

**INGINERIE SEISMICĂ
SEMINAR**

**Titular disciplină
Ș.l.ing. MARIANA POP**

1. Calculul structurilor la acțiunea seismică

1.1. Introducere

Aspectul dinamic al acțiunii seismice și comportarea inelastică a structurilor afectate de cutremure puternice impun metode de proiectare specifice, reglementate prin norme de proiectare seismică. În România, aceste reglementări sunt conținute în P100-1 (2006) “Cod de proiectare seismică P100 – partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri”.

Prevederile P100 conțin două cerințe fundamentale (nivele de performanță) pe care trebuie să le îndeplinească construcțiile amplasate în zone seismice și anume:

- **cerința de siguranță a vieții** – construcțiile trebuie să fie proiectate astfel încât sub efectul acțiunii seismice de proiectare să posede o marjă suficientă de siguranță față de prăbușirea locală sau globală a structurilor astfel încât viețile oamenilor să fie protejate. Nivelul acțiunii seismice asociat acestui nivel de performanță corespunde unui interval mediu de recurență (IMR=100 de ani).

- **cerința de limitare a degradărilor** – construcțiile trebuie proiectate astfel încât pentru cutremure cu o probabilitate de apariție mai mare decât acțiunea seismică de proiectare structurile să nu sufere degradări sau scoaterea din uz ale căror costuri să fie exagerate față de costul construcției. Nivelul acțiunii seismice asociată acestui nivel de performanță corespunde unui IMR=30 de ani.

Îndeplinirea prin calcul a celor două cerințe fundamentale se realizează prin verificarea structurilor la două stări limită și anume:

- **stări limite ultime (SLU)** asociat colapsului structural și altor forme de degradare structurală care pot pune viața oamenilor în pericol. Verificare la SLU implică asigurarea unui echilibru între rezistența și ductilitatea structurii.

- **stări limită de serviciu (SLS)** asociat apariției unor degradări dincolo de care numai sunt îndeplinite cerințe specifice de exploatare. Poate fi necesară limitarea atât a degradărilor structurale cât și a celor nestructurale. În general, verificarea la SLS implică limitarea deplasărilor relative de nivel în vederea asigurării protecției elementelor nestructurale, echipamentelor, etc..

1.2. Acțiunea seismică

Teritoriul României este împărțit în zone seismice în funcție de hazardul seismic local, care luat simplificat este considerat constant în fiecare zonă seismică. Hazardul seismic pentru proiectare se exprimă prin valoarea de vârf a accelerației orizontale a terenului (a_g) determinat pentru intervalul mediu de recurență corespunzător SLU (adică IMR=100 de ani).

Mișcarea seismică într-un punct pe suprafață ternului este descrisă prin spectre de răspuns elastic pentru accelerații absolute (două componente orizontale și una verticală).

Condițiile locale de teren afectează forma spectrelor de răspuns elastic și modifică atât amplificarea accelerației de vârf a terenului, a_g , cât și conținutul de frecvență a mișcării seismice.

Condiții locale de teren sunt descrise prin valorile perioadei de control (de colț) T_C a spectrului de răspuns pentru zona amplasamentului considerat.

Normativul P100 specifică trei valori ale perioadei de control T_C pe o hartă de zonare macroseismică. Unei valori a perioadei de control T_C îi corespund o pereche de valori T_B , T_D .

Perioada de control T_C a spectrului de răspuns reprezintă limita dintre zona de valori maxime în spectrul de accelerații absolute și zona de valori maxime în spectrul de viteze relative.

Perioada de control T_B poate fi exprimată în funcție de perioada de control, T_C astfel: $T_B = 0.1 \cdot T_C$.

Perioada de control T_D a spectrului de răspuns reprezintă limita dintre zona de valori maxime în spectrul de viteze relative și zona de valori maxime în spectrul de deplasări relative.

Spectrul de răspuns elastic pentru componentele orizontale ale accelerației terenului în amplasament este definit astfel:

$$Se(T) = a_g \cdot \beta(T)$$

unde:

a_g – accelerația de vârf a terenului;

$\beta(T)$ – spectrul de răspuns normalizat la valorile de vârf a accelerației terenului.

Formele normalizate ale spectrului de răspuns elastic pentru componentele orizontale ale accelerației terenului pentru fracțiunea din amortizarea critică egală cu 0.05 sunt date de relațiile:

$$0 \leq T \leq T_B \quad \beta(T) = 1 + \frac{(\beta_0 - 1)}{T_B} \cdot T$$

$$T_B < T \leq T_C \quad \beta(T) = \beta_0$$

$$T_C < T \leq T_D \quad \beta(T) = \beta_0 \cdot \frac{T_C}{T}$$

$$T > T_D \quad \beta(T) = \beta_0 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2}$$

unde:

β_0 – factorul de amplificare dinamică maximă a accelerației terenului de către structură;

T – perioada proprie de vibrație a unui sistem cu un grad de libertate dinamică cu răspuns elastic.

Componentele verticale ale mișcării seismice ale unui amplasament sunt date de relațiile similare celor de mai sus.

Forțele seismice de proiectare se exprimă pe baza spectrului de proiectare a accelerației care este un spectru de răspuns inelastic și se obține cu una din următoarele relații:

$$0 \leq T \leq T_B \quad Sd(T) = a_g \cdot \left[1 + \frac{\beta_0 - 1}{T_B} \cdot T \right]$$

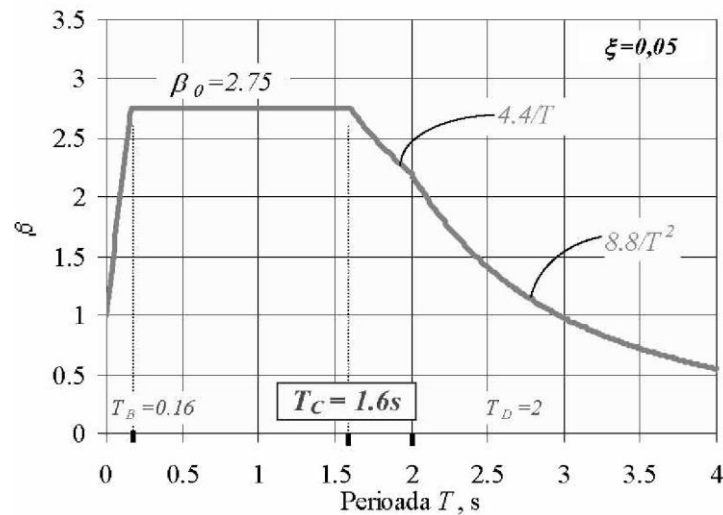
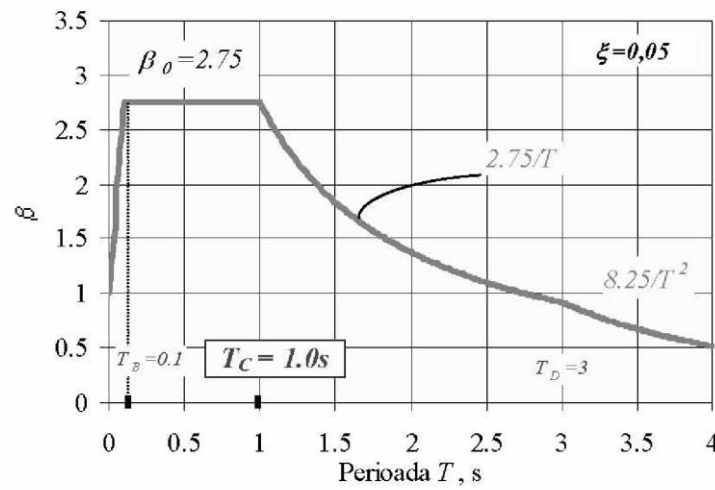
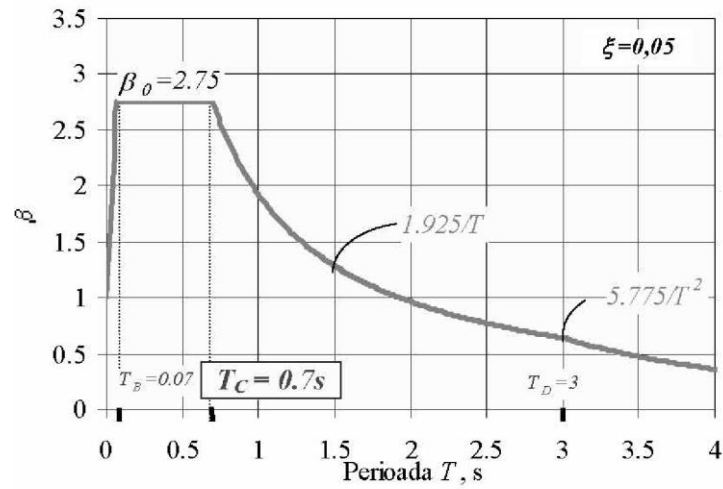
$$T > T_B \quad Sd(T) = a_g \cdot \frac{\beta(T)}{q}$$

unde:

