



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

RAPORT DE CERCETARE

TEZA DE DOCTORAT

**Metode moderne de izolarea bazei structurilor
aplicate condițiilor seismice din Romania**

Doctorand:

ing. Mihai Ion BADILA

Conducător științific:

prof. univ. dr. ing. Dan Ilie CRETU

**BUCUREȘTI
2021**

Cuprins:

Cuprins:	2
1. Evaluarea răspunsului seismic al structurilor izolate la baza folosind calculul static echivalent.....	3
1.1. Introducere	3
Izolarea bazei – aspecte fundamentale	3
Proiectarea clădirilor izolate seismic.....	4
1.2. Izolarea bazei – Calculul static liniar.....	5
Aspecte fundamentale	5
Calculul static liniar – Procedura actuala	6
1.3. Calculul static liniar –Procedura de calcul propusa.....	8
1.4. Studiu de caz: Implementarea metodei de calcul pentru Eurocode 8.....	12
Exemplu de calcul	16
1.5. Concluzii.....	17
2. Concluzii analize numerice structuri izolate seismic	18
2.1 Concluziile studiilor numerice	18
Prezentare generala.....	18
Evaluarea spectrului normalizat de răspuns elastic-liniar al structurii cu baza izolata prin metoda simplificata	20
Concluzii pentru Structuri in cadre: DCH ($q=6.75$); $\gamma=1.0$ si pentru Structuri cu pereți: DCH ($q=4.60$); $\gamma=1.0$	24
Concluzii finale	27
Contribuții personale	29
Direcții viitoare de cercetare	30
Bibliografie.....	31

1. Evaluarea răspunsului seismic al structurilor izolate la baza folosind calculul static echivalent

1.1. Introducere

Răspunsul seismic al structurilor izolate la baza poate fi determinat în mod eficient utilizând metoda calculului static echivalent. Rezultatele obținute surprind cu suficientă acuratețe și proprietățile neliniare ale sistemului de izolare.

Prin aceasta teză, dar și prin articolul „Seismic response of base isolated structures using equivalent lateral force procedure” susținut la „International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences (ICCAES-20)” (5 August 2020, Los Angeles, USA) se propune o reinterpretare a modului în care se poate evalua răspunsul seismic al structurilor izolate la baza, cu ajutorul metodei calculului static echivalent.

În abordarea clasică a metodei calculului static echivalent, procedura de dimensionare a sistemului de izolare are o abordare iterativă care se raportează la o deplasare maximă țintă. În abordarea propusă dimensionarea sistemului de izolare se raportează la un factor maxim de reducere a forței seismice, concomitent cu prestabilirea amortizării efective țintă a sistemului de izolare. Prin această abordare se obține o dimensionare directă care conferă un control mai mare asupra proprietăților efective ale sistemului de izolare și asupra modului în care acestea influențează comportarea dinamică de ansamblu a structurii izolate seismic.

Izolarea bazei – aspecte fundamentale

Pentru reducerea efectului acțiunii seismice, codurile moderne de proiectare din ultimii cincizeci de ani s-au bazat pe disiparea energiei induse de acțiunea seismică prin formarea unor „articulații plastice” în zone controlate astfel încât, în cazul unui cutremur sever, să se evite colapsul structural. Ca urmare, proiectarea construcțiilor la acțiunea seismică se bazează pe principiul ierarhizării capacităților și al proiectării la capacitate, denumit generic „capacity design”. [1]

Reducerea efectului acțiunii seismice asupra construcțiilor a constituit și constituie o preocupare continuă pe plan mondial, materializată prin introducerea de dispozitive și procedee inovative în practică și în reglementările specifice. În țările dezvoltate pe teritoriul cărora există zone cu seismicitate ridicată, proiectarea clădirilor, a podurilor și a structurilor ingineresti în general este reglementată în coduri de proiectare specifice, SUA elaborând pentru prima oară astfel de reglementări.

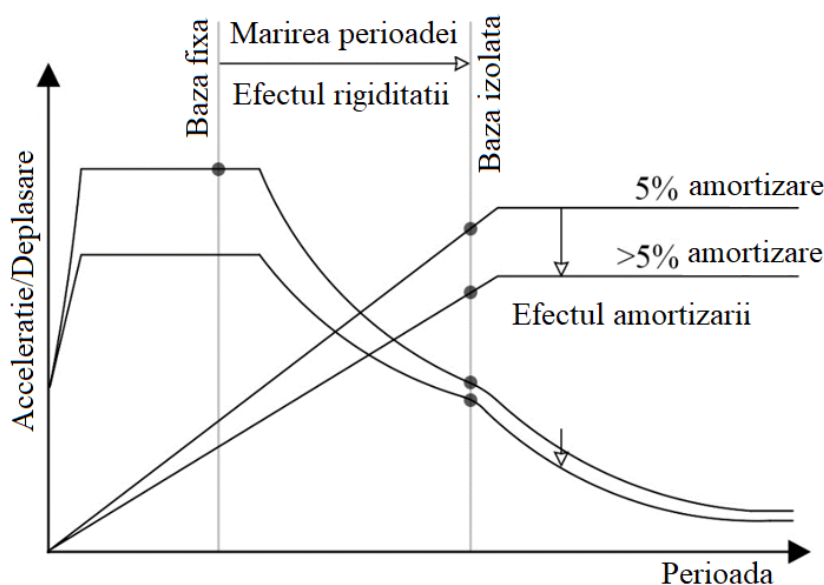
Codurile americane au stat la baza elaborării codului european cu indicativul EN 1998-1, „EUROCODE 8 – Proiectarea structurilor rezistente la cutremur. Partea 1: reguli generale, acțiunea seismică și reguli pentru clădiri”, publicat în decembrie 2004. Capitolul 10 al acestei

norme europene este destinat izolării bazei. Principiile și regulile conținute în acest cod au fost preluate și în codul românesc P 100-1/2013.

Procedeul izolării bazei reprezintă una dintre cele mai eficiente și răspândite tehnologii destinate atenuării efectului acțiunii seismice. În cazul izolării totale a bazei, construcțiile pot rămâne operaționale după un cutremur major, asigurându-se astfel un nivel îmbunătățit și superior de performanță. Se evită astfel pierderea unor vieți omenești și producerea unor pagube materiale importante, atât în cazul structurilor de clădiri și de poduri, cât și al altor tipuri de construcții, metalice sau din beton armat. Ca urmare, în cazul cutremurelor foarte rare, cu un interval mediu de revenire de 2475 ani, se poate păstra integritatea construcției fără reparații post-seism, izolarea bazei reprezentând uneori cea mai economică soluție. [1]

Izolarea bazei este o tehnică prin care o structură este protejată de efectele distructive ale cutremurelor de pământ prin instalarea la baza de rezemare a structurii, a unor elemente flexibile, care fie măresc perioada fundamentală a structurii la o valoare care este suficient de departe de perioadele dominante ale cutremurelor așteptate, fie permit lunecarea la forțe laterale atunci când se depășește un nivel prestabilit. În acest fel, deformațiile induse de un cutremur vor avea loc la nivelul elementului flexibil sau de lunecare, în timp ce structura de rezistență, se va mișca ca un corp rigid (în cazul unei izolări totale).

În principiu structura este foarte puțin afectată de mișcările de la baza acesteia, forțele laterale având valori semnificativ reduse fata de cazul în care clădirea este cu baza fixă. Pe lângă principiul fundamental al izolării bazei (mutarea perioadei de răspuns a suprastructurii), forțele seismice sunt reduse și de amortizarea suplimentară a sistemului de izolare.



Figură 1.1. Efectul amortizării și al măririi perioadei de răspuns

Proiectarea clădirilor izolate seismic

Conceptul de proiectare urmărește evitarea de pierderi de vieți omenești cu limitarea avariilor, menținerea funcțiilor și repararea posibilă post-seism. De regulă, construcțiile cu bază fixă se proiectează pentru nivelul de salvare a vieții, corespunzător unui cutremur rar care apare la 475 de ani. Nivelurile de performanță îmbunătățită și superioară se pot atinge fie printr-o

proiectare în domeniul post-elastic în care forța seismică de bază elastică se consideră redusă printr-un factor de comportare, fie prin folosirea unor procedee moderne de control pasiv sau activ al răspunsului structural. [1]

În cazul structurilor izolate seismic, sistemul de izolare trebuie să asigure capacitatea preluării unor deplasări mari și a forțelor seismice asociate cutremurului de calcul, în timp ce suprastructura are un comportament aproape elastic. Se acceptă o ductilitate limitată în suprastructura, astfel încât să se limiteze driftul sporit care poate să rezulte datorită naturii vibrațiilor induse de perioadele mari de oscilație.

Analiza structurală a clădirilor izolate seismic trebuie să fie fundamentată de analize statice liniare, analize cu spectru de răspuns cât și a analizelor dinamice de tip time-history. Odată cu dezvoltarea programelor de calcul structural, inginerul proiectant optează din ce în ce mai mult să folosească metodele avansate de calcul de tip time-history. Cu toate acestea, fără o înțelegere profundă a principiilor fundamentale ale izolării bazei, riscurile unui calcul eronat sau a unor interpretări eronate sunt ridicate.

În concluzie, pentru proiectarea clădirilor izolate seismic, este esențială realizarea unui calcul static liniar prin care se surprind cu suficientă acuratețe și proprietățile neliniare ale sistemului de izolare. În urma acestui calcul static liniar se obțin caracteristicile proprietăților sistemului de izolare, deplasările necesare, cât și forțele seismice de bază.

1.2. Izolarea bazei – Calculul static liniar

Aspecte fundamentale

Calculul static liniar consideră deplasările orizontale și mișcarea de torsiune în jurul axei verticale și presupune că infrastructura și suprastructura au comportare de corp rigid. Răspunsul dinamic al sistemului structural va fi caracterizat în termeni de accelerație, forțe de inerție și deplasări. Pentru clădiri, se va ține seama de efectele de torsiune, inclusiv de cele datorate excentricității adiționale.

Modelarea sistemului izolator trebuie să reflecte cu suficientă acuratețe distribuția spațială a dispozitivelor izolatoare, astfel încât translația pe cele două direcții orizontale și efectele corespunzătoare de răsturnare și rotația în jurul axei verticale să fie considerate în mod adecvat. Modelul trebuie să reflecteze adecvat caracteristicile diferitelor tipuri de izolatori folosiți în sistemul de izolare.

Analiza liniară statică este limitată de către forma geometrică a structurii, de seismicitatea locală dar și de către proprietățile izolatoarelor. Sistemul izolator poate fi caracterizat de un model cu comportare vâsco-elastică liniară echivalentă, în situația când acesta este alcătuit din reazeme elastomerice laminate, sau de un model biliniar histeretic, în situația în care sistemul este alcătuit din dispozitive de tip elasto-plastic.

Dacă este folosit modelul linear echivalent, se va utiliza rigiditatea echivalentă a fiecărui dispozitiv izolator (valoarea secanței a rigidității la deplasarea totală de proiectare d_{db}). Rigiditatea efectivă K_{eff} a sistemului izolator este suma rigidităților efective a izolatoarelor luate individual.

Daca se folosește modelul linear echivalent, disiparea de energie a sistemului izolator poate fi exprimata în funcție de amortizarea vâscoasa echivalenta, amortizarea efectiva ξ_{eff} în codurile europene sau B_{eff} în codurile americane. Disiparea de energie în dispozitive se exprima pe baza energiei disipate măsurate în cicluri cu frecventa în domeniul frecventelor naturale ale modurilor considerate. Pentru moduri superioare în afara acestui domeniu, factorul amortizării modale a structurii în ansamblu trebuie sa fie cel al suprastructurii considerate fixate (încastrata) la baza.

