



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

## **Rezumat**

### **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**

## 1. Introducere

### 1.1 Principiile metodei de izolare seismică a bazei

Acțiunea seismică, denumită în mod curent cutremur, a constituit și constituie în situații extreme cea mai severă dintre acțiunile cu o rată redusă de apariție, dar cu un efect catastrofal. În prezent, cutremurul reprezintă principala sursă generatoare de victime și de pagube materiale pe o mare suprafață a globului pământesc.

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”. 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.

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.

Din categoria procedeelelor moderne de control pasiv se pot aminti dispozitivele vâsco-elastice, care sporesc nivelul de amortizare structurală, și dispozitivele de tip izolare bazei, oscilante și neoscilante sau cu frecare. Procedeele de izolare a 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.

## 1.2 Oportunitatea si obiectivele cercetării

Principalul obiectiv al lucrării este analizarea metodelor de izolare a bazei structurilor, studierea efectului asupra comportării unei clădiri si aplicarea acestora în condițiile seismice din Romania.

La nivel mondial metodele de izolare a bazei sunt o practica curenta, din ce in ce mai populara, in special in tari precum Statele Unite ale Americii, Japonia, China, Italia, Rusia, Armenia, Chile, Taiwan sau Turcia. In Romania aceste metode au fost aplicate însă într-un număr foarte redus, in special la lucrări cu caracter experimental sau consolidări.

În România, prima clădire izolată la seism s-a realizat la Iași. Clădirea a fost construită în anii 1985-1986, are 5 etaje, structura din beton armat cu elemente prefabricate și ocupă o suprafață în plan de 14,00 x 20,60 m. Sistemul de izolare constă din 552 de penduli din beton armat cu extremitățile eliptice. Clădirea nu a fost instrumentată și, ca urmare, nu s-au făcut înregistrări la seismele din anii 1986 și 1990. O a doua lucrare a fost acceleratorul de particule de la Institutul de Fizică Atomică de la Măgurele, lângă București. Acesta are lungimea de 14,00 m, 3,60 m diametru și 60 tone greutate și a fost izolat la seism de către firma GERB GmbH din Germania în perioada 1988-1989. S-au folosit patru reazeme de tip resort cu amortizori vâscoși. O altă lucrare cu caracter experimental este reprezentată de o clădire cu greutatea de 100 tone amplasată la INCERC, care reazemă pe trei dispozitive elastomerice fabricate în Italia. [11]

În anul 2010 a fost finalizată modernizarea și izolarea seismică a clădirii Victor Slăvescu din Calea Griviței, București. Sistemul de izolare proiectat de dr. ing. Eugeniu Iordăchescu constă din 79 reazeme elastomerice cu diametrul de 700 mm și înălțimea de 400 mm, care au fost fabricate în SUA și sunt capabile la o deplasare laterală de 600 mm. Pentru asigurarea amortizării necesare s-au introdus 18 amortizori vâscoși Taylor care pot dezvolta o forță de 1500kN și o deplasare maximă de 500mm. O altă lucrare de consolidare și de protecție la seism prin izolarea bazei s-a realizat la clădirea Primăriei București din B-dul Elisabeta și pentru Arcul de Triumf. [1]

O cauza a numărului redus de clădiri izolate seismic pe teritoriul României este si existenta unui număr redus de studii elaborate asupra metodelor de izolare seismică a structurilor situate în zona seismică Vrancea.

La nivel mondial, in decursul ultimilor decenii au fost efectuate o multitudine de cercetării asupra tipurilor de dispozitive de control pasiv precum si a utilizării acestora la izolarea seismică a clădirilor. Trebuie remarcat că la nivelul contribuțiilor științifice actuale nu există o delimitare sau clasificare clară a tehnologiilor speciale de reducere a efectului acțiunii seismice, atât pentru construcțiile civile cât și pentru lucrările de artă. Ca atare, clasificările actuale depind preponderent de tipologia izolatorilor proiectați de către diverse companii de profil. Se poate afirma, în consecință, ca piața acestor tehnologii este dominată de atâtea tipuri de dispozitive câți producători exista. Din acest motiv, în cele ce urmează, vor fi analizate cele mai recente concepte de clasificare a tehnologiilor de protecție seismică fără a se face uz de clasificările uzuale oferite de producătorii de dispozitive din domeniu.

Aceste dispozitive pot fi împărțite in doua categorii de baza: dispozitive de izolare oscilante si 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. Apariția unor materiale moderne cu caracteristici fizico-mecanice potrivite și a tehnologiei vulcanizării cauciucului pe plăci de oțel a permis ca, începând cu anii 1960, procedeul izolării bazei să fie aplicat în multe țări cu risc seismic pronunțat.

În concluzie, 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 România au condus la oportunitatea cercetării în acest domeniu. În acest sens, obiectivele tezei de doctorat sunt:

- Aprofundarea cunoștințelor cu privire la tipurile, caracteristicile și modelele de calcul ale dispozitivelor pasive de izolare seismică;
- Analizarea prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor de izolare a bazei în îmbunătățirea răspunsului seismic al structurilor, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona seismogenă Vrancea.
- Realizarea de programe de calcul pentru dispozitivele de izolare oscilante și dispozitivele de izolare neoscilante
- Determinarea sistemelor de izolare ce sunt mai eficiente în condițiile seismice din România.
- Analizarea efectului asupra sistemului de izolare pe care îl are amplasamentul construcțiilor din punct de vedere al spectrului normalizat de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică  $\xi = 5\%$  și al valorilor de vârf ale accelerațiilor terenului.

