

### 5.3.3. Combinarea efectelor componentelor acțiunii seismice

Acțiunea seismică asupra unei construcții este dată de componente de translație după trei axe ortogonale (două orizontale și una verticală). În general, efectele acțiunii seismice (deplasări laterale ale nodurilor structurii, eforturi și tensiuni în elementele structurale, etc.) se datorează ambelor componente ale acțiunii seismice. În Figura 5.9 se demonstrează acest aspect pe baza forței axiale dintr-un stâlp al structurii, care se consideră acționată doar de componentele orizontale ale acțiunii seismice ( $F_x$  și  $F_y$ ). Forțele seismice  $F_x$  generează efortul axial  $N_{1x}$ , iar componenta  $F_y$  a acțiunii seismice generează efortul axial  $N_{1y}$ . Efortul axial total, ca și efect al acțiunii seismice după ambele direcții orizontale este  $N_1$ . Efectele acțiunii seismice (valorile de vârf ale  $N_{1x}$  și  $N_{1y}$ ) din fiecare componentă orizontală pot fi determinate considerând structura acționată separat de o componentă a acțiunii seismice. Efectul total al ambelor componente orizontale ale acțiunii seismice ( $N_1$ ) nu este însă egal cu suma efectelor acțiunii seismice considerate separat după cele două direcții ( $N_{1x}$  și  $N_{1y}$ ) în cazul unui calcul cu forțe laterale sau un calcul spectral. Aceasta se datorează faptului că aceste metode de calcul estimează direct valoarea de vârf a efectului.

Valorile de vârf ale accelerației terenului pentru componentele orizontale ale mișcării seismice nu au loc la același moment de timp. Acest fenomen este exemplificat în Figura 5.10 pentru componentele N-S și E-W ale înregistrării seismice de la stația INCERC a cutremurului din 04.03.1997 din Vrancea. În plus, din cauza unor rigidități în general diferite pe cele două direcții orizontale, structura va avea perioade proprii de vibrație diferite pe cele două direcții. Deoarece răspunsul seismic în timp al unei structuri este influențat puternic de perioada proprie de vibrație (vezi Figura 3.3), efectele acțiunii seismice din diferite componente ale acțiunii seismice vor avea loc la momente de timp diferite.

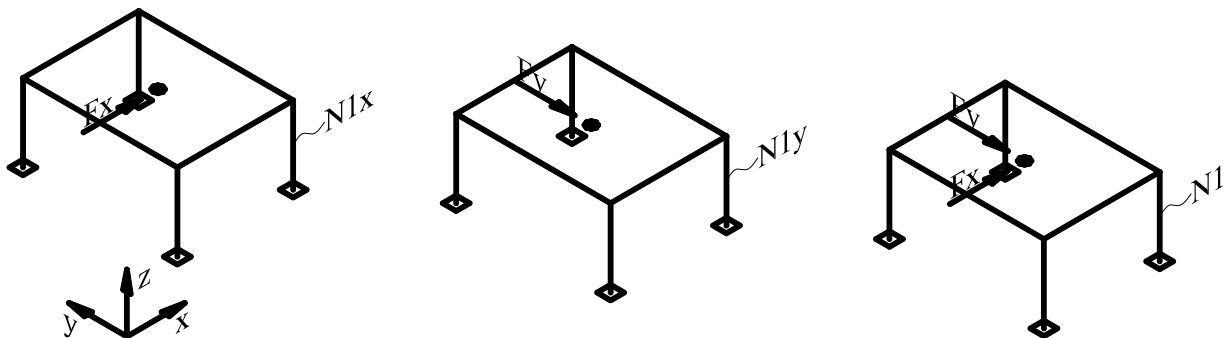


Figura 5.9. Exemplu de combinare a efectelor componentelor acțiunii seismice.