Calculul static liniar – Procedura actuala

Prima procedura de calcul a structurilor izolate seismic a fost dezvoltata de „Structural Engineers Association of California” (SEAOC) la începutul anilor 80. Deși de-a lungul timpului au fost făcute multe îmbunătățiri și descoperiri tehnologice în procesul de producție a sistemelor de izolare seismică, conceptele fundamentale de calcul și proiectare din codurile americane, cât și din cele europene, au la baza procedura dezvoltata de SEAOC.

Procedura de calcul static liniar al structurilor izolate seismic implica un proces iterativ în care performanta structurala definește proprietățile fundamentale ale sistemului de izolare seismică. Punctul de plecare al procedurii de calcul este impunerea unei deplasări maxime ținta, denumita generic deplasarea de calcul D_D , care reprezintă cel mai important parametru al analizelor. Aceasta abordare a fost propusa și de Takim Andriono în 1990. Procedura de calcul static liniar se realizează conform următorilor pași:

Pasul – 1. Stabilirea zonei seismice corespunzătoare amplasamentului structurii propuse pentru izolare seismică

Pasul – 2. Stabilirea deplasării ținta de proiectare D_D

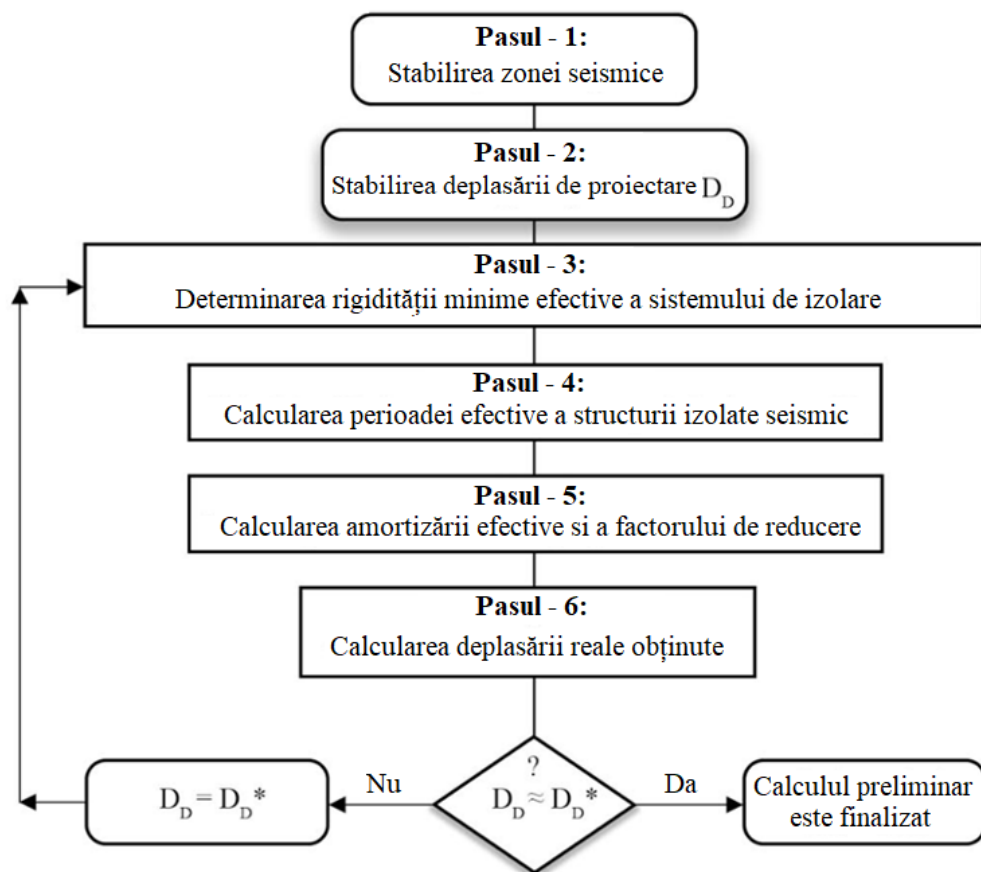
Pasul – 3. Determinarea rigidității minime efective a sistemului de izolare (normalizata pe greutatea clădirii)

Pasul – 4. Calcularea perioadei efective a structurii izolate seismic la deplasarea ținta de proiectare

Pasul – 5. Calcularea amortizării efective și a factorului de reducere a accelerațiilor spectrale la deplasarea ținta de proiectare

Pasul – 6. Calcularea deplasării reale obținute D_D^* și verificarea cu deplasarea ținta de proiectare D_D

Daca cele doua deplasări sunt aproximativ egale, procedura de calcul este finalizata. In caz contrar se reia procedura de calcul de la pasul 2 pana când cele doua deplasări sunt aproximativ egale. Schema logica a procedurii curente de calcul static liniar este prezentata în Figura 1.2.



Figură 1.2. Schema logica a procedurii curente de calcul static liniar

1.3. Calculul static liniar –Procedura de calcul propusa

Dezvoltarea accelerata a capacitaților tehnologice de producție a sistemelor de izolare seismica, dar si noile studii privind sistemele de izolare seismica, asigura un control sporit cat si o mai buna înțelegere a sistemelor de izolare seismica si a metodelor de calcul si dimensionare.

In procedura de calcul propusa se urmărește ca punctul de plecare al analizelor sa fie reprezentat de factorul maxim de reducere al forțelor seismice, după care sa se stabilească, in baza unei logici ingineresti, amortizarea efectiva ținta a sistemului de izolare seismica.

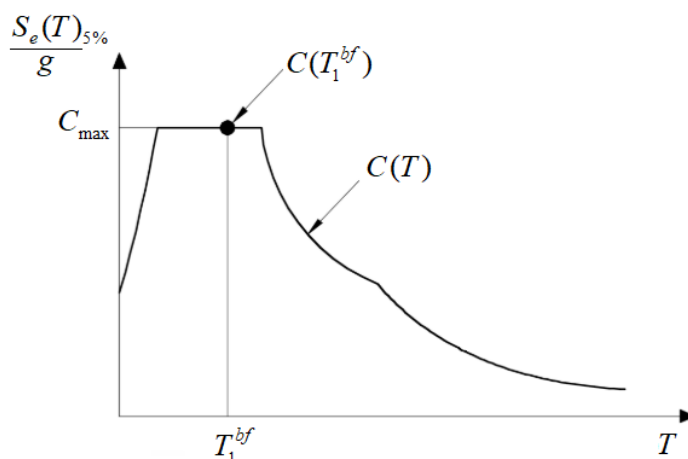
Procedura de calcul static liniar propusa se realizează conform următorilor pași:

Pasul – 1. Stabilirea zonei seismice corespunzătoare amplasamentului structurii

In general, in codurile de proiectare, accelerația spectrala este definita sub forma unei funcții având ca variabila perioada:

$$S_e(T)_{5\%} = C(T) \cdot g \quad (1)$$

Unde $C(T)$ este un coeficient al forței tăietoare de baza definit ca o funcție având ca variabila perioada T , iar g este accelerația gravitaționala. In Figura 1.3 T_1^{bf} reprezinta perioada fundamentala a structurii cu baza fixa, iar $C(T_1^{bf})$ reprezinta ordonata accelerației spectrale a structurii cu baza fixa.



Figură 1.3. Curba spectrala de răspuns

Pasul – 2. Stabilirea factorului maxim de reducere al forțelor seismice in funcție de sistemul structural

Factorul maxim de reducere al forțelor seismice reprezintă punctul de plecare al analizei statice liniare pentru dimensionarea sistemului de izolare seismica. Proiectarea construcțiilor cu baza fixa la acțiunea seismică se bazează pe principiul ierarhizării capacitaților și al proiectării la capacitate, denumit generic “capacity design”. Pentru reducerea efectului acțiunii seismice, proiectarea se bazează pe disiparea energiei induse de acțiunea seismică prin formarea unor “articulații plastice” în zone controlate astfel încât, în cazul unui cutremur sever, să se evite colapsul structural.

In funcție de sistemul structural, redundanta si ductilitate se pot aplica diverse valori pentru factorul de reducere a acțiunii seismice. Aceste reduceri ale acțiunii seismice sunt definite in

codurile europene sub forma unui factor de comportare „ q ”, iar în codurile americane sub forma unui factor de reducere „ R ”.

Prin izolarea bazei, o structură este protejată de efectele distructive ale cutremurelor de pământ prin instalarea la baza de rezemare a structurii, a unor elemente flexibile, care fie măresc perioada fundamentală a structurii la o valoare care este suficient de departe de perioadele dominante ale cutremurelor așteptate, fie permit lunecarea la forțe laterale atunci când se depășește un nivel prestabilit.

Pentru o izolare optimă, nivelul ținta de reducere a forțelor seismice este dependent de sistemul structural, cât și de rigiditatea, redundanța și ductilitatea structurii. Pentru o izolare totală, nivelul de reducere al forțelor seismice prin izolare trebuie să fie egal cu factorul de comportare al structurii cu baza fixă.

Definim q_{equiv} sau R_{equiv} ca fiind factorul maxim de reducere a forțelor seismice prin metoda izolării bazei:

$$R_{equiv} = \frac{R^{bf}}{R^{bi}} \longleftrightarrow q_{equiv} = \frac{q^{bf}}{q^{bi}} \quad (2)$$

Unde R^{bf} sau q^{bf} reprezintă factorul de reducere/comportare a clădirii cu baza fixă, iar R^{bi} sau q^{bi} este factorul de reducere/comportare a clădirii cu baza izolată ($q^{bi} \leq 1.5$ în codurile europene și $R^{bi} = \frac{3}{8R^{bf}} < 2$ în codurile americane).

Factorul maxim de reducere a forțelor seismice prin metoda izolării bazei reprezintă nivelul optim de izolare pentru o proiectare eficientă atât din punct de vedere economic cât și din punct de vedere al răspunsului dinamic al structurii.

Pasul – 3. Stabilirea valorii ținta a amortizării efective și determinarea factorului de reducere al accelerației spectrale

Principiul fundamental al izolării bazei constă în mutarea perioadei fundamentale a structurii la o valoare care este suficient de departe de perioadele dominante ale cutremurelor așteptate. Studiile recente, precum Lee JJ și Kelly JM (2019), demonstrează faptul că sistemele de izolare ce au o valoare ridicată a amortizării efective au un răspuns dinamic instabil, în principal datorită influenței modurilor superioare. Mai mult, Kelly TE (2001) prin studiile sale demonstrează faptul că în zonele cu o seismicitate ridicată nivelul amortizării nu depășește valorile de 10-12%.

Având în vedere și dezvoltările accelerate ale capacității de producție a sistemelor de izolare seismică cât și a materialelor utilizate, în prezent inginerul proiectant are libertatea de a dimensiona sistemul de izolare în funcție de o amortizare țintă predeterminată în baza unei logici ingineresti în funcție de răspunsul structural urmărit.

Astfel, având stabilită valoarea factorului maxim de reducere a forțelor seismice și valoarea amortizării efective țintă, în următorii pași se poate determina accelerația spectrală, perioada efectivă și deplasarea efectivă a structurii izolate seismic.

Aceste valori depind doar de spectrul elastic al accelerațiilor, de amortizarea efectivă prestabilită și de factorul maxim de reducere a forțelor seismice.

