

# RĂSPUNSUL SEISMIC al STRUCTURILOR

## ANALIZA SPECTRALĂ

### \* Ipoteze de bază.

- mișcarea pământului este reprezentată prin 3 deplasări translative independente. Răspunsul total = superpunerea liniară a efectelor corespunzătoare celor 3 mișcări separate
- întreaga structură suferă simultan aceleași deplasări pe toată suprafața bazei de rezanare. Ipoteza = acceptabilă când structura este fundată pe un teren ferm, iar dimensiunile sale în plan sunt mici în comparație cu lungimea undelor seismice
- se neglijează efectele interacțiunii structură-teren de fundare, deci mișcarea pământului nu este influențată de mișcarea proprie a structurii. Efectul interacțiunii este neglijabil mai ales în cazul structurilor relativ flexibile fundate pe terenuri ferme (structura transmite o cantitate redusă de energie solului).

## \* Spectre Seismice de Răspuns

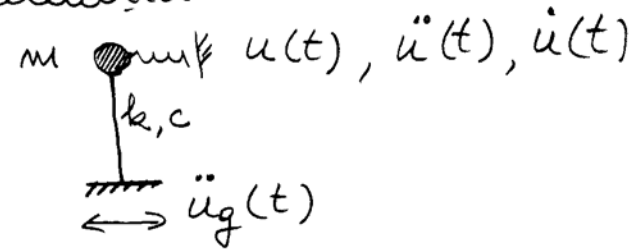
Efectul acțiunii seismice asupra structurilor poate fi estimat pe baza:

- răspunsului unui sistem cu 1 grad de libertate dinamică (1-GLD)

Ecuația mișcării:

$$\ddot{u} + 2\nu\omega\dot{u} + \omega^2 u = -\ddot{u}_g(t)$$

$\ddot{u}_g(t)$  = accelerația bazei de referință



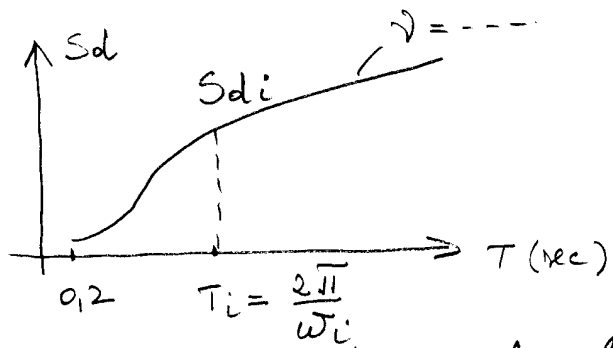
Răspunsul sistemului = integrala Duhamel

$$u(t) = -\frac{1}{m\omega^*} \int_0^t m \ddot{u}_g(\tau) e^{-\nu\omega(t-\tau)} \sin \omega^*(t-\tau) d\tau \quad \text{unde: } \omega^* = \omega\sqrt{1-\nu^2}$$

Pentru o înregistrare a accelerațiilor  $\ddot{u}_g(t)$  în timpul cutremurului, rezultă funcția integrală numerică:

$$u_{\max} = \left| \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\nu\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} = S.d$$

S.d = valoarea spectrală a deplasărilor =  $f(\omega, \nu)$

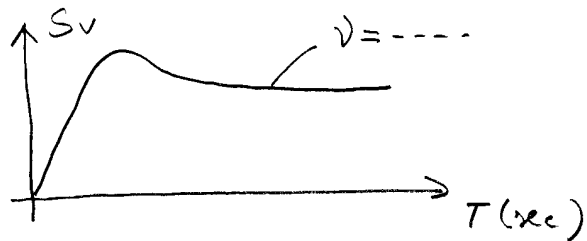


= Spectrul seismic al deplasărilor.

Similar se obțin valorile spectrale ale vitezelor și accelerațiilor:

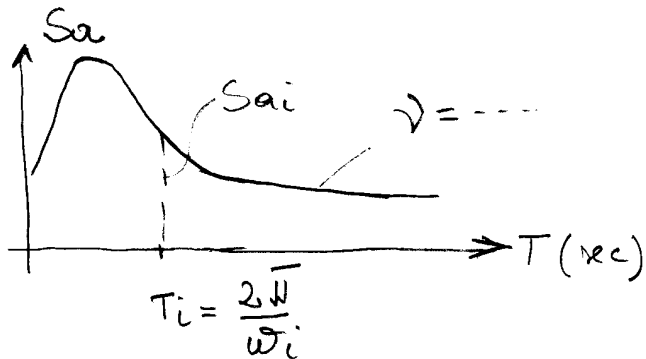
$$S_v = \left| \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\nu\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max}$$

$$S_a = \left| \omega \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\nu\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max}$$

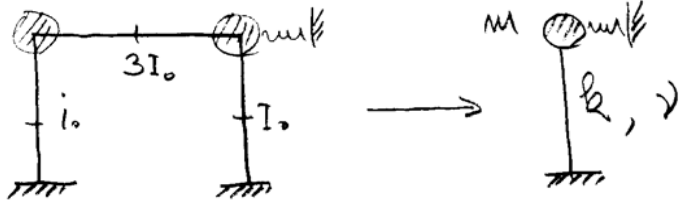


Forța seismică maximă:

$$F_{\max} = k S_d = m \omega S_v = m S_a$$



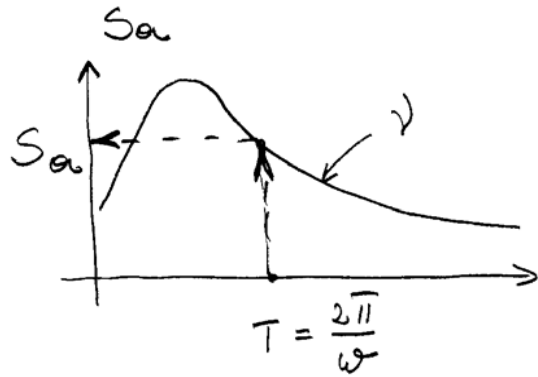
Magnitudinea cutremurului  $\rightarrow$  Spectre Seismice de Răspuns  $\rightarrow$  Răspuns seismic al structurii.