În concluzie, valorile de vârf ale efectelor din diferite componente ale acțiunii seismice nu sunt corelate statistic (nu se înregistrează la același moment de timp). De aceea, atunci când se folosesc metode de calcul care determină direct valorile de vârf ale efectelor acțiunii seismice, se va folosi o metodă de combinare a efectelor acțiunii seismice care să reflecte faptul că acele valori nu sunt corelate statistic. Normele de proiectare antisismică (ex. P100-1/2006 și Eurocode 8). Combinația efectelor componentelor orizontale ale acțiunii seismice poate fi realizată astfel:

- Se evaluează separat răspunsul structural pentru fiecare direcție de acțiune seismică
- Valoarea de vârf a efectului acțiunii seismice reprezentată prin acțiunea simultană a două componente orizontale ortogonale, se obține cu regula de combinare radical din suma pătratelor a fiecărei componente orizontale:

$$E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2} \quad (5.21)$$

unde:

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

$E_{Edy}$  reprezintă efectele acțiunii datorate aplicării mișcării seismice pe direcția axei orizontale  $y$ , perpendiculară pe axa  $x$  a structurii.

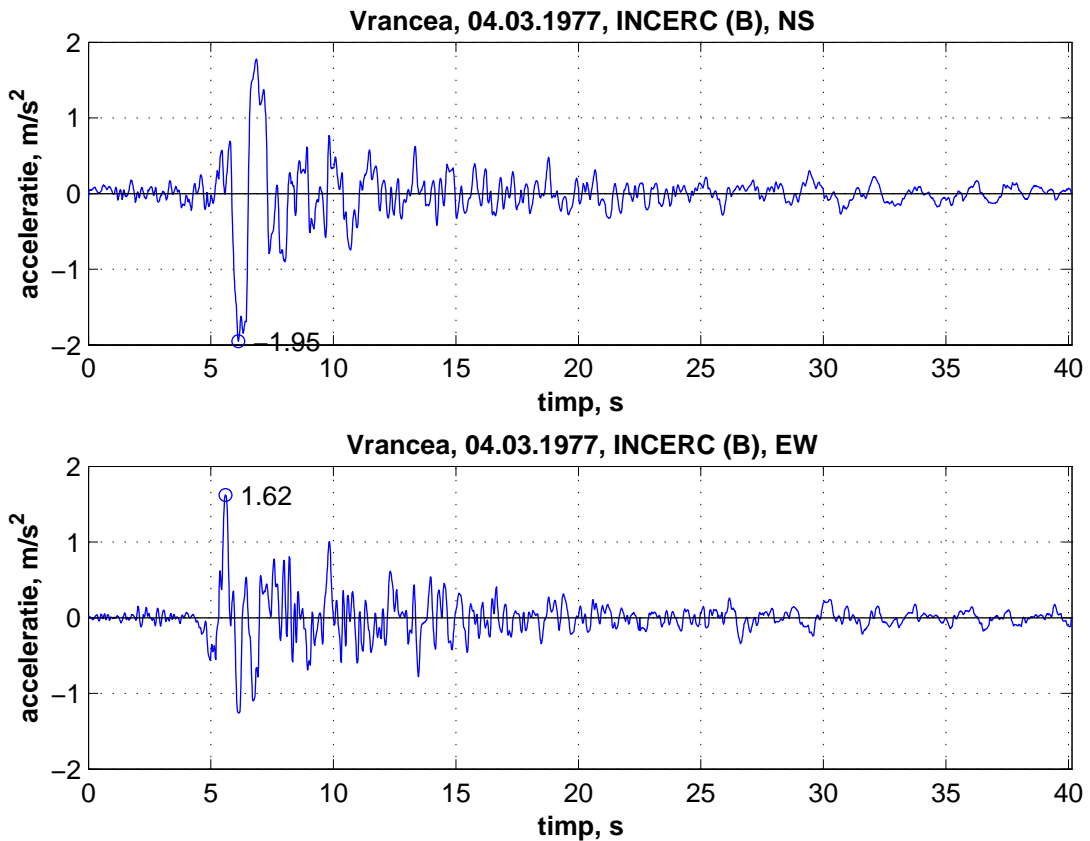


Figura 5.10. Componentele N-S și E-W ale înregistrării seismice de la stația INCERC a cutremurului din 04.03.1997 din Vrancea.