Pasul – 4. Calcularea accelerației spectrale efective

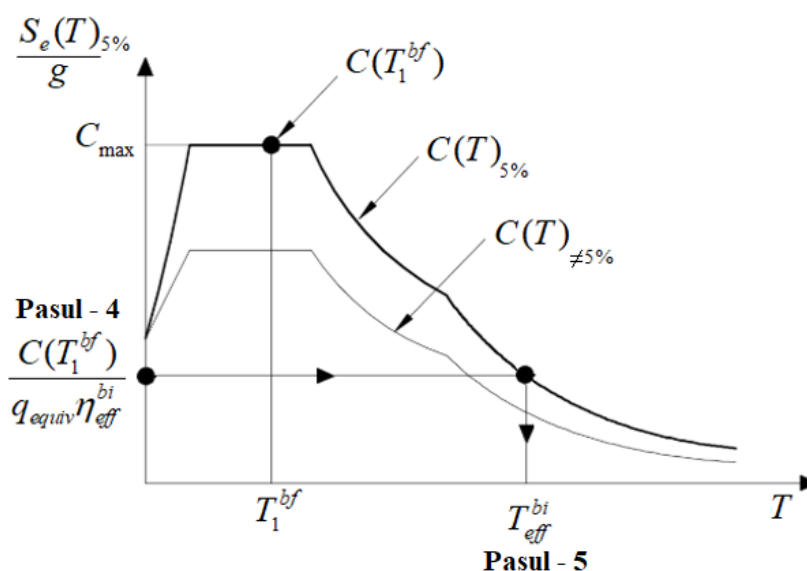
Accelerația spectrală efectivă $S_e(T_{eff}^{bi})_{5\%}$ (Figura 1.4) se obține cu relația:

$$S_e(T_{eff}^{bi})_{5\%} = \frac{C(T_1^{bf})}{q_{equiv} \cdot \eta_{eff}^{bi}} \longleftrightarrow \frac{C(T_1^{bf})}{R_{equiv} \cdot B_{eff}^{bi}} \quad (3)$$

Unde T_{eff}^{bi} este perioada efectivă a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice q_{equiv} sau R_{equiv} , iar η_{eff}^{bi} sau B_{eff}^{bi} reprezintă factorul de corecție a amortizării pentru sistemul de izolare.

Pasul – 5. Calcularea perioadei efective a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice

După calcularea accelerației spectrale efective, se obține perioada efectivă a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice q_{equiv} sau R_{equiv} prin inversarea funcției spectrului de răspuns.



Figură 1.4. Determinarea accelerației spectrale efective și a perioadei efective

Pasul – 6. Calcularea deplasării efective corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice

Deplasarea efectivă a structurii izolate seismic se obține cu relația:

$$d_{dc}^{bi} = S_e(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi}\right)^2 \quad (4)$$

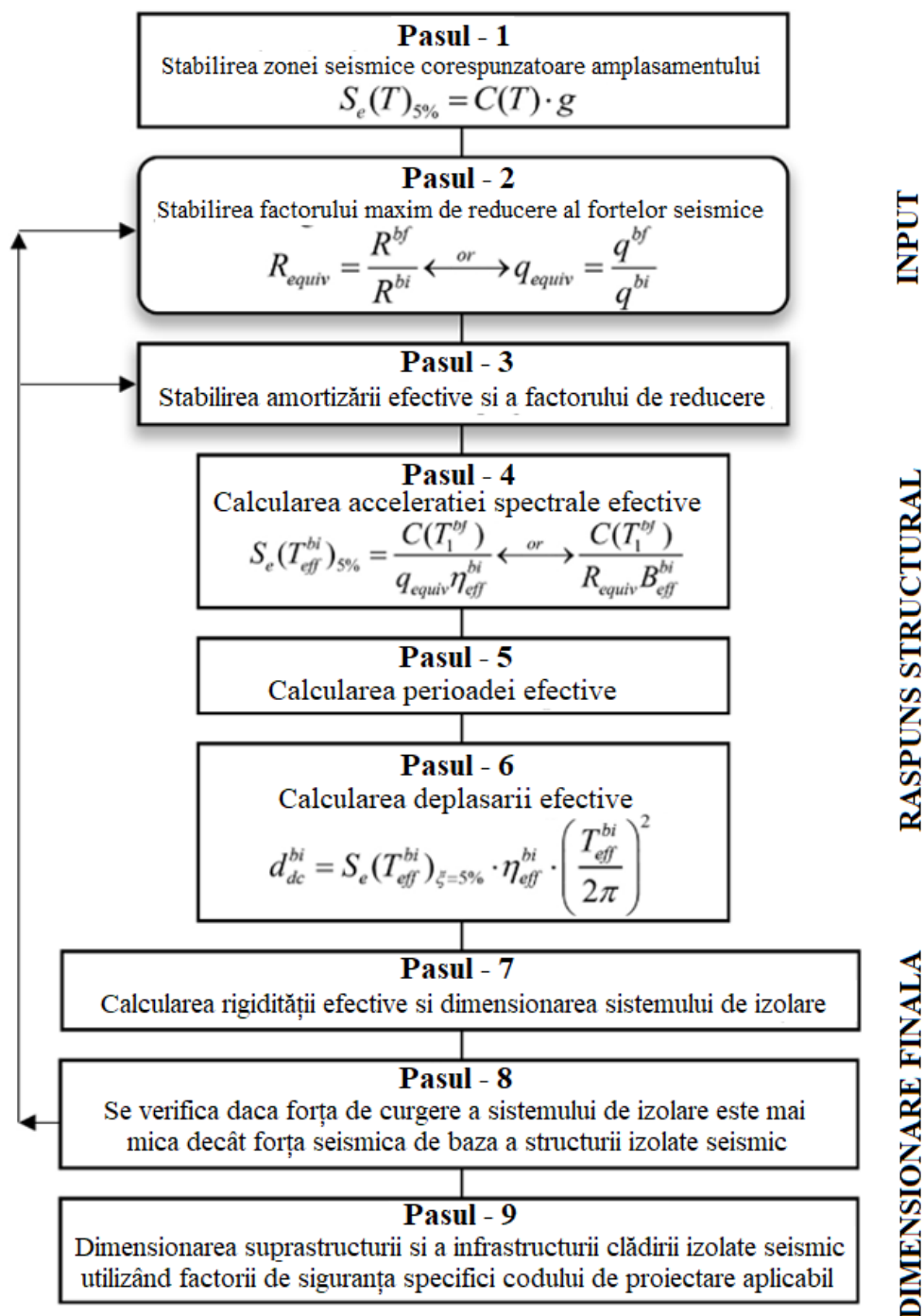
Pasul – 7. Calcularea rigidității efective și dimensionarea sistemului de izolare în funcție de factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil

$$K_{eff}^{bi} = M \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi}\right)^2 \quad (5)$$

Pasul – 8. Se verifică dacă forța de curgere a sistemului de izolare este mai mică decât forța seismică de bază a structurii izolate seismic

Pasul – 9. Dimensionarea suprastructurii si a infrastructurii clădirii izolate seismic utilizând factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil

Schema logica a procedurii de calcul static liniar propusa este prezentata in Figura 1.5.



Figură 1.5. Schema logica a procedurii de calcul static liniar propuse

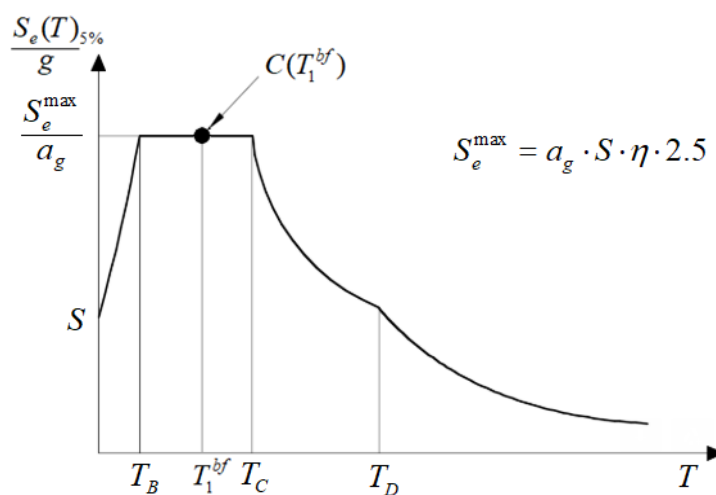
1.4. Studiu de caz: Implementarea metodei de calcul pentru Eurocode 8

În acest studiu de caz se implementează metoda de calcul propusă în concordanță cu cerințele din Eurocode 8:

1. INPUT:

Pasul – 1. Stabilirea zonei seismice corespunzătoare amplasamentului structurii

În EN-1998 mișcarea seismică este reprezentată prin spectre de răspuns elastic pentru accelerații absolute ce au aceeași formă atât pentru starea limită de serviciu cât și pentru starea limită ultimă. (Figura 1.6)



Figură 1.6. Forma spectrului elastic de răspuns

Spectrele normalizate de răspuns elastic $S_e(T)$ ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică $\xi = 5\%$ în condițiile seismice și de teren sunt definite de următoarele relații:

$$\begin{aligned} T_B < T < T_C &\longrightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \\ T_C < T < T_D &\longrightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \\ T_D < T < 4s &\longrightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Unde T este perioada fundamentală a structurii, a_g este valoarea de proiectare a accelerației terenului ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$), T_B , T_C și T_D sunt perioadele de control (colt) ale spectrului de răspuns elastic pentru componentele orizontale ale accelerației terenului, S este factorul de teren, iar η este factorul de corecție ce ține cont de amortizare, determinat cu relația următoare:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55 \quad (7)$$

Unde ξ reprezintă fracțiunea din amortizarea critică, având referința la 5% ($\eta_{5\%}=1$).

Pentru o structură cu bază fixă cu perioada fundamentală T_1^{bf} ecuația (6) se poate reduce sub următoarea formă:

$$S_e(T_1^{bf}) = S_e^{max} \cdot C_{T_1^{bf}} \quad (6)$$

Unde:

$$S_e^{max} = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad (9)$$

Iar $C_{T_1^{bf}}$ este o constanta care depinde de perioada fundamentala a structurii cu baza fixa:

$$\begin{aligned} T_B < T_1^{bf} < T_C &\longrightarrow C_{T_1^{bf}} = 1 \\ T_C < T_1^{bf} < T_D &\longrightarrow C_{T_1^{bf}} = \frac{T_C}{T_1^{bf}} \\ T_D < T_1^{bf} < 4s &\longrightarrow C_{T_1^{bf}} = \frac{T_C \cdot T_D}{(T_1^{bf})^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Pasul – 2. Stabilirea factorului maxim de reducere al forțelor seismice in funcție de sistemul structural

In prima etapa a dimensionării se considera structura având baza fixa. Forța tăietoare de baza F_b^{bf} este calculata cu următoarea formula:

$$F_b^{bf} = S_d(T_1^{bf}) \cdot m \cdot \lambda^{bf} \quad (7)$$

Unde T_1^{bf} reprezinta perioada fundamentala a cladirii, λ^{bf} este factorul de corecție care este egal cu 0.85 daca $T_1 < T_C$ si clădirea are mai mult de doua niveluri, sau 1.00 in celelalte cazuri, iar $S_d(T_1^{bf})$ este egal cu:

$$S_d(T_1^{bf}) = S_e(T_1^{bf})/q^{bf} \quad (8)$$

Unde q^{bf} este factorul de comportare al cladirii cu baza fixa.

In următoarea etapa de proiectare se considera structura izolata seismic la baza. Definim q_{equiv}^{max} ca fiind factorul maxim de reducere al forțelor seismice in funcție de sistemul structural:

$$q_{equiv}^{max} = \frac{q^{bf} \cdot \lambda^{bf}}{q^{bi} \cdot \lambda^{bi}} \quad (9)$$

Unde q^{bi} este factorul de comportare a structurii izolate seismic (maxim 1.5) iar λ^{bi} este factorul de corectie al structurii izolate seismic.

