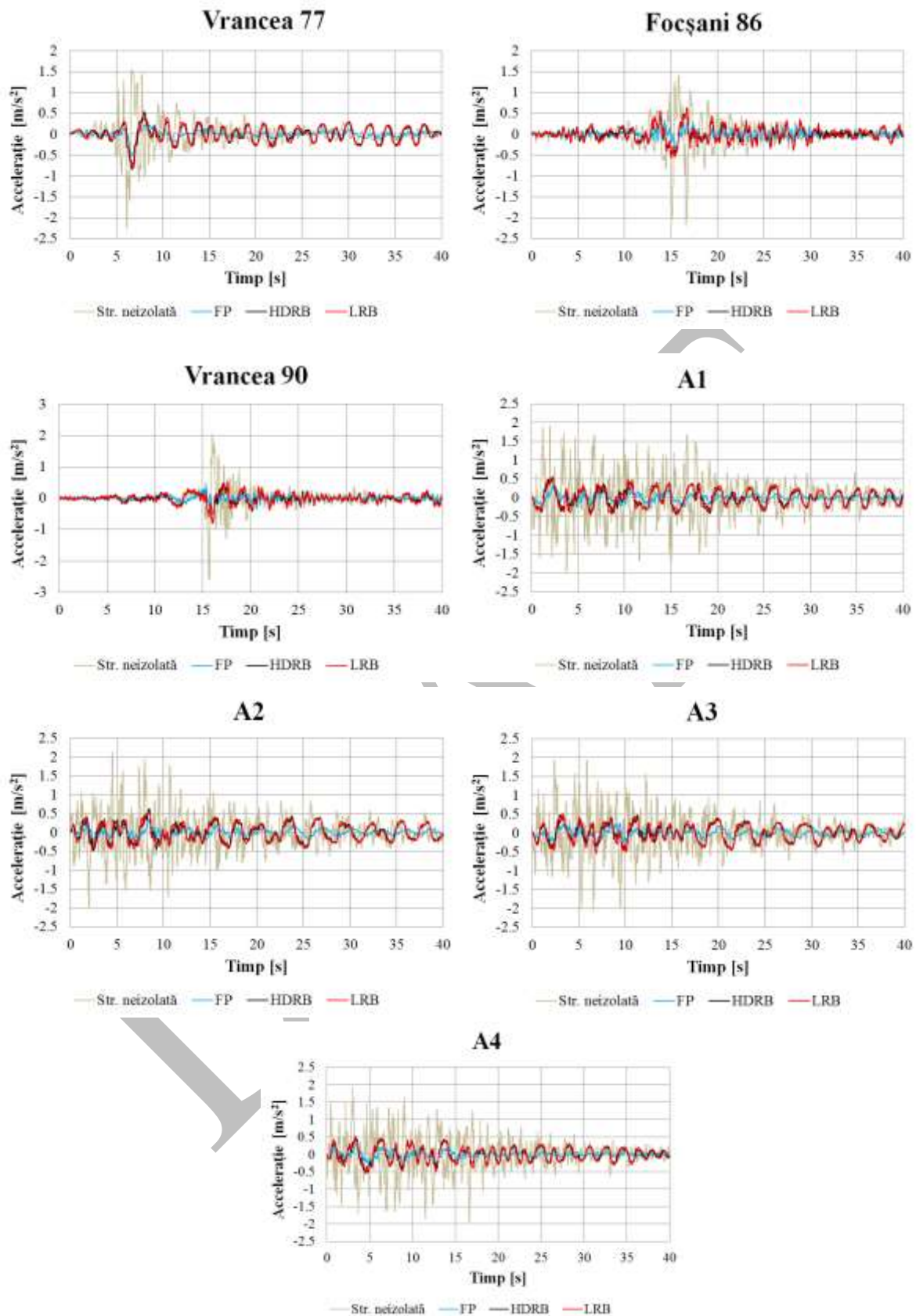
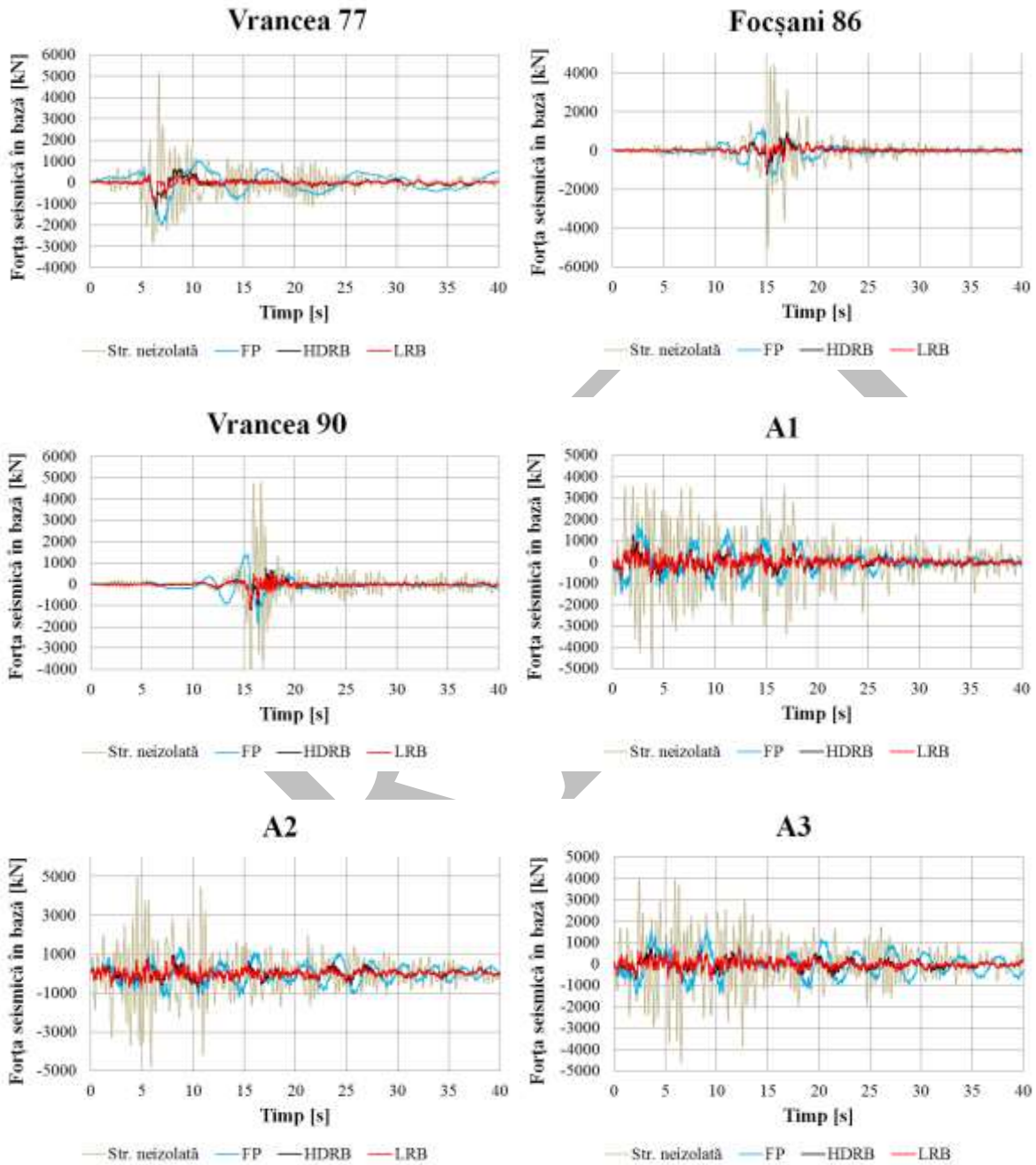


Fig. 5.10 Variația în timp a accelerației la nivelul acoperișului



De asemenea, se observă o reducere importantă a forței tăietoare de bază în fiecare caz de izolare față de valorile înregistrate în analiza structurii inițiale, cu articulații la capătul superior al stâlpilor.



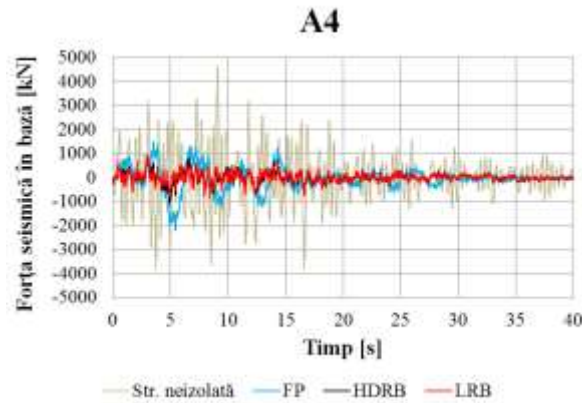


Fig. 5.11 Variația forțelor seismice în bază

Prin introducerea izolatorilor se urmărește și creșterea perioadei proprii de vibrație a structurii, lucru care stă și la baza principiului izolării bazei. Creșterea acesteia are ca urmare scăderea factorului de amplificare dinamică, efectul fiind și în cadrul analizei seismice cu spectru de răspuns, reducerea acțiunii seismice asupra structurii. Pentru a fi considerată eficientă, în urma izolării seismice trebuie obținută o perioadă proprie de vibrație de cel puțin trei ori mai mare decât în cazul structurii neizolate. Această condiție este îndeplinită în toate cele trei cazuri de izolare prezentate. În urma izolării, perioada fundamentală de vibrație crește de la valoarea  $T=0,598$  s la 2,21 s pentru cazul izolării cu FP, 3,87 s pentru utilizarea HDRB și 8,85 s pentru utilizarea LRB. Aceste perioade se îndepărtează de perioada predominantă a cutremurelor considerate care variază de la 0,28s până la 1,42 s și astfel se elimină posibilitatea ca structura să intre în rezonanță. Din analiza modală a rezultat că primele două moduri proprii de vibrație sunt translații după cele două direcții principale, iar cel de-al treilea mod propriu este cel de torsiune.

Prin plasarea izolatorilor imediat sub nivelul de izolare, pe lângă schimbările produse asupra caracteristicilor elementelor acoperișului, se înregistrează modificări semnificative și asupra elementelor structurale situate sub nivelul de izolare. Aceste elemente sunt reprezentate de stâlpii de beton armat care susțin structura acoperișului. Cele mai importante modificări sunt cele ale parametrilor statici reprezentați prin momentul încovoietor pe cele două direcții, forța tăietoare la baza lor și deplasarea la capătul superior. Din secțiunea transversală se poate observa că pentru stâlpii circulari de beton avem două înălțimi libere diferite, una de 9,30 m și alta de 3,40 m, corespunzătoare zonei dedicate comentatorilor. Valorile prezentate mai jos sunt extrase pentru situația cea mai puțin favorabilă.