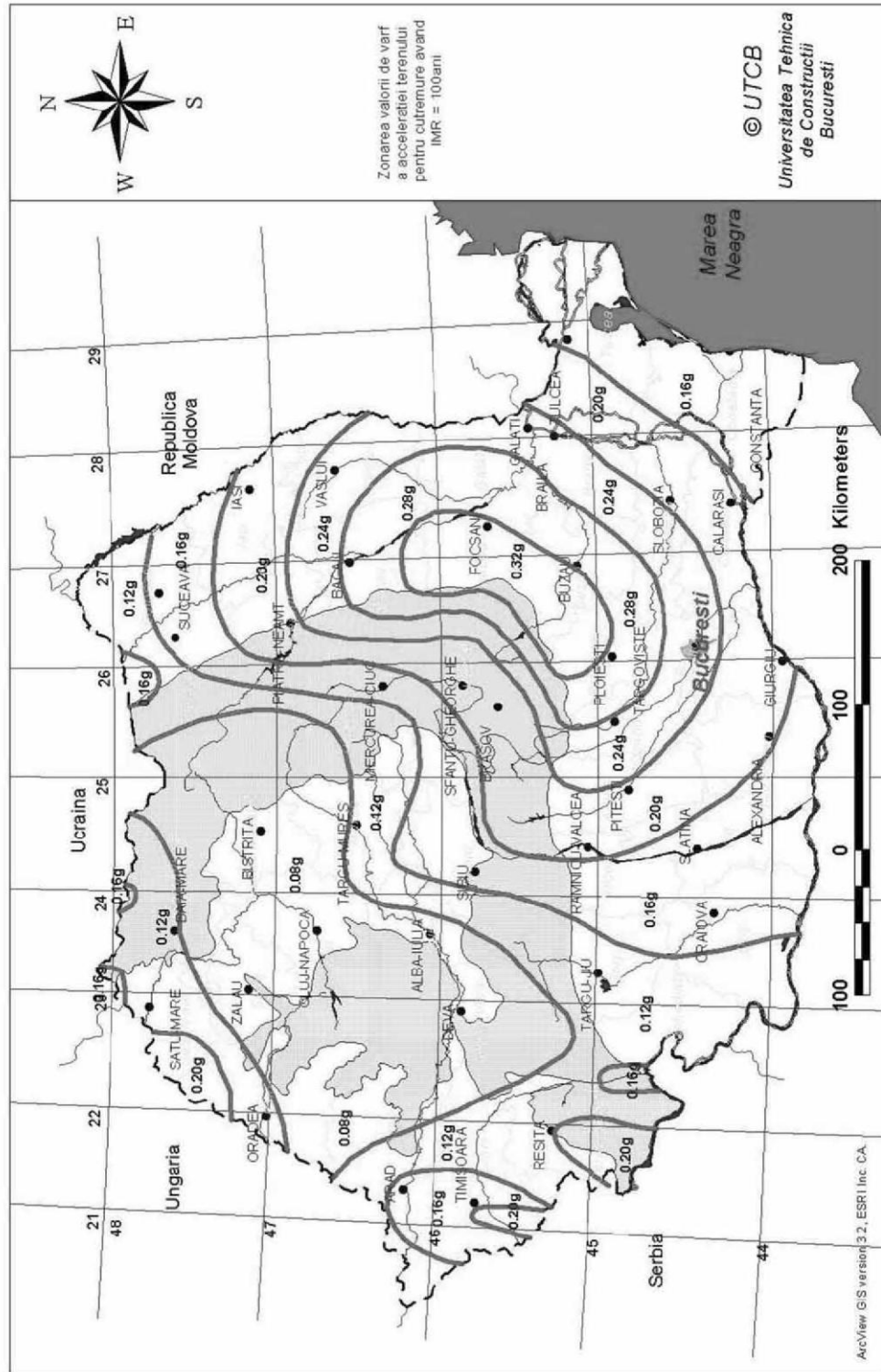
q – factorul de comportare al structurii, factor de modificare a răspunsului elastic în răspuns inelastic, cu valori în funcție de tipul structurii și capacitatea acestuia de a disipa energie.

Perioadele de control (colț) T_B , T_C , T_D ale spectrului de răspuns pentru componentele orizontale ale mișcării seismice.

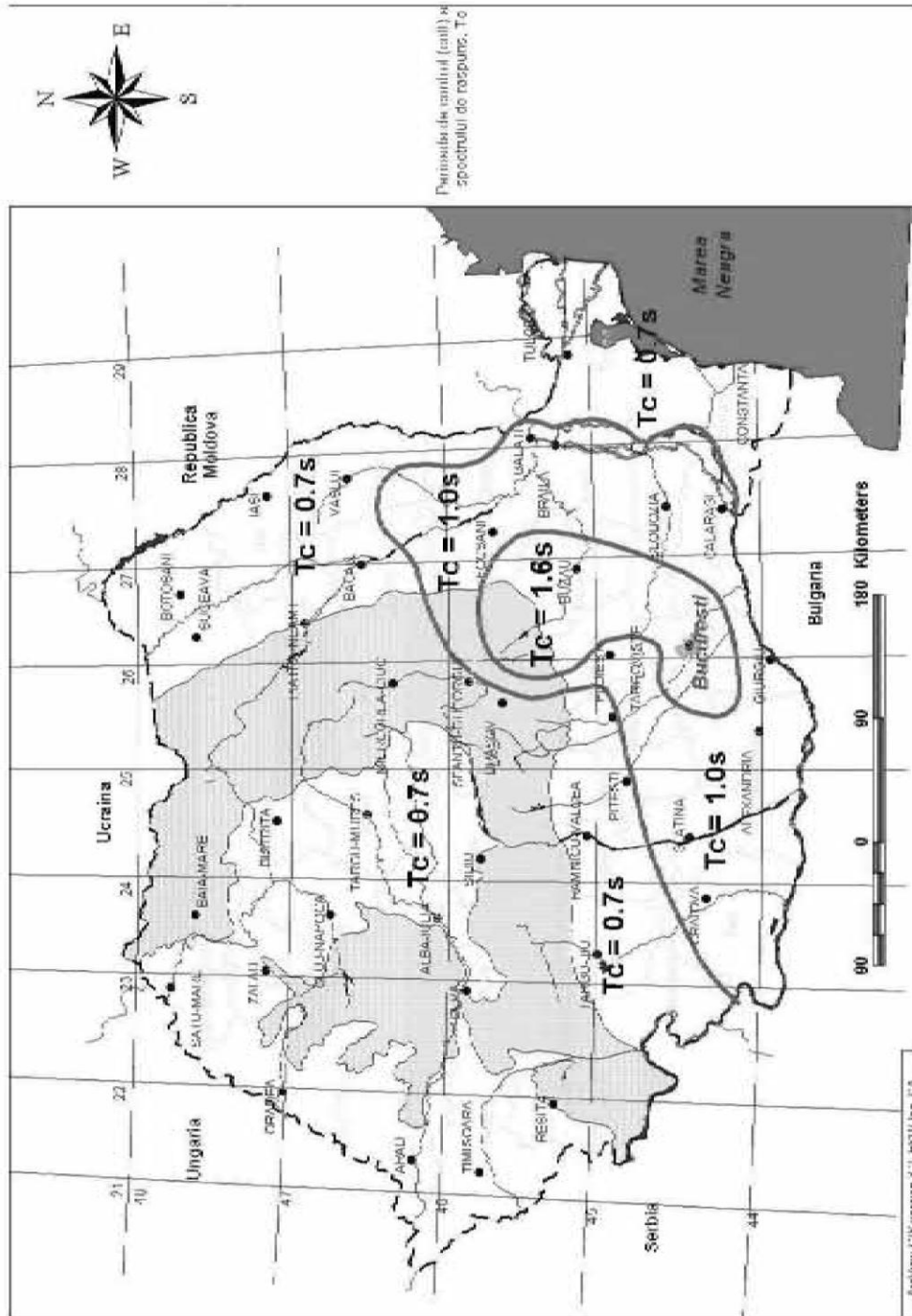
Intervalul mediu de recurență a magnitudinii cutremurului	Valori ale perioadelor de control (colț)			
IMR = 100ani, pentru starea limită ultimă	T_B , s	0.07	0.10	0.16
	T_C , s	0.7	1.0	1.6
	T_D , s	3	3	2



Spectre normalizate de răspuns elastic pentru accelerații pentru componentele orizontale ale mișcării terenului, în zonele caracterizate prin perioadele de control (colț): $T_C = 0,7$; $T_C = 1,0$ și $T_C = 1,6s$.



Zonarea teritoriului României în termeni de valori de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare a_g pentru cutremure având intervalul mediu de recurență $IMR = 100$ de ani.



Zonarea teritoriului României în termeni de perioada de control (colț), T_c a spectrului de răspuns.

2. Conformarea seismică a structurii

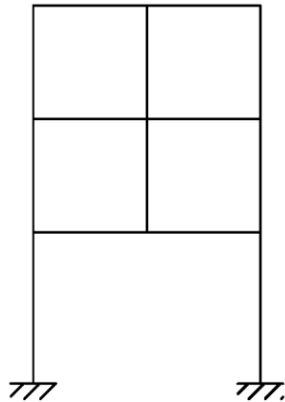
O proiectare conceptuală a structurilor situate în zone seismice care să asigure o comportare seismică corespunzătoare este foarte importantă. Aspectele conceptuale de bază se referă la:

- simplitatea structurii;
- uniformitatea, simetria și redundanța structurii;
- rezistența și rigiditatea laterală în orice direcție;
- rezistența și rigiditatea la torsiune;
- realizarea ca diafragme a planșeelor;
- fundații adecvate.