Pasul – 3. Stabilirea valorii ținta a amortizării efective si determinarea factorului de reducere al accelerației spectrale

2. RASPUNSUL STRUCTURAL:

Pasul – 4. Calcularea accelerației spectrale efective

Accelerația spectrala efectiva $S_e(T_{eff}^{bi})_{5\%}$ se obtine ca raportul intre accelerația spectrala elastica a componentelor orizontale ale mișcării terenului pentru perioada fundamentala a structurii cu baza fixa si factorul maxim de reducere a forțelor seismice q_{equiv}^{max} :

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi \neq 5\%} = \frac{S_e(T_1^{bf})_{\xi=5\%}}{q_{equiv}^{max}} \quad (10)$$

Aplicând relația de conversie a spectrului de răspuns se obține expresia finală a accelerației spectrale:

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{S_e^{max} \cdot C_{T_1^{bf}}}{q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi}} \quad (11)$$

Unde η_{eff}^{bi} este factorul de corectie ce ține cont de amortizarea ξ_{eff}^{bi} a sistemului de izolare. Considerând faptul că izolarea bazei reprezintă o soluție viabilă din punct de vedere pentru valori ale perioadei fundamentale a clădirii cu baza fixă cuprinse între $T_B < T_1^{bf} < T_C$, accelerația spectrală efectivă devine:

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{S_e^{max}}{q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi}} \quad (12)$$

Pasul – 5. Calcularea perioadei efective a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice

După calcularea accelerației spectrale efective, se obține perioada efectivă a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice q_{equiv} sau R_{equiv} prin inversarea funcției spectrului de răspuns.

Definim $S_e(T_D)$ ca fiind:

$$S_e(T_D) = S_e^{max} \frac{T_C}{T_D} \quad (13)$$

Pentru structura izolată seismic sunt posibile următoarele două variante:

1. Dacă: $S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} > S_e(T_D)$

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = S_e^{max} \cdot \frac{T_C}{T_{eff}^{bi}} \quad (14)$$

Înlocuind ecuația (15) perioada efectivă a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice devine:

$$T_{eff}^{bi} = q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot T_C / C_{T_1^{bf}} \quad (15)$$

2. Dacă: $S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} < S_e(T_D)$

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = S_e^{max} \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{(T_{eff}^{bi})^2} \quad (20)$$

Înlocuind ecuația (15) perioada efectivă a structurii izolate seismic corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice devine:

$$T_{eff}^{bi} = \sqrt{q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot T_C \cdot T_D / C_{T_1^{bf}}} \quad (16)$$

Pasul – 6. Calcularea deplasării efective corespunzătoare factorului maxim de reducere a forțelor seismice

Deplasarea efectivă a structurii izolate seismic se obține cu relația:

$$d_{dc}^{bi} = S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi \neq 5\%} \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi} \right)^2 \quad (22)$$

Aplicând relația de conversie a spectrului de răspuns se obține:

$$d_{dc}^{bi} = S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi}\right)^2 \quad (23)$$

Pentru structura izolată seismic sunt posibile următoarele două variante:

1. Dacă: $S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} > S_e(T_D)$

$$d_{dc}^{bi} = S_e^{max} \frac{T_C}{T_{eff}^{bi}} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi}\right)^2 \quad (24)$$

Înlocuind cu ecuația (19), deplasarea efectivă a structurii izolate seismic se obține cu relația finală:

$$d_{dc}^{bi} = q_{equiv}^{max} \cdot (\eta_{eff}^{bi})^2 \cdot \frac{S_e^{max} \cdot T_C^2}{4\pi^2} \quad (25)$$

2. Dacă: $S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} < S_e(T_D)$

$$d_{dc}^{bi} = S_e^{max} \frac{T_C \cdot T_D}{(T_{eff}^{bi})^2} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot \left(\frac{T_{eff}^{bi}}{2\pi}\right)^2 \quad (26)$$

Înlocuind cu ecuația (19), deplasarea efectivă a structurii izolate seismic se obține cu relația finală:

$$d_{dc}^{bi} = \eta_{eff}^{bi} \cdot \frac{S_e^{max} \cdot T_C \cdot T_D}{4\pi^2 \cdot C_{T_1^{bf}}} \quad (27)$$

3. DIMENSIONARE FINALA:

Pasul – 7. Calcularea rigidității efective și dimensionarea sistemului de izolare în funcție de factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil

Rigiditatea efectivă a sistemului de izolare se obține cu relația:

$$K_{eff}^{bi} = M \cdot \left(\frac{2\pi}{T_{eff}^{bi}}\right)^2 \quad (28)$$

Unde T_{eff}^{bi} este determinată conform ecuației (19) sau (21), iar M este masa totală a clădirii.

Având obținute valorile rigidității efective și a amortizării efective sistemul de izolare poate fi dimensionat în detaliu.

Pasul – 8. Se verifică dacă forța de curgere a sistemului de izolare este mai mică decât forța seismică de bază a structurii izolate seismic

Pasul – 9. Dimensionarea suprastructurii și a infrastructurii clădirii izolate seismic utilizând factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil

Exemplu de calcul

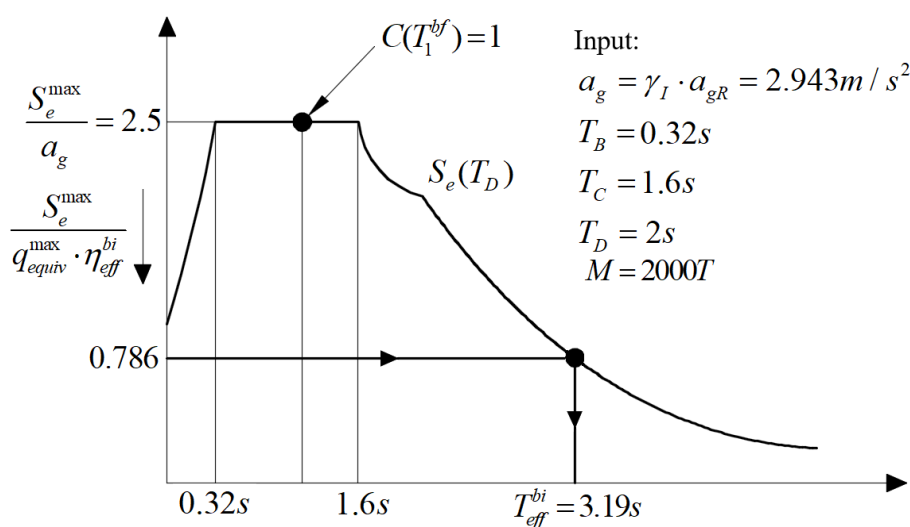
Implementarea metodei izolării bazei ca alternativa fata de soluțiile clasice, este in general analizata in principal sub aspectul următoarelor doua aspecte: eficiența economică și eficiența structurală. Pentru a reliefa simplitatea și eficiența metodei propuse se prezintă următorul exemplu numeric.

Se considera ca tema de proiectare, izolarea unei clădiri pentru care infrastructura are o comportare de cutie rigidă, iar suprastructura este formată din cadre de beton armat, amplasată în București Romania. Se considera ca perioada fundamentală a structurii cu baza fixă este cuprinsă între:

$$T_B < T_1^{bf} < T_C \rightarrow C_{T_1^{bf}} = 1$$

1. INPUT:

Pasul – 1. Stabilirea zonei seismice corespunzătoare amplasamentului structurii:



Figură 9.7. Spectrul elastic de răspuns

$$S_e^{max} = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 = 7.3575 \text{ m/s}^2$$

P

asul – 2. Stabilirea factorului maxim de reducere al forțelor seismice:

$$q_{equiv}^{max} = \frac{q^{bf} \cdot \lambda^{bf}}{q^{bi} \cdot \lambda^{bi}} = \frac{6.75}{1.5} = 4.5$$

Pasul – 3. Stabilirea valorii țintă a amortizării efective:

$$\xi_{eff}^{bi} = 15\% \Rightarrow \eta_{eff}^{bi} = \sqrt{10/(5 + 15)} = 0.707$$

2. RASPUNSUL STRUCTURAL:

Pasul – 4. Calcularea accelerației spectrale efective:

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{S_e^{max}}{q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi}} = \frac{7.3575}{4.5 \cdot 0.707} = 2.313 \text{ m/s}^2$$

Pasul – 5. Calcularea perioadei efective:

$$S_e(T_{eff}^{bi}, \xi_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} < S_e(T_D)$$

$$T_{eff}^{bi} = \sqrt{q_{equiv}^{max} \cdot \eta_{eff}^{bi} \cdot T_C \cdot T_D / C_{T_1^{bf}}} = 3.19s$$

Pasul – 6. Calcularea deplasării efective:

$$d_{dc}^{bi} = \eta_{eff}^{bi} \cdot \frac{S_e^{max} \cdot T_C \cdot T_D}{4\pi^2 \cdot C_{T_1^{bf}}} = 0.422m$$

3. DIMENSIONARE FINALA:

Pasul – 7. Calcularea rigidității efective:

$$K_{eff}^{bi} = M \cdot \left(\frac{2\pi}{T_{eff}^{bi}} \right)^2 = 2000 \cdot \left(\frac{2\pi}{3.19} \right)^2 = 7751kN/m$$

Având obținute valorile rigidității efective și a amortizării efective sistemul de izolare poate fi dimensionat în detaliu.

Pasul – 8. Se verifică dacă forța de curgere a sistemului de izolare este mai mică decât forța seismică de bază a structurii izolate seismic.

Pasul – 9. Dimensionarea suprastructurii și a infrastructurii clădirii izolate seismic utilizând factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil.

1.5. Concluzii

Prin această abordare se obține o dimensionare directă care conferă un control mai mare asupra proprietăților efective ale sistemului de izolare și asupra modului în care acestea influențează comportarea dinamică de ansamblu a structurii izolate seismic. În urma acestei dimensionări, este recomandabil ca soluția finală să se obțină și să se confirme prin analize dinamice neliniare. Inginerul proiectant trebuie să țină cont, pe lângă analizele dinamice, și de strategiile de achiziții, capacitățile de producție, particularitățile proiectului, proprietățile și tipul sistemului de izolare optim aplicabil, precum și de racordurile flexibile ale instalațiilor. Toate aceste aspecte se transpun în analize de tip cost-beneficiu prin care se reliefează impactul economic inițial cât și pagubele mai reduse survenite urma unui seism major.

2. Concluzii analize numerice structuri izolate seismic

2.1 Concluziile studiilor numerice

Prezentare generala

Principalul obiectiv al lucrării este analizarea prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor de protecție pasiva la seism pentru îmbunătățirea răspunsului seismic al structurilor, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona Vrancea. Dezvoltarea accelerata si aplicabilitatea in practica curenta a metodelor de izolare a bazei la nivel mondial, dar si numărul redus de studii privind analiza aplicabilității condițiilor seismice din Romania au condus la oportunitatea cercetării în acest domeniu.

Așa cum am menționat anterior, pentru a se observa eficienta izolării bazei, s-au realizat analize pentru doua dintre cele mai răspândite sisteme structurale întâlnite în practica curenta pe teritoriul României:

1. structuri tip cadru;
2. structuri cu pereți necuplați.

Proiectarea structurilor s-a făcut astfel încât să fie respectate prevederile normativului P100-1/2013, dar și ale Eurocodului EC3 și EC8 pentru îndeplinirea condițiilor stării de rezistență SLS și SLU. În prima etapa structurile se considera incastrate la baza si se calculează conform metodei forțelor seismice statice echivalente. Acestea se dimensionează astfel încât sa fie îndeplinite verificările deplasărilor laterale la starea limita de serviciu si la starea limita ultima.