Ca o alternativă a metodei de mai sus, efectele acțiunii datorate combinației componentelor orizontale ale acțiunii seismice se pot calcula folosind următoarele combinații:

$$E_{Edx} + 0.3E_{Edy} \quad (5.22)$$

$$0.3E_{Edx} + E_{Edy} \quad (5.23)$$

unde "+" înseamnă "a se combina cu".

"Semnul fiecărei componente în combinațiile de mai sus se va lua astfel încât efectul acțiunii considerate să fie defavorabil. Pentru clădiri care satisfac criteriile de regularitate în plan și la care pereții sau sistemele independente de contravântuire verticală în plane asociate celor două direcții orizontale principale sunt singurele elemente care preiau efectele mișcării seismice, se poate considera acțiunea separată a cutremurului în cele două direcții orizontale principale fără a se face combinațiile (5.22) și (5.23)."

În cazul în care se ține cont și de componenta verticală a mișcării seismice, relațiile (5.21) - (5.23) devin:

$$E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2 + E_{Edz}^2} \quad (5.24)$$

$$0.3E_{Edx} + 0.3E_{Edy} + E_{Edz} \quad (5.25)$$

$$E_{Edx} + 0.3E_{Edy} + 0.3E_{Edz} \quad (5.26)$$

$$0.3E_{Edx} + E_{Edy} + 0.3E_{Edz} \quad (5.27)$$

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

Componenta verticală a mișcării seismice poate fi neglijată pentru majoritatea structurilor curente. Conform Eurocode 8, 2003, componenta verticală a mișcării seismice trebuie considerată atunci

când accelerația verticală de vârf a terenului depășește 0.25g, iar structura are una din următoarele caracteristici:

- conține elemente orizontale cu deschideri de peste 20 m
- conține elemente în console cu lungimea de peste 5 m
- conține elemente orizontale precomprimate
- conține stâlpi rezemați pe rigle
- este izolată la bază

#### 5.4. Conformarea antiseismică a structurilor

Prezicerea răspunsului seismic al structurilor la cutremure viitoare conține o doză mare de incertitudine. Aceasta se datorează în primul rând imposibilității de a cunoaște cu exactitate caracteristicile cutremurelor de pământ viitoare, iar în cel de-al doilea rând diferențelor dintre modele structurale folosite la proiectarea structurilor și comportării reale ale acestora. Una dintre aceste diferențe constă în faptul că proiectarea curentă folosește modele elastice a structurilor, în timp ce răspunsul structurilor sub acțiunea unui cutremur major este în domeniul inelastic. Evaluarea răspunsului seismic folosind metode de analiză statică în locul unei analize dinamice reprezintă o altă diferență majoră. Incertitudinea determinării răspunsului seismic al unei structuri este amplificată și de alte aspecte, printre care se numără imposibilitatea de a prezice cu exactitate valoarea și mai ales distribuția încărcărilor gravitaționale, aportul elementelor nestructurale la rigiditatea, rezistența și amortizarea structurii principale de rezistență. De aceea este foarte importantă o proiectare conceptuală a structurilor situate în zone seismice, care să asigure o comportare seismică corespunzătoare. Aspectele conceptuale de bază se referă la:

- simplitatea structurii
- uniformitate, simetrie și redundanță
- rezistență și rigiditate laterală în orice direcție
- rezistență și rigiditate la torsiune
- realizarea ca diafragme a planșeelor
- fundații adecvate

Realizarea unei structuri simple, compacte, pe cât posibil simetrice, reprezintă obiectivul cel mai important al proiectării, deoarece modelarea, calculul, dimensionarea, detalierea și execuția structurilor simple este supusă la incertitudini mult mai mici și, ca urmare, se poate impune construcției, cu un grad înalt de încredere, comportarea seismică dorită.