**Tabel 5.3**

Valorile momentului încovoietor maxim la baza stâlpului

Acțiune seismică	Moment maxim la baza stâlpului (kNm)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	4808	560	632	605
Focșani 86	5009	549	701	594
Vrancea 90	5042	558	748	664
A1	4799	515	654	594
A2	5083	546	695	639
A3	4918	430	525	446
A4	4701	408	528	468

**Tabel 5.4**

Valorile forței tăietoare maxime la baza stâlpului

Acțiune seismică	Forța tăietoare maximă la baza stâlpului (kN)			
	Str. neizolată	FP	HDRB	LRB
Vrancea 77	474	60	65	63
Focșani 86	521	57	73	61
Vrancea 90	525	58	77	69
A1	500	55	68	61
A2	530	56	72	66
A3	512	46	54	47
A4	489	44	55	49

O altă consecință importantă care reiese în urma acestor analize este reducerea semnificativă a deplasării capătului liber al stâlpilor de susținere. Astfel, s-au prelucrat datele pentru stâlpii circulari cu înălțime de 9,30 m, obținute în urma analizei de tip *time-history*, unde au fost luate în considerare toate cele șapte cutremure specificate anterior. După cum se poate observa și în graficul de mai jos (Fig. 5.12), care prezintă procentual valoarea deplasării în urma izolării față de cazul structurii neizolate, cea mai importantă reducere a acestora se înregistrează în cazul utilizării elementelor de tip FP, iar cea mai mică diferență în cazul izolării cu HDRB. Aceste valori corespund stâlpilor în capătul cărora sunt montați izolatorii. Ceilalți stâlpi, care sunt prevăzuți cu elemente suplimentare de tip pure friction (PF), nu preiau practic forța seismică, astfel că au deplasări nule. În realitate, ei vor înregistra deplasări de sub 5% din valoarea inițială. Sub acest aspect, se dovedește mai oportună utilizarea sistemului de izolare cu LRB sau HDRB, deoarece nu se bazează pe aportul stâlpilor dreptunghiulari aflați pe lățimea structurii, lucru imposibil de realizat în cazul utilizării

dispozitivelor de tip FP, care presupune amplasarea acestora în fiecare punct de sprijin al acoperișului.

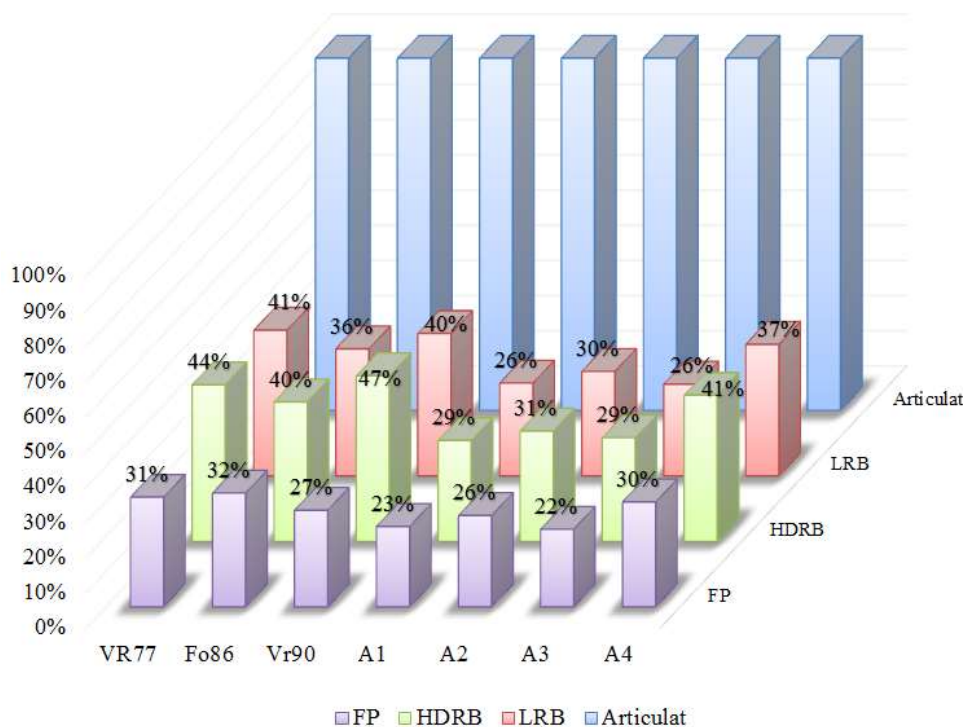


Fig. 5.12 Deplasarea capătului liber al stâlpilor

Structura a fost evaluată și din punctul de vedere al posibilității reducerii consumului de material necesar pentru realizarea acoperișului. Elementele care alcătuiesc structura acoperișului au fost dimensionate cu ajutorul modulului integrat în SAP2000, conform prevederilor din Eurocod 3 și utilizând același set de parametri pentru fiecare analiză în parte. S-au utilizat secțiuni diferite, alese din bazele de date pentru diverse tipuri de elemente. Pentru tălpile grinzilor principale s-au folosit elemente de tip HEA și HEB, iar pentru restul elementelor s-au folosit elemente de tip țevă dreptunghiulară. Pentru partea de dimensionare, evaluarea acțiunii seismice asupra acestor elemente s-a făcut cu ajutorul analizei spectrale. În urma analizelor și a procesului de dimensionare, s-a constatat o reducere a greutateii totale a acoperișului pentru fiecare dintre cele trei cazuri de izolare în parte. Reducerea cea mai importantă s-a constatat în cazul utilizării izolatorilor de tip HDRB, când greutatea structurii s-a redus cu 8,7% față de valoarea obținută în urma dimensionării structurii de bază. Pentru celelalte două cazuri de izolare s-au obținut reduceri de material puțin mai mici, în jurul valorii de 7,5%. Greutățile totale ale elementelor acoperișului obținute în urma dimensionării în fiecare caz de izolare sunt prezentate în tabelul de mai jos.

**Tabel 5.5**

Greutatea structurii acoperișului

	Str. neizolată	Tipul de izolare		
		FP	HDRB	LRB
Greutate structură metalică acoperiș (tone)	227,48	210,60	207,67	210,38

Un alt obiectiv al studiilor prezentate l-a constituit optimizarea, din punctul de vedere al consumului de material, ceea ce se traduce prin reducerea greutateii acoperișului și implicit reducerea costului de realizare al acestuia. Într-adevăr, amplasarea izolatorilor seismici în secțiunea de sub acoperiș a clădirilor de tip sală de sport cu deschidere mare influențează substanțial consumul de material asociat structurii acoperișului. Reducerea consumului de material este prezentată sub formă tabelară (tabel 5.5) și se poate concluziona că amplasarea izolatorilor seismici la nivelul acoperișului conduce la o reducere de circa 8% a greutateii acestuia.

## 6. Optimizarea structurilor cu deschidere mare izolate seismic la nivelul acoperișului

Optimizarea structurală poate fi definită ca stabilirea rațională a soluției structurale care se dovedește a fi cea mai bună dintre toate celelalte, ținând cont de obiective și de un set de limitări impus [35]. Tendința actuală în munca de concepție tehnică este proiectarea optimală, prin care se înțelege realizarea unui program de optimizare calat pe modelul matematic al unei situații ingineresti concrete [106, 138]. Proiectarea optimală a structurilor are ca scop realizarea unor construcții la costuri reduse, cu asigurarea tuturor cerințelor impuse de siguranță, funcționalitate și explatare a acestora [106].

Procesul de optimizare poate fi descris cu ajutorul unor cuvinte-cheie, cum ar fi recunoașterea unei necesități, crearea și selecția alternativelor. În mod tradițional, descrierea procesului de optimizare se bazează pe recunoașterea unei nevoi, urmată de definiția tehnică a problemei, crearea uneia sau mai multor configurații, analiza acestora și selectarea celei mai bune alternative (optimizarea) [120]. Reducerea avariilor produse de încărcările dinamice care sunt aplicate structurilor, mai ales ale celor situate în zone cu potențial seismic ridicat, reprezintă pentru ingineri o provocare, o necesitate și trebuie să devină o preocupare permanentă. În mod tradițional, protecția antiseismică înseamnă disiparea energiei induse de seism prin deformații inelastice ale elementelor structurale. Această abordare este înlocuită cu mare succes de utilizarea sistemelor de control prin folosirea de dispozitive active sau pasive pentru reducerea răspunsului structural și pentru minimizarea daunelor produse de seism. Interesul crescut pentru acest subiect se observă și prin numărul de studii publicate în acest domeniu. Astfel, cele mai abordate tematici sunt optimizarea structurilor cu deschidere mare [73, 88], optimizarea dispozitivelor de izolare seismică [78] și optimizarea structurilor prevăzute cu elemente de disipare a energiei seismice [52, 92, 132]. Scopul principal al analizei structurale este de a prezice comportamentul structurilor sub diferite acțiuni [120].

În cadrul studiilor numerice prezentate în capitolul anterior s-a observat că prin plasarea izolatorilor seismici se obține doar la o îmbunătățire a răspunsului seismic după orizontală. Acțiunea seismică verticală asupra structurilor are un efect considerabil mai ales în zona imediată a epicentrului unde accelerațiile verticale pot fi mai mari decât cele orizontale [69]. Se acordă o atenție deosebită în analiza dinamică a structurilor cu deschidere mare situate în zone seismice deoarece mare parte din masa structurii este concentrată la nivelul acoperișului. Momentan există modele analitice de izolatori care să asigure și o reducere a efectelor componente verticale a seismului dar și unele sisteme care au fost implementate

[129, 131]. Aceste sisteme sunt greu de implementat pe o gamă largă de structuri iar unele dintre și-au dovedit utilitatea în cazul producerii unui seism [143]. Una dintre metodele de îmbunătățire a răspunsului seismic pe verticală a structurilor ar fi reducerea masei care vibrează pe această direcție. Acest lucru înseamnă, în cazul structurilor cu deschidere mare, o reducere a masei acoperișului. Acest aspect s-a avut în vedere și a condus la problemele de optimizare abordate în prezentul capitol.

### Tipuri de optimizare structurală

În funcție de caracteristicile geometrice, optimizarea structurală se poate împărți în trei mari categorii:

- Optimizarea dimensională, unde variabila principală este mărimea unei secțiuni, ca de exemplu aria secțiunii transversale;
- Optimizarea topologică, care presupune găsirea unei forme a structurii fără ca aceasta să fie cunoscută a priori.
- Optimizarea formei presupune cunoșterea topologiei structurii și are ca variabilă distribuția grosimilor elementelor sau mărimea golurilor

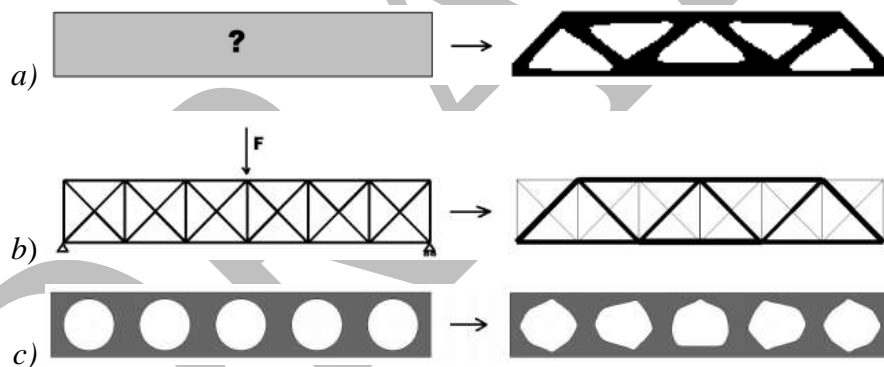


Fig. 6.1 Tipuri de optimizare structurală [98]

### Obiectivele optimizării

Procesul de optimizare implică utilizarea unei funcții  $f(x)$  sau  $f(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$  numite obiectiv, a cărei valoare poate fi folosită ca o evaluare a soluției. Dacă această funcție conține mai multe funcții obiectiv, atunci vom denumi procesul ca fiind unul de optimizare multicriterială. Această funcție obiectiv poate reprezenta greutatea elementelor structurii, eforturi, tensiuni, deplasări, perioada structurii sau combinații între aceste elemente [55]. În prezentul capitol, autorul utilizează în problemele de optimizare doar o singură funcție obiectiv.