Structurile tip cadru analizate sunt dublu simetrice si au 4 deschideri si 4 travee de cate 6m, rezultând o lungime totala de 24m. Forțele gravitaționale sunt preluate de către planșeul de beton armat ce are o grosime de 15cm si apoi transmise la stâlpi. Sistemul structural de preluare a forțelor laterale consta in cadre de beton armat. Factorul de comportare q pentru acțiuni seismice orizontale se ia egal cu 6.75. Se analizează 3 structuri identice în plan dar cu regimuri de înălțime diferite: P+2, P+4 si P+6.

Sistemul de izolare este alcătuit din 25 de izolatori identici dispuși la baza structurilor si proiectați astfel încât structura sa rămână în domeniul elastic-liniar de comportare, asigurându-se o izolare totala.

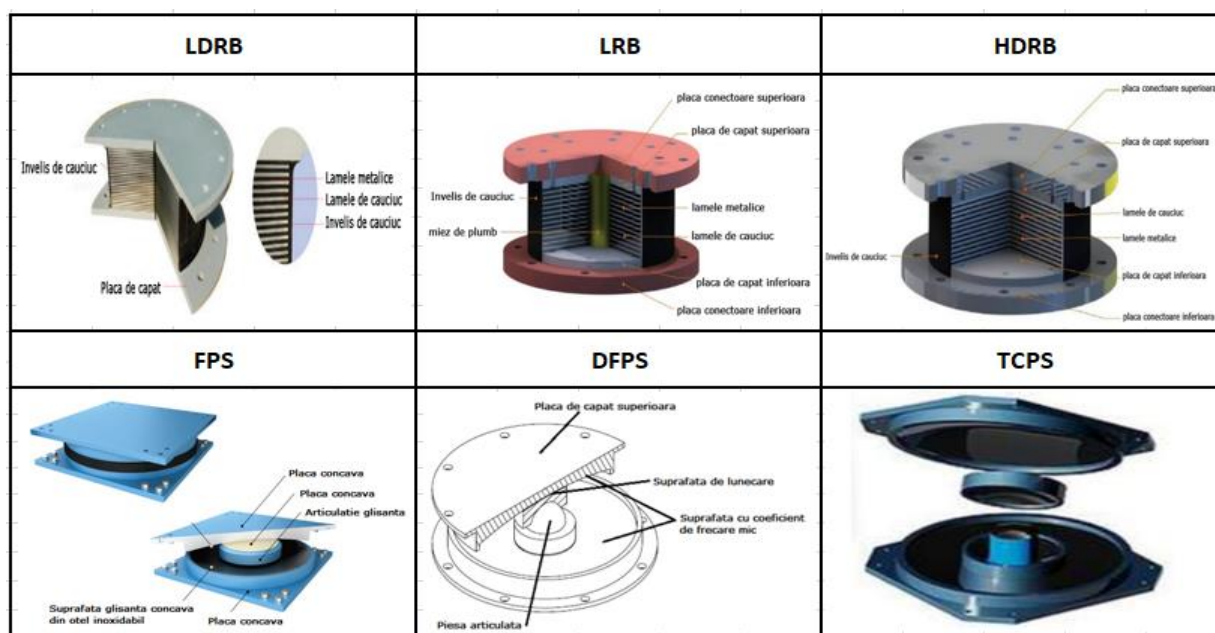
Structurile cu pereți analizate sunt similare cu structurile tip cadru. Acestea sunt dublu simetrice si au 4 deschideri si 4 travee de cate 6m, rezultând o lungime totala de 24m. Forțele gravitaționale sunt preluate de către planșeul de beton armat ce are o grosime de 15cm si apoi transmise la stâlpi si pereți. Sistemul structural de preluare a forțelor laterale consta in pereți de beton armat. Factorul de comportare q pentru acțiuni seismice orizontale se ia egal cu 4.6. Se analizează 3 structuri identice în plan dar cu regimuri de înălțime diferite: P+6, P+8 si P+10.

Sistemul de izolare este alcătuit din 33 de izolatori identici dispuși la baza structurilor si proiectați astfel încât structura sa rămână în domeniul elastic-liniar de comportare, asigurându-se o izolare totala.

Așa cum am prezentat în capitolele precedente, dispozitivele de izolare a bazei pot fi împărțite în două categorii de baza: dispozitive de izolare oscilante și dispozitive de izolare neoscilante. Dispozitivele de izolare oscilante sau elastomerice măresc perioada naturală fundamentală a structurii la o valoare care este suficient de departe de perioadele dominante ale cutremurelor așteptate, pe când dispozitivele de izolare neoscilante permit lunecarea la forțe laterale atunci când se depășește un nivel prestabilit.

Pentru a se observa eficiența diverselor categorii și dispozitive de izolare a bazei, pentru fiecare sistem structural se implementează și analizează 3 sisteme de izolare oscilante și 3 sisteme de izolare neoscilante, utilizate în majoritatea cazurilor în proiectarea curentă prezentate în figura 2.1.

1. Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB);
2. Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB);
3. Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB);
4. Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de lunecare (FP);
5. Izolator de tip dublu pendul cu frecare (DCFP);
6. Izolator de tip triplu pendul cu frecare (TCFP).



Figură 2.1. Tipurile de izolatori analizați

Pentru a se observa efectul condițiilor seismice și de teren din România amplasamentul structurilor variază. Se analizează structurile pentru cele trei spectre normalizate de răspuns elastic-liniar ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică $\xi = 5\%$ ($T_c = 0.7s, T_c = 1.0s$ și $T_c = 1.6s$). Pentru a se observa influența valorilor de vârf a accelerațiilor terenului se fac analize pentru $a_g = 0.2g, a_g = 0.3g$ și $a_g = 0.4g$.

În tabelul 2.1 sunt prezentați toți factorii care se vor modifica în analiza prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor seismice pasive în îmbunătățirea răspunsului seismic al structurilor, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona Vrancea.

Factori analizați	Tip structura	
	Structura in cadre	Structura cu pereti
Regim de inaltime	P+2 / P+4 / P+6	P+8 / P+10 / P+12
Tip de izolatori	Pentru fiecare structura s-au analizat 3 tipuri de izolatori oscilanti (LDRB, LRB, HDRB) si 3 tipuri de izolatori neoscilanti (FP, DCFP, TCFP)	
Spectru de proiectare	Se analizează structurile pentru cele trei spectre normalizate de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică $\xi=5\%$ ($T_c=0.7s, T_c=1.0s$ si $T_c=1.6s$).	
Valoare de varf a accelerațiilor	Pentru a se observa influenta valorilor de vârf a accelerațiilor terenului se fac analize pentru $a_g=0.2g, a_g=0.3g$ si $a_g=0.4g$	
Factor de comportare q	q=6.75	q=4.6

Tabel 2.1. Factori analizați

Evaluarea spectrului normalizat de răspuns elastic-liniar al structurii cu baza izolata prin metoda simplificata

1. Spectrul normalizat de răspuns elastic pentru structurile izolate la baza se poate evalua cu expresia:

$$\beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{2.125}{q_{echiv} \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{eff}^{bi}}}} = \frac{2.125}{q_{echiv} \cdot \eta}$$

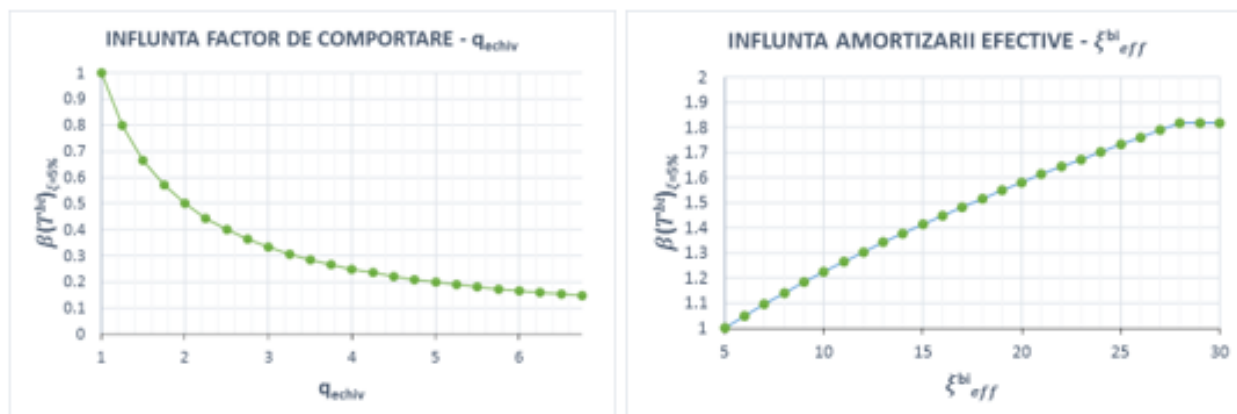
Pentru structurile in cadre, presupunând o amortizare $\xi_{eff}^{bi} = 30\%$ si, pentru o izolare completa $q_{echiv} = q = 6.75$, obținem:

$$\beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{2.125}{6.75 \cdot 0.55} = 0.572$$

Pentru structurile cu pereți, presupunând o amortizare $\xi_{eff}^{bi} = 30\%$ si, pentru o izolare completa $q_{echiv} = q = 4.60$, obținem:

$$\beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} = \frac{2.125}{4.60 \cdot 0.55} = 0.840$$

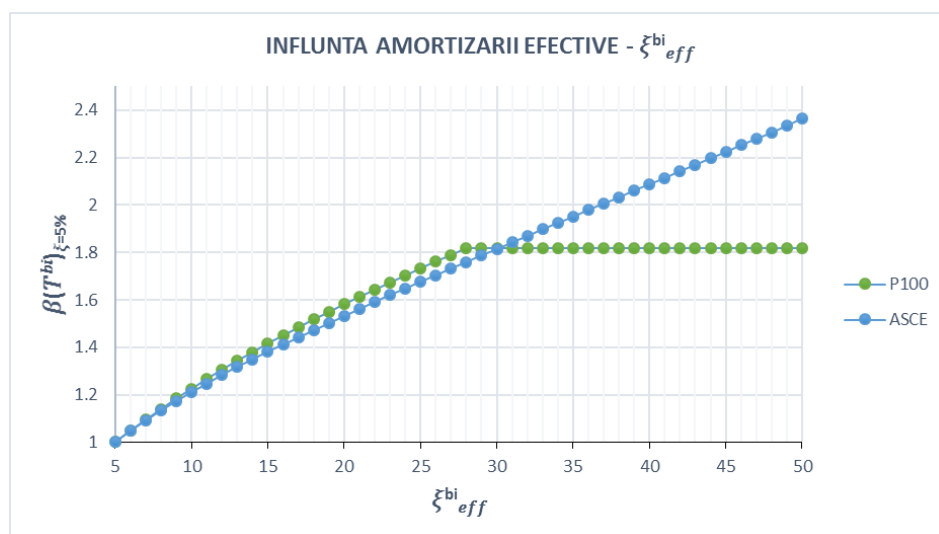
Se observa astfel faptul ca răspunsul structurilor izolate depinde doar de factorul de comportare echivalent impus și de amortizarea efectivă a sistemului de izolare. Astfel pe baza acestei relații se poate estima răspunsul structurilor izolate doar funcție de factorul de comportare echivalent impus și de amortizarea efectivă a sistemului de izolare. În figura 2.2 este prezentată influența factorului de comportare echivalent impus și a amortizării efective a sistemului de izolare asupra spectrului normalizat de răspuns elastic-liniar pentru structurile izolate la baza.



Figură 2.2. Influența factorului de comportare echivalent impus și a amortizării efective a sistemului de izolare asupra spectrului normalizat de răspuns

Pentru realizarea izolării seismice se pot alege dispozitive de izolare oscilante, cum ar fi sistemele elastomerice cu amortizare înaltă, HDRB, dispozitive neoscilante, cu frecare, sau sisteme combinate alcătuite din reazeme elastomerice și amortizoare vâscoase. Pentru fiecare sistem va corespunde o anumită amortizare efectivă. De exemplu, pentru HDRB, nivelul de amortizare este de cca $10 \div 20\%$.