Caracteristici  
Proprii de  
Vibrație

$$\omega$$

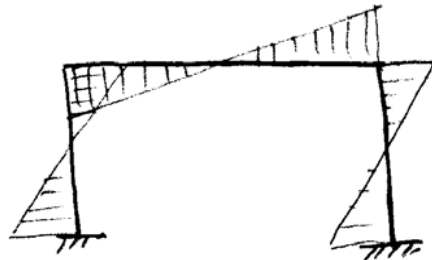
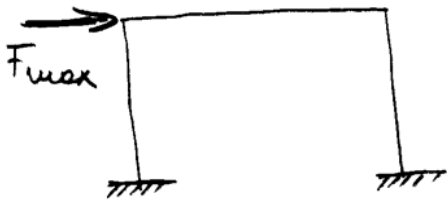
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$



Forța seismică  
maximă

$$F_{\max} = m \cdot S_a(T, v)$$

Răspunsul seismic maxim.



## \* Spectre de Răspuns de Proiectare

În zone cu Seismicitate ridicată :

- încălzirile rezinice produc stări de tensiuni și deformări superioare celor produse de alte combinații de încălziri utile
- probabilitatea de apariție a unui cutremur extrem este destul de redusă

Strategia de proiectare are la bază două criterii :

- 1) Ca bază de proiectare se consideră un cutremur moderat ca intensitate care se așteaptă să se producă cel puțin o dată în viața structurii

Structura va fi proiectată pentru a rezista la acest cutremur fără a avea deteriorări semnificative

- 2) Structura este analizată la un cutremur test - cel mai sever cutremur care poate să apară în perioada de viață a structurii.

Întrucât un astfel de cutremur este puțin probabil să apară, din motive economice se permit deteriorări semnificative ale unor elemente structurale, fără a cauza prăbușirea structurii sau pierderi de vieți omenești.

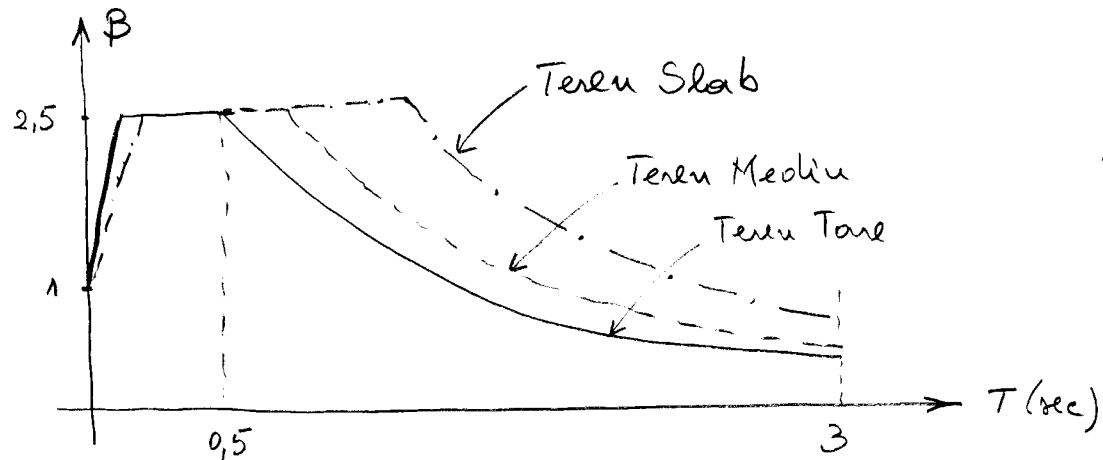
Tendința curentă = pentru construcții importante  $\Rightarrow$  creșterea rezistenței pentru a îndeplini Criteriul 2

## • Spectre de proiectare - Caracteristici

- Forma spectrelor este perpendiculară aceeași atât pentru faza de proiectare cât și pentru faza când se consideră cel mai puternic cutremur care poate apărea pe perioada de viață a structurii
- Cele două evenimente diferă numai în intensitate măsurată prin accelerația maximă a pământului (PGA)
- În practică curenții spectrele de răspuns sunt normalizate în raport cu accelerația maximă a pământului =  $1g$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S_a(T, \nu) = 1g$$

- Condițiile locale de sol sunt luate în considerare prin factori care sporesc PGA



$$\beta = \frac{\text{accelerația spectrală}}{\text{PGA}}$$

$$\nu = 5\% \rightarrow \text{alte valori } \gamma = \sqrt{\frac{7}{2+\nu}} = \text{factor de conversie}$$

Spectre normalizate

\* Răspunsul seismic al Structurilor cu mai multe grade de libertate dinamice (MGLD).