## 6.1 Algoritmii genetici

Algoritmul genetic bazat pe teoria lui Darwin de „supraviețuire a celui mai adaptat” („the survival of the fittest”) reprezintă o metodă eficientă și cu aplicabilitate răspândită de căutare globală, deoarece lucrează direct cu soluții, și nu cu informații derivate (1).

John Holland (1975) a fost primul care a dezvoltat teoria algoritmilor genetici, în cartea sa intitulată „Adaptation in Natural and Artificial Systems”.

Algoritmii genetici elementari (SGA) propuși de Goldberg (1989) sunt cei care stau la baza majorității algoritmilor genetici. Aceștia presupun utilizarea a trei operatori genetici de bază: selecția, mutația și încrucișarea [55]. Procesul de selecție are drept scop transmiterea în generația următoare a informației cu cea mai bună valoare a funcției fitness. Mutația permite apariția unor caracteristici noi, care să nu fie întâlnite la nici unul dintre părinți, iar încrucișarea (crossover) presupune împărțirea informației în segmente și schimbul segmentelor de același fel cu corespondentul celuilalt părinte. Pe baza algoritmilor genetici elementari au fost dezvoltați și algoritmii genetic paraleli (PGA), hibridi și adaptivi.

Adeli și Cheng [1] au fost primii care au prezentat optimizarea unei structuri spațiale integrând în algoritmi genetici funcția de penalizare. Cercetarea efectuată în acest domeniu în ultimul deceniu se concentrează în special fie pe îmbunătățirea metodei de optimizare cu algoritmi genetici [2, 84], fie pe accelerarea acestui proces [66, 119]. Există studii care se concentrează doar pe problemele optimizării grinzilor cu zăbrele, unele dintre ele cu aplicații practice în acest domeniu [144].

Simplitatea metodei calculului evoluționist reprezintă principalul său atu, iar acest lucru se datorează faptului că nu este necesar calculul gradientului funcției. Algoritmii problemei conține, pe lângă inițializare, și procesul iterativ de selecție și reproducere, care conduce la soluția optimă [127]. Aplicabilitatea algoritmilor genetici se poate face cu succes pentru o gamă variată de probleme care să conțină un număr considerabil de variabile, iar aceștia pot fi combinați cu metode clasice de optimizare pentru reducerea timpului de calcul [127]. O altă metodă de scurtare a timpului efectiv de soluționare a problemei este penalizarea proceselor.

Adaptabilitatea la schimbările dinamice este o altă caracteristică a algoritmilor evoluționști, spre deosebire de metodele clasice de optimizare, care nu se potrivesc acestor tipuri de probleme. Adaptarea constă în faptul că noile populații generate furnizează o bază pentru viitoarele îmbunătățiri, nefiind necesară reinițializarea aleatoare a populației [127].

Principalele elemente ale algoritmilor genetici sunt:

- Codarea



- Populația inițială
- Funcția adaptabilității (fitness)
- Restricțiile
- Operatorii genetici: scalare, selectare, încrucișare, mutație și selectarea elitelor

## **Codarea**

Codarea este procesul de reprezentare a genelor fiecărui individ care se face în mod uzual cu ajutorul unui șir binar, al numerelor reale, al numerelor întregi și cu ajutorul structurilor de date.

## **Populația inițială**

Populația inițială este în mod obișnuit creată aleator, astfel încât indivizii acesteia să fie cât mai răspândiți pe suprafața de răspuns, pentru ca aceasta să poată fi suficient explorată [55]. Mărimea populației inițiale depinde în primul rând de complexitatea problemei, iar cu cât aceasta este mai mare, cu atât se poate acoperi mai eficient spațiul de căutare a soluțiilor problemei.

## **Funcția adaptabilității (fitness)**

Pentru a putea face o distincție între soluții se utilizează funcția fitness, care are un rol major în cadrul procesului evoluționist. Această funcție realizează corespondența dintre cromozomii unei populații și valoarea adaptabilității lor [138]. O nouă populație este alcătuită în urma evaluării populației anterioare cu ajutorul funcției fitness. Soluțiile relativ bune din fiecare populație sunt reproduse în generația următoare, iar cele slabe sunt abandonate [44, 55].

În cadrul algoritmilor genetici, o valoare fitness este atribuită fiecărui individ. Pașii pe care îi urmărește această funcție sunt următorii: decodarea individului, modificarea și rezolvarea modelului structural.

## **Restricții**

În urma operațiilor algoritmilor genetici asupra indivizilor pot rezulta situații în care aceștia să nu corespundă cerințelor, astfel că aplicarea restricțiilor are un rol important în validarea acestora.

Strategiile de respingere elimină indivizii nefezabili creați printr-un proces evoluționist. Respingerea soluțiilor nefezabile se face cu ajutorul metodelor de penalizare.

Există două tipuri de penalizare: una exterioară, care penalizează soluțiile nefezabile, și una interioară, care penalizează soluțiile fezabile.

### **Operatori genetici:**

După generarea aleatoare a populației inițiale, algoritmul evoluează cu ajutorul a trei operatori principali: selecția, încrucișarea și mutația.

Procesele de scalare, selectare și încrucișare sunt definite în cadrul bibliotecilor conținute în MATLAB.

#### *Mutația:*

Mutația încurajează diversitatea genetică în cadrul algoritmului și împiedică soluțiile să fie foarte apropiate între ele. Funcția de mutație este un proces în două etape, în cadrul căruia la început se selectează aleator un număr de gene care nu va depăși numărul maxim stabilit conform unui parametru definit în cadrul procesului. Al doilea pas presupune schimbarea genelor selectate cu valori aleatoare cuprinse între o limită superioară și una inferioară, impuse de utilizator. Scopul acestei funcții este de a nu permite, pe cât posibil, algoritmului să se blocheze la un minim local și face posibilă explorarea întregii suprafețe de răspuns.

#### *Încrucișarea (crossover):*

Acest proces presupune generarea unui nou individ (copil), provenit din combinarea a doi indivizi denumiți părinți. Această operație are ca scop generarea în următoarea generație a indivizilor cu o valoare fitness mai bună. Procesul cuprinde trei etape: selectarea aleatoare a doi părinți, selectarea aleatoare a unei zone de încrucișare și schimbarea elementelor între acești indivizi, în funcție de zona de încrucișare. Parametrul important al acestui proces este reprezentat de proporția de indivizi care iau naștere în urma lui .

#### *Selecția:*

Presupune selectarea unui număr de indivizi pentru procesul de reproducere. Acest procedeu de alegere a indivizilor este unul aleator și se face pe baza valorii funcției fitness, astfel încât pentru o valoare fitness mai mare a individului șansele ca el să fie selectat cresc.

### **Criteriul de oprire a procesului de optimizare:**

Pentru ca procesul de optimizare să fie considerat terminat trebuie să se îndeplinească una dintre condițiile specificate. Una dintre aceste condiții este atingerea numărului maxim de generații, iar cel de-al doilea criteriu este reprezentat de atingerea unui număr de repetări consecutive a valorii fitness.

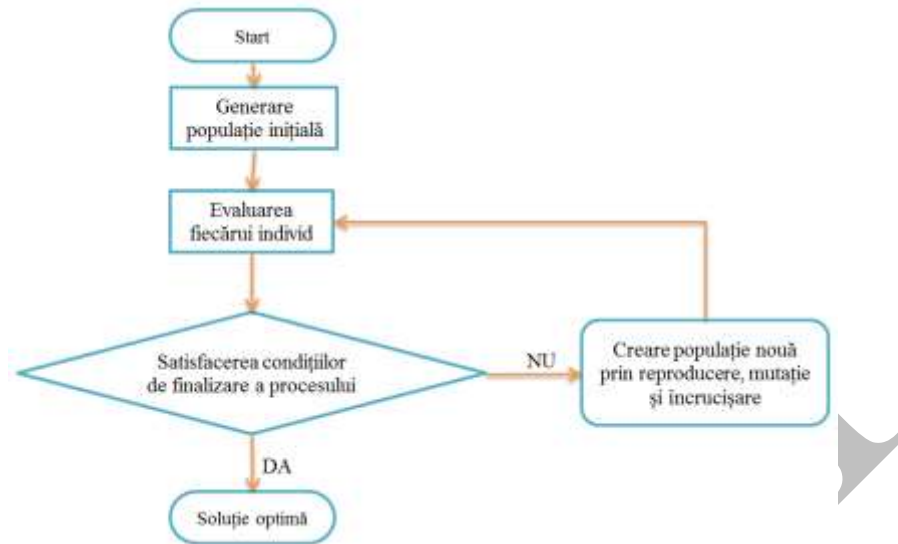


Fig. 6.2 Diagramă algoritm genetic

## 6.2 Descrierea problemei de optimizare

Structura propusă pentru optimizare este cadrul transversal al structurii de rezistență a sălii de sport din Slatina. Procesul de optimizare s-a efectuat considerând cadrul 2D cu cea mai mare înălțime a fermei principale (5,9m). Ferma de tip grindă cu zăbrele este rezemată pe doi stâlpi circulari din beton armat cu diametrul de 160 cm.

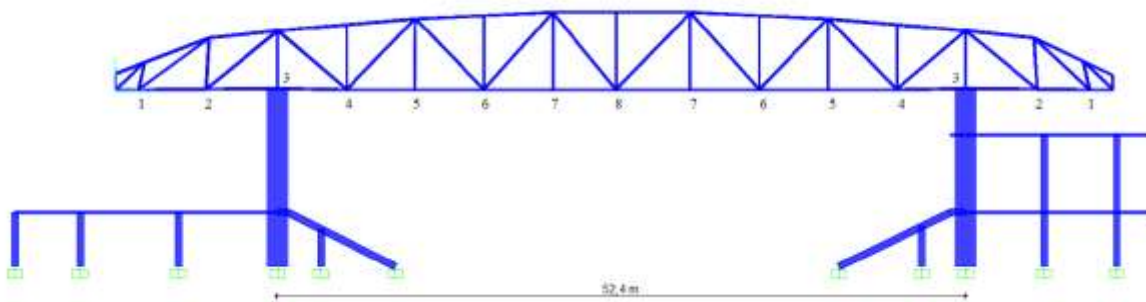


Fig. 6.3 Cadrul transversal al sălii de sport Slatina

Capitolul propune rezolvarea a trei probleme de optimizare distincte. Prima problemă constă în integrarea modului pentru SAP2000, numit API (Application Programming Interface) sau OAPI în procesul și algoritmul de optimizare dezvoltat în Matlab. Următorul caz presupune rezolvarea problemei de optimizare utilizând algoritmi evolutivi, precum

algoritmii genetici. Scopul acestei teme este obținerea unei forme optime pentru grinda cu zăbrele (shape optimization), dar și a celor mai potrivite secțiuni (section optimization), pentru a minimaliza consumul de oțel și a obține cea mai mică greutate pentru structura metalică. Ultima chestiune abordată este reprezentată de introducerea unui nou parametru în acest proces, și anume utilizarea dispozitivelor antiseismice pasive plasate la partea superioară a stâlpilor, astfel încât să se facă izolarea completă a structurii acoperișului față de structura de beton. Pentru prezentul studiu au fost utilizate trei tipuri de izolatori: FP, LRB și HDRB. Comparăția între ultimele două probleme se va face din punctul de vedere al greutății structurale optime pentru grinda cu zăbrele, al deplasării, al momentului încovoietor și al forței tăietoare care apar pe stâlpii de susținere a acoperișului.