În figura 10.3 se prezintă influența amortizării efective a sistemului de izolare asupra spectrului normalizat de răspuns pentru codul american de proiectare (culoare albastră) și codul românesc de proiectare (culoare verde). Se observă că pentru valori ale amortizării efective cuprinse între 5% și 30% valorile sunt comparative. În codul american nu există limitări în ceea ce privește influența amortizărilor cu valori mai mari de 30%, pe când în codul românesc relația de conversie a ordonatelor spectrale se limitează la o amortizare maximă: $\xi_{max} = 28.06\%$.

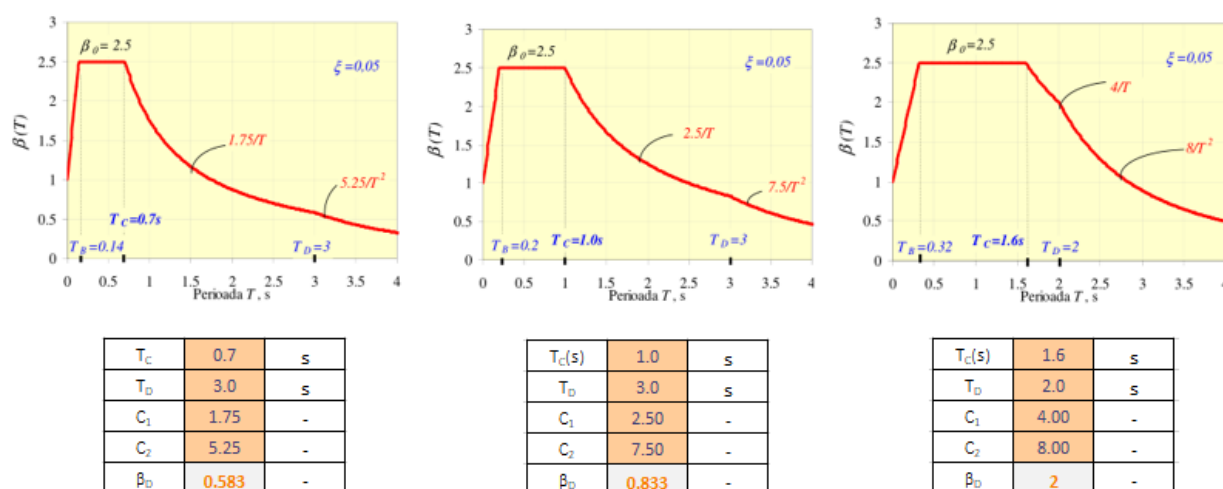


Figură 2.3. Influența amortizării efective a sistemului de izolare asupra spectrului normalizat de răspuns în codul american și cel românesc

2. Perioadele de răspuns pentru structurile izolate seismic se pot evalua cu expresia:

$$T_{eff}^{bi} = \begin{cases} q_{echiv} \cdot \eta \cdot \frac{C_1}{2.125} & \beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} > \beta_D \\ \sqrt{q_{echiv} \cdot \eta \cdot \frac{C_2}{2.125}} & \beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} < \beta_D \end{cases}$$

Pentru evaluarea perioadei de răspuns a structurii cu baza izolata am definit coeficienții C_1 si C_2 conform figura 2.4.



Figură 2.4. Coeficienții C_1 si C_2 pentru determinarea perioadei de răspuns a structurii cu baza izolată

Se observa astfel faptul ca răspunsul structurilor izolate depinde doar de factorul de comportare echivalent impus, de amortizarea efectiva a sistemului de izolare si de spectrul de proiectare in funcție de amplasament. Astfel pe baza acestei relații se poate estima răspunsul structurilor izolate doar funcție de factorul de comportare echivalent impus si de amortizarea efectiva a sistemului de izolare.

Tip structura	Spectru de proiectare		
	$T_c=0.7s$	$T_c=1.0s$	$T_c=1.6s$
Structura in cadre $q=6.75$ $\xi=30\%$	$T_{eff}=3.03s$ calcul liniar	$T_{eff}=3.62s$ calcul modal/dinamic	$T_{eff}=3.74s$ calcul modal/dinamic
Structura cu pereti $q=4.6$ $\xi=30\%$	$T_{eff}=2.08s$ calcul liniar	$T_{eff}=2.99s$ calcul liniar	$T_{eff}=3.08s$ calcul modal/dinamic

Tabel 2.2. Perioadele de răspuns pentru structurile izolate seismic

Una din limitările aplicării calculului liniar echivalent simplificat, conform P100-1/2013 si EC8, este ca perioada efectiva T_{eff} sa satisfacă următoarele condiții:

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s$$

În funcție de perioadele de răspuns obținute în tabelul 10.2 sunt prezentate metodele de calcul pentru structurile izolate seismic în funcție de tipul de structură, factorul de comportare echivalent și amortizarea efectivă a sistemului de izolare. Se observă faptul că pe măsura ce factorul de comportare echivalent q_{echiv} și amortizarea efectivă ξ_{eff}^{bi} vor avea valori mai ridicate, metoda de calcul liniar simplificată nu mai poate fi aplicată datorită perioadelor de răspuns ale structurii cu baza izolată ce depășesc 3 secunde.

3. Deplasarea centrului de rigiditate pentru structurile izolate seismic se pot evalua cu expresia:

$$d_{dc}^{bi} = \begin{cases} q \cdot a_g \cdot \eta^2 \cdot \frac{C_1^2}{8.5 \cdot \pi^2} & \beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} > \beta_D \\ a_g \cdot \eta \cdot \frac{C_2}{4 \cdot \pi^2} & \beta(T_{eff}^{bi})_{\xi=5\%} < \beta_D \end{cases}$$

Deplasarea centrului de rigiditate pentru structurile izolate seismic								
Structura în cadre $q=6.75 \quad \xi=30\%$		Spectru de proiectare			Structura cu pereți $q=4.6 \quad \xi=30\%$		Spectru de proiectare	
		$T_c=0.7s$	$T_c=1.0s$	$T_c=1.6s$			$T_c=0.7s$	$T_c=1.0s$
a_g/g	0.2	0.144	0.205	0.219	a_g/g	0.2	0.100	0.205
	0.3	0.215	0.308	0.328		0.3	0.150	0.308
	0.4	0.287	0.410	0.438		0.4	0.200	0.410

Tabel 2.3. Deplasările de răspuns pentru structurile izolate seismic

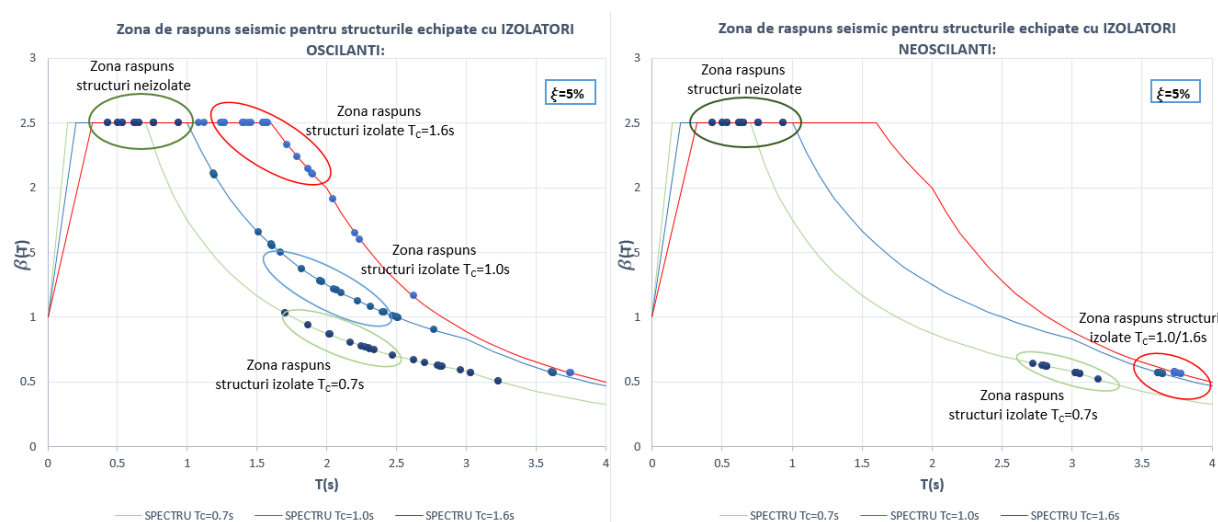
Se observă astfel faptul că răspunsul structurilor izolate depinde doar de factorul de comportare echivalent impus, de amortizarea efectivă a sistemului de izolare și de spectrul de proiectare și a_g în funcție de amplasament.

Pentru ambele tipuri de structuri considerate se remarcă faptul că cerințele la deplasare sunt ridicate pentru accelerații mari ($a_g = 0.3g/0.4g$) pentru zonele cu $T_c = 1.0s$ și $T_c = 1.6s$.

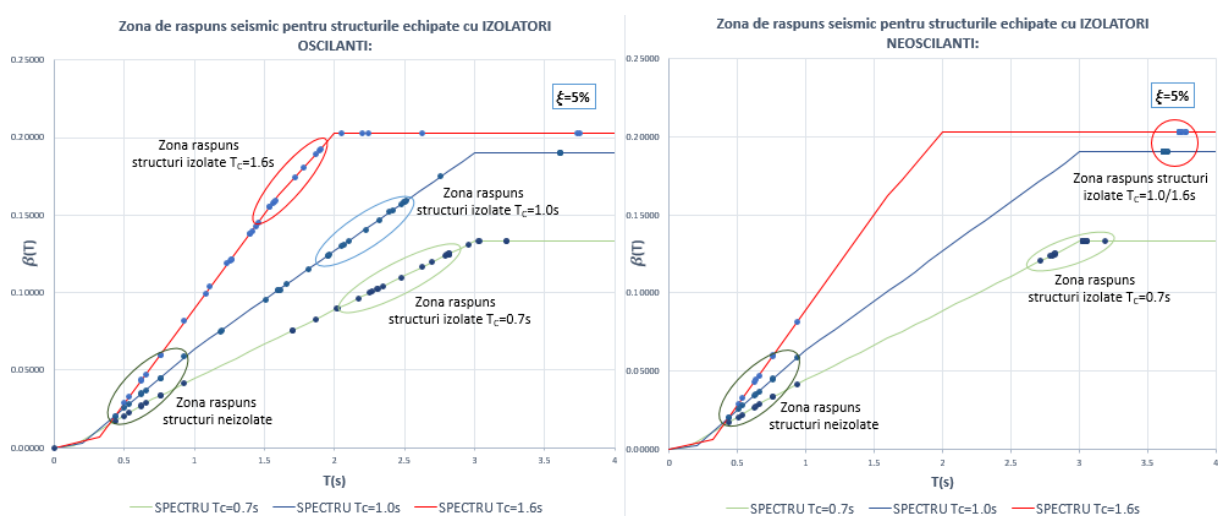
Concluzii pentru Structuri in cadre: DCH ($q=6.75$); $\gamma=1.0$ si pentru Structuri cu pereți: DCH ($q=4.60$); $\gamma=1.0$

In figura 2.5 si figura 2.6 sunt prezentate zonele de răspuns pentru structurile in cadre de beton armat, izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) si cu izolatori neoscilanți (dreapta). Se observa ca dispozitivele de izolare neoscilante cu frecare oferă avantaje fata de dispozitivele de izolare oscilante sau elastomerice. Toate cele 3 sisteme de izolatori neoscilanți obțin o reducere substanțială a efectelor acțiunii seismice, plasând răspunsul suprastructurii in domeniul elastic pentru toate cele 3 spectre de proiectare.