• Ecuația de mișcare:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [c]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = -[M]\{1\}\ddot{a}_g(t)$$

Poate fi rezolvată: - în domeniul frecvențelor

- în domeniul timp: a) integrarea directă a sistemului

b) procedee de reducere - Analiza Modală

• Analiza Modală: - mișcarea seismică tinde să excite primele moduri proprii  
- suprapunerea liniară a răspunsurilor în fiecare mod propriu

• Pentru modul propriu de vibrație „j”, răspunsul seismic:

$$\{d_j(t)\} = \{\phi_j\} \eta_j^*(t) \quad \text{unde } \{\phi_j\} = \text{forma proprie de vibrație}$$

iar coordonata generalizată:

$$\eta_j^*(t) = \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \cdot \frac{1}{\omega_j^*} \int_0^t \ddot{a}_g(\tau) e^{-\gamma_j \omega_j^* (t-\tau)} \cdot \sin \omega_j^* (t-\tau) d\tau$$

• Răspunsul total = suprapunerea liniară a răspunsurilor modale

$$\{d\} = [\Phi] \{\eta^*(t)\} \quad \text{unde } [\Phi] = \{\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_j \ \dots \ \phi_n\}$$

- Răspunsul Seismic Maxim = utilizarea Spectrelor Seismice de Răspuns
  - valoarea maximă a coordonatei generalizate în modul „j”:

$$\eta_j^* = \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \cdot \frac{1}{\omega_j} \cdot \left| \int_0^t \ddot{a}_g(\tau) e^{-\nu_j \omega_j (t-\tau)} \cdot \sin \omega_j (t-\tau) d\tau \right|_{\max} =$$

$$= \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \cdot \frac{1}{\omega_j} \cdot \underbrace{S_{\nu_j}(T_j, \nu_j)}_{\substack{\text{valoarea spectrală a vitezei} \\ \text{asociată modului j de vibrație}}}$$

- deplasările relative maxime corespunzătoare modului „j”:

$$\{d_j\}_{\max} = \{\phi_j\} \eta_j^*$$

- forțele elastice maxime pe direcțiile GLD, asociate modului „j”:

$$\{F_j\}_{\max} = [K] \{d_j\}_{\max} = \omega_j^2 [M] \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \cdot \frac{1}{\omega_j} S_{\nu_j}(T_j, \nu_j)$$

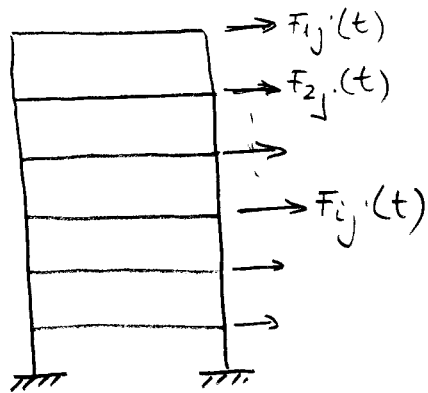
- stări de eforturi maxime, asociate modului „j”

$$\{F_j\}_{\max} \rightarrow \begin{cases} N_{j\max} \\ T_{j\max} \\ M_{j\max} \end{cases}$$



- Fonte elastice exterioare - asociate fiecărui mod de vibrație

$$\{F_j(t)\} = [K] \{d_j(t)\} = \omega_j^2 [M] \{\phi_j\} \eta_j^*(t)$$



→ Stări de eforturi și deformații =  
 = suprapunerea liniară a efectelor pentru  
 fiecare mod de vibrație.

$$\{d(t)\} = \sum_j \{d_j(t)\}$$

$$\{F_i(t)\} = \sum_j \{F_{ij}(t)\}$$

$j = 1, 2, \dots, M$  moduri de  
 vibrație.

## • Răspunsul Seismic Total Maxim.

- răspunsurile maxime asociate fiecărui mod de vibrație se produc la momente „t” diferite
- suma răspunsurilor modale maxime are la bază considerente probabilistice
- „suprapunerea” răspunsurilor maxime se referă la deplasări, tensiuni, eforturi

### a) SRSS

$$V_{\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{j\max})^2}$$

### b) CQC - are la bază teoria vibrațiilor aleatoare.

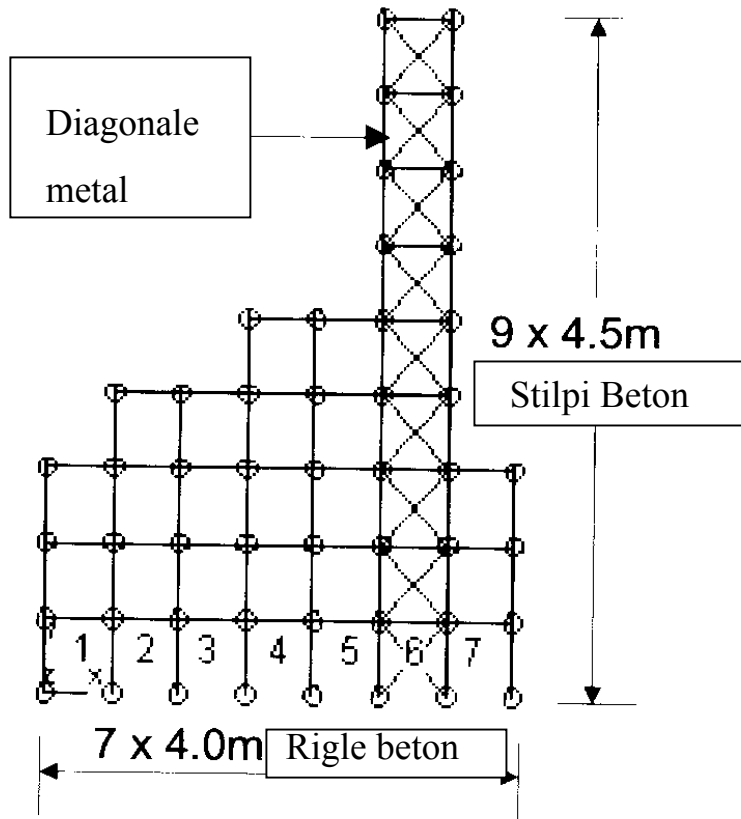
$$V_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{i\max} \rho_{ij} V_{j\max}}$$