Aplicația API integrată în SAP2000 este o unealtă puternică, ce permite automatizarea procesului de analiză structurală. Această aplicație permite legătura, conlucrarea dintre SAP2000 și un alt software, oferind o cale bilaterală pentru schimbul de date referitoare la modelul analizat. API este o librărie de funcții care permit utilizatorului să facă aproape orice operațiune în SAP2000 prin intermediul unui alt software. API este compatibil cu majoritatea limbajelor de programare, precum Visual Basic.NET, Visual Basic for Applications (VBA), Visual Fortran, Visual C#, Visual C++, Python și Matlab. Deoarece nu sunt folosite fișiere suplimentare, timpul de transfer al informației este semnificativ redus, iar accesarea fișierului SAP2000 poate fi făcută doar atâta timp cât aplicația este deschisă.

Acest proces poate fi caracterizat prin parcurgerea a trei mari etape. Prima se referă la modificările care pot fi aduse unui model deja existent. În cazul de față, acest stadiu este realizat prin modificarea parametrilor care reprezintă coordonatele nodurilor pe orizontală și verticală, dar și prin modificarea secțiunilor fiecărei bare în parte. După obținerea acestui nou model structural, se trece la analiza acestuia, fapt care încheie cea de-a doua etapă. Ultimul pas este reprezentat de citirea și procesarea rezultatelor cu ajutorul programului Matlab.

Problema de optimizare a fost rezolvată cu ajutorul programului Matlab și utilizează teorii evolutive, respectiv algoritmi genetici. Obiectivul principal este obținerea unei greutăți minime pentru grinda cu zăbrele principală a structurii metalice a acoperișului, astfel încât aceasta să respecte prevederile Eurocodului 3 (SR EN 1993-1-1:2006). Variabilele programului sunt definite ca fiind pozițiile nodurilor tălpii de jos a grinzii cu zăbrele, dar și secțiunile transversale ale tuturor elementelor constitutive ale acesteia. Formularea matematică a problemei de optimizare este:

$$f_0 = \sum_{i=1}^{\text{număr elemente}} l_i \cdot A_i \cdot \delta$$

unde  $l_i$  – lungime element  $i$

$A_i$  – aria secțiunii transversale a elementului  $i$

$\delta$  – greutatea specifică a materialului

Restricții ale procesului de optimizare

- Verificarea elementelor la efort axial:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \text{ și } \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

- Verificarea elementelor la moment încovoietor și forță tăietoare:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \text{ și } \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

- Săgeata maximă:

$$[u, v]_{str} \leq [u, v]_{adm}$$

unde:  $N_{Ed}$  – valoarea de calcul a efortului axial;

$N_{c,Rd}$  – valoarea de calcul a rezistenței secțiunii transversale la compresiune uniformă;

$N_{t,Rd}$  – valoarea de calcul a rezistenței la întindere;

$M_{Ed}$  – valoarea de calcul a momentului încovoietor;

$M_{c,Rd}$  – valoarea de calcul a rezistenței secțiunii transversale la încovoiere;

$V_{Ed}$  – valoarea de calcul a efortului de forfecare;

$V_{c,Rd}$  – valoarea de calcul a rezistenței la forfecare;

$[u, v]_{str}$  – deplasarea pe verticală a structurii;

$[u, v]_{adm}$  – deplasarea maximă admisibilă pe verticală.

### Funcția de codare:

Pentru problemele de optimizare abordate în acest capitol au fost folosite două tipuri de variabile de codare a individului. Primul tip de variabile este definit cu ajutorul numerelor reale și reprezintă modificarea poziției (schimbarea coordonatelor) nodurilor. Secțiunile transversale ale elementelor de oțel sunt codate cu ajutorul numerelor întregi și reprezintă numărul de ordine corespunzător unei baze de date. Reprezentarea unui individ se poate face sub forma:

$$[x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n, el. sect_1, el. sect_2, \dots, el. sect_m]$$

unde  $x_n, y_n$  – deviația coordonatelor nodului "n" după direcția x și y

$el. sect_m$  – numărul de ordine corespunzător elementului m din baza de date

## Funcția populație inițială

Populația inițială este creată în urma unui proces care presupune parcurgerea a două etape. Cel dintâi pas prevede procesul de alocare aleatoare de numere reale corespunzătoare schimbării poziției nodurilor, iar în următorul pas se continuă cu atribuirea de numere reale fiecărui element, acestea reprezentând poziția (ordonată) secțiunii transversale în baza de date. Valorile atribuite sunt limitate de cele două limite impuse de către utilizator: limita inferioară (lowerbound) și cea superioară (upperbound).

## Funcția fitness:

Funcția fitness se calculează cu ajutorul funcției obiectiv afectate cu ajutorul metodei de penalizare. Formularea matematică este următoarea:

$$f_v = f_o + p * r$$

unde  $f_v$  – funcția fitness

$f_o$  – funcția obiectiv (greutatea)

$p$  – coeficientul de penalizare

$r$  – variabilă ce reprezintă depășirea restricțiilor

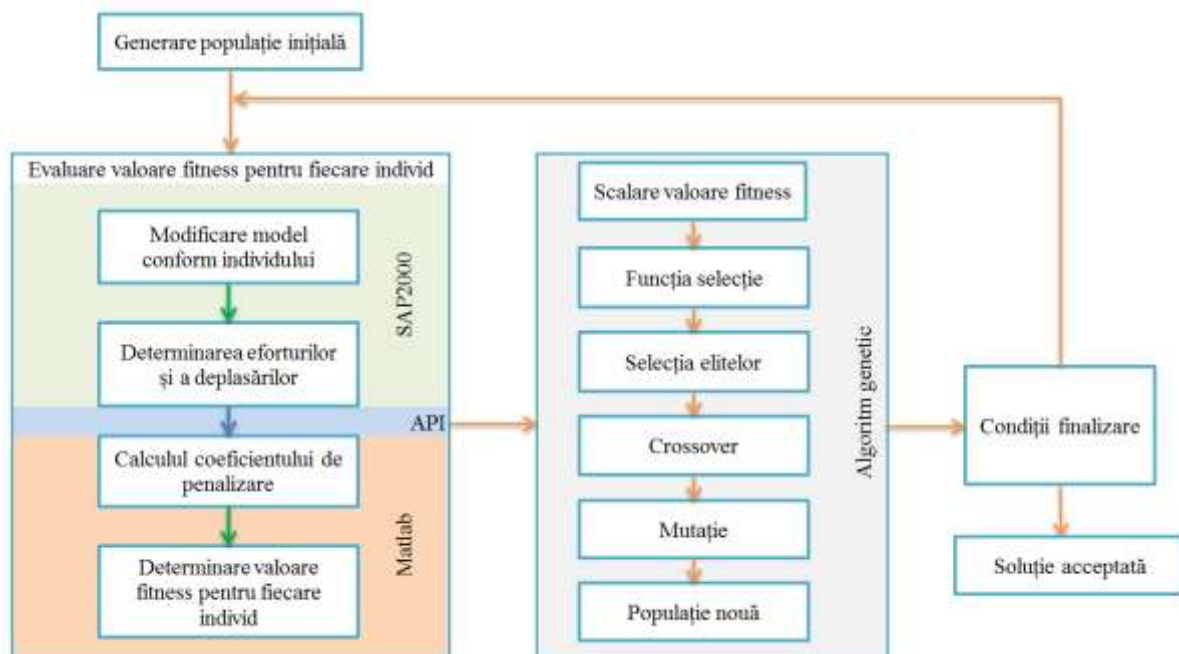


Fig. 6.4 Diagramă proces optimizare

Problemele de optimizare propuse în acest capitol au în comun mai multe elemente. Obiectivul urmărit în cazul celor trei procese este diminuarea greutateii structurii metalice a

grinzii cu zăbrele care aparține acoperișului sălii multifuncționale din Slatina. Restricțiile impuse țin cont de deplasarea maximă, și verificarea tensiunilor conform Eurocod 3. Toate problemele au ca parametri deplasarea nodurilor care aparțin tălpii inferioare a grinzii transversale, dar și alegerea secțiunii elementelor metalice, indiferent că acest lucru este realizat cu ajutorul modulului integrat de dimensionare din SAP2000 sau cu ajutorul modelului de calcul elaborat de utilizator pe baza prevederilor Eurocode 3. Baza de date din care se poate face selecția profilelor este comună pentru toate cele trei probleme. De asemenea, se folosesc setări inițiale identice pentru fiecare caz.

În cadrul acestor procese de optimizare se folosesc cele două tipuri de variabile amintite anterior: prima dintre ele indică poziția nodurilor, iar cea de-a doua precizează secțiunea profilului utilizat pentru fiecare bară în parte. Trebuie precizat că doar poziția nodurilor din talpa inferioară a grinzii cu zăbrele poate fi supusă procesului de translație pentru ca forma exterioară a structurii să nu fie afectată. Pentru cele două noduri care se găsesc la intersecția structurii metalice cu cea din beton, deplasarea se va face doar pe axa Z, pentru a nu afecta verticalitatea stâlpilor. S-a optat pentru o deplasare simetrică a nodurilor față de mijlocul deschiderii grinzii cu zăbrele. Deplasarea nodurilor se poate face simultan pe ambele direcții în limita a 1,00 m față de poziția inițială. Pentru procesul de selecție a secțiunii transversale a fiecărui element s-au ales profile de tip HEA, HEB pentru barele din talpa superioară și inferioară și profile de tip țevă dreptunghiulară pentru diagonale și montanți.

Parametrii programului de optimizare sunt prezentați în tabelul de mai jos:

Numărul de generații	800
Numărul de indivizi	80
Parametrul de crossover	0.55
Număr repetiții	80
Rata mutației	0.5
Funcția scalare	Scalare proporțională
Funcția de selecție	Stochastic uniform selection
Funcția încrucișare	Scattered crossover

Modelul de calcul pentru prima problemă este reprezentat de cadrul transversal central al structurii studiate în care prinderea structurii metalice se face articulat pe cei doi stâlpi de susținere. În cadrul acestei probleme de optimizare, dimensionarea elementelor și verificarea acestora se face cu ajutorul modulului integrat din programul SAP2000. Algoritmul genetic

din cadrul programului MATLAB guvernează doar procesul de modificare a poziției nodurilor. Interacțiunea dintre cele două programe se face cu ajutorul funcțiilor din modulul API prezentat anterior.

Ipotezele celei de a doua probleme sunt identice cu cele enunțate în cadrul primei probleme, diferența dintre acestea fiind dată de faptul că procesul de atribuire (alegere) a secțiunilor și verificarea acestora se face în cadrul programului Matlab, pe baza tensiunilor și deplasărilor obținute în SAP și culese cu ajutorul modulului API.

Cea de-a treia problemă de optimizare se bazează pe caracteristicile enunțate în cadrul celei de-a doua, diferența între cele două fiind schimbarea modelului de calcul prin introducerea de dispozitive antiseismice în dreptul nivelului de izolare. Din faptul că sunt propuse trei metode de izolare diferite rezultă necesitatea soluționării a trei procese separate de optimizare.

Pentru fiecare proces s-au rulat un număr de cinci analize, iar valorile prezentate aparțin celei mai bune soluții găsite.