"Proiectarea seismică va urmări realizarea unei structuri cât mai regulate, distribuite cât mai uniform în plan, permițând o transmitere directă și pe un drum scurt a forțelor de inerție aferente maselor distribuite în clădire." Atunci când este necesară o formă în plan care nu este uniformă, structura poate fi împărțită prin intermediul unor rosturi antiseismice în unități independente structural (vezi Figura 5.11). Se va evita rezemarea stâlpilor pe grinzi (vezi Figura 5.12).

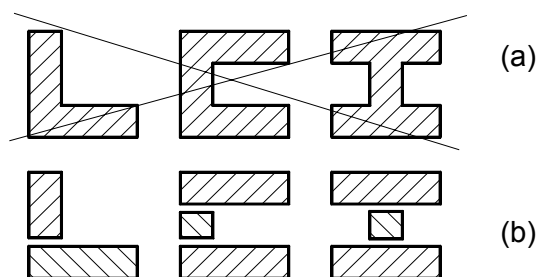


Figura 5.11. Forme ale structurilor neuniforme în plan (a) și transformarea acestora în forme uniforme prin dispunerea unor rosturi antiseismice (b).

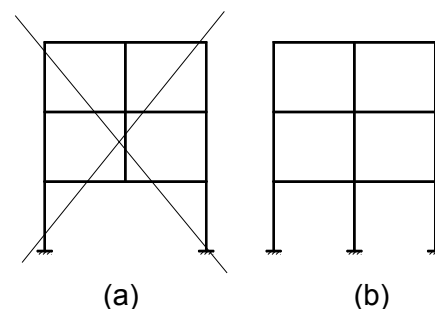


Figura 5.12. Rezemarea stâlpilor pe rigle – de evitat (a); cadru cu o conformare corespunzătoare (b).

Pe lângă uniformitatea în plan este necesară și o uniformitatea pe verticală, aceasta diminuând concentrarea eforturilor și a cerințelor de ductilitate în zone izolate ale clădirii. Nu doar forma clădirii trebuie să fie uniformă, ci și elementele structurale care asigură rigiditatea la forțe laterale

trebuie să fie dispuse cât mai uniform, pentru a permite excentricității cât mai mici și o redundanță sporită a structurii, care conduce la o capacitate sporită de disipare a energiei seismice în întreaga structură.

Deoarece mișcarea seismică are componente pe două direcții orizontale, structura trebuie să posede rigidități și rezistențe laterale similare pe cele două direcții principale ale structurii. Sisteme tipice de preluare a forțelor laterale sunt structurile în cadre necontravântuite (cu noduri rigide), cadrele contravântuite (de regulă cu noduri articulate) și pereții structurali (vezi Figura 5.13a-c). Cu excepția cadrelor necontravântuite cu noduri rigide, celelalte sisteme de preluare a forțelor laterale impun restricții de ordin arhitectural, existând în consecință limitări în dispunerea acestora în structură. În plus, sistemele de preluare a forțelor gravitaționale sunt în general mai puțin economice decât cele de preluare doar a forțelor laterale (vezi Figura 5.13d). De aceea, o structură tipică va conține atât un sistem de preluare a forțelor gravitaționale, cât și unul de preluare a forțelor laterale (vezi Figura 5.13e).