unde  $\rho_{ij}$  = coeficienții de corelație: amortizări, frecvențele naturale

Observații: 1) CQC este superioră lui SRSS

2) Pentru  $\nu=0$  CQC  $\equiv$  SRSS

3) Suprapunerea răspunsurilor maxime nu se aplică pentru  $\nu > 10\%$



	Stilpi	Rigle
Cross-Sectional Area	0.1	0.08
2nd Moment of Area (Y axis)	8.333e-4	5.333e-4
2nd Moment of Area (Z axis)	8.333e-4	5.333e-4
Torsional Constant	1.666e-3	1.066e-3
Effective Shear Area in Z Direction	0.1	0.08
Effective Shear Area in Y Direction	0.1	0.08
Eccentricity	0.0	0.0

## Caracteristici materiale

- Beton -  $E_b = 30 \text{ EJ N/m}^2$   
 $\nu = 0,15$   
 $\rho = 2400 \text{ kg}$
- Metal -  $E_o = 210 \text{ EJ N/m}^2$   
 $\nu = 0,3$   
 $\rho = 7800 \text{ kg}$ .

## Spectrul de Răspuns al Acceleratilor

$$S_e = (\gamma \cdot \eta \cdot \ddot{a}_g) \beta$$

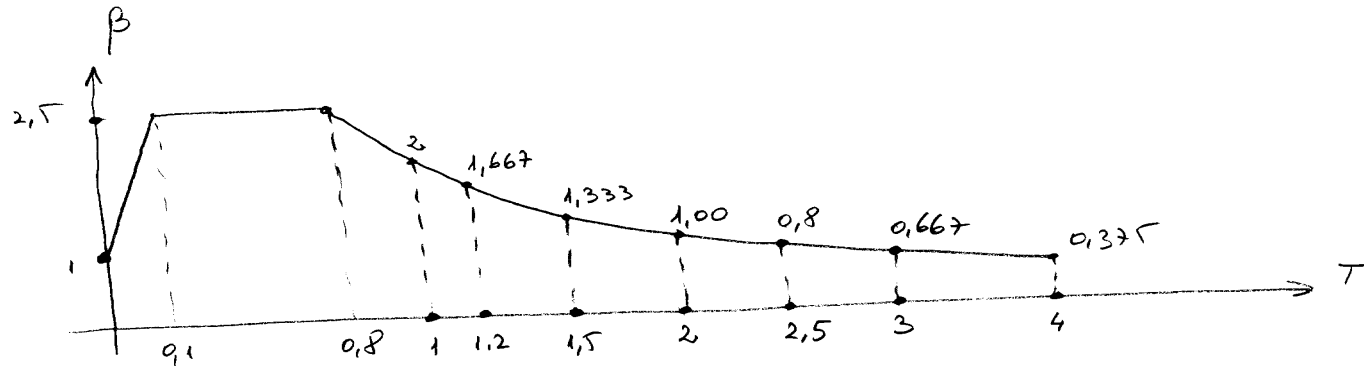
$$\nu = 4\%$$

$\beta$  = Spectrul normalizat

$\gamma = 1,3$  factor de importanță  
 $\ddot{a}_g = 2 \text{ m/s}^2$  - accelerația maximă  
de calcul

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\nu}} = \sqrt{\frac{7}{2+4}} = 1,08 =$$