### 1.3 Conținutul tezei de doctorat

#### **Capitolul 1 - Introducere:**

În primul capitol sunt prezentate principiile metodei de izolare a bazei, oportunitatea și obiectivele prezentei cercetări, precum și conținutul tezei de doctorat.

#### **Capitolul 2 - Tipuri de izolatori seismici:**

În acest capitol sunt detaliate tipurile de dispozitive de izolare a bazei structurilor la acțiunile seismice. Pentru fiecare dispozitiv se vor prezenta avantajele și dezavantajele, principiile de funcționare, de alcătuire, comportamentul acestora, dar și relațiile de calcul ale principalelor caracteristici necesare pentru modelarea lor cu ajutorul unor programe de calcul.

#### **Capitolul 3 - Metode de calcul pentru structurile dotate cu izolatori seismici:**

În acest capitol sunt prezentate metodele de calcul din principalele coduri internaționale de proiectare pentru structurile echipate cu izolatori seismici, precum și alte metode de calcul. Se vor urmări procedurile de proiectare, cerințele codurilor și criteriile de performanță structurală. Se va analiza codul de proiectare japonez (Building Standard Law), codul de proiectare american (ASCE 7-10), codul european (Eurocode 8, EC8) și codul românesc (P100-1 2013 – preluat din EC8).

#### **Capitolul 4 - Exemple de structuri izolate seismic:**

În acest capitol sunt prezentate câteva din cele mai reprezentative construcții izolate seismic din Statele Unite ale Americii, Japonia, China, Italia, Rusia, Armenia, Chile, Taiwan, Turcia și România. Se prezintă studii de caz și se exemplifică diferențele și similitudinile între codurile de proiectare japonez, american și european pe o structură de beton armat cu structură în cadre.

#### **Capitolul 5:**

În acest capitol este prezentată descrierea problemei și obiectivele analizei. Astfel, pentru a se observa eficiența izolării bazei, se vor realiza 2 serii de analize pentru două din cele mai răspândite sisteme structurale întâlnite în practica curentă pe teritoriul României:

1. structuri tip cadru - Structura P+2 (27analize) - Structura P+4 (27analize) - Structura P+6 (27analize);
2. structuri cu pereți necuplați - Structura P+6 (27analize) - Structura P+8 (27analize) - Structura P+10 (27analize);

#### **Capitolul 6:**

În acest capitol se dezvoltă o metodă de determinare a răspunsului seismic pentru structurile izolate la baza utilizând calculul liniar echivalent. Se pune accent pe obținerea unei izolări complete (izolarea care asigură suprastructurii o comportare în domeniul elastic).

#### **Capitolul 7:**

În acest capitol se prezintă și se analizează rezultatele pentru o serie de structuri în cadre din beton armat dublu simetrice cu 4 deschideri și 4 travee de câte 6m, rezultând o lungime totală de 24m. Forțele gravitaționale sunt preluate prin planșeul de beton armat ce are o grosime de 15cm. Sistemul structural de preluare a forțelor laterale constă în cadre de beton armat. Se analizează 3 structuri identice în plan dar cu regimuri de înălțime diferite: P+2, P+4 și P+6.

În prima etapă structurile P+2, P+4 și P+6 se consideră încastrate la baza și se calculează conform metodei forțelor seismice statice echivalente. Acestea se dimensionează astfel încât să

fie îndeplinite verificările deplasărilor laterale la starea limita de serviciu și la starea limita ultima.

Pentru a se observa efectul condițiilor seismice și de teren din Romania amplasamentul structurilor variază:

- Se analizează structurile pentru cele trei spectre normalizate de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică  $\xi = 5\%$  ( $T_C = 0.7s, T_C = 1.0s$  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 etapa următoare se realizează, utilizând metoda forțelor seismice statice echivalente, o pre-dimensionare a sistemului de izolare astfel încât structura să se comporte în domeniul elastic.

Sistemul de izolare este alcătuit din 25 de izolatori identici dispuși la baza structurilor și proiectați astfel încât structura să rămână în domeniul elastic. Pentru fiecare tip de structura se analizează și dimensionează fiecare tip de izolator.

Un prim obiectiv este validarea prin studii numerice a eficienței utilizării dispozitivelor antiseismice pasive în îmbunătățirea răspunsului seismic al structurilor, când acestea sunt supuse cutremurelor din zona Vrancea.

Un al doilea obiectiv este determinarea sistemelor de izolare ce sunt mai eficiente în condițiile seismice din Romania.

Un alt obiectiv este acela de a observa efectul asupra sistemului de izolare pe care îl are amplasamentul construcțiilor din punct de vedere al spectrului normalizat de răspuns elastic ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică  $\xi = 5\%$  și al valorilor de vârf ale accelerațiilor terenului.

### **Capitolul 8:**

În acest capitol se prezintă și se analizează rezultatele pentru o serie de structuri cu pereți din beton armat. Structurile cu pereți analizate sunt similare cu structurile tip cadru. Acestea sunt dublu simetrice și au 4 deschideri și 4 travee de câte 6m, rezultând o lungime totală de 24m. Se analizează 3 structuri identice în plan dar cu regimuri de înălțime diferite: P+6, P+8 și P+10. Metodologia de analiză este similară cu cea a structurilor în cadre.