Structuri in cadre: DCH ($q=6.75$); $\gamma=1.0$:



Figură 2.5. Spectrele normalizate de răspuns elastic-liniar ale accelerațiilor absolute: Zonele de răspuns pentru structurile izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) si cu izolatori neoscilanți (dreapta)

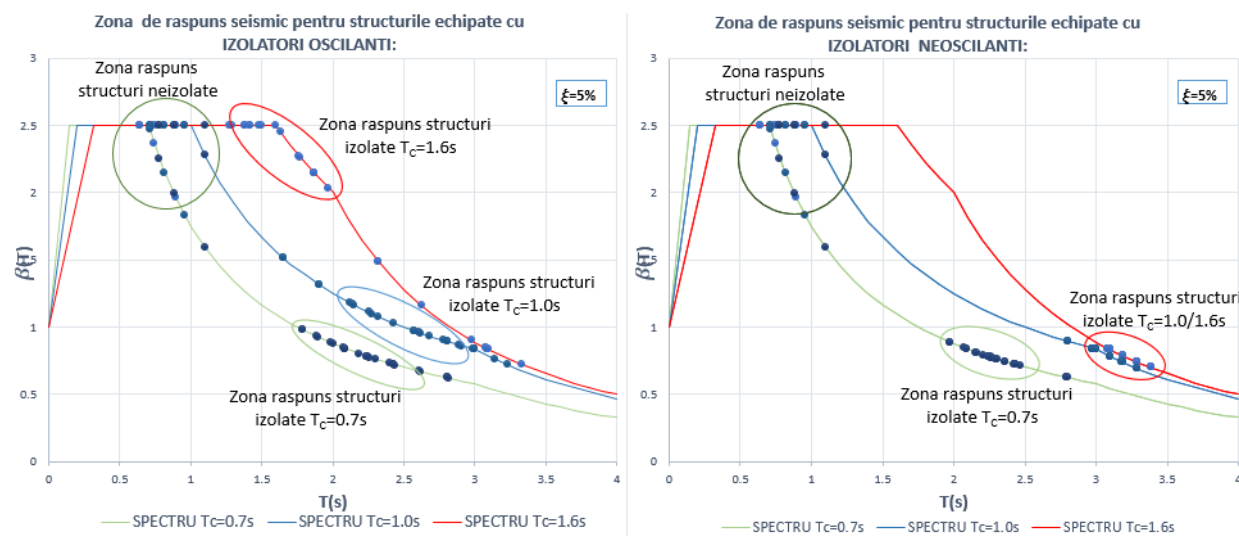


Figură 2.6. Spectrele normalizate de răspuns elastic-liniar ale deplasărilor relative: Zonele de răspuns pentru structurile izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) si cu izolatori neoscilanți (dreapta)

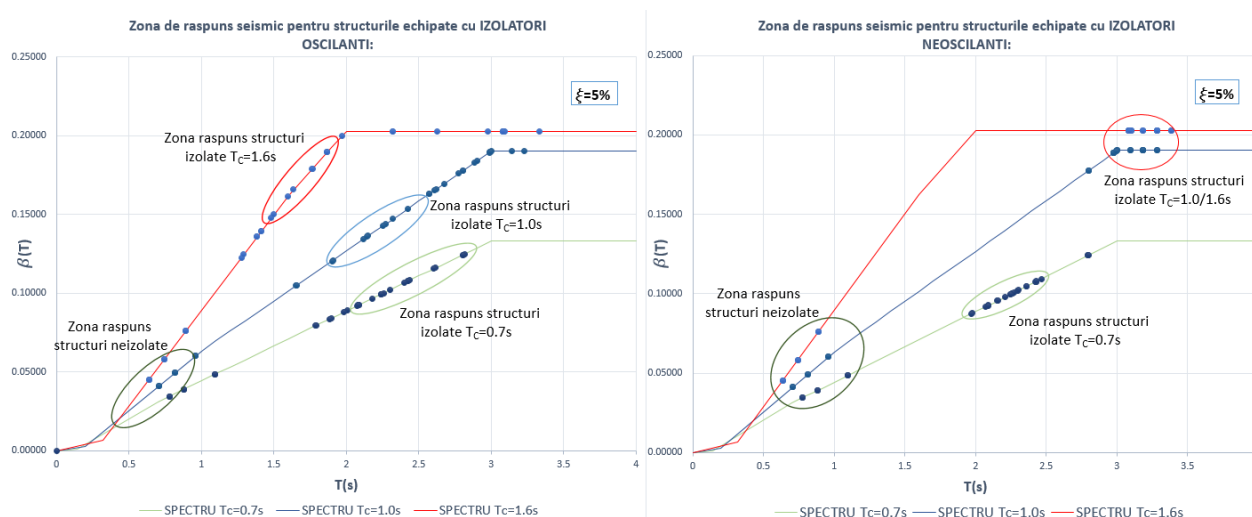
În figura 2.7 și figura 2.8 sunt prezentate zonele de răspuns spectrale pentru structurile cu pereți de beton armat, izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) și cu izolatori neoscilanți (dreapta).

Se observa că și în cazul structurilor în cadre, dispozitivele de izolare neoscilante cu frecare oferă avantaje față de dispozitivele de izolare oscilante sau elastomerică. Toate cele 3 sisteme de izolatori neoscilanți obțin o reducere substanțială a efectelor acțiunii seismice, plasând răspunsul suprastructurii în domeniul elastic-liniar pentru toate cele 3 spectre de proiectare.

Structuri cu pereți: DCH ($q=4.60$); $\gamma=1.0$:



Figură 2.7. Spectrele normalizate de răspuns elastic-liniar ale accelerațiilor absolute: Zonele de răspuns pentru structurile izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) și cu izolatori neoscilanți (dreapta)



Figură 2.8. Spectrele normalizate de răspuns elastic-liniar ale deplasărilor relative: Zonele de răspuns pentru structurile izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) și cu izolatori neoscilanți (dreapta)

Comparativ, izolatorii oscilanți dau un răspuns similar doar în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=0.7s$. În zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.0s$ se obține o reducere medie a efectelor acțiunii seismice, dar structura va avea incursiuni semnificative în domeniul inelastic, iar în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.6s$ sistemele oscilante nu sunt eficiente, răspunsul suprastructurii plasându-se de fapt în domeniul de rezonanță cu mișcarea predominantă a terenului. Acest lucru este datorat sensibilității sistemelor oscilante la stabilitatea la deplasări laterale mari, necesare izolării totale pentru zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.0s$ și $T_C=1.6s$.

Parcurgând figura 2.5, figura 2.6, figura 2.7 și figura 2.8 se pot trage următoarele concluzii:

1. Izolatori oscilanți:

- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=0.7s$ se obține o reducere substanțială a efectelor acțiunii seismice, asigurându-se astfel îndepărtarea structurii de zona de amplificare specifică cutremurelor de tip Vrancea, plasând răspunsul suprastructurii în domeniul elastic-liniar de comportare.
- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.0$, pentru $a_g/g > 0.2$, se obține o izolare parțială, iar structura va avea incursiuni în domeniul inelastic de comportare.
- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.6$, pentru $a_g/g > 0.2$, sistemele oscilante nu sunt eficiente, răspunsul suprastructurii plasându-se de fapt în domeniul de rezonanță cu mișcarea predominantă a terenului (în zona de amplificare spectrală).
- o dată cu creșterea valorilor maxime ale accelerației terenului pentru proiectare eficiența izolatorilor oscilanți scade
- o dată cu creșterea regimului de înălțime eficiența izolatorilor oscilanți crește

2. Izolatori neoscilanți:

- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=0.7s$ și/sau în zonele cu $a_g/g < 0.2$ se recomandă utilizarea izolatorilor FPS.
- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.0$ și $T_C=1.6$, pentru $a_g/g=0.3$, se recomandă utilizarea izolatorilor DFPS.
- în zonele caracterizate prin perioada de control $T_C=1.0$ și $T_C=1.6$, pentru $a_g/g=0.5$, se recomandă utilizarea izolatorilor TFPS.
- izolatorii de tip DFPS și TFPS sunt recomandați în zonele caracterizate de perioade de control și valori maxime ale accelerației terenului sporite.

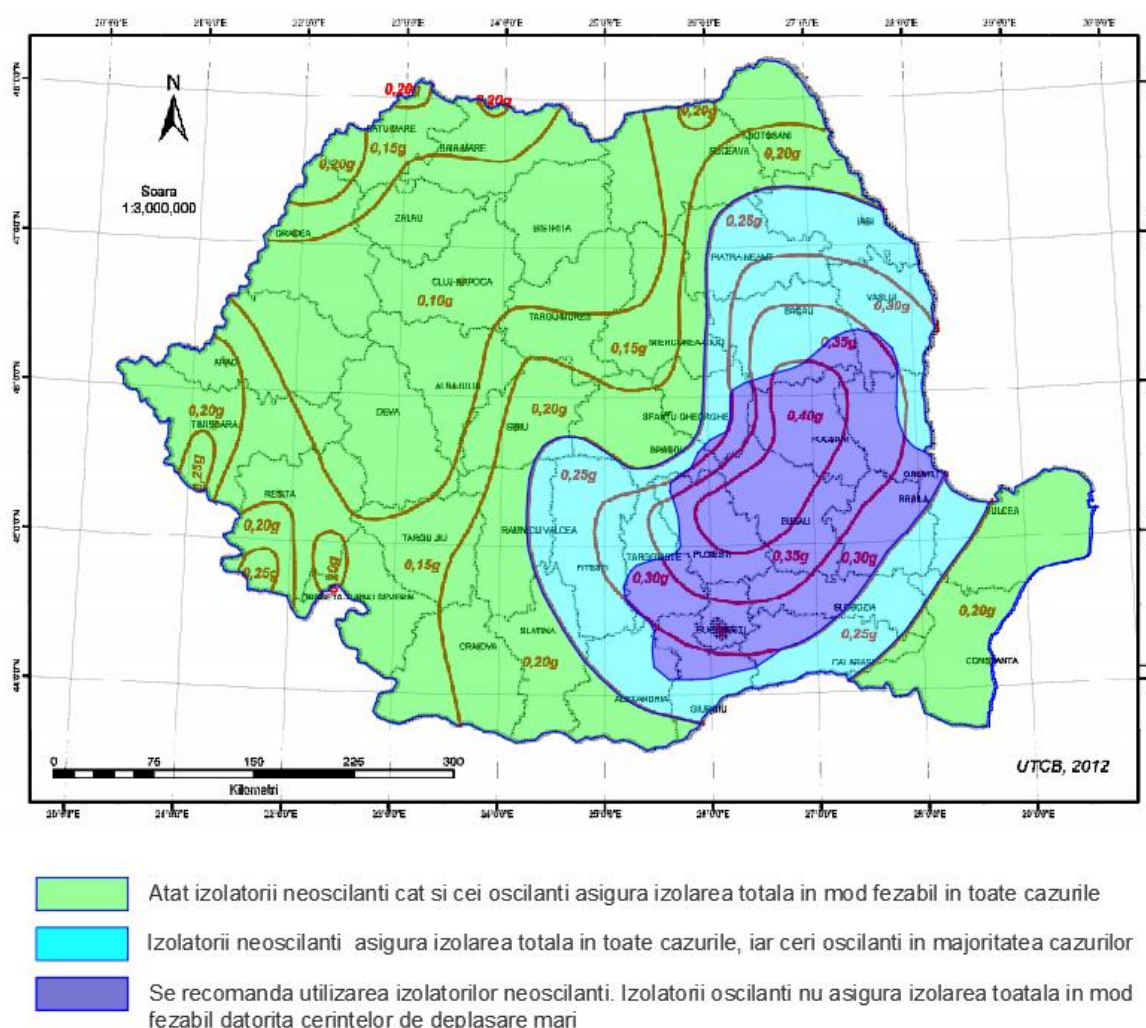
Concluzii finale

Pe baza rezultatelor obținute în urma analizelor numerice pe baza formulelor de calcul simplificat dezvoltate, cât și în urma analizelor spațiale pentru tipurile de structuri alese, se propun următoarele zonări ale teritoriului României:

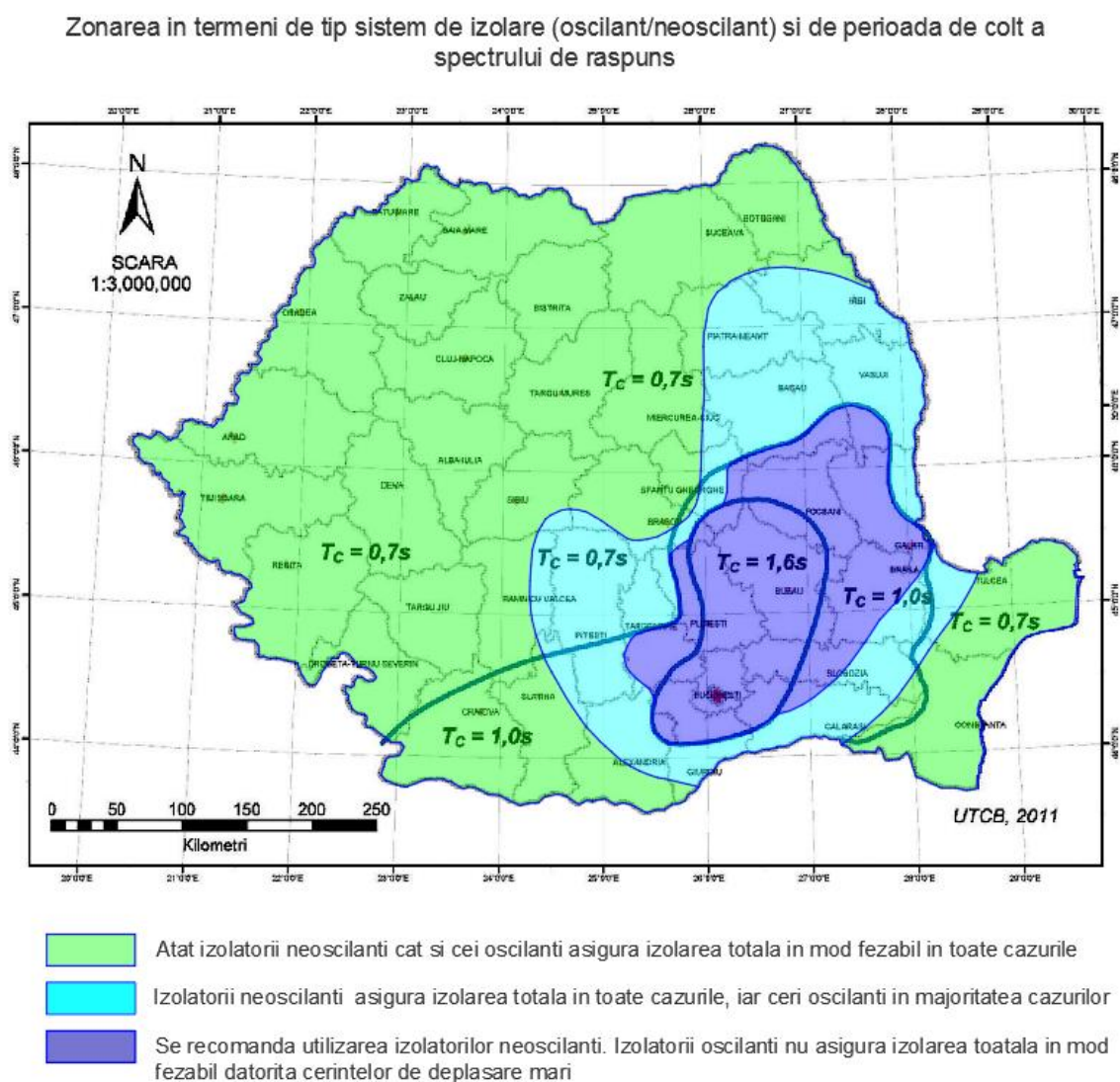
1. Figura 2.9: Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare (IMR=225 ani și 20% probabilitate de depășire în 50 de ani)
2. Figura 2.10: Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de perioada de colt a spectrului de răspuns

Aceste zonări corespund atât structurilor în cadre de beton armat pentru valori ridicate ale factorului de comportare seismică ($q=6.75$), cât și structurilor cu pereți de beton armat pentru valori ridicate ale factorului de comportare la seism ($q=4.60$).

Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare (IMR=225 ani și 20% probabilitate de depășire în 50 de ani)



Figură 2.9. Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare (IMR=225 ani și 20% probabilitate de depășire în 50 de ani)



Figură 2.10. Zonarea in termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) si de perioada de colt a spectrului de răspuns

Un mare dezavantaj al izolatorilor oscilanți îl prezintă stabilitatea la deplasări laterale mari. Răspunsul structurilor izolate depinde doar de factorul de comportare echivalent impus, de spectrul de proiectare și a_g în funcție de amplasamentul zonal.

În zonele cu valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare a_g și perioada de colt T_c ridicate, izolatorii oscilanți nu pot asigura o izolare completă.

Cerințele de deplasare laterală a centrului de rigiditate a structurilor izolate sunt direct proporționale cu factorul de comportare echivalent impus. Astfel, pentru valori mai reduse ale factorului de comportare (cadre: $q < 6.75$; pereți: $q < 4.60$) zonele în care se pot utiliza izolatorii oscilanți se măresc în comparație cu zonele prezentate în figurile 10.9 și 10.10.

De asemenea, în zona propusă a fost luată în calcul o amortizare efectivă a sistemului de izolare oscilant maximă posibilă ($\xi_{eff}^{bi} = 30\%$ pentru LDRB și LRB și $\xi_{eff}^{bi} = 20\%$ pentru HDRB). Pentru valori mai mici ale amortizării efective eficiența sistemului de izolare oscilant scade, iar zonele în care se pot utiliza izolatorii oscilanți se reduc în comparație cu zonele prezentate în figurile 2.9 și 2.10.

Contribuții personale

Principalul obiectiv al lucrării este analizarea metodelor de izolare a bazei structurilor, studierea efectului asupra comportării unei clădiri și aplicarea acestora în condițiile seismice din Romania. Dezvoltarea accelerată și aplicabilitatea în practica curentă a metodelor de izolare a bazei la nivel mondial, dar și numărul redus de studii privind analiza aplicabilității la condițiile seismice din Romania au condus la oportunitatea cercetării în acest domeniu. Principalele contribuții personale constau în:

1. Dezvoltarea unei metode matematice de estimare a răspunsului seismic pentru structurile izolate la baza utilizând calculul liniar echivalent, în concordanță cu exigentele codului românesc de proiectare seismică P100/2013. Se observa astfel faptul că răspunsul structurilor izolate depinde doar de factorul de comportare echivalent impus, de amortizarea efectivă a sistemului de izolare și de spectrele normalizate de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică $\xi=5\%$ în condițiile seismice și de teren din Romania. În funcție de acești parametri au fost dezvoltate relații de determinare a spectrului normalizat de răspuns elastic, a perioadei de răspuns și a deplasării de răspuns pentru structurile izolate la baza.
2. Dezvoltarea unei noi abordări în aplicarea calculului static liniar pentru structurile izolate seismic. În procedura de calcul propusă se urmărește ca punctul de plecare al analizelor să fie reprezentat de factorul maxim de reducere al forțelor seismice, după care să se stabilească amortizarea efectivă țintă a sistemului de izolare seismică. Prin această abordare se obține o dimensionare directă care conferă un control mai mare asupra proprietăților efective ale sistemului de izolare și asupra modului în care acestea influențează comportarea dinamică de ansamblu a structurii izolate seismic.
3. Analizarea prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor de izolare a bazei (atât oscilante cât și neoscilante), pentru structuri în cadre și structuri cu pereți necuplați, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona Vrancea. Sistemul de izolare se dimensionează astfel încât să se realizeze o izolare totală (izolarea care asigură suprastructurii o comportare în domeniul elastic). În cadrul analizelor se determină efectele asupra sistemului de izolare pe care îl are amplasamentul construcției (în funcție de cele trei spectre normalizate de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică $\xi=5\%$, dar și în funcție de valorile de vârf ale accelerațiilor terenului). În urma analizelor se observă faptul că în zonele cu valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare și perioada de colț ridicate, izolatorii oscilanți nu sunt o soluție eficientă pentru obținerea unei izolări totale.
4. Analiză cu privire la tipurile, caracteristicile și modelele de calcul ale dispozitivelor pasive de izolare seismică.
5. Realizarea de programe de calcul pentru dimensionarea a 3 sisteme de izolare oscilante și a 3 sisteme de izolare neoscilante, utilizate în majoritatea cazurilor în proiectarea curentă:
 1. Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB);
 2. Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB);
 3. Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB);
 4. Izolator de tip pendul cu frecare cu o suprafață de lunecare (FP);
 5. Izolator de tip dublu pendul cu frecare (DCFP);
 6. Izolator de tip triplu pendul cu frecare (TCFP).

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 pentru o structură, considerând amplasamentul acesteia pe harta de zonare seismică și pe baza formulelor pentru evaluarea spectrului normalizat de răspuns elastic, a perioadelor fundamentale și a cerințelor de deplasare pentru structurile cu baza izolată prin metoda simplificată prezentată în capitolul 9.

Se dorește realizarea unor studii aprofundate pentru a cuantifica și influența teren-structură în alegerea tipului de izolare, dar și a caracteristicilor izolatorilor. În cadrul acestui studiu se va trata și problema structurilor izolate seismic amplasate în zone care sunt caracterizate de apariția cutremurelor cu perioada lungă, dincolo de perioada de colt prevăzută în codurile de proiectare („*long period waves*”). Acest fenomen apare în special în bazine aluvionare majore și poate conduce la rezonanță cu zona de răspuns a clădirilor izolate seismic. Exemple de astfel de fenomene, cât și consecințele dezastruoase ale cutremurelor cu perioada lungă sunt prezentate în literatura de specialitate. În acest sens, Kelly TE (2001) [47] atrage atenția asupra necesității măsurilor de protecție ce trebuie luate din faza de proiectare în astfel de amplasamente, atât în cazul structurilor izolate seismic, cât și în cazul structurilor caracterizate de perioade proprii mari. Ca exemple de astfel de amplasamente Kelly TE (2001) [47] amintește de Mexico City și București.

Bibliografie

- [1] American Society of Civil Engineers (2016) ASCE standard. American Society of Civil Engineers, Virginia, Reston.
 - [2] Federal Emergency Management Agency (FEMA). 2009. “2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples”, Chapter 12, September 2012.
 - [3] European Committee for Standardization CEN (2004) EN 1998-1:2004, „Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”.
 - [4] Takim Andriono, „Seismic Resistant Design of Base Isolated Multistory Structures.” Report 90-12, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 1990.
 - [5] Lee JJ, Kelly JM, “The effect of damping in isolation system on the performance of base-isolated system”. *J Rubber Res* **22**, 77–89 (2019).
 - [6] Kelly TE, “Base isolation of structures”, Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
- P100/2013 Cod de Proiectare Seismica – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri – Indicativ P100-1.