= factor de conversie







*(Chuo-ku, Jan. 18, p.m.)*



## **ANEXE**

**1) Specificatii normative P100 – Actiune Seismica**

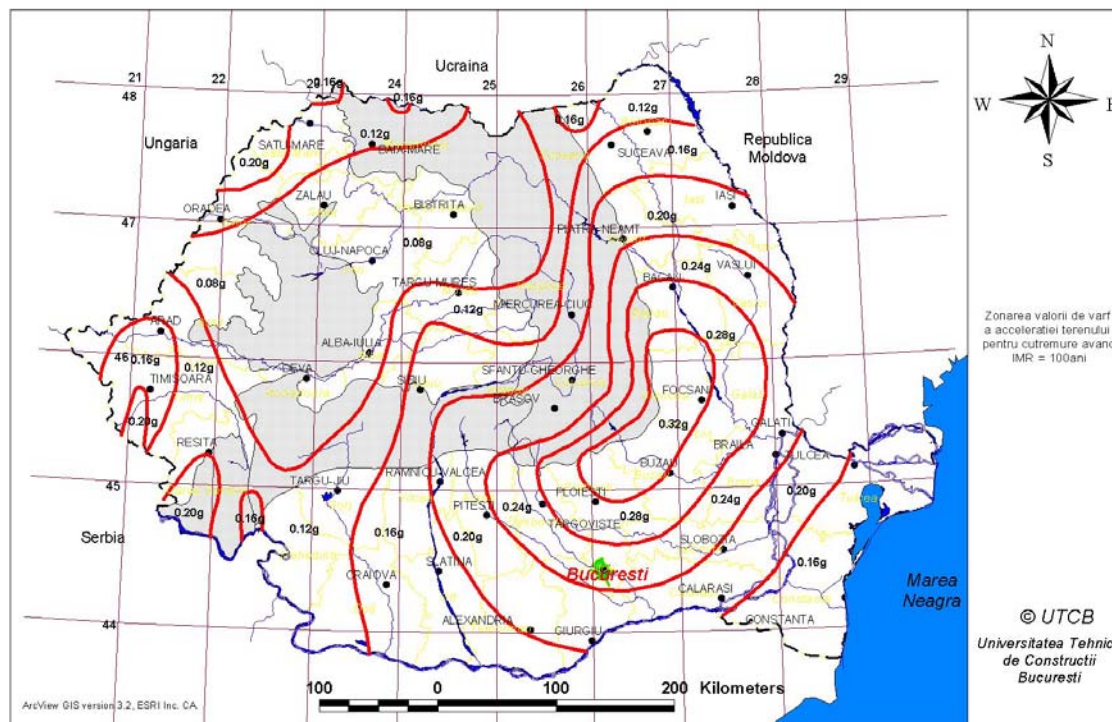
**2) Aplicatie numerica – Analiza Spectrala - Pod cu izolatori seismici**



# Normativul P100 – Acțiune Seismică

## Reprezentarea acțiunii seismice pentru proiectare

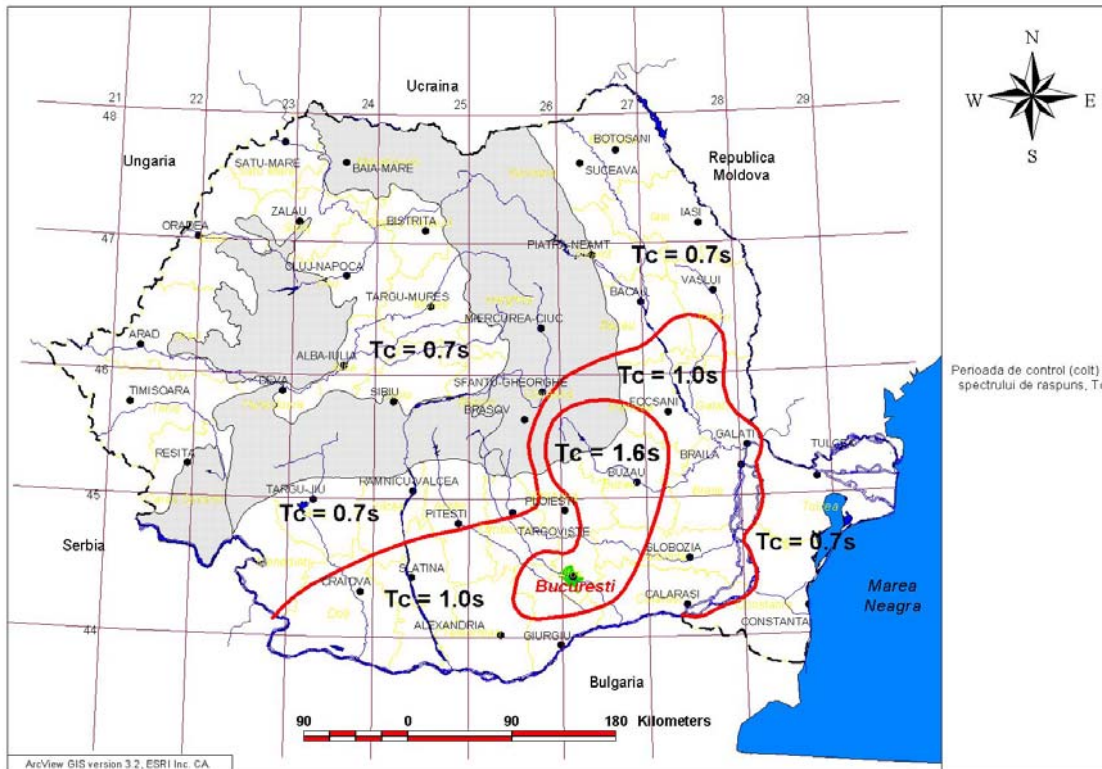
- (1) Hazardul seismic pentru proiectare este descris de valoarea de vârf a accelerației orizontale a terenului  $a_g$  determinată pentru intervalul mediu de recurență de referință ( $IMR$ ) corespunzător stării limită ultime, valoare numită în continuare “accelerația terenului pentru proiectare”.



**Figura 1.** Zonarea teritoriului Romaniei in termeni de valori de vârf ale accelerației terenului pentru proiectare  $a_g$  pentru cutremure avand intervalul mediu de recurență  $IMR = 100$  ani

- (2) Mișcarea seismică într-un punct pe suprafața terenului este descrisă prin spectrul de răspuns elastic pentru accelerații absolute.
- (3) Condițiile locale de teren sunt descrise prin valorile perioadei de control (colț)  $T_C$  a spectrului de răspuns pentru zona amplasamentului considerat. Aceste valori caracterizează sintetic compoziția de frecvențe a mișcărilor seismice.

În condițiile seismice și de teren din România, pentru cutremure având  $IMR = 100$  ani, zona pentru proiectare a teritoriului României în termeni de perioadă de control (colț),  $T_C$ , a spectrului de răspuns obținută pe baza datelor instrumentale existente pentru componentele orizontale ale mișcării seismice este prezentată în Figura 2.