### 6.3 Rezultatele problemelor de optimizare

**Tabel 6.1**

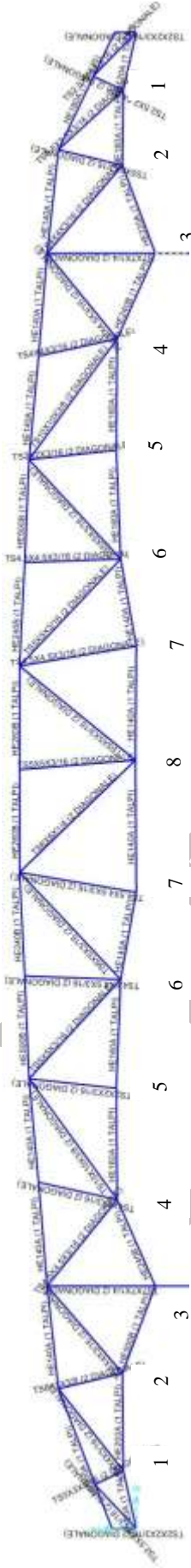
Pozițiile nodurilor tălpii inferioare

	Nod 1		Nod 2		Nod 3		Nod 4		Nod 5		Nod 6		Nod 7		Nod 8	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Problema 1	0,720	0,662	0,784	0,677	0	-0,986	-0,88	0,968	-0,49	0,991	-0,196	0,756	-0,993	0,101	0,450	0,095
Problema 2	0,411	0,938	-0,071	0,684	0	0,624	0,171	0,870	0,816	0,693	0,213	0,950	0,574	0,940	-0,100	0,777
Problema 3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

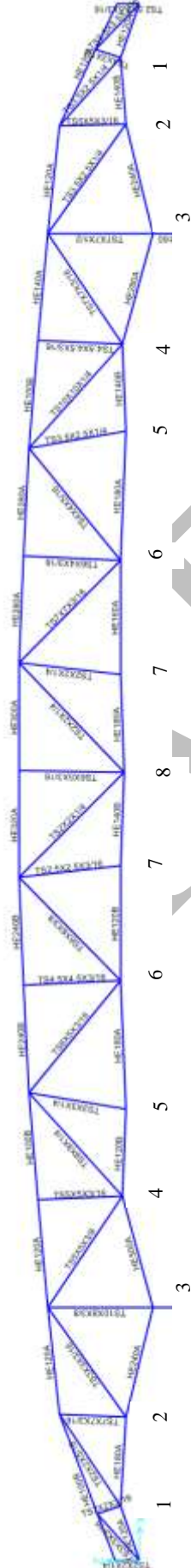
În urma optimizării, pentru cele trei probleme studiate și prezentate mai sus, a poziției nodurilor de la talpa inferioară și a secțiunilor barelor grinzii cu zăbrele, s-au obținut rezultatele prezentate în figura de mai jos.



Problema 1



Problema 2



Problema 3



Fig. 6.5 Elementele obținute în urma procesului de optimizare

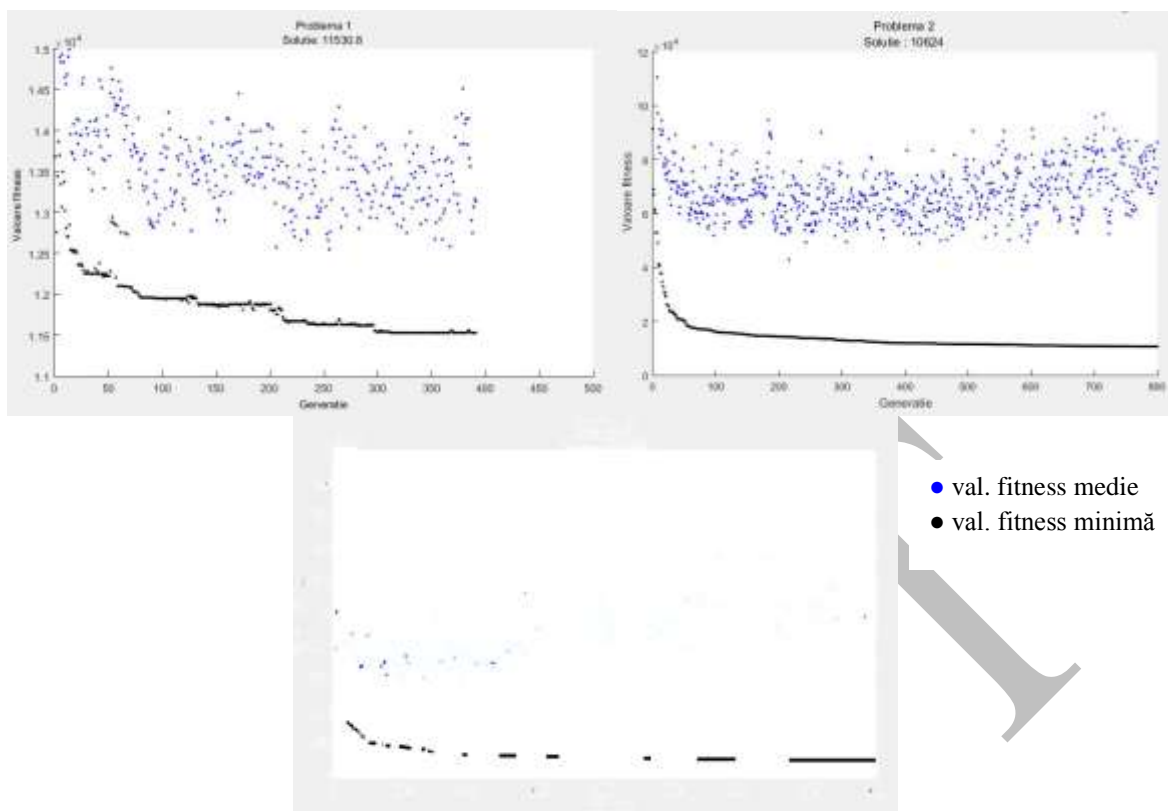


Fig. 6.6 Convergența proceselor de optimizare

Principalul obiectiv al procesului de optimizare a fost reducerea greutateii elementelor acoperișului, prin modificarea secțiunilor barelor, a poziției nodurilor de la talpa inferioară și a schimbării soluției de rezemare prin utilizarea izolatoarelor pasivi. În urma acestui proces, pentru problemele de optimizare propuse, greutatea obținută în fiecare caz sunt prezentate în tabelul de mai jos.

**Tabel 6.2**

Greutatea grinzii cu zăbrele

	Problema 1	Problema 2	Problema3
Greutate (tone)	11.580	10.623	█

În urma rezultatelor prezentate se poate observa că, pornind de la structura de bază (rezemată articulată și fără modificarea poziției nodurilor de la talpa inferioară) dimensionată cu ajutorul modulului integrat din SAP2000, în urma rezultatelor obținute în cadrul problemei 1 de optimizare, s-a înregistrat o reducere a consumului de oțel cu aproximativ 19%. Dacă dimensionarea secțiunilor elementelor grinzii se face cu ajutorul rutinei elaborate de către autor în Matlab, în cadrul problemei a doua de optimizare, rezultatele arată o mai bună alegere a secțiunilor și un procent de utilizare crescut al acestora, iar acest lucru înseamnă o reducere

a greutatei de până la 8.25%. Problema a treia presupune dimensionarea și optimizarea elementelor în același mod precum în cadrul celei de-a doua probleme, doar că se modifică soluția de rezemare, prin introducerea pe rând a trei tipuri de izolatori. Din rezultatele obținute se observă o reducere a greutatei elementelor grinzii cu ■% față de greutatea obținută în cadrul celei de-a doua probleme. Diferența dintre greutatea obținută în cadrul ultimei probleme de optimizare și structura inițială este de ■%.

Rezultatele prezentate în urma proceselor de optimizare reprezintă valorile cele mai bune obținute în urma rulării de cinci ori a fiecărei probleme. Există posibilitatea ca rezultatele să sufere mici modificări în urma rulării de un număr mai mare de ori a fiecărei probleme.

Obiectivul acestui capitol l-a reprezentat elaborarea unui proces complex de optimizare al structurilor de tip grinzi cu zăbrele plane. Criteriul de optimizare este masa (oțel) grinzii cu zăbrele a acoperișului. Din punct de vedere al conexiunii grinzii cu zăbrele cu stâlpii structurali pe care este amplasată, au fost considerate două situații: fixarea clasică (articulată) a grinzii pe stâlpi și fixarea prin intermediul izolatoarelor seismici. Au fost considerați trei tipuri de izolatori seismici (FP, LRB și HDRB).

Complexitatea procesului de optimizare elaborat constă în interactivitatea dintre utilizator, prin programul Matlab (în care a fost codat algoritmul genetic) și programul SAP2000, folosit pentru analizele structurale. Intervenția utilizatorului constă în crearea unei baze de date (pentru barele structurii de optimizat) și în interconectarea SAP2000-Matlab, care asigură rularea procesului de optimizare-analiză structurală până la atingerea criteriului de convergență, care este unul multi-operațional.

Din punct de vedere al intervenției utilizatorului, procesul interactiv creează posibilitatea optimizării atât din punctul de vedere al masei structurii, cât și al topologiei acesteia. De asemenea, utilizatorul intervine chiar în procesul de optimizare rulat prin SAP2000, impunând acestuia o subrutină de dimensionare a secțiunii elementelor pe baza relațiilor din EC3.

Rezultatele (secțiunile transversale ale barelor și masa structurii) sunt prezentate numeric sub formă grafică și tabelară. Topologia optimă rezultată este prezentată grafic. Produsul astfel obținut este verificat și utilizat într-un set de analize numerice care confirmă atât valabilitatea acestuia, cât și originalitatea lui.

## 7. Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

### 7.1 Concluzii generale

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat a fost realizarea unor studii numerice pe mai multe structuri cu deschidere mare, amplasate pe teritoriul României echipate cu izolatori seismici la nivelul acoperișului, cu scopul de a studia impactul asupra răspunsului seismic al acestora.

Pentru atingerea acestui obiectiv s-a realizat o documentare amănunțită cu privire la tipurile de izolatori pasivi existente la momentul actual, s-au identificat principalele avantaje și dezavantaje ale utilizării acestora, dar și posibilitățile de aplicare în domeniul cercetat.

Se poate concluziona că, prin poziționarea izolatoarelor la capătul superior al stâlpilor, se asigură protecția seismică a elementelor de rezistență (structurale), dar nu și a elementelor nestructurale (echipamentele), care se găsesc sub nivelul de amplasare a izolatoarelor. Studiile existente în literatura de specialitate arată că, mai ales pentru clădirile de birouri, acestea sunt mult mai însemnate valoric decât costurile asociate degradărilor elementelor structurale. În cazul în care obiectele de valoare sunt protejate chiar de elementele izolate, atunci se poate spune că sistemul de izolare îndeplinește și acest rol de reducere importantă a pierderilor materiale datorate acțiunii seismice. Printre dezavantajele izolării seismice în bază se numără deplasările laterale foarte mari ale izolatoarelor și a căror deformare trebuie permisă pe întreaga durată de viață a construcției, dar și costul inițial mai mare. De asemenea, se va da o importanță crescută modului de amplasare a izolatoarelor, pentru a evita pe cât posibil efectele torsionii. Acest obiectiv este urmat de implementarea soluțiilor pe o structură care urmează să fie realizată în Slatina.

Disponerea acțiunii seismice pe trei direcții, două orizontale și una verticală, crește precizia rezultatelor obținute în urma analizei de tip *time-history*. Se va acorda o atenție sporită influenței forței verticale a seismului asupra modului de comportare a izolatoarelor, în special a elementelor de tip FP. Coeficientul de frecare al acestora diferă în funcție de încărcarea verticală și viteza de deplasare.

O problemă des întâlnită la structurile ușoare o reprezintă efectele date de acțiunea vântului, care poate produce întindere în izolatori. În astfel de cazuri se pot introduce elemente suplimentare, care să împiedice desprinderea pieselor care alcătuiesc izolatorul.