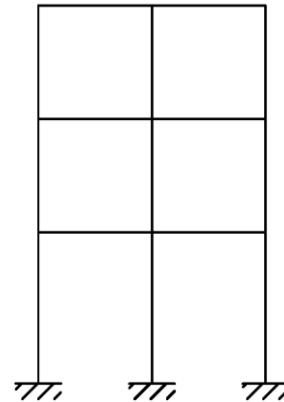
Simplitatea structurii

- presupune existența unui sistem structural continuu și suficient de rezistent care să asigure un traseu clar, direct și neîntrerupt a forțelor seismice până la terenul de fundare;
- nu trebuie să existe discontinuități în traseul forțelor seismice (exemplu: un gol mare în planșeu sau lipsa armăturilor de colectare a forțelor de inerție).

Un exemplu de conformare structurală nerecomandată îl constituie rezemarea stâlpilor pe rigle.



nu e recomandată
corectă.

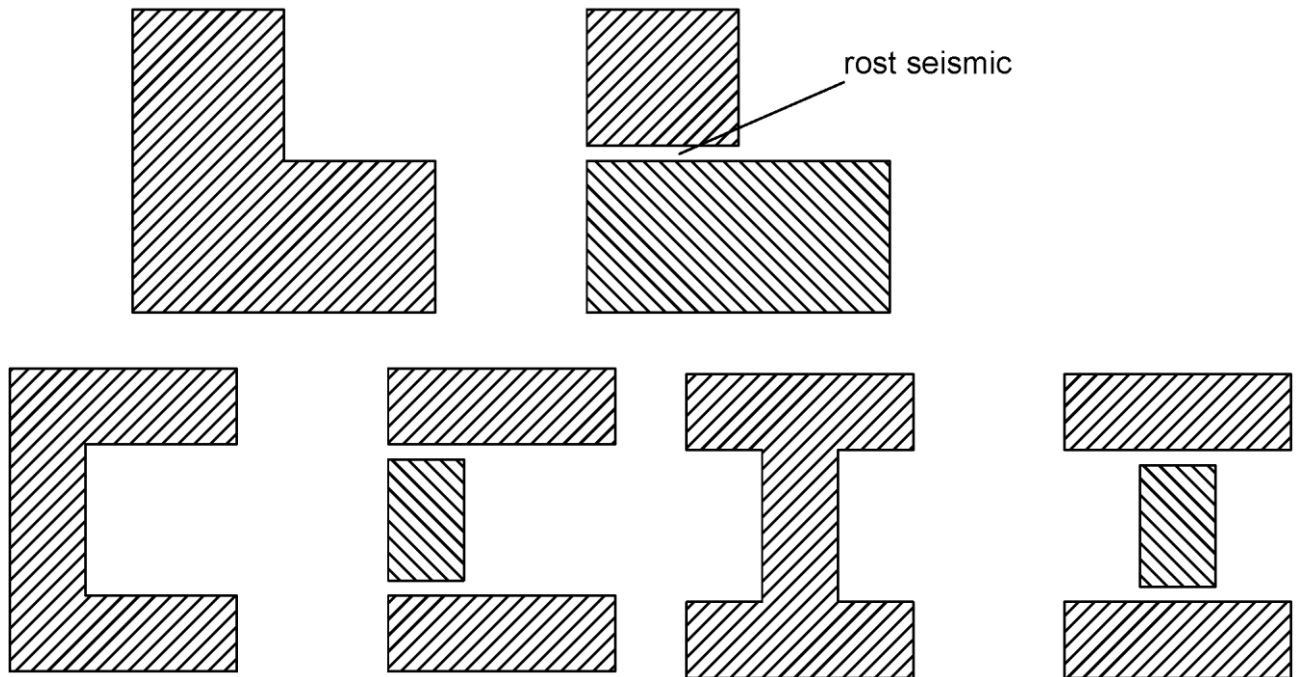


structură cu o conformare seismică

Uniformitatea, simetria și redundanța structurii.

Proiectarea seismică trebuie să urmărească realizarea unei structuri cât mai regulate, distribuită cât mai uniform în plan, astfel ca forțele de inerție aferente maselor să fie transmise direct și pe un drum cât mai scurt către

fundații. În cazul în care este necesară o formă în plan care nu este uniformă structura poate fi împărțită prin intermediul unor rosturi seismice în unități independente din punct de vedere structural.



Pe lângă uniformitatea în plan este necesară și o uniformitate pe verticală, aceasta diminuând concentrarea eforturilor și a cerințelor de ductilitate în zone izolate ale clădirii.

Elementele structurale care asigură rigiditatea la forțe laterale trebuie dispuse cât mai uniform pentru a permite excentricități cât mai mici și o redundanță sporită a structurii care conduc la o capacitate sporită de disipare a energiei seismice în întreaga structură.

Prin redundanță se asigură că:

- cedarea unui singur element sau a unei singure îmbinări nu conduce la cedarea întregii structuri;

- se realizează un mecanism de plastificare cu suficiente zone plastice care să permită exploatarea rezervelor de rezistență a structurii și o disipare avantajoasă a energiei seismice.

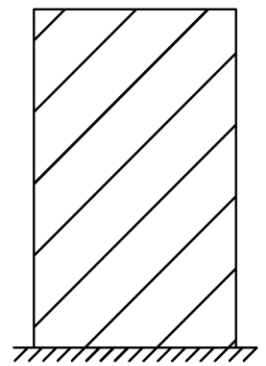
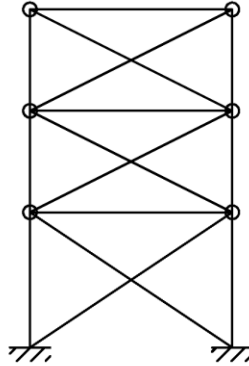
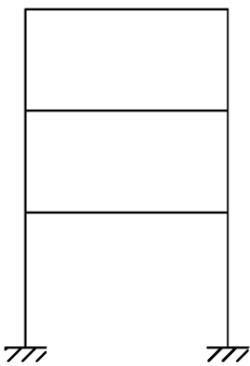
Exemplu: o structură etajată din beton armat nu prezintă redundanță dacă lungimile de înădare ale armăturilor din stâlpi sunt insuficiente.

Rezistența și rigiditatea laterală în orice direcție.

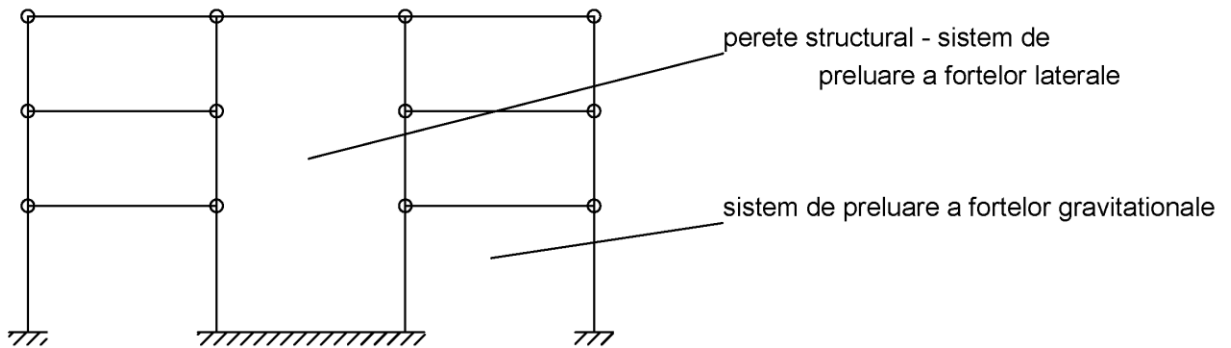
Deoarece mișcarea seismică are componente pe două direcții orizontale structura trebuie să posede rezistențe și rigidități laterale suficiente pe cele două direcții principale ale clădirii.

Sisteme tipice de preluare a forțelor laterale sunt:

- cadre necontravântuite (cu noduri rigide);
- cadre contravântuite (de regulă cu noduri articulate);
- pereți structurali.



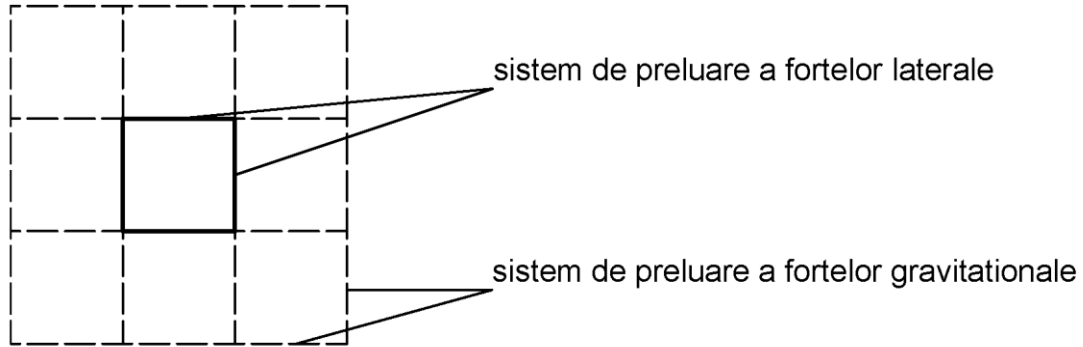
O structură tipică va conține atât un sistem de preluare a forțelor gravitaționale cât și unu a forțelor laterale.