**Figura 2.** Zonarea teritoriului României în termeni de perioada de control (colț),  $T_C$  a spectrului de raspuns

(4) Formele normalizate ale spectrelor de răspuns elastic pentru componentele orizontale ale accelerației terenului,  $\beta(T)$ , pentru fracțiunea din amortizarea critică  $\xi = 0.05$  și în funcție de perioadele de control (colț)  $T_B$ ,  $T_C$  și  $T_D$  sunt:

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

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

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

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

unde:

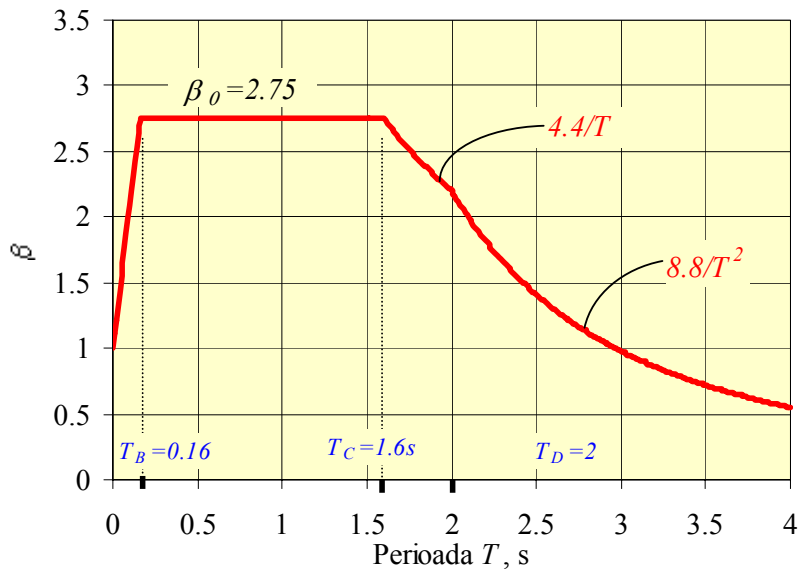
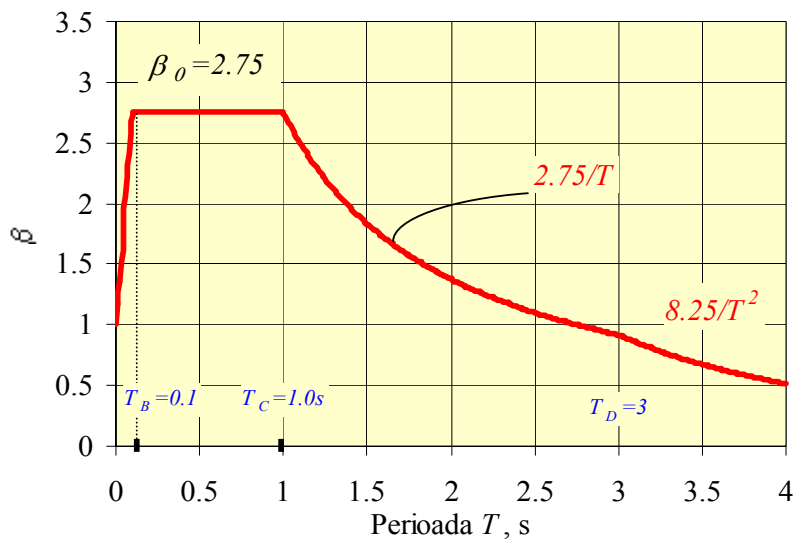
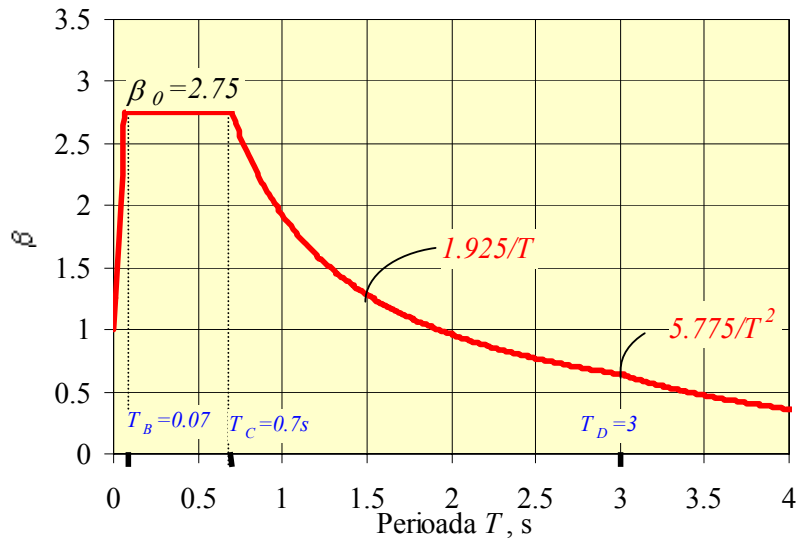
$\beta(T)$  este spectrul normalizat de răspuns elastic;

$\beta_0$  este factorul de amplificare dinamică maximă a accelerației orizontale a terenului de către structură;

$T$  este perioada de vibrație a unei structuri cu un grad de libertate dinamică și cu răspuns elastic.

$T_B$  și  $T_C$  sunt limitele domeniului de perioade în care accelerația spectrală are valorile maxime și este modelată simplificat printr-un palier de valoare constantă.