### **Capitolul 9:**

În acest capitol se prezintă se propune o reinterpretare a modului în care se poate evalua răspunsul seismic al structurilor izolate la baza cu ajutorul metodei calculului static echivalent. Dimensionarea sistemului de izolare se raportează la un factor maxim de reducere a forței seismice, concomitent cu prestabilirea amortizării efective ținta 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.

### **Capitolul 10:**

În acest capitol sunt sintetizate concluziile rezultatelor obținute în urma analizelor efectuate. Sunt subliniate concluziile proprii și se propun direcții viitoare de cercetare.

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

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 această 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.

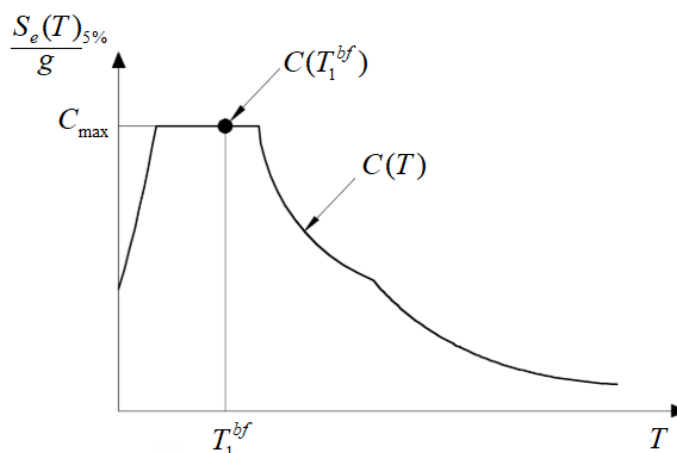
**Procedura de calcul static liniar propusă se realizează conform următorilor pași:**

### Pasul – 1. Stabilirea zonei seismice corespunzătoare amplasamentului structurii

În general, în codurile de proiectare, accelerația spectrală este definită sub forma unei funcții având ca variabilă perioada:

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

Unde  $C(T)$  este un coeficient al forței tăietoare de bază definit ca o funcție având ca variabilă perioada  $T$ , iar  $g$  este accelerația gravitațională. În Figura 1.1  $T_1^{bf}$  reprezintă perioada fundamentală a structurii cu baza fixă, iar  $C(T_1^{bf})$  reprezintă ordonata accelerației spectrale a structurii cu baza fixă.



Figură 1.1. Curba spectrală de răspuns

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

Factorul maxim de reducere al forțelor seismice reprezintă punctul de plecare al analizei statice liniare pentru dimensionarea sistemului de izolare seismică. Proiectarea construcțiilor cu baza fixă la acțiunea seismică se bazează pe principiul ierarhizării capacităților 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.

În funcție de sistemul structural, redundanța și ductilitatea se pot aplica diverse valori pentru factorul de reducere a acțiunii seismice. Aceste reduceri ale acțiunii seismice sunt definite în 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 țintă 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 țintă 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 care 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**

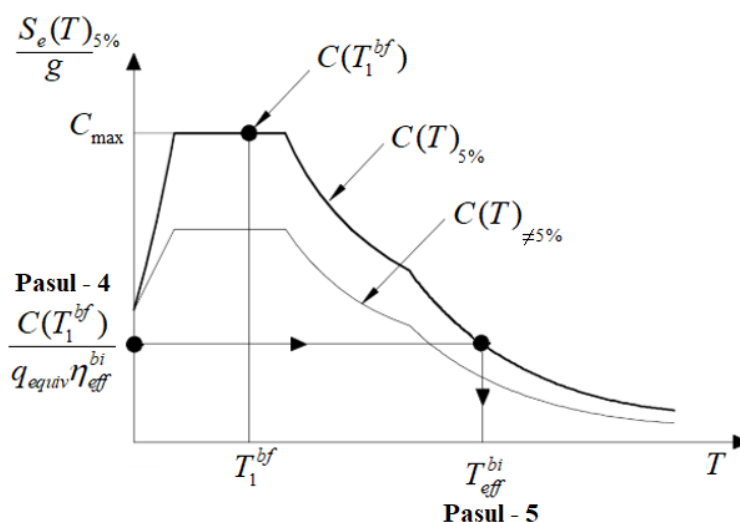
Accelerația spectrală efectivă  $S_e(T_{eff}^{bi})_{5\%}$  (Figura 1.4) se obține cu relația:

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

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  $\eta_{eff}^{bi}$  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 1.2. 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:

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

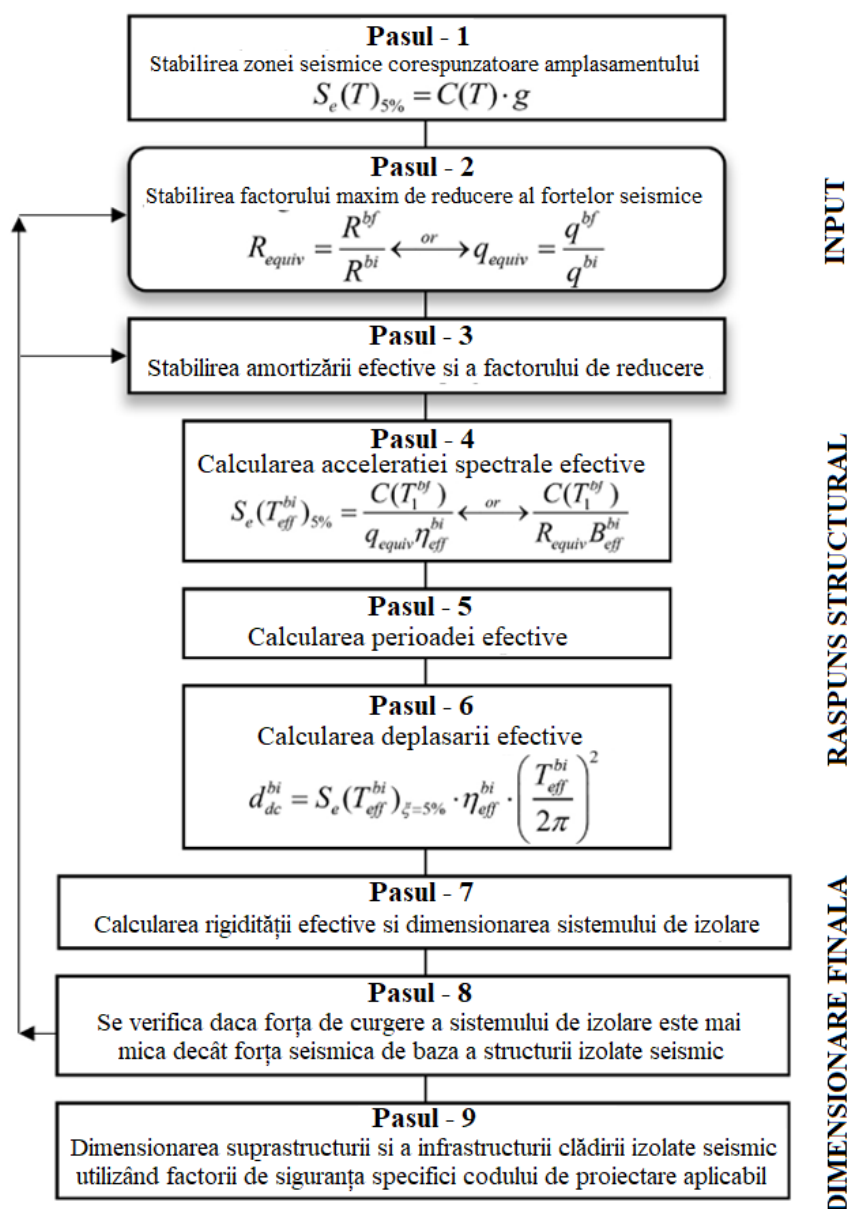
**Pasul – 7. Calcularea rigidității efective și dimensionarea sistemului de izolare în funcție de factorii de siguranță specifici codului de proiectare aplicabil**

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

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

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

Schema logică a procedurii de calcul static liniar propusă este prezentată în Figura 1.3.



Figură 1.3. Schema logică a procedurii de calcul static liniar propusă

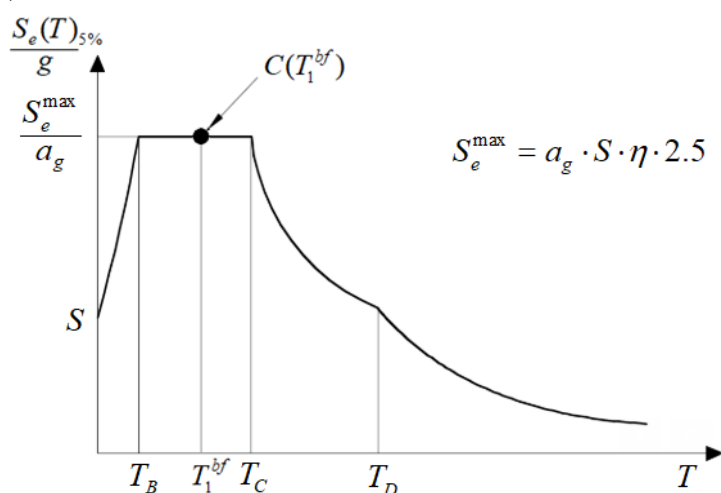
## Studiu de caz: Implementarea metodei de calcul pentru Eurocode 8

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

### 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 1.4)



Figură 1.4. 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  $\eta$  este factorul de corecție ce ține cont de amortizare, determinat cu relația următoare:

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

Unde  $\xi$  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 clădirii,  $\lambda^{bf}$  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 clădirii 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  $\lambda^{bi}$  este factorul de corectie al structurii izolate seismic.

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

### 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 finala 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  $\eta_{eff}^{bi}$  este factorul de corectie ce tine cont de amortizarea  $\xi_{eff}^{bi}$  a sistemului de izolare. Considerând faptul ca izolarea bazei reprezintă o soluție viabila din punct de vedere pentru valori ale perioadei fundamentale a clădirii cu baza fixa 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 izolata seismic sunt posibile următoarele doua variante:

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3. DIMENSIONARE FINALA:

**Pasul – 7. Calcularea rigidității efective si dimensionarea sistemului de izolare in funcție de factorii de siguranța specifici codului de proiectare aplicabil**

Rigiditatea efectiva 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 determinata conform ecuației (19) sau (21), iar  $M$  este masa totala a clădirii.

Având obținute valorile rigidității efective si a amortizării efective sistemul de izolare poate fi dimensionat in detaliu.