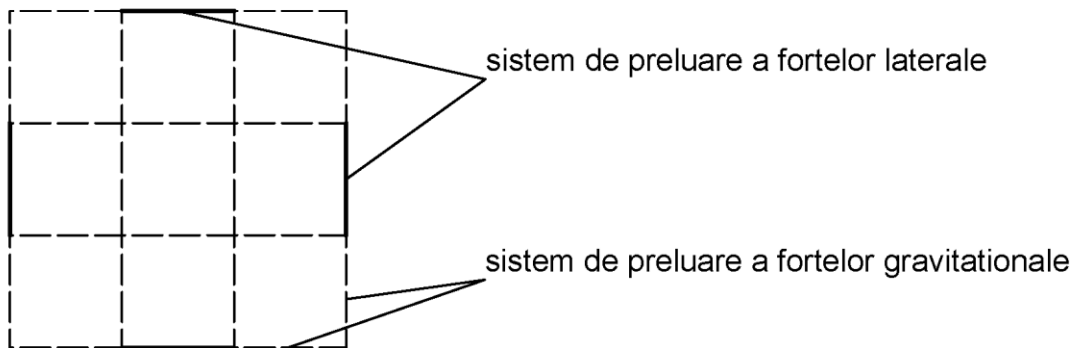
Rezistența și rigiditatea la torsiune.

O structură trebuie să posede o rigiditate suficientă la torsiune. Structurile flexibile la torsiune conduc la deformații și eforturi mai mari în elementele perimetrice ale clădirii, precum și la o distribuție neuniformă a acestuia în elementele structurale.

Structuri cu același număr de elemente de rezistență laterale:

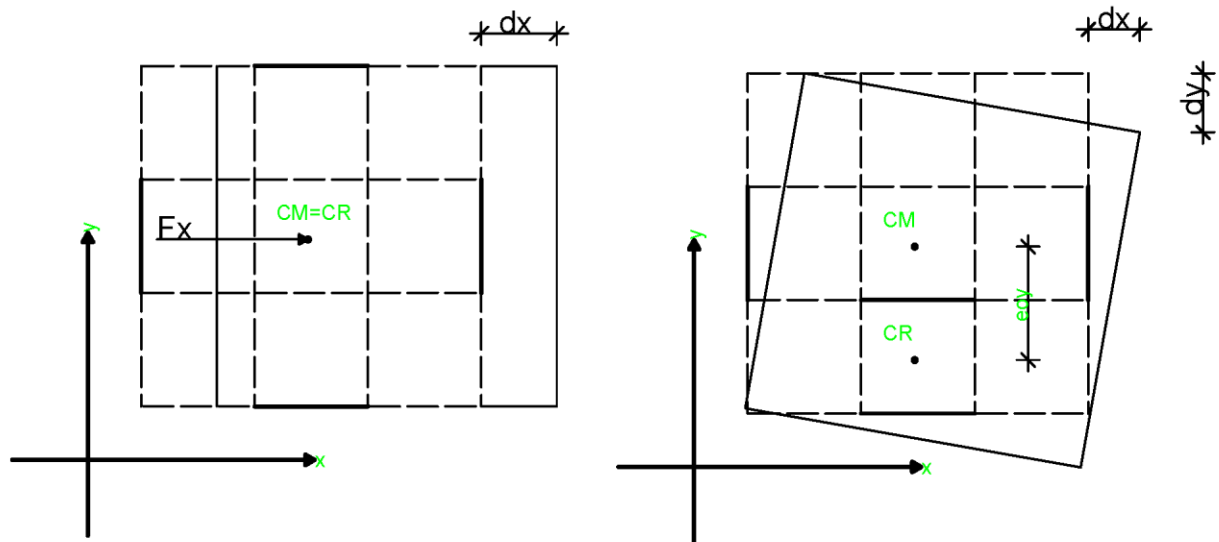


Structură susceptibilă la efectele de torsiune



Structură cu o rezistență și rigiditate sporită la efectele de torsiune.

Sistemele de preluare a forțelor laterale trebuie dispuse pe cât posibil perimetral pentru a realiza structuri cu rezistențe și rigidități sporite la torsiune. Dispunerea acestora trebuie să fie cât mai simetrică pentru a asigura o diferență cât mai mică între centrul de rigiditate (CR) și centrul maselor (CM) a unei structuri. Atunci când CR coincide cu CM forțele seismice laterale care acționează pe o direcție oarecare induc o mișcare de translație uniformă a uni etaj al structurii. Dacă există o excentricitate între CM și CR pe lângă componenta de translație va exista și o componentă de rotație a planșeului.



Excentricitatea dintre CR și CM se poate datora fie distribuției neuniforme a rigidității fie distribuției neuniforme a maselor structurii.

Realizarea ca diafragme a planșelor.

Planșeele joacă un rol esențial în preluarea forțelor seismice prin:

- preluarea forțelor de inerție și transmiterea lor la elementele verticale ale structurii.
- acțiunea de diafragmă orizontală.

Pentru a asigura efectul de diafragmă planșeele structurilor trebuie să posede rezistențe și rigidități adecvate. Comportarea planșeelor ca diafragme infinit rigide și rezistente pentru forțe aplicate în planul lor permite adoptarea unor modele de calcul simplificate caracterizate prin manifestarea a 3 deplasări la fiecare nivel (2 translații și o rotație).

Fundații adecvate.

Alcătuirea fundației și a legăturii acesteia cu suprastructura trebuie să asigure condiția ca întreaga clădire să fie supusă unei acțiuni seismice cât mai uniformă.

În cazul în care structura este alcătuită din pereți structurali cu rigidități și capacități de rezistențe diferite se recomandă fundații de tip cutie rigidă sau de tip radier casetat. În cazul adoptării unor elemente de fundare individuale (directe sau adâncime prin piloți) se recomandă utilizarea unei plăci din beton armat sau a unor grinzi de legătură între aceste elemente pe ambele direcții.

3. Condiții referitoare la masele construcțiilor

Se va urmări dispunerea cât mai uniformă a încărcărilor gravitaționale atât în plan cât și pe verticală. Pentru reducerea forțelor de inerție aferente maselor se va urmări realizarea de construcții cu mase cât mai mici prin:

- utilizarea materialelor ușoare la realizarea elementelor nestructurale adică termoizolații, învelitori, șape, pereți de compartimentare, pereți de închidere ș.a.m.d.;

- reducerea grosimilor tencuielilor și a șapelor de egalizare;

- utilizarea betoanelor de înaltă rezistență în elementele structurale (stâlpi, pereți structurali) la construcțiile înalte sau cu mase mari;

- amplasarea încărcărilor utile mari la nivelurile inferioare în cazul clădirilor cu funcțiuni diferite pe înălțime.

4. Elemente structurale principale și secundare în preluarea forțelor seismice

Elementele structurale care nu preiau forțele seismice sunt proiectate ca elemente seismice secundare. În cazul acestor elemente rezistența și rigiditatea laterală se pot neglija. Dar aceste elemente și legăturile lor cu structura seismică de bază vor fi alcătuite în așa fel încât să preia încărcările gravitaționale aferente.

Rigiditatea laterală a elementelor secundare nu va fi mai mare de 15% din rigiditatea laterală a structurii.

Elementele care nu sunt considerate secundare se vor proiecta ca elemente seismice principale care preiau forțele laterale.

5. Condiții pentru evaluarea regularității structurale

Construcțiile se pot clasifica în construcții regulate și neregulate. În funcție de tipul construcțiilor se va alege diferențiat:

- modelul structural care poate fi plan sau spațial;

- metoda de calcul structural care poate fi procedeul simplificat al forței laterale echivalente sau procedeul de calcul modal cu spectre de răspuns;

- valoarea factorului de comportare q care trebuie redusă în cazul structurilor neregulate pe verticală.

5.1. Criterii de regularitate în plan

- construcțiile trebuie să aibă o distribuție simetrică în plan a rigidității și maselor în raport cu două axe ortogonale.

- construcțiile trebuie să aibă o formă compactă cu contururi regulate.

Observație: atunci când există retrageri în plan acestea trebuie să fie cât mai reduse (15% din aria totală).

Reducerile de gabarit se vor realiza pe verticala elementelor portante la clădirile etajate. Pentru a permite distribuția forțelor seismice la sistemele de preluare a forțelor laterale rigiditatea în plan a planșelor trebuie să fie suficient de mare pentru a permite modelarea acestora ca și diafragme rigide.

La fiecare nivel al unei clădiri și în fiecare din direcțiile principale ale acesteia excentricitatea trebuie să satisfacă condițiile.

$$e_{0x} \leq 0.30 \cdot r_x$$

$$e_{0y} \leq 0.30 \cdot r_y$$

e_{0x} - distanța dintre centrul de rigiditate și centrul maselor măsurate în direcție normală pe direcția de calcul.

r_x și r_y - rădăcina pătrată a raportului între rigiditatea structurii la torsiune și rigiditatea laterală pe direcția de calcul.