Spectrele normalizate de răspuns elastic ( $\xi=0.05$ ) pentru accelerație pentru condițiile seismice și de teren din România sunt reprezentate în Figura 3.



**Figura 3.** Spectre normalizate de raspuns 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  $T_C = 1.6s$ .

Componenta verticală a acțiunii seismice este reprezentată prin spectrul de răspuns elastic pentru accelerații pentru componenta verticală a mișcării terenului

Perioadele de control (colț) ale spectrelor de răspuns normalizate pentru componenta verticală a mișcării seismice se consideră simplificat astfel:

$$\begin{aligned}T_{Bv} &= 0,1 T_{Cv} \\ T_{Cv} &= 0,45 T_C \\ T_{Dv} &= T_D.\end{aligned}$$

Spectrul de răspuns elastic pentru componenta verticală a mișcării terenului în amplasament  $S_{ve}$  este definit astfel:

$$S_{ve}(T) = a_{vg} \beta_v(T).$$

Valoarea de vârf a accelerației pentru componenta verticală a mișcării terenului  $a_{vg}$  se evaluează ca fiind:

$$a_{vg} = 0,7 a_g.$$

### Spectrul de proiectare

Spectrul de proiectare pentru accelerații  $S_d(T)$  este un spectru de răspuns inelastic care se obține cu relațiile 3.17 și 3.18:

$$\begin{aligned}0 < T \leq T_B & \quad S_d(T) = a_g \left[ 1 + \frac{\beta_0 - 1}{q} \frac{T}{T_B} \right] \\ T > T_B & \quad = a_g \frac{\beta(T)}{q}.\end{aligned}$$

$S_d(T)$  se exprimă în  $m/s^2$ .

$T$  – perioada, în secunde.

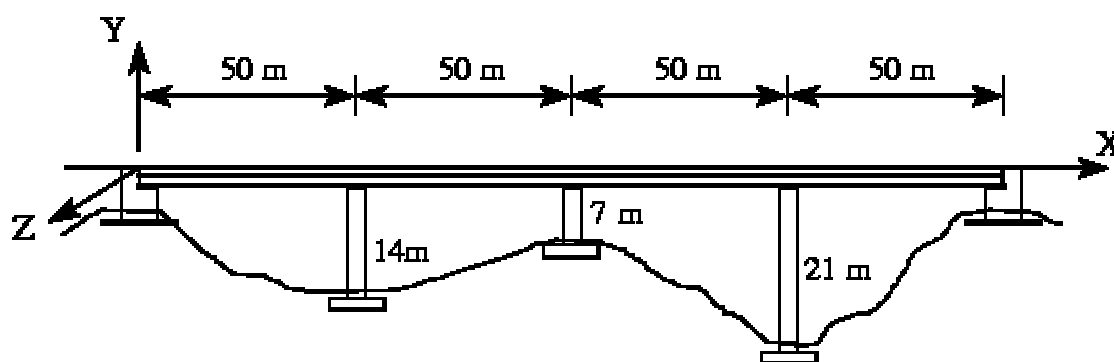
$q$  este factorul de comportare al structurii (factorul de modificare a răspunsului elastic în răspuns inelastic), cu valori în funcție de tipul structurii și capacitatea acesteia de disipare a energiei.

Valorile factorului de comportare  $q$  sunt indicate pentru diferite tipuri de materiale și de sisteme structurale în capitolele prezentului normativ.

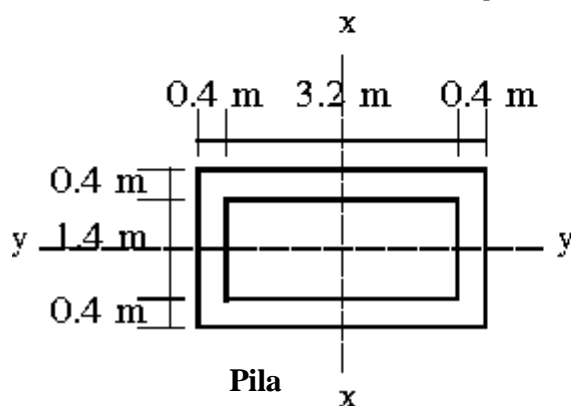
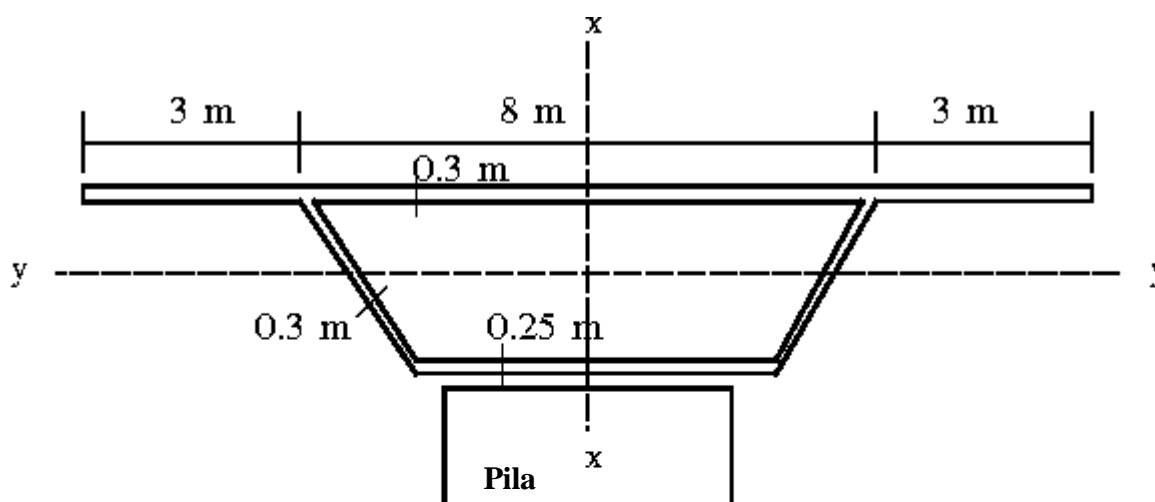
Valoarea factorului de comportare  $q$  poate fi diferită pe direcții orizontale diferite ale structurii, dar clasificarea ductilității trebuie să fie aceeași indiferent de direcția considerată.