**Pasul – 8. Se verifica daca forța de curgere a sistemului de izolare este mai mica decât forța seismică de baza a structurii izolate seismic**

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

### 3. Concluzii analize numerice structuri izolate seismic

#### 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 in 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 in plan dar cu regimuri de înălțime diferite: P+6, P+8 si P+10.

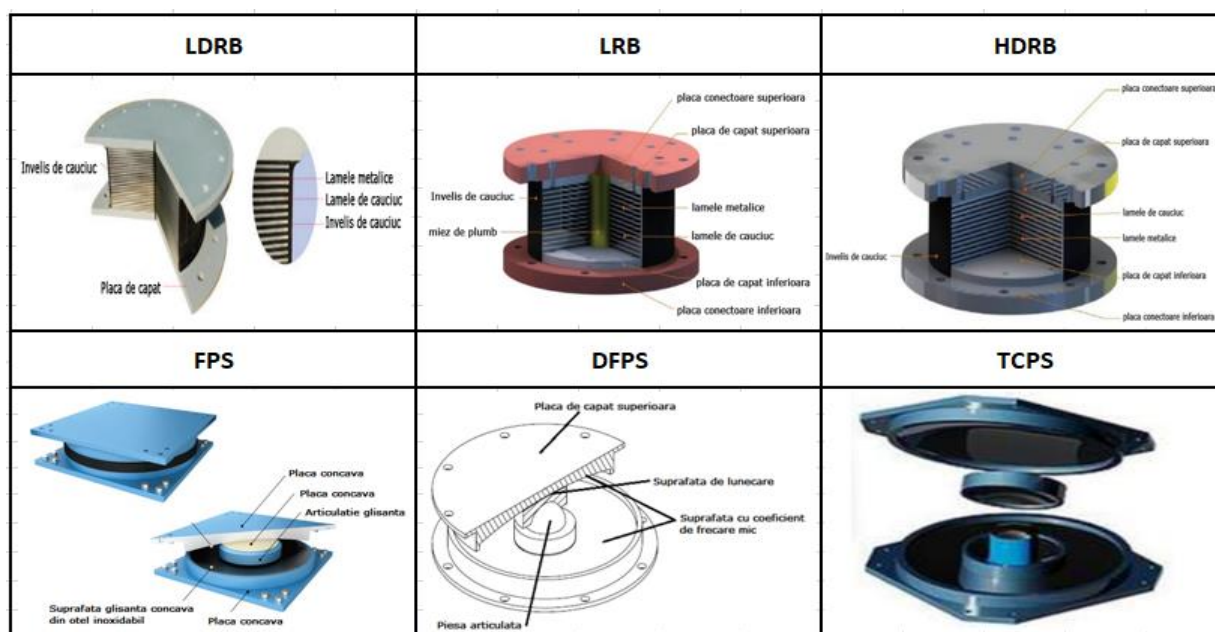
Sistemul de izolare este alcătuit din 33 de izolatori identici dispuși la baza structurilor si proiectați astfel încât structura sa rămână în domeniul elastic-liniar de comportare, asigurându-se o izolare totala.

Așa cum am prezentat în capitolele precedente, dispozitivele de izolare a bazei pot fi împărțite în doua categorii de baza: dispozitive de izolare oscilante si 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

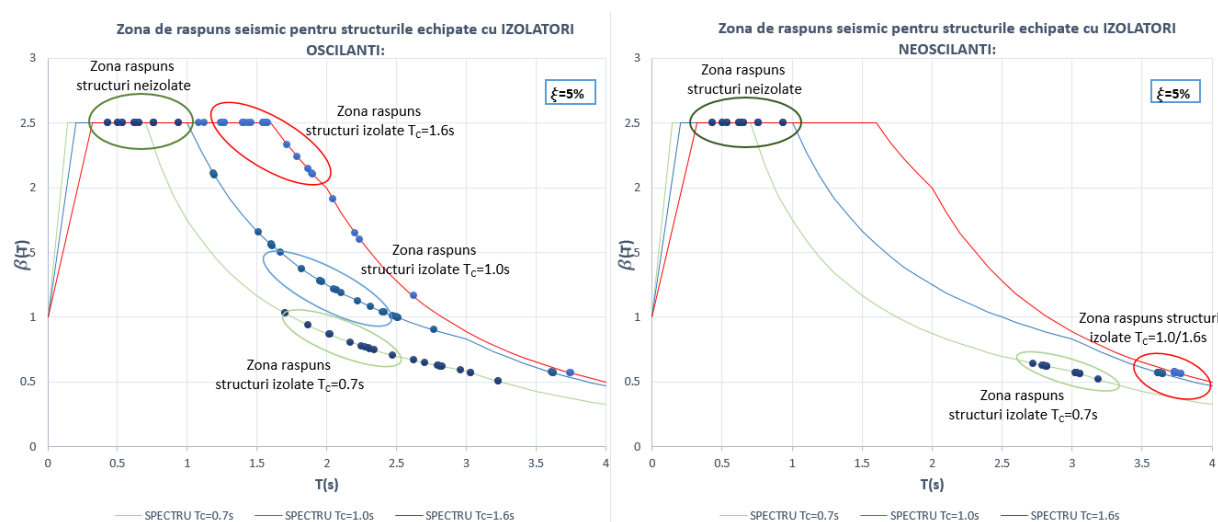
Pentru a se observa efectul condițiilor seismice și de teren din Romania amplasamentul structurilor variază. Se analizează structurile pentru cele trei spectre normalizate de răspuns elastic-liniar ale accelerațiilor absolute pentru fracțiunea din amortizarea critică  $\xi = 5\%$  ( $T_C = 0.7s, T_C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