În cazul structurilor monotone pe verticală rigiditatea laterală a componentelor structurale (cadre, pereți) se poate considera proporțională cu un sistem de forțe laterale care produce acestor componente o deplasare unitară la vârful construcției.

5.2. Criterii de regularitate pe verticală

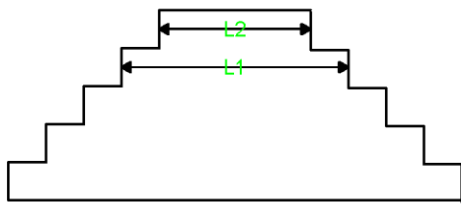
Pentru ca o structură să fie considerată regulată pe verticală ea trebuie să respecte următoarele condiții:

- sistemele de preluare ale forțelor laterale trebuie să se dezvolte fără întreruperi de la fundație până la ultimul nivel;
- masa și rigiditatea structurii trebuie să fie constante sau să se reducă gradual cu înălțimea.

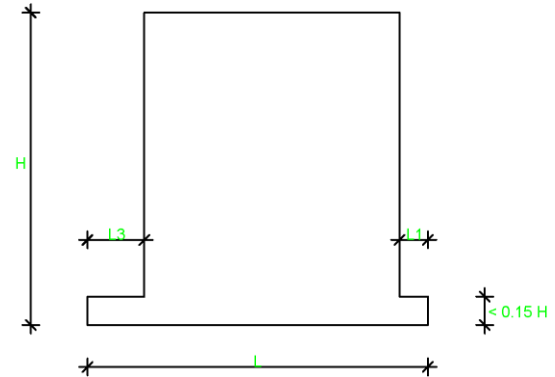
Conform P100 o structură este regulată pe verticală dacă rigiditatea și rezistența laterală a unui nivel nu au reduceri mai mari de 30% respectiv 20% din cele ale nivelurilor adiacente (nivelul imediat superior și imediat inferior).

Masa trebuie să aibă o distribuție uniformă pe înălțime. La nici un nivel masa aferentă nu trebuie să depășească cu mai mult de 50% masa nivelurilor adiacente. Atunci când există retrageri, acestea trebuie să se încadreze în anumite limite și anume:

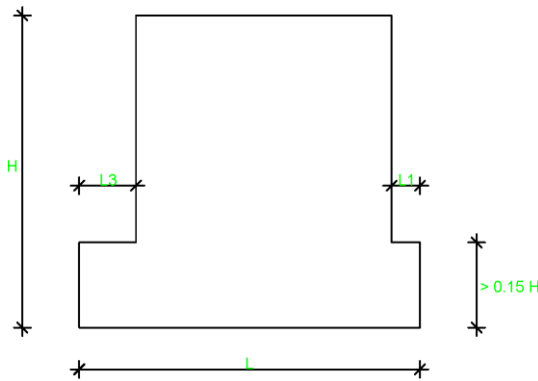
Conform EN 1998-1 2003.:



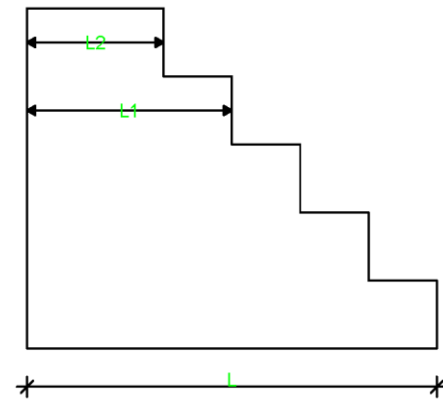
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.2$$



$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.2$$



$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.5$$



$$\frac{L - L_2}{L} \leq 0.3 \text{ sau } \frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.1$$

6. Condiții pentru alcătuirea planșelor

6.1 Generalități.

Diafragmele orizontale acționează ca și grinzi orizontale cu proporții de grinzi pereți rezemate în planurile unde se dezvoltă subsistemele structurale verticale. Încărcările lor sunt constituite din forțele de inerție orizontale asociate greutateii tuturor elementelor structurale și nestructurale,

echipamentelor și respectiv fracțiunii de lungă durată a încărcărilor temporare.

Diafragmele se modelează în calcul ca grinzi pereți sau grinzi cu zăbrele. Proiectarea trebuie să urmărească evitarea solictării planșeelor în domeniul inelastic care poate altera semnificativ distribuția încărcărilor laterale și ponderea modurilor de vibrație ale planșeelor și structurii verticale.

Aspectele specifice ale proiectării planșeelor se referă la:

- preluarea eforturilor de întindere din încovoiere;
- transmiterea reacțiunilor la reazeme, pereți sau grinzi de cadru prin legătura dintre aceste elemente și placa planșeului;
- colectarea încărcărilor aplicate în masa planșeelor în vederea transmiterii lor la elementele verticale;
- preluarea forțelor tăietoarea prin mecanismele specifice grinzilor pereți (adică prin acțiunea de arc sau grindă cu zăbrele).

6.2. Proiectarea la încovoiere

Eforturile de întindere din încovoiere sunt preluate de armăturile din elementele de bordare. Elementele de bordare sunt realizate sub formă de centuri, grinzi sau ca armături dispuse între rosturile unei zidării și trebuie să fie continue și conectate adecvat la placa planșeului.

Pentru evaluarea eforturilor de întindere din planșeu se va ține seama de efectele flexibilității relative a elementelor verticale. La colțurile intrânde ale planșeelor cu forme neregulate se vor dispune armături adecvate în vederea limitării deschiderii fisurilor periculoase ce pot apărea în aceste zone.

6.3. Conectarea planșeelor la elementele structurii laterale

Conectarea planșeelor la elementele structurii laterale se va realiza în așa fel încât să fie în măsură să transmită forțele de forfecare rezultate din acțiunea de diafragmă orizontală. Această legătură se realizează prin:

- ancorarea adecvată a armăturilor perpendiculare pe interfața placă-perete (sau grindă) la planșeele din beton armat;
- legături sudate sau bulonate la planșeele metalice;
- scoabe solidarizate prin cuie sau buloane la planșeele din lemn;

6.4. Măsuri specifice în planșeele cu goluri mari

- se va evita prevederea golurilor de circulație pe verticală în zonele în care secțiunea diafragmei este redusă semnificativ;

- în jurul golurilor de dimensiuni mari se vor prevedea elemente de bordare;
- la dispunerea golurilor în planșeu (funcționale sau de instalații) se vor analiza efectele discontinuităților asupra modului de transmitere a forțelor orizontale de la planșeu la elementele structurii laterale, precum și asupra modelului de calcul structural.

Prezența golurilor suprapuse pe mai multe niveluri poate expune elementele verticale la pierderea stabilității sau la ruperi sub forțe normale pe planul lor.

7. Clase de importanță și de expunere la cutremur și factori de importanță

Nivelul de asigurare a construcțiilor diferă în funcție de clasa de importanță și de expunere la cutremur din care acestea fac parte. Importanța construcțiilor depinde de consecințele prăbușirii asupra oamenilor, de importanța lor pentru siguranța publică și protecția civilă în perioada de imediat după cutremur, precum și de consecințele sociale și economice ale prăbușirii sau avarierii grave.

Clasa de importanță și de expunere la cutremur este caracterizată de valoarea factorului de importanță γ_I .

Clasa de importanță	Tipuri de clădiri	γ_I
I	Clădiri cu funcțiuni esențiale, a căror integritate pe durata cutremurelor este vitală pentru protecția civilă: stațiile de pompieri și sediile de poliție; spitale și alte construcții aferente serviciilor sanitare care sunt dotate cu secții de chirurgie și de urgență; clădirile instituțiilor cu responsabilitate în gestionarea situațiilor de urgență, în apărarea și securitatea națională; stațiile de producere și distribuție a energiei și/sau care asigură servicii esențiale pentru celelalte categorii de clădiri menționate aici; garajele de vehicule ale serviciilor de urgență de diferite categorii; rezervoare de apă și stații de pompare esențiale pentru situații de urgență; clădiri care conțin gaze toxice, explozivi și alte substanțe periculoase.	1.4
II	Clădiri a căror rezistență seismică este importantă sub aspectul consecințelor asociate cu prăbușirea sau avarierea gravă: - clădiri de locuit și clădiri publice având peste 400 persoane în aria totală expusă - spitale, altele decât cele de clasa I, și instituții medicale cu o capacitate de peste 150 persoane în aria totală expusă - penitenciare - aziluri de bătrâni, creșe - școli cu diferite grade, cu o capacitate de peste 200 de persoane în aria totală expusă - auditorii, săli de conferințe, de spectacole cu capacități de peste 200 de persoane - clădirile din patrimoniul național, muzee etc.	1.2
III	Clădiri de tip curent, care nu aparțin celorlalte categorii	1.0
IV	Clădiri de mică importanță pentru siguranța publică, cu grad redus de ocupare și/sau de mică importanță economică, construcții agricole	0.8

8. Calculul structurilor la acțiunea seismică

8.1. Metode de calcul elastic

Proiectarea structurilor la acțiunea seismică se poate face prin mai multe metode de analiza structurală. În proiectarea curentă se folosește un calcul liniar elastic, fiind posibile două alternative:

- metode de calcul cu forțe laterale (metode forțelor statice echivalente);
- metode de calcul modal cu spectre de răspuns (calcul spectral).