Spectrul de proiectare pentru componenta verticală a mișcării seismice se obține în mod asemănător. Valoarea factorului de comportare în acest caz se consideră simplificat 1,5 pentru toate materialele și sistemele structurale, cu excepția cazurilor în care valori mai mari pot fi justificate prin analize speciale.

## Analiza Dinamică a unui pod cu izolatori seismici (reazeme elastice) la acțiuni seismice reprezentate prin Spectrul de accelerații



Elevație Pod



	Tablier	Pila
area(m <sup>2</sup> )	6.88	4.16
I <sub>x</sub> (m <sup>2</sup> )	87.24	7.39
I <sub>y</sub> (m <sup>2</sup> )	5.26	0.67
w(kN /m)	200	104

### Caracteristici geometrice Secțiuni transversale

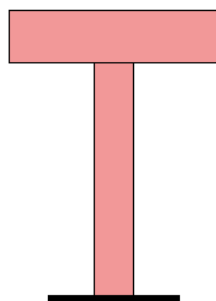
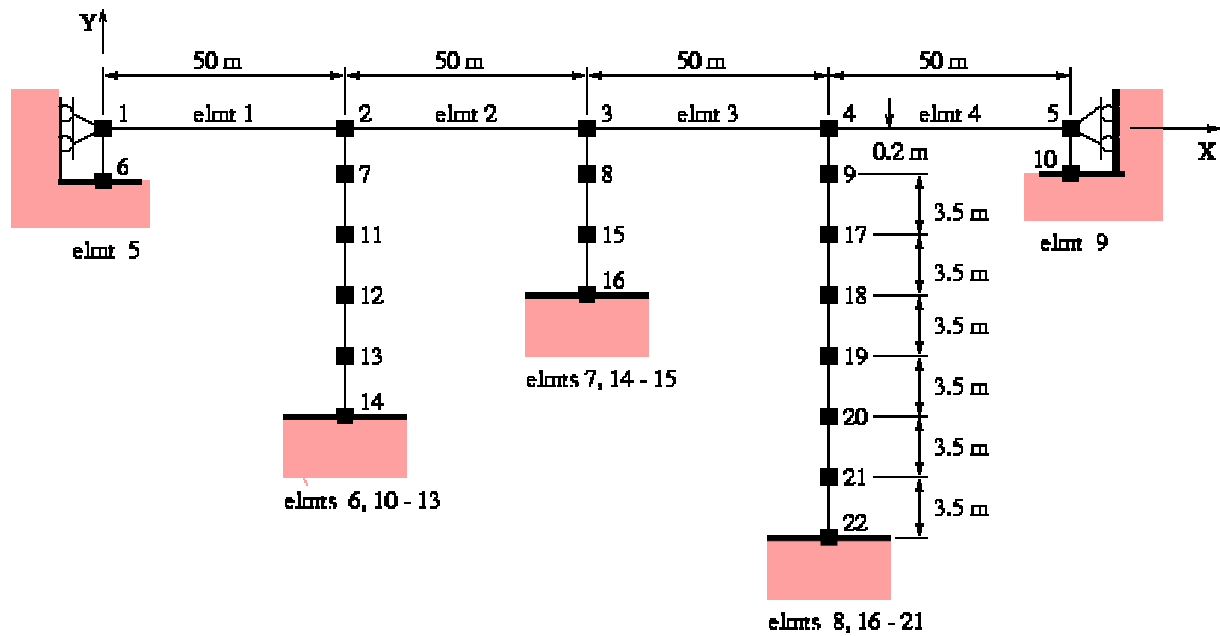
Material : Tablier și Pile - Beton armat

## Rigidități ale izolatorilor seismici

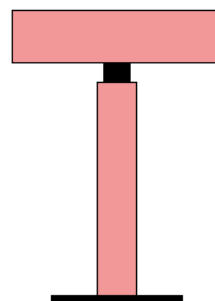
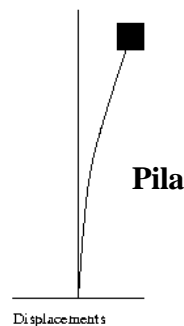
	Rigiditate secanta (kN/m)	Rez. la curgere (kN)
Izolatori 1 and 5	$K_o=5300 / K_v=100000$	2100
Izolator 2	$K_o=16100 / K_v=150000$	2100
Izolator 3	$K_o=11500 / K_v=150000$	2100
Izolator 4	$K_o=47000 / K_v=150000$	2100

### Modelul dinamic al structurii podului

Influență izolatorilor seismici (reazeme elastice) asupra modurilor de vibrare



Legături rigide



Legături elastice