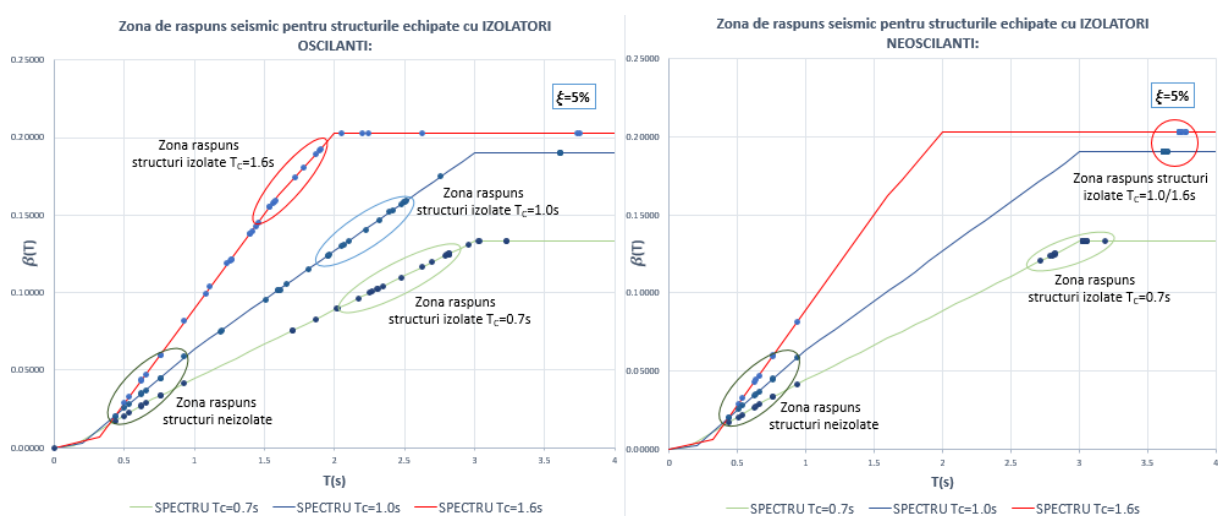
## Concluzii pentru Structuri in cadre: DCH ( $q=6.75$ ); $\gamma=1.0$ si pentru Structuri cu pereți: DCH ( $q=4.60$ ); $\gamma=1.0$

In figura 2.2 si figura 2.3 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 2.2. 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)

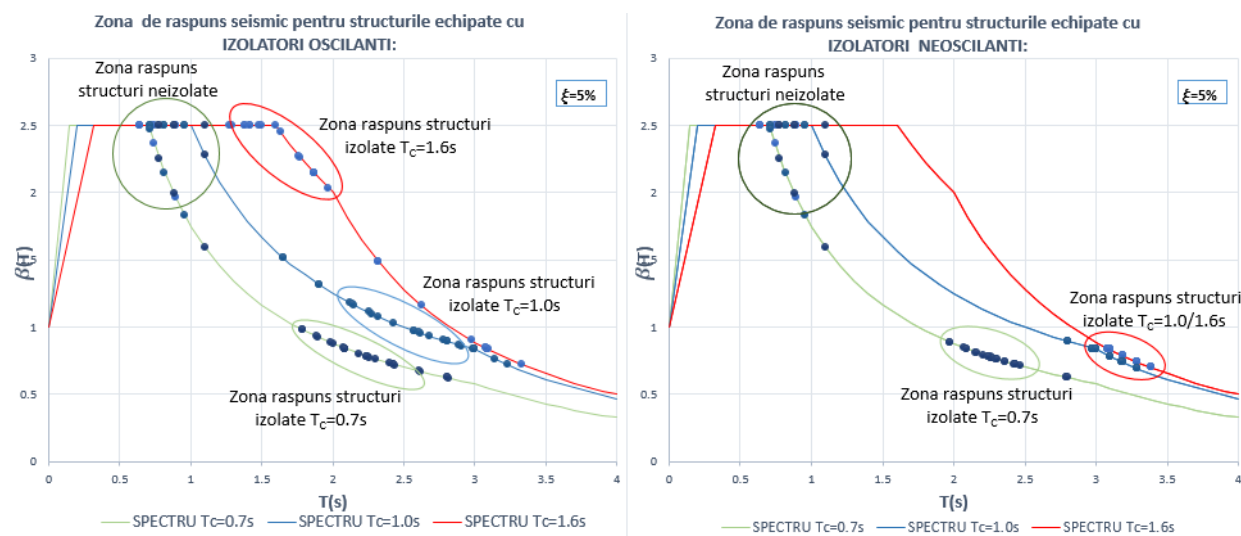


Figură 2.3. Spectrele normalizate de răspuns elastic-liniar ale deplasărilor relative: Zonele de răspuns pentru structurile izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) si cu izolatori neoscilanți (dreapta)