8.2. Metoda forțelor statice echivalente

Această metodă se aplică construcțiilor care pot fi calculate prin considerarea a două modele plane câte unul pentru fiecare direcție principală a clădirii și al căror răspuns seismic total nu este influențat semnificativ de modurile proprii superioare de vibrație. Aceste cerințe pot fi considerate satisfăcute de structurile care au perioada fundamentală de vibrație $T_1 \leq 1.5s$ și sunt regulate pe verticală.

Determinarea forțelor laterale se efectuează în două etape. În prima etapă se determină forța tăietoare de bază, iar în cea de a doua etapă aceasta se distribuie pe înălțimea structurii conform modului fundamental.

Forța de tăietoare de bază corespunzătoare modului propriu fundamental pentru fiecare direcție orizontală principală se determină cu următoarea relație:

$$F_b = \gamma_I \cdot S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

γ_I – factorul de importanță și expunere la cutremur;

$S_d(T_1)$ – ordonata spectrului de răspuns de proiectare corespunzătoare perioadei fundamentale T_1 ;

T_1 – perioada proprie fundamentală de vibrație a clădirii în planul ce conține direcția orizontală considerată;

m – masa totală a clădirii calculată ca sumă a maselor de nivel m_i ;

λ – factor de corecție care ține seama de contribuția modului propriu fundamental prin masa modală efectivă asociată acestuia și are următoarele valori:

$\lambda = 0.85$ $T_1 \leq T_c$ - și clădirea are mai mult de două niveluri;

$\lambda = 1$ - în celelalte situații.

Formule simplificate pentru exprimarea perioadei fundamentale:
 - pentru clădirile cu înălțimi până la 40m:

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4}$$

C_t - coeficient în funcție de tipul structurii;

$C_t = 0.085$ – pentru cadre spațiale metalice necontravântuite;

$C_t = 0.075$ – pentru cadre spațiale din beton armat necontravântuite sau metalice cu contravânturi excentrice;

$C_t = 0.05$ – pentru celelalte tipuri de structuri;

H - reprezintă înălțimea clădirii măsurată de la nivelul fundației sau de la extremitatea superioară a infrastructurii rigide.

- pentru structurile în cadre de beton armat sau oțel care nu depășesc 12 etaje (înălțimea fiecărui etaj nu este mai mare de 3 metri), atunci :

$$T_1 = 0.1 \cdot n$$

n – numărul de niveluri ale structurii;

Exemplu de calcul

Se cere să se determine valoarea forței tăietoare de bază pentru o structură în cadre din beton armat, având regimul de înălțime P+7E amplasată în municipiul Oradea. Se cunosc:

- clasa de importanță a clădirii III

- greutatea totală a clădirii $G = 15000kN$

- valoarea factorului de comportare $q = 5$

$$F_b = \gamma_I \cdot S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

$\gamma_I = 1.0$ - pentru clasa de importanță III

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4}$$

$$H = 23.0m$$

$C_t = 0.075$ - pentru beton armat

necontravântuit;

$$T_1 = 0.075 \cdot 23^{3/4} = 0.79s \quad \text{sau}$$

$$T_1 = 0.1 \cdot n = 0.1 \cdot 8 = 0.80s$$

$$T_1 = 0.79s$$

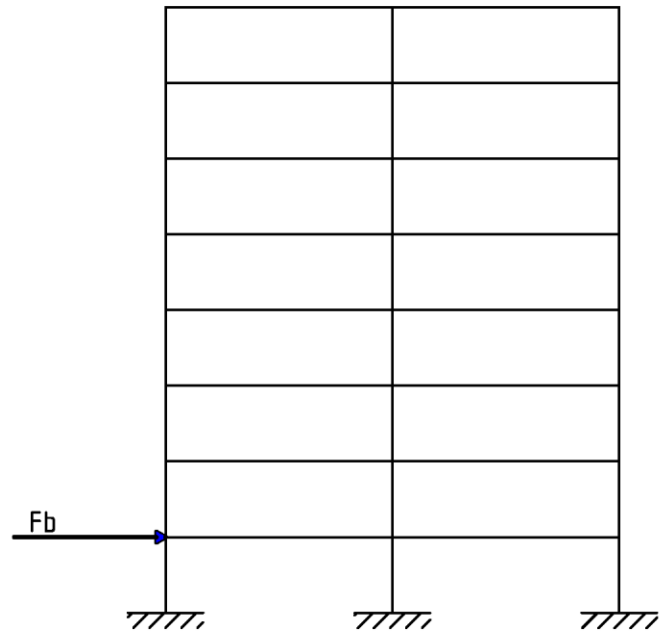
$T_C = 0.7s$ pentru Oradea

$$T_1 > T_C \Rightarrow \lambda = 0.1$$

$g = 9.81m/s^2$ - accelerația gravitațională

$$m = \frac{G}{g} = \frac{15000}{9.81} = 1529.05$$

$$T_B = 0.07s \text{ și } T_D = 3s \text{ pentru } T_C = 0.7s$$



$$T_1 > T_B \Rightarrow Sd(T_1) = a_g \cdot \frac{\beta(T)}{q}$$

$$a_g = 0.12 \cdot g \text{ pentru Oradea}$$

$$T_C < T_1 \leq T_D \Rightarrow \beta(T) = \beta_0 \cdot \frac{T_C}{T_1}$$

$$Sd(T_1) = 1.177 \cdot \frac{2.44}{5} = 0.574$$

$$a_g = 0.12 \cdot 9.81 = 1.177 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_0 = 2.75 \quad \beta(T) = 2.75 \cdot \frac{0.7}{0.79} = 2.44$$

$$Fb = 1 \cdot 0.57 \cdot 1529.05 \cdot 1 = 877.2 \text{ kN}$$

8.3. Distribuția forțelor seismice orizontale

Forța seismică care acționează la nivelul i se calculează cu relația.

$$F_i = Fb \cdot \frac{m_i \cdot s_i}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot s_i}$$

F_i – forța seismică orizontală static echivalentă de la nivelul i ;

Fb – forța tăietoare de bază corespunzătoare modului fundamental de vibrație, reprezentând rezultanta forțelor seismice orizontale de nivel;

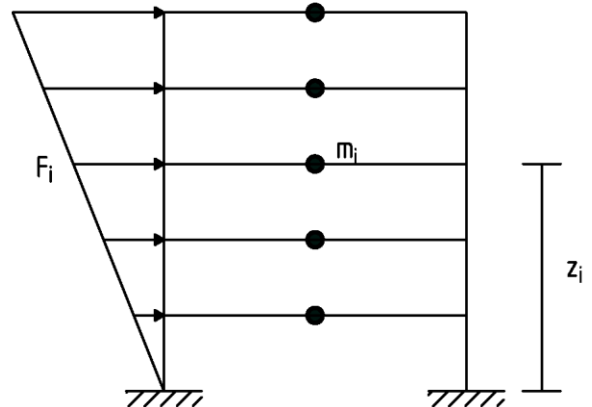
m_i – masa de nivel;

s_i – componenta formei fundamentale pe direcția gradului de libertate dinamică de translație la nivelul i .

Forma proprie fundamentală poate fi aproximată printr-o variație liniară proporțională cu înălțimea. În acest caz forțele orizontale de nivel se determină cu relația:

$$F_i = Fb \cdot \frac{m_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot z_i}$$

z_i – înălțimea nivelului i față de baza construcției



Forțele seismice orizontale se aplică sistemelor structurale ca forțe laterale la nivelul fiecărui planșeu considerat indeformabil în planul său. Distribuția invers triunghiulară a forțelor laterale reprezintă în mod

simplificat forma modului fundamental de vibrație. Forțele laterale fiind proporționale cu masa de la nivelul i vor avea această distribuție doar în cazul în care masele de nivel sunt egale între ele.

8.5. Metoda de calcul modal cu spectre de răspuns

În metoda de calcul modal acțiunea seismică se determină pe baza spectrelor de răspuns corespunzătoare mișcărilor de translație unidirecționale ale terenului descris prin accelerograme. Această metodă se aplică clădirilor care nu îndeplinesc condițiile specificate pentru utilizarea metodei simplificate cu forțe laterale static echivalente. Ea se folosește în cazul structurilor cu forme complexe sau cu distribuții neuniforme ale masei și rigidității deoarece răspunsul unor astfel de structuri este dat de aportul mai multor moduri proprii de vibrații.

În calcul se consideră modurile proprii de vibrație cu o contribuție semnificativă la răspunsul seismic total, condiție îndeplinită dacă:

- suma maselor modale efective pentru modurile proprii de vibrație considerate reprezintă cel puțin 90% din masa totală a structurii;
- au fost considerate în calcul toate modurile proprii de vibrație cu masă modală efectivă mai mare de 5% din masa totală.

Forța tăietoare de bază aplicată pe direcția de acțiune a mișcării seismice în modul propriu de vibrație k este dată de relația:

$$Fb_k = \gamma_I \cdot Sd(T_k) \cdot m_k$$

m_k – masa modală efectivă asociată modului propriu de vibrație k ;

$$m_k = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot s_{i,k} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot s_{i,k}^2}$$

$s_{i,k}$ – componenta vectorului propriu în modul de vibrație k pe direcția gradului de libertate dinamică de translație la nivelul i ;

T_k – perioada proprie în modul propriu de vibrație k .