Lansarea programului de calcul SAP2000 se face automat din programul de optimizare (Matlab), iar prin conlucrarea celor două se obține o mai bună utilizare a timpului destinat proiectării structurilor prin automatizarea unor procese.

Scăderea consumului de oțel necesar realizării elementelor acoperișului, atât prin utilizarea elementelor pasive de izolare, cât și prin modificarea formei tălpii inferioare, se face cu ajutorul algoritmilor genetici.

Cercetarea întreprinsă implică studiul amănunțit al dispozitivelor pasive de izolare în bază și al structurilor cu deschidere mare echipate cu acestea la nivelul acoperișului. Atenția se focalizează pe implementarea a trei astfel de sisteme de izolare pe structuri amplasate pe teritoriul României și supuse acțiunilor seismice din zona Vrancea.

Prin ”decuplarea” structurii verticale de structura orizontală se modifică interacțiunea dintre acestea atunci când asupra structurii acționează încărcări din vânt, seism, încărcări verticale sau cele date de variațiile de temperatură ale elementelor de rezistență ale acoperișului. Aceste modificări se răsfrâng atât asupra eforturilor din elementele acoperișului, cât și asupra stâlpilor și a elementelor infrastructurii. Dacă se optează pentru soluția clasică de prindere articulată a acoperișului pe stâlpii de susținere, încărcarea seismică

Răspunsul seismic al structurii se poate exprima prin raportarea la valorile caracteristicilor statice și cinematice ale acesteia. Componentele statice sunt definite de mărimi ale eforturilor secționale ( $M$ ,  $T$ ,  $N$ ), ale eforturilor unitare, ale forței seismice tăietoare de bază, iar cele cinematice sunt legate de perioadele de vibrație, vitezele și accelerațiile structurii, deplasări absolute și relative.

Evaluarea în termeni economici se face prin compararea consumului de oțel necesar pentru realizarea structurii metalice a acoperișului, dar și prin posibilitățile de reducere a secțiunilor stâlpilor de beton care îl susțin.

## **7.2 Contribuții personale**

- a) S-a efectuat o analiză critică asupra tipurilor de izolatori pasivi disponibili pe piață și a principiilor de funcționare ale acestora și s-au selectat trei tipuri de dispozitive pentru echiparea structurilor propuse proiectării optime. Această alegere s-a făcut în urma identificării principalelor avantaje, dar și în urma consultărilor pe care autorul tezei le-a avut cu membrii departamentului tehnic, în perioada de documentare la firma TENSACCAI - Milano (unul dintre principalii producători de echipamente de izolare seismică din Europa).

- b) S-a procedat la identificarea principalelor avantaje ale izolării seismice la nivelul acoperișului pentru structurile cu deschidere mare și situate în zone seismice. S-au analizat, din punctul de vedere al răspunsului structural la acțiunea cutremurului, o serie de astfel de structuri, situate în zone cu o importantă activitate seismică și s-au evidențiat principalele atuuri pentru fiecare caz în parte.
- c) S-a efectuat o analiză comparativă cu privire la răspunsul seismic al structurilor cu deschidere mare, izolate seismic la nivelul acoperișului și amplasate pe teritoriul României. Studiul a fost efectuat pe trei structuri cu deschideri ale acoperișului de 40 m, 60 m, 80 m; pentru fiecare structură au fost propuse trei sisteme diferite de izolare, s-au extras curbele histeretice și deplasările izolatoarelor, s-a analizat și s-a comparat răspunsul seismic al acestor structuri. Schimbarea perioadei a dus la modificarea unor parametri (forța seismică de bază, accelerațiile la nivelul acoperișului, deplasările stâlpilor, momentul și forța tăietoare pe aceștia). S-au realizat programe de calcul pentru determinarea caracteristicilor izolatoarelor de tip FP (Friction Pendulum), LRB (Lead Rubber Bearing) și HDRB (High Damping Rubber Bearing), deoarece informațiile care parvin de la producător nu sunt suficiente pentru a putea modela comportarea izolatoarelor în programele de analiză structurală, prin elemente de tip *link*. S-au generat accelerograme artificiale, care să corespundă amplasamentului structurii și, de asemenea, s-au scalat accelerograme înregistrate ale cutremurelor importante din zona Vrancea, astfel încât să corespundă spectrului de răspuns. S-a generat un număr de patru accelerograme artificiale cu componente orizontale și verticale și s-au scalat toate cele trei componente ale cutremurelor analizate din zona Vrancea, conform spectrului de răspuns.
- d) Este studiat efectul introducerii izolatoarelor asupra unei structuri cu deschidere mare care urmează a fi realizată la Slatina și sunt prezentate rezultatele analizei dinamice neliniare de tip *time-history*. S-a evidențiat eficiența comportării structurii atunci când se realizează izolarea seismică a acoperișului și s-au comparat datele obținute în fiecare dintre cele trei cazuri de izolare cu cele obținute pe structura neizolată.
- e) Este abordată problema optimizării structurii de rezistență a acoperișului în condițiile utilizării izolatoarelor seismice. S-au utilizat algoritmi genetici pentru a realiza optimizarea greutății fermei transversale a sălii de sport din Slatina. S-a urmărit influența sistemelor de izolare asupra greutății fermei principale și, de asemenea, s-a studiat influența poziției nodurilor tălpii inferioare asupra consumului de oțel. Pentru

dimensionarea secțiunilor s-a realizat o subrutină conform Eurocod 3, apelabilă din Matlab, după execuția analizei în SAP2000.

- f) S-a conceput un proces interactiv care să facă conlucrarea între programul SAP2000, cu ajutorul căruia au fost calculate structurile, și Matlab, programul în care a fost scris codul de optimizare cu ajutorul algoritmilor genetici. Astfel, s-a urmărit automatizarea acestui proces, care poate fi ulterior aplicat cu succes și în producție.

### **7.3 Direcții viitoare de cercetare**

Ulterior elaborării prezentei teze de doctorat, se dorește crearea unui program care să facă o selecție automată a celei mai bune metode de izolare pasivă pentru o structură, pe baza răspunsului seismic al acesteia. Algoritmul va trebui să realizeze automat dimensionarea izolatorilor în fiecare caz, să selecteze numărul optim al elementelor de izolare utilizate, precum și poziția pe care aceștia o vor avea în planul de izolare.

Se va cuantifica și influența teren-structură în alegerea tipului de izolare, dar și a caracteristicilor izolatorilor.

Se dorește realizarea unor studii aprofundate asupra potențialului implementării în România a metodei de izolare pasivă pentru structurile cu deschidere mare.

În vederea îmbunătățirii răspunsului seismic în deplasări al structurilor, se va studia oportunitatea utilizării în paralel a izolatorilor seismici pasivi și a amortizorilor vâscoși neliniari.

Se va încerca crearea unui model experimental (utilizând similitudinea) la scara 1/10 - 1/20 pentru o structură spațială cu deschidere mare. Pentru aceasta, se vor proiecta și realiza izolatorii adecvați, iar încercările experimentale vor fi comparate cu analizele numerice.

## Bibliografie:

- [1] Adeli, H. și Cheng, N., *Augmented Lagrangian Genetic Algorithm for Structural Optimization*, J. Aerosp. Eng., vol.10.1061, no.1994, p.104-118.
- [2] Adeli, H. și Sarma, K.C., *Fuzzy Genetic Algorithm for Optimization of Steel Structures*, Cost Optimization of Structures, John Wiley & Sons, Ltd, 77-99.
- [3] Aiken, I., Kelly, J.M. și Tajirian, F.F., *Mechanics of low shape factor elastomeric seismic isolation bearings* -Report no. UCB/EERC-89/13, 1989.
- [4] Aizenberg, I.M., *Construcții cu structură autoadaptabilă la solicitări seismice*.
- [5] Alam, M.S., Bhuiyan, M. a R. și Billah, a. H.M.M., *Seismic fragility assessment of SMA-bar restrained multi-span continuous highway bridge isolated by different laminated rubber bearings in medium to strong seismic risk zones*, Bulletin of Earthquake Engineering, vol.10, no.6, 2012, p.1885-1909.
- [6] Alam, M.S., Youssef, M. a și Nehdi, M., *Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol.34, no.9, 2007, p.1075-1086.
- [7] ALGA, *Algasism: High Damping Rubber Bearing; Lead Rubber Bearing* - Catalog, vol.no.2011.
- [8] ALGA, *Algasism: Isolatori a pendolo scorrevole (Friction Pendulum Isolators)* - Catalog.
- [9] Aseismic Devices Co. - Sliding Seismic Isolation Device (03.2015);, [http://www.adc21.com/203\\_suberi.html](http://www.adc21.com/203_suberi.html).
- [10] Attanasi, G., Auricchio, F. și Fenves, G.L., *Feasibility Assessment of an Innovative Isolation Bearing System with Shape Memory Alloys*, Journal of Earthquake Engineering, vol.13, no.2009, p.18-39.
- [11] Calvi, P.M. și Ruggiero, D.M., *Numerical modelling of variable friction sliding base isolators*, Bulletin of Earthquake Engineering, vol.14, no.2, 2016, p.549-568.
- [12] Cancellara, D. și De Angelis, F., *Assessment and dynamic nonlinear analysis of different base isolation systems for a multi-storey RC building irregular in plan*, Computers & Structures, vol.no.2016.
- [13] Casciati, F., Faravelli, L. și Hamdaoui, K., *Performance of a base isolator with shape memory alloy bars*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol.6, no.4, 2007, p.401-408.
- [14] Castellano, M.G., Colato, G.P., Infanti, S. și Borella, R., *Seismic isolation of continuous bridges through curved surface sliders combined with shock transmission units*, Proceedings of the fifteenth world conference on earthquake engineering, Lisabona, 2012.
- [15] CenturyLink; <http://fansided.com/2013/09/15/49ers-seahawks-suspended-due-weather/>.
- [16] Chen, Y., Wang, W. și Shen, Z., *Recent development and applications of tubular structures in China*, Tubular Structures XII, 305-312.
- [17] Cheng, F.Y., Jiang, H. și Lou, K., *Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control*, Taylor& Francis Group, LLC, 2008, ISBN: 9781420008173.
- [18] Choi, E., Nam, T.H., Oh, J.T. și Cho, B.S., *An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys*. Materials Science and Engineering: A.
- [19] Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kim, Y. și Okamoto, S., NCEER-Taisei Corp . *Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Exp and Analytical Study of Friction Pendulum System (FPS)* by, 1993.
- [20] Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M. și Warn, G.P., *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading* - Technical Report MCEER-07-0012, 2007.