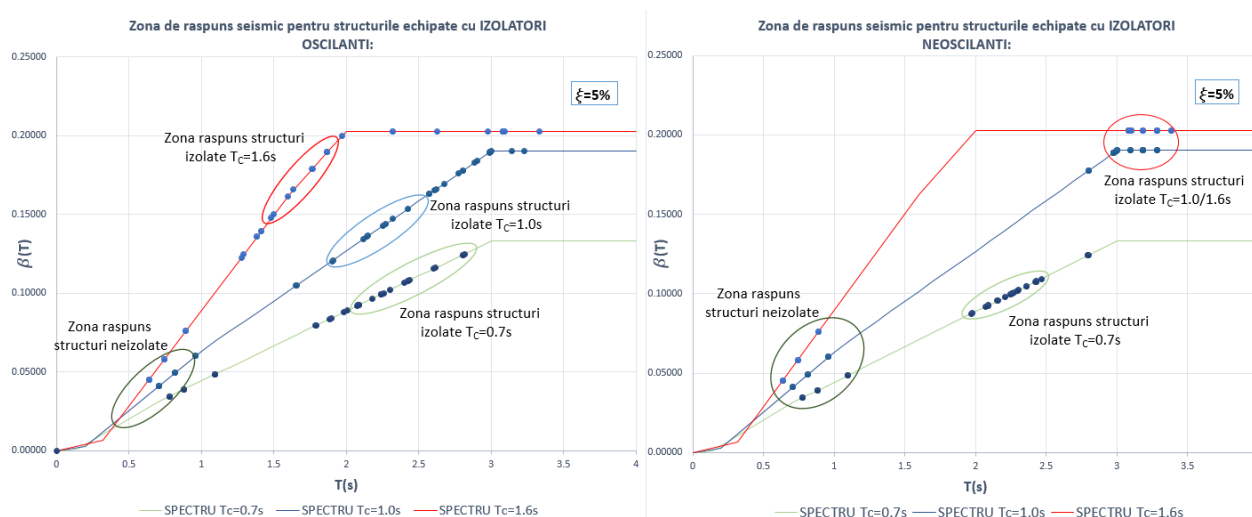
În figura 2.4 și figura 2.5 sunt prezentate zonele de răspuns spectrale pentru structurile cu pereți de beton armat, izolate seismic cu izolatori oscilanți (stânga) și cu izolatori neoscilanți (dreapta).

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 2.4. 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 2.5. 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 2.2, figura 2.3, figura 2.4 și figura 2.5 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.

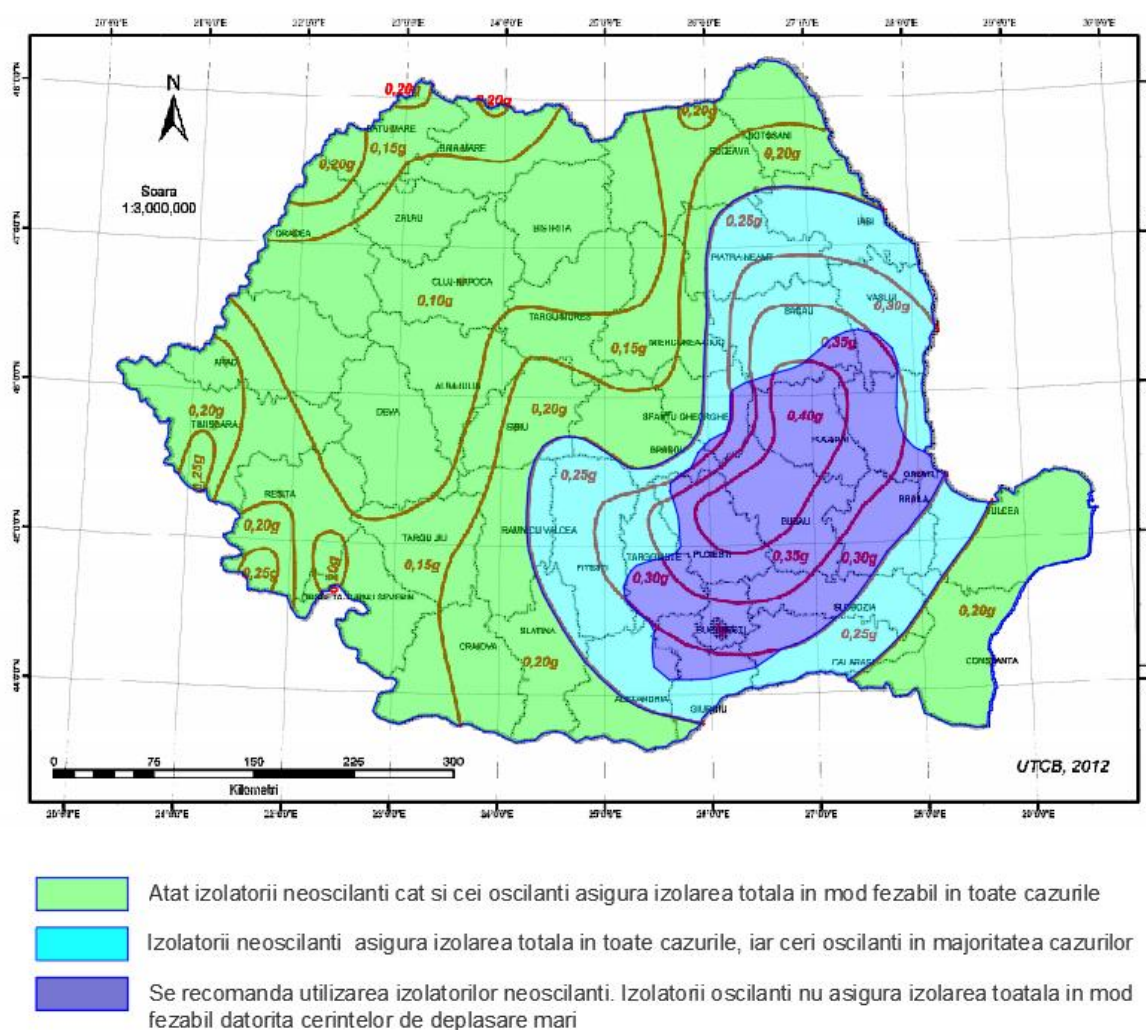
## Concluzii finale

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:

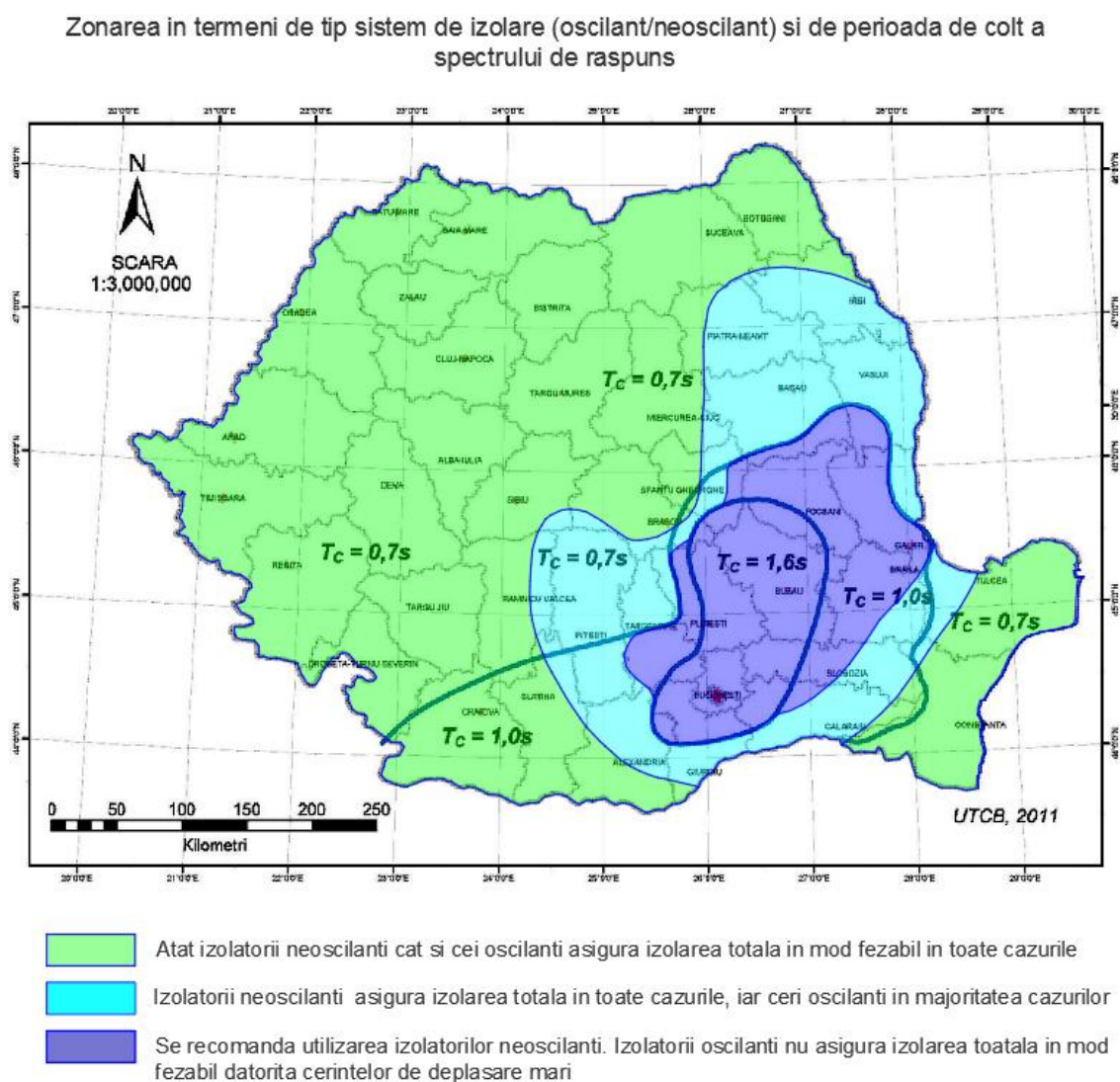
1. Figura 2.6: Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de valorile de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare (IMR=225 ani și 20% probabilitate de depășire în 50 de ani)
2. Figura 2.7: Zonarea în termeni de tip sistem de izolare (oscilant/neoscilant) și de perioada 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 2.6. 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 2.7. 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 2.6 și 2.7.

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 2.6 și 2.7.



## 4. 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).

## 5. 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 izolatoarelor. 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 principală

- [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 Andriano, „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 Seismică – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri – Indicativ P100-1.
- [7] Dan Ilie Crețu (2015), „Sisteme inovative pentru atenuarea efectului acțiunii seismice la structuri inginerești – Metoda Izolării”