9. Combinarea acțiunii seismice cu alte tipuri de acțiuni

Combi-națiile de încărcări pentru verificarea acțiunilor se întocmesc conform CR0-2005. În cazul acțiunii seismice combinația de încărcări pentru verificarea la starea limită ultimă se determină cu relația:

$$\sum_{j=1}^m G_{k,j} + \gamma_I \cdot A_{ek} + \sum_{i=1}^n \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$ – valoarea caracteristică a acțiunii permanente j;

$Q_{k,i}$ – valoarea caracteristică a acțiunii variabile i;

A_{ek} – valoarea caracteristică a acțiunii seismice ce corespunde unui interval mediu de recurență corespunzător stării limite ultime (în acest caz IMR=100 de ani);

$\psi_{2,i}$ – coeficient pentru determinarea valorii cvasipermanente a acțiunii variabile.

Tipul acțiunii	$\psi_{2,i}$
Acțiunea din vânt și din variația de temperatură	0
Acțiunea din zăpadă și acțiunea datorită exploatării	0.4
Încărcări din depozite	0.8

10. Verificarea la starea limită ultimă

Conform EN 1998-1 (2003) verificarea unei structuri la starea limită ultimă SLU, necesită îndeplinirea următoarelor cerințe principale: rezistență, ductilitate, rezistența fundațiilor și rosturi seismice. P100-1 (2006) impune suplimentare limitarea deplasărilor laterale de nivel.

Condiția de rezistență

Condiția de rezistență implică verificarea elementelor structurale la eforturile de calcul determinate din combinația de încărcări corespunzătoare acțiunii seismice. Relația de verificare are următoarea formă generală:

$$E_d \leq R_d$$

E_d –valoarea de proiectare a efectului acțiunii în combinația care conține acțiunea seismică;

R_d – valoarea corespunzătoare efortului capabil.

În general în calcul structural trebuie considerate și efectele de ordinul 2 (adică un calcul geometric neliniar). Într-un calcul geometric neliniar încărcările sunt aplicate pe forma deformată a structurii ceea ce conduce la deplasări și eforturi mai mari decât în cazul unui calcul liniar elastic. Efectele de ordinul 2 sunt importante pentru elementele solificate la forțe de compresiune mari și în cazul unor deplasări laterale mari.

Totuși efectele de ordinul 2 pot fi neglijate dacă pentru fiecare nivel al structurii este îndeplinită următoarea condiție:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0.10$$

θ – coeficient de sensibilitate al deplasării relative de nivel;

P_{tot} – încărcarea verticală totală la nivelul considerat în ipoteza de calcul seismic;

d_r – deplasarea relativă de nivel determinată ca diferența deplasărilor laterale medii la partea superioară și la cea inferioară nivelului considerat;

V_{tot} – forța totală de nivel;

h – înălțimea de nivel.

Limitarea deplasărilor laterale la starea limită ultimă

Calculul deplasărilor laterale pentru starea limită ultimă se face pe baza următoarei relații:

$$d_s = c \cdot q \cdot d_e$$

d_s – deplasarea unui punct din sistemul structural ca efect al acțiunii seismice;

q – factor de comportare specific tipului de structură;

d_e – deplasarea aceluiasi punct din sistemul structural determinată prin calcul static elastic sub încărcările seismice de proiectare;

c – factor supraunitar care ține seama de faptul că în răspunsul seismic inelastic cerințele de deplasare sunt superioare celor din răspunsul elastic pentru structurile cu perioade de oscilație mai mică decât T_c .

Conform P100-1 (2006) verificarea deplasărilor de nivel la starea limită ultimă are drept scop evitarea pierderilor de vieți omenești prin prevenirea prăbușirii totale a elementelor nestructurale.

Verificarea la deplasare se face pe baza expresiei:

$$d_r^{ULS} = c \cdot q \cdot d_{re} \leq d_{ra}^{ULS}$$

d_r^{ULS} – deplasarea relativă de nivel sub acțiunea seismică asociată stării limite ultime;

d_{re} – deplasarea relativă de nivel determinată prin calcul static elastic din încărcările seismice de proiectare;

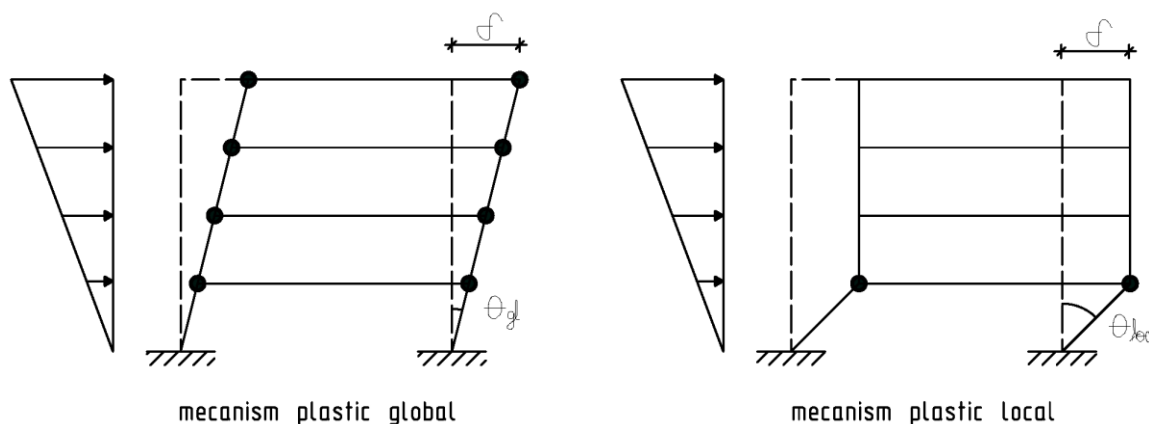
d_{ra}^{ULS} – valoarea admisibilă a deplasării relative de nivel și are valoarea

$d_{ra}^{ULS} = 0.025 \cdot h$ unde h reprezintă înălțimea de nivel.

Condiții de ductilitate locală și globală

Componenta principală a factorului de comportare q o constituie ductilitatea structurii. Factorii de comportare sunt specificați în normele de proiectare în funcție de material, clasa de ductilitate și tipul structurii.

Criteriile de asigurare a ductilității locale la nivel de material secțiune și element structural sunt specificate de norme pentru fiecare tip de material și structură în parte. O condiție generală pentru toate tipurile de materiale și structuri o constituie asigurarea unei ductilități globale adecvate. Acest lucru se poate obține prin ierarhizarea rezistenței elementelor structurale urmărind principiile de proiectare bazate pe capacitate în vederea localizării deformațiilor plastice în elementele ductile și evitării fenomenului de cedare în elementele fragile. La structurile etajate în scopul obținerii unei ductilități globale corespunzătoare este necesară asigurarea unui mecanism plastic global a structurii.



Mecanismul plastic global asigură un număr maxim de zone plastice și o solicitare uniformă a acestora. Mecanismele plastice de nivel trebuie evitate, deoarece în acest caz deformațiile inelastice sunt concentrate într-un număr redus de zone plastice având cerințe de deformații inelastice mai ridicate decât în cazul unui mecanism plastic global la aceeași deplasare globală a structurii δ .

Rezistența fundațiilor

Reacțiunile în fundații determinate pe baza forțelor seismice de proiectare sunt mai mici decât cele care vor apărea în cazul unui cutremur

datorită faptului ca au fost determinate pe baza spectrului de proiectare. Astfel dimensionarea fundațiilor și a legăturilor elementelor structurale cu fundațiile trebuie realizată pe baza unor eforturi obținute pe principiul proiectării bazate pe capacitate în ipoteza formării unui mecanism plastic în suprastructură.

Rosturi seismice

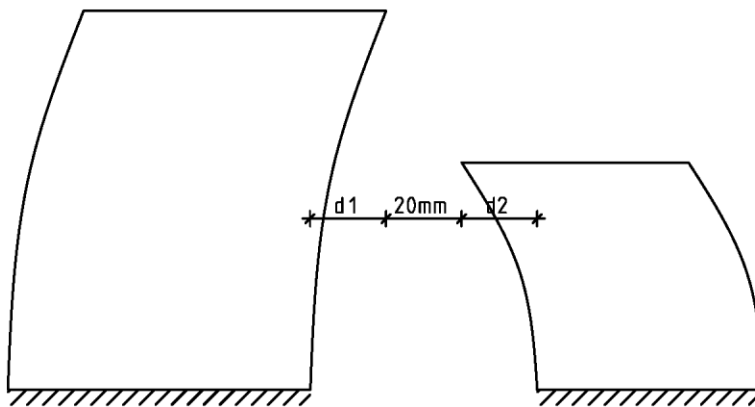
La proiectarea unei structuri aceasta se consideră independentă față de clădirile învecinate. Ciocnirea a două clădiri învecinate poate determina avarierea gravă a acestora. De aceea este necesară asigurarea unui rost seismic între clădirile învecinate sau între corpurile independente ale aceleiași clădiri. Probabilitatea ciocnirii a două clădiri alăturate și efectele acestuia sunt maxime atunci când structurile au caracteristici dinamice diferite (masă, rigiditate, înălțime), deoarece în acest caz oscilațiile sunt diferite și pot fi defazate.