- [21] Constantinou, M.C., Whittaker, A.S. și Velivasakis, E., *Seismic evaluation and retrofit of the Atatürk International Airport Terminal building*, Structures, vol.no.2001, p.1-8.
- [22] Costs and benefits of seismic / base isolation - (04.2015): , [http://canterbury.royalcommission.govt.nz/documents-by-key/20120309.3765/\\$file/ENG.DEV.0001A.pdf](http://canterbury.royalcommission.govt.nz/documents-by-key/20120309.3765/$file/ENG.DEV.0001A.pdf).
- [23] Crowne Plaza Caserta:, <http://www.informazione.it/pruploads/44884066-2aa0-4fde-a02b-cfd9ea06e1aa/volta.jpg>, accesat: 2015-02-04.
- [24] Cruciat, R.-I., *Reducerea efectului acțiunii seismice asupra clădirilor prin metoda izolării* - Teză de doctorat, UTCB, Facultatea Construcții Civile Industriale și Agricole, 2013.
- [25] Danila Gh. Gabriel, *Studii asupra sistemelor hibride de izolare seismică a bazei considerând controlul pasiv*, UTCB, Facultatea Construcții Civile Industriale și Agricole, 2013.
- [26] DESROCHES, R. și SMITH, B., *Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations*, Journal of Earthquake Engineering, vol.7, no.C, 2003, p.2005-2006.
- [27] Ding, Y., Chen, X., Li, A. și Zuo, X., *A new isolation device using shape memory alloy and its application for long-span structures*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol.10, no.2, 2011, p.239-252.
- [28] Dolce, M., Cardone, D. și Marnetto, R., *Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.29, no.7, 2000, p.945-968.
- [29] Dolce, M. și Marnetto, R., *Passive seismic devices based on shape memory alloys*, vol.no.1997, p.1-8.
- [30] DRB - Natural Rubber Bearing (NRB) (02.2015):, <http://www.drbworld.com/en/pgm/wm02070202.php>.
- [31] Duran, C.K., *Seismic Roof Isolation of Halkapınar Gymnasium*, Middle East Technical University, 2007.
- [32] Earthquake Countermeasure and Seismic Isolation Technology in Japan - (04.2015):, <http://en.akihabaranews.com/134688/science/earthquake-countermeasure-and-seismic-isolation-technology-in-japan>.
- [33] Earthquake Protection Systems (EPS) (02.2015):, <http://www.earthquakeprotection.com/pdf/EPSPProductBrochure4PageVersionE.pdf>.
- [34] EN, 15129:2009, Anti-seismic devices; European Committee For Standardization, 2009.
- [35] Eschenauer, H., Olhoff, N. și Schnell, W., *Fundamentals of structural optimization, Applied Structural Mechanics: Fundamentals of Elasticity, Load-Bearing Structures, Structural Optimization*, Springer Berlin Heidelberg, 301-310.
- [36] Fema 274, *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, developed by the Applied Technology Council, vol.no.October, 1997.
- [37] Fenz, D. și Constantinou, M.C., *Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings*: Technical Report MCEER-08-0018, New York, vol.no.2008.
- [38] Fenz, D.M. și Constantinou, M.C., *Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.35, no.11, 2006, p.1403-1424.
- [39] Fenz, D.M. și Constantinou, M.C., *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings* -Technical Report MCEER-08-0007, 2008.

- [40] Fenz, D.M. și Constantinou, M.C., *Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis*, Earthquake Spectra, vol.24, no.4, 2008, p.1011-1028.
- [41] FIP Industriale - *Elastomeric isolators Series SI catalog*:, [http://www.fipindustriale.it/public/divisione\\_industriale/dispositivi\\_antisismici/isolatori\\_sisimici/S02\\_SI-en.pdf](http://www.fipindustriale.it/public/divisione_industriale/dispositivi_antisismici/isolatori_sisimici/S02_SI-en.pdf).
- [42] FIP Industriale - *Lead rubber bearings Series LRB*: [http://www.fipindustriale.it/public/divisione\\_industriale/dispositivi\\_antisismici/isolatori\\_sisimici/S03\\_LRB-en.pdf](http://www.fipindustriale.it/public/divisione_industriale/dispositivi_antisismici/isolatori_sisimici/S03_LRB-en.pdf).
- [43] Gavrioloaia, C., Breviar de calcul - cupolă Palas.
- [44] Gen, M., Cheng, R. și Lin, L., *Network Models and Optimization*, Springer London, 2008, ISBN: 978-1-84800-180-0.
- [45] Giornale del Genio Civile, *Sală cu acoperișul sferic din beton armat, rezemat pe rulouri*, Industria construcțiilor și a materialelor de construcții, vol.11, no.1956, p.699.
- [46] Girish, M. și Pranesh, M., *Sliding Isolation Systems: State-of-the-Art Review*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol.p.30-35.
- [47] Giuliani, G.C. și Giuliani, M.E., *Seismic isolation for a wide span glazed roof*, WIT Transactions on the Built Environment, 2009, p. 327-332.
- [48] Gosav, I., *Proiectul Palas Iasi -Structurile de rezistentă*, C60 international conference - presentation, Cluj-Napoca, 2013.
- [49] Halkapınar Arena:, <http://www.mimdap.org/?p=78854>, accesat: 2015-02-05.
- [50] Halkapınar Sport Hall - IZMIR:, <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=201415&page=5>.
- [51] Hedayati Dezfuli, F. și Alam, M.S., *Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing*, Smart Materials and Structures, vol.22, no.4, 2013, p.45013.
- [52] Hejazi, F., Toloue, I., Jaafar, M.S. și Noorzai, J., *Optimization of earthquake energy dissipation system by genetic algorithm*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.28, no.10, 2013, p.796-810.
- [53] Higashino, M. și Okamoto, S., *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*, 2006, ISBN: 9780415366236.
- [54] Hong, W.K. și Kim, H.C., *Performance of a multi-story structure with a resilient-friction base isolation system*, Computers and Structures, vol.82, no.27, 2004, p.2271-2283.
- [55] Hulea, R., *Cercetări privind optimizarea structurilor la stadioane medii și mari*, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2011.
- [56] Ibrahim, R.A., *Recent advances in nonlinear passive vibration isolators*, Journal of Sound and Vibration, vol.314, no.3-5, 2008, p.371-452.
- [57] Ismail, M., *An Innovative Isolation Device for Aseismic Design* - Phd. Thesis, Technical University of Catalonia, 2009.
- [58] Ismail, M., *Inner pounding control of the RNC isolator and its impact on seismic isolation efficiency under near-fault earthquakes*, Engineering Structures, vol.86, no.2015, p.99-121.
- [59] Ismail, M., Rodellar, J. și Ikhounay, F., *Seismic protection of low- to moderate-mass buildings using RNC isolator*, Structural Control and Health Monitoring, vol.19, no.2012, p.22-42.
- [60] Istanbul Atatürk Airport:, <http://www.akfen.com.tr/en/yatirimlar/havalimanlari/havalimani-isletmeleri/>, accesat: 2015-02-04.
- [61] Istanbul Sabiha Gokcen Airport MRO Hangar:, <http://www.emke.com.tr/sabiha-gokcen-mro-hangar>.
- [62] Istanbul's Ataturk Airport:, <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1394048&page=7>.

- [63] Jalali, A., Cardone, D. și Narjabadifam, P., *Smart restorable sliding base isolation system*, Bulletin of Earthquake Engineering, vol.9, no.2, 2011, p.657-673.
- [64] Jangid, R.S., *Stochastic seismic response of structures isolated by rolling rods*, Engineering Structures, vol.22, no.8, 2000, p.937-946.
- [65] Jangid, R.S. și Londhe, Y.B., *Effectiveness of Elliptical Rolling Rods for Base Isolation*. Journal of Structural Engineering.
- [66] Jiang, X. și Adeli, H., *Neuro-genetic algorithm for non-linear active control of structures*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.75, no.7, 2008, p.770-786.
- [67] Katsunori, K., *Seismic Isolation of the Roof over a Large Space - Design of the Roof for Kyoto Aquarena*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [68] Katsunori, K. și Takahashi, H., *Seismic Roof Isolation over a Large Space – Kyoto Aquarena Roof Design*, Journal of Disaster Research, vol.4, no.3, 2009, p.220-228.
- [69] Kehoe, B. și Attalla, M., *Considerations of Vertical Acceleration On Structural Response*, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, vol.Paper No. , no.2000, p.1-7.
- [70] Kelly, J.M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 1997, ISBN: 9783540197874.
- [71] Kemeny, Z.A., *Ball-in-cone seismic isolation bearing*. U.S. Patent #US 5599106 A. 1997.
- [72] Khoshnoudian Faramarz și Hagdoust, V.R., *Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation considering variations in the coefficient of friction*, SCIENTIA IRANICA, vol.16, no.4, 2009, p.429-442.
- [73] Kociecki, M. și Adeli, H., *Two-phase genetic algorithm for topology optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex curvatures*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.32, no.2014, p.218-227.
- [74] Kravchuk, N., Colquhoun, R. și Porbaha, A., *Development of a Friction Pendulum Bearing Base Isolation System for Earthquake Engineering Education*, Proceedings of the 2008 American Society for Engineering Education Pacific Southwest Annual Conference, 2008, p. 16.
- [75] Krishnamoorthy, A., *Seismic isolation of bridges using variable frequency and variable friction pendulum isolator system*, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), vol.20, no.2, 2010, p.178-184.
- [76] Kumar, M., Whittaker, A.S. și Constantinou, M.C., *Seismic isolation of nuclear power plants using elastomeric bearings*, 2015.
- [77] Kyoto Aquarena:, <http://www.kyoto-aquarena.com/facility/pool.html>, accesat: 2015-02-05.
- [78] Lavan, O., Dargush, G.F. și Reinhorn, a M., *Multi-objective evolutionary optimization of passive energy dissipation systems under seismic loading*, 14th World Conference on Earthquake Engineering, vol.no.1992, 2008.
- [79] Lin, T.-W. și Hone, C.-C., *Base isolation by free rolling rods under basement*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.22, no.3, 1993, p.261-273.
- [80] Lu, L., Wang, J. și Hsu, C., *Sliding Isolation Using Variable Frequency Bearings for Near - Fault Ground Motions*, vol.no.164, 2006, p.1-10.
- [81] Lu, L.Y. și Hsu, C.C., *Experimental study of variable-frequency rocking bearings for near-fault seismic isolation*, Engineering Structures, vol.46, no.2013, p.116-129.
- [82] Lu, L.Y., Lee, T.-Y. și Hsu, C.-C., *Experimental Verification of Variable-Frequency Rocking Bearings for Near-fault Seismic Isolation*, Proceedings of the fifteenth world conference on earthquake engineering, Lisabona, 2012.