Conform P100-1 (2006) în cazul clădirilor cu caracteristici dinamice diferite dimensiunea rostului dintre cele două clădiri se stabilește pe baza următoarei relații:

$$\Delta = d_1 + d_2 + 20mm$$

Δ - lățimea necesară a rostului seismic;

d_1 și d_2 - deplasările maxime ale celor două clădiri sub acțiunea încărcărilor seismice orizontale la nivelul extremităților superioare ale corpurilor de clădire cu înălțimea mai mică



În cazul structurilor cu caracteristici dinamice similare se pot adopta valori ale rostului seismic mai mici decât cele determinate cu relația de mai sus.

11. Verificarea la starea limită de serviciu SLS

Conform P100-1 (2006) verificarea la SLS are drept scop menținerea funcțiunii principale a clădirii în urma cutremurelor care pot apărea de mai multe ori în viața unei construcții prin limitarea degradării elementelor nestructurale și a componentelor instalațiilor.

Calculul deplasărilor laterale pentru SLS se face cu următoarea relație:

$$d_s = \nu \cdot q \cdot d_e$$

d_s – deplasarea unui punct din sistemul structural ca efect a acțiunii seismice la SLS;

q – factor de comportare specific tipului de structură;

d_e – deplasarea aceluiași punct din sistemul structural determinată prin calcul static elastic sub încărcările seismice de încărcare;

ν – factor de reducere care ține seama de intervalul mediu de recurență asociat verificărilor la SLS.

Verificarea la SLS se realizează prin limitarea deplasărilor relative de nivel corespunzătoare unui cutremur cu intervalul mediu de recurență corespunzătoare SLS conform următoarei relații:

$$d_r^{SLS} = \nu \cdot q \cdot d_{re} \leq d_{ra}^{SLS}$$

d_r^{SLS} – deplasarea relativă de nivel sub acțiunea seismică asociată SLS;

d_{re} – deplasarea relativă a aceluiași nivel determinată prin calcul static elastic sub încărcări seismice de proiectare;

d_{ra}^{SLS} – valoarea admisibilă a deplasării de nivel; are valoarea $0.005h$ pentru clădirile cu elemente nestructurale din materiale fragile atașate structurii și valoarea $0.008h$ pentru clădirile cu elemente nestructurale fixate astfel încât nu afectează deformațiile structurale sau cu elemente nestructurale cu deformabilitate înaltă, unde h reprezintă înălțimea de nivel.

12. Concepte de proiectare

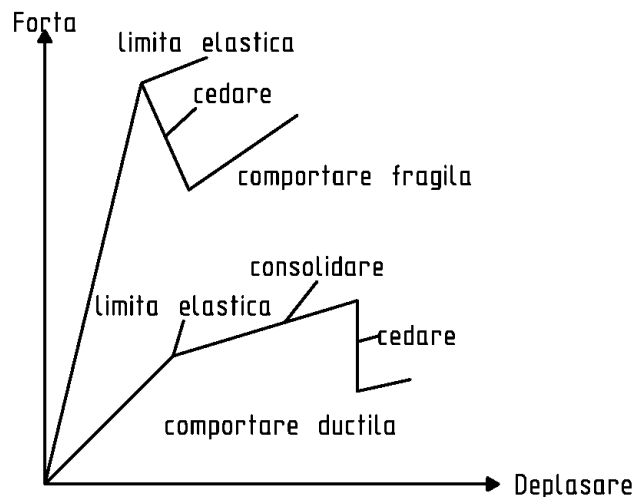
Structurile amplasate în zone seismice pot fi proiectate urmând două concepte principal diferite:

- comportare disipativă (ductilă) a structurii;
- comportare slab-disipativă (fragilă) a structurii.

Diferența între comportarea disipativă și slab-disipativă este dictată de ductilitatea structurii. Ductilitatea reprezintă capacitatea structurii de a se deforma în domeniul plastic fără o reducere substanțială a capacității portante.

În cazul unei structuri cu o comportare fragilă după atingerea limitei de elasticitate forța înregistrează o degradare bruscă. Structurile cu o comportare fragilă au o capacitate redusă de deformare în domeniul inelastic. În cazul unei structuri ductile după atingerea limitei de elasticitate structura se deformează în domeniul inelastic până la atingerea forței maxime (palier de consolidare). Structura cedează numai după consumarea unor deformații inelastice importante. Structurile ductile pot supraviețui unor forțe seismice ce depășesc forța de curgere deoarece după atingerea limitei de elasticitate ele se pot deforma în domeniul inelastic după o degradare substanțială a forței.

Reprezentarea principală a unei comportări ductile și a unei comportări fragile a structurilor:



12.1 Conceptul de proiectare disipativă a structurilor

Pentru a preîntâmpina avariarea excesivă a structurii și a respecta cerința fundamentală de comportare la starea limită ultimă (siguranța vieții) deformația inelastică impusă de către acțiunea seismică nu trebuie să depășească capacitatea de deformare în domeniul inelastic a structurii. Astfel rezistența minimă la forțe laterale trebuie să fie în relație directă cu capacitatea structurii de deformare în domeniul inelastic. Pentru un nivel dat al acțiunii seismice corespunzătoare stării limite ultime pot fi determinate diferite combinații de rezistență-ductilitate care să asigure satisfacerea cerințelor de proiectare la starea limită ultimă.

În cazul structurilor cu perioada proprie de vibrație $T > T_c$, cerința de deplasare inelastică este aproximativ egală cu cea corespunzătoare unui răspuns infinit elastic. Cu cât rezistența structurii la forțe laterale este mai mică cu atât cerința de ductilitate impusă structurii este mai mare. Astfel structurile care au o ductilitate mai mare pot fi proiectate pentru forțe laterale mai mici și vice-versa.

În cazul structurilor cu perioada proprie de vibrație $T < T_c$ deplasările inelastice ale structurii sunt mai mari decât deplasările din sistemul elastic corespunzător.

Normele de proiectare seismică oferă posibilitatea alegerii unor niveluri diferite de ductilitate a structurii încadrându-le pe acestea în clase de ductilitate. Alegerea unei clase de ductilitate la proiectarea unei structuri are două consecințe majore în procesul de proiectare.

Prima consecință o reprezintă valoarea încărcării seismice de proiectare care este determinată pe baza unui spectru de proiectare redus față de cel elastic prin intermediul factorului de comportare q . Structurile proiectate conform unei clase de ductilitate mai ridicate au asociate valori mai ridicate ale factorului de comportare și în consecință forțe seismice de proiectare mai mici.

Cea de a doua consecință constă în asigurarea unui anumit nivel de ductilitate la nivel de structură. Astfel normele de proiectare seismică conțin prevederi specifice de detaliere și proiectare pentru structurile din fiecare clasă de ductilitate. Aceste prevederi au menirea să asigure structurii valori ale ductilității în acord cu clasa de ductilitate aleasă. Ductilitatea unei structuri se asigură pe baza unor criterii specifice diferitelor materiale de construcții și tipuri de structuri.

În general realizarea tuturor elementelor unei structuri ca și elemente ductile nu este economică și nici posibilă. De aceea o structură disipativă va

conține atât elemente disipative cât și elemente nedisipative (fragile). Pentru asigurarea unei comportări disipative la nivelul întregii structuri trebuie preîntâmpinată cedarea elementelor fragile.

În concluzie proiectarea structurilor la acțiunea seismică conform principiului de comportare disipativă implică două etape. În prima etapă se dimensionează elementele ductile pe baza eforturilor determinate dintr-o analiză elastică a structurii supusă forțelor seismice de proiectare. Pe lângă rezistență elementele ductile trebuie să posedă și o ductilitate corespunzătoare clasei de ductilitate alese. În cea de a doua etapă se dimensionează elementele fragile pe baza unor eforturi corespunzătoare plasticizării elementelor ductile. Această metodă de proiectare are scopul de a asigura o suprarezistență a elementelor fragile față de cele ductile conducând la structuri ductile per ansamblu.

12.2. Conceptul de proiectare slab-disipativă a structurilor

Structurile slab-disipative au o ductilitate neglijabilă. Aceste structuri trebuie proiectate astfel ca sub acțiunea seismică corespunzătoare stării limite ultime structura să rămână în domeniul elastic. Astfel încărcarea seismică de calcul trebuie determinată pe baza spectrului de răspuns elastic, iar efortul în elementul cel mai solicitat al structurii nu trebuie să depășească efortul capabil al acestui element. Prima condiție este îndeplinită prin determinarea spectrului de proiectare folosind un factor de comportare $q = 1$. Cea de a doua condiție implică faptul că structurile proiectate conform conceptului de proiectare slab disipativă trebuie să aibă un răspuns preponderent elastic sub acțiunea încărcărilor seismice de calcul ceea ce permite proiectarea acestora conform procedurilor de calcul folosite la proiectarea structurilor amplasate în zone neseismice. Astfel normele de calcul seismic se folosesc doar pentru determinarea încărcării seismice, iar verificarea structurilor la starea limită ultimă se efectuează conform normelor generale de calcul a structurilor.