- [83] Makris, N. și Deoskar, H.S., *Prediction of Observed Response of Base-Isolated Structure*. Journal of Structural Engineering.
- [84] Mathakari, S., Gardoni, P., Agarwal, P., Raich, A. și Haukaas, T., *Reliability-Based Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi-Objective Genetic Algorithms*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.22, no.4, mai. 2007, p.282-292.
- [85] Melkumyan, M., *New application of roof isolation system in the form of an isolated upper slab for seismic protection of an existing 12-story office building*, Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal, vol.1, no.1, 2014, p.35-48.
- [86] Mociran, H., *Contribuții privind evaluarea performanțelor seismice ale structurilor echipate cu amortizori cu fluid vâcos* - Teză de doctorat, 2010.
- [87] Mojolic, C., *Preliminary studies of structural design of the gymnasiums in Sfântu-Gheorghe and Slatina*, 2nd International Scientific Meeting GTZ 2012, Tuzla, 2012.
- [88] Mojolic, C., Hulea, R. și Pârv, B.R., *Weight optimization of large span steel truss structures with genetic algorithm*, AIP Conference Proceedings, vol.1648, no.March, 2015.
- [89] Monfared, H., Shirvani, A., Nwaubani, S. și Lane, B.H., *An investigation into the seismic base isolation from practical perspective*, Journal of Civil Engineering and Structural Engineering, vol.3, no.3, 2013, p.451-463.
- [90] Mori, S., Sahara, J., Kurosawa, I., Saruta, M. și Okada, K., *Simulation Analysis of Free Vibration Test in a Building " Chisuikan " using Three-dimensional Seismic Base Isolation System*, Proceedings of the fifteenth world conference on earthquake engineering, Lisabona, 2012.
- [91] Mostaghel, N. și Khodaverdian, M., *Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI)*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.15, no.June 1986, 1987, p.379-390.
- [92] Mousaviu, S.A. și Ghorbani-Tanha, A.K., *Optimum placement and characteristics of velocity-dependent dampers under seismic excitation*, Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol.11, no.3, 2012, p.403-414.
- [93] Naeim, F. și Kelly, J.M., *Design of Seismic Isolated Structures- From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, 1999, ISBN: 0-471-14921-7.
- [94] Nanda, R.P., Agarwal, P. și Shrikhande, M., *Suitable friction sliding materials for base isolation of masonry buildings*, Shock and Vibration, vol.19, no.6, 2012, p.1327-1339.
- [95] Nazin, V.V., *Buildings on gravitational seismoisolation system in Sevastopol*, Proceedings of the VI Symposium on Earthquake Engineering, Roorkee, India, 1978.
- [96] New Seismic Isolated Airport Hangar, Istanbul:, [http://www.earthquakeengineering.com/news\\_events/articles/08-10-09.shtml](http://www.earthquakeengineering.com/news_events/articles/08-10-09.shtml).
- [97] Olariu, I., Olariu, F. și Sarbu, D., *Base Isolation Versus Energy Dissipation for Seismic*, Romania, vol.no.Agostinelli, 1993, p.1-8.
- [98] OLASON, A. și TIDMAN, D., *Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process*, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2010.
- [99] OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) (11.2014):, [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Triple\\_Friction\\_Pendulum\\_Element](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Triple_Friction_Pendulum_Element).
- [100] Ozbulut, O.E. și Hurlebaus, S., *Energy-balance assessment of shape memory alloy-based seismic isolation devices*, Smart Structures and Systems, vol.8, no.4, 2011, p.399-412.
- [101] Panchal, V.R. și Jangid, R.S., *Seismic response of liquid storage steel tanks with variable frequency pendulum isolator*, KSCE Journal of Civil Engineering, vol.15, no.6, 2011, p.1041-1055.

- [102] Panchal, V.R. și Jangid, R.S., *Variable friction pendulum system for seismic isolation of liquid storage tanks*, Nuclear Engineering and Design, vol.238, no.6, 2008, p.1304-1315.
- [103] Parducci, A., Costantini, S., Marimpietri, A., Mezzi, M., Radicchia, R. și Tommesani, G., *Base Isolation and Structural Configuration the New Emergency Management Centre in Umbria*, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan., vol.no.6, 2005, p.1-8.
- [104] Parducci, A., Radicchia, R. și Tommesani, G., *La tecnica del "roof and wall isolation" applicata ad un edificio per i beni culturali*, vol.no.2007, p.117-122.
- [105] Petrina, B., Muresan, I. și Pasca, S., *Seismic Isolating Systems*, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, vol.no.Lviii, 2011.
- [106] Petrina, M., *Probleme ale optimizării proiectării structurilor alcătuite din bare*, Institut Politehnic Cluj-Napoca, 1982.
- [107] Prodan, O., *Reducerea răspunsului seismic al structurilor metalice multietajate spațiale prin protecție pasivă*, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2011.
- [108] Rasheed, A. și Vasudevan, G., *Seismic Control Using Base Isolation Strategy*, vol.1, no.2, 2015, p.4-7.
- [109] Ray, T., Sarlis, A.A., Reinhorn, A.M. și Constantinou, M.C., *Hysteretic models for sliding bearings with varying frictional force*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.42, no.2013, p.2341-2360.
- [110] Robinson, W.H. și Gannon, C.R., *The seismic isolation of Wanganui Hospital with RoGliders*, vol.41, no.4, 2008, p.263-265.
- [111] Robinson, W.H., Gannon, C.R. și Meyer, J., *The RoGlider - A sliding bearing with an elastic restoring force*, Bullerin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, vol.39, no.03.2006, 2006, p.81-84.
- [112] Roussis, P.C. și Constantinou, M.C., *Experimental and analytical studies of structures seismically isolated with an uplift-restraining friction pendulum system*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.35, no.5, 2006, p.595-611.
- [113] S.C. Bogart Construct SRL, *Memoriu tehnic pentru obiectivul: Sală de sport multifuncțională cu 3.000 de locuri, Slatina- Proiect tehnic.*
- [114] Sabiha Gokcen Airport New Terminal Building:, <http://openbuildings.com/buildings/sabiha-gokcen-airport-new-terminal-building-profile-5396#>, accesat: 2015-02-04.
- [115] Sabiha Gökçen Terminal:, [http://www.arup.com/Projects/Sabiha\\_Gokcen\\_Terminal.aspx?sc\\_lang=en-GB](http://www.arup.com/Projects/Sabiha_Gokcen_Terminal.aspx?sc_lang=en-GB), accesat: 2015-02-05.
- [116] Saha, P., *Seismic Control of Benchmark Cable-Stayed Bridges Using Variable Friction Pendulum Isolator*, Advances in Structural Engineering, 1271-1282.
- [117] Saito, T., *Behavior of response controlled and seismically isolated buildings during severe earthquakes in Japan*, Energia, Ambiente e Innovazione, vol.no.5, 2015, p.31-37.
- [118] Sanap, S.B., Jadhao, P.D. și Dumne, S.M., *Seismic Response Analysis of Isolated Building with Resilient Friction Base Isolator*, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol.5, no.11, 2014, p.288-294.
- [119] Sarma, K.C. și Adeli, H., *Bilevel Parallel Genetic Algorithms for Optimization of Large Steel Structures*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.16, no.5, sep. 2001, p.295-304.
- [120] Schoofs, A.J.G., *Structural Optimization History and State-of-the-Art, Topics in Applied Mechanics: Integration of Theory and Applications in Applied Mechanics*, J.F. Dijkstra și F.T.M. Nieuwstadt, ed., Springer Netherlands, 339-345.

- [121] Scotti, P., Marenda, I. și Mojolic, C., *Seismic devices for the structure protection : a correct selection with a focus on the installation under a steel structure*, “Construieste cu STEEL” a 14-a conferință națională de construcții metalice, Cluj-Napoca, 2015.
- [122] Seismic Energy Dissipation and Damage Control of Building Structures in Recent Years:,  
[https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/jrc\\_20100618\\_shanghai\\_expo\\_wensheng.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/jrc_20100618_shanghai_expo_wensheng.pdf),  
 accesat: 2015-02-05.
- [123] Seissoft, SeismoArtif v 2.1.3, 2016.
- [124] Sesigur, H. și Cili, F., *A seismic isolation application using rubber bearings*; Hangar project in Turkey, AIP Conference Proceedings, vol.1020, no.PART 1, 2008, p.1475-1482.
- [125] Shanghai International Circuit:, <http://www.f1fanatic.co.uk/2013/04/12/2013-chinese-grand-prix-practice-pictures/motor-racing-formula-one-world-championship-chinese-grand-prix-practice-day-shanghai-china-8/>, accesat: 2015-02-05.
- [126] Shook, D.A., Roschke, P.N. și Ozbulut, O.E., *Superelastic semi-active damping of a base-isolated structure*, Structural Control and Health Monitoring, vol.15, no.5, 2008, p.746-768.
- [127] Sivanandam, S.N. și Deepa, S.N., *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, ISBN: 978-3-540-73189-4.
- [128] Soft soil makes for tough design:, <http://www.djc.com/news/co/11134804.html>,  
 accesat: 2015-02-04.
- [129] Stuardi, J.E., Nawrotzki, P. și Suárez, L.E., *Comparative Seismic Performance of a Base Control System Based on Measured and Calculated Responses*, 14 World Conference on Earthquake Engineering, vol.no.2008, p.1-8.
- [130] Symans, M.D., *Seismic Protective Systems: Seismic Isolation*, Instructional Material Complementing FEMA 451, vol.no.2004, p.1-87.
- [131] Takahashi, O., Aida, H., Suhara, J., Matsumoto, R. și Engineering, K.K., *Construction of Civil Building Using Three Dimensional Seismic Isolation System ( Part 1 , Design of Building Using Three Dimensional Seismic Isolation System )* Takafumi Fujita, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [132] Takeuchi, T., Kinouchi, Y., Matsui, R. și Ogawa, T., *Optimal Arrangement of Energy-Dissipating Members for Seismic Retrofitting of Truss Structures*, American Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.no.2015, p.2-11.
- [133] THK - Seismic Isolation System (04.2015):,  
[http://www.thk.com/sites/default/files/documents/it\\_pdf/product/con\\_cat/THK\\_Base\\_Isolation\\_Catalog\\_Technical\\_Book.pdf](http://www.thk.com/sites/default/files/documents/it_pdf/product/con_cat/THK_Base_Isolation_Catalog_Technical_Book.pdf).
- [134] Tomizawa, T., Takahashi, O. și Aida, H., *Vibration test in a Building named „ Chisuihan ” using Three-dimensional Seismic Isolation System*, Proceedings of the fifteenth world conference on earthquake engineering, Lisabona, 2012.
- [135] Toniolo, R., *THK: CLB crossed linear bearing seismic isolators*, AIP Conference Proceedings, vol.1020, no.PART 1, 2008, p.1483-1492.
- [136] TOUCHING BASE - (04.2015):,  
<http://www.holmesgroup.com/assets/Uploads/pdfs/touching-base.pdf>.
- [137] Tsopelas, P. și Kunnath, S., *Recent Advances in Seismic Isolation: Methods and Tools*, Advances in Performance-Based Earthquake ..., vol.no.2010.
- [138] TUDOSE, L., POP, D. și HARAGÂS, S., *Proiectarea optimală a sistemelor complexe*, 2006, ISBN: 978-973-713-076-1.
- [139] Unprecedented Pact Hangs Over Stadium Job in Seattle:,  
<http://enr.construction.com/features/buildings/archives/020211.asp>.

- [140] UTCB și MDRAP, *P100-1/2013: Cod de proiectare seismică – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri*, 2013.
- [141] Villaverde, R., *Aseismic Roof Isolation System: Feasibility Study with 13-Story Building*, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, vol.128, no.2, 2000, p.17-27.
- [142] Villaverde, R., *Roof isolation system to reduce the seismic response of buildings: A preliminary assessment*, *Earthquake Spectra*, vol.14, no.3, 1998, p.521-532.
- [143] Vu, B.X., *Seismic Performance of Base Isolated Buildings and Strategies To Mitigate Vertical Acceleration Demands* - PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 2012.
- [144] Wang, H. și Ohmori, H., *Truss Optimization Using Genetic Algorithm , Considering Construction Process*, vol.no.2010.
- [145] Warn, G.P. și Ryan, K.L., *A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs*, *Buildings*, vol.2, no.3, 2012, p.300-325.
- [146] Warn, G.P. și Whittaker, A.S., *A Study of the Coupled Horizontal-Vertical Behavior of Elastomeric and Lead-Rubber* -Technical Report MCEER-06-0011, 2006.
- [147] WorkSafe Technologies - ISO Base- Specificatii tehnice:, [www.lanshop.netinstal.ro/attachment.php?id\\_attachment=565](http://www.lanshop.netinstal.ro/attachment.php?id_attachment=565).
- [148] Xue, S. și Li, X., *Control devices incorporated with shape memory alloy*, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol.6, no.2, 2007, p.159-169.
- [149] Zayas, V., Low, S. și Mahin, S., *A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation*. *Earthquake Spectra*.
- [150] Zekioglu, A., Darama, H. și Erkus, B., *Performance-Based Seismic Design of a Large Seismically Isolated Structure : Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building*, vol.no.2007, p.409-427.