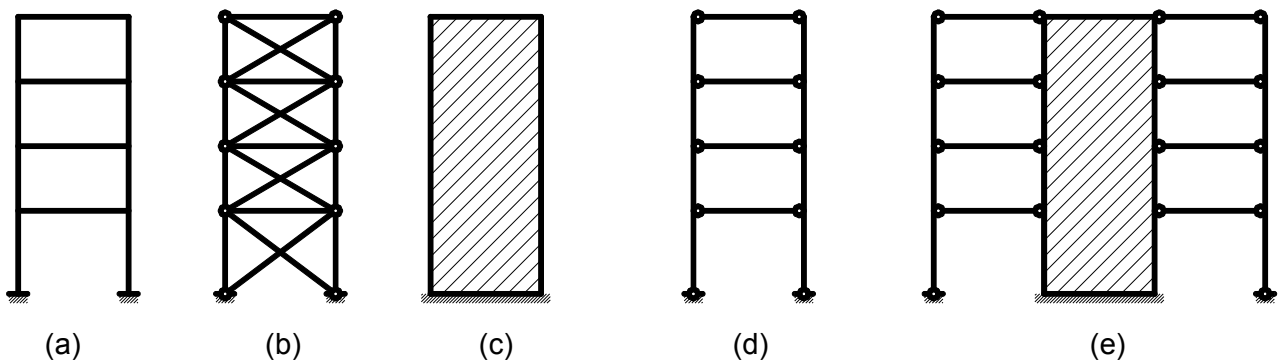


Figura 5.13. Sisteme de preluare a forțelor laterale: cadre necontravântuite cu noduri rigide (a), cadre contravântuite (b), pereți structurali (c); sistem de preluare a forțelor gravitaționale (d) și sistem combinat (e).

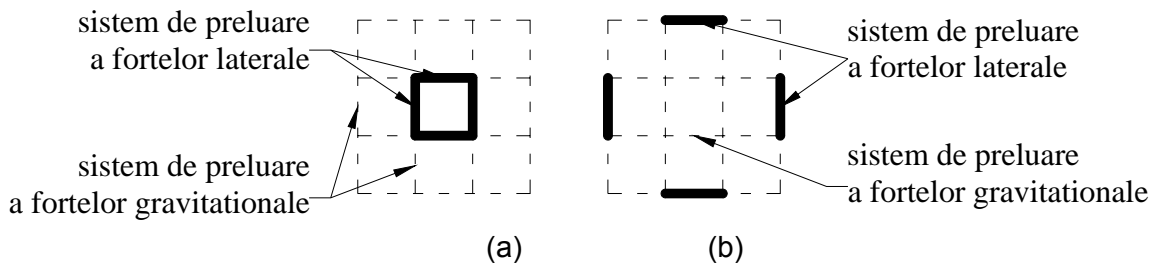


Figura 5.14. Structuri cu același număr de elemente de rezistență laterală: susceptibile la efectele de torsiune (a) și cu o rigiditate și rezistență sporite la efectele de torsiune (b).

Pe lângă rezistența și rigiditatea la forțe laterale, pentru o comportare adecvată la acțiunea seismică, 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 deformațiilor și eforturilor în elementele structurale. Sistemele de preluare a forțelor laterale trebuie dispuse pe cât posibil perimetral (vezi Figura 5.14), pentru a realiza structuri cu rigiditate și rezistență sporită la torsiune.

Dispunerea sistemelor de preluare a forțelor laterale trebuie să fie cât mai simetrică (vezi Figura 5.15a), pentru a asigura o diferență cât mai mică între centrul de rigiditate (CR) și centrul maselor (CM) al unei structurii. Forțele seismice sunt forțe de inerție, rezultanta cărora acționează în centrul de masă. Reacțiunea structurii însă acționează însă în centrul de rigiditate al structurii. Atunci când centrul de rigiditate coincide cu centrul de masă (Figura 5.15a), forțele seismice laterale care acționează pe o direcție oarecare induc o mișcare de translație uniformă a unui etaj al structurii. Dacă există o excentricitate între centrul de masă și cel de rigiditate (vezi Figura 5.15b), pe lângă componenta de translație, va exista și o componentă de rotație a planșeului. Acest efect conduce la creșteri ale deplasărilor la marginea flexibilă ( $\Delta_{2x}$  în Figura 5.15b) față de cele de la marginea rigidă ( $\Delta_{1x}$  în Figura 5.15b) pe direcția de aplicare a forței. În plus, vor apărea și componente de

translație pe direcția perpendiculară aplicării încărcării seismice ( $\Delta_{1y}$  și  $\Delta_{2y}$ ). Este de notat că excentricitatea între centrul de rigiditate și cel al maselor se poate datora atât unei distribuții neuniforme ale rigidității, cât și a maselor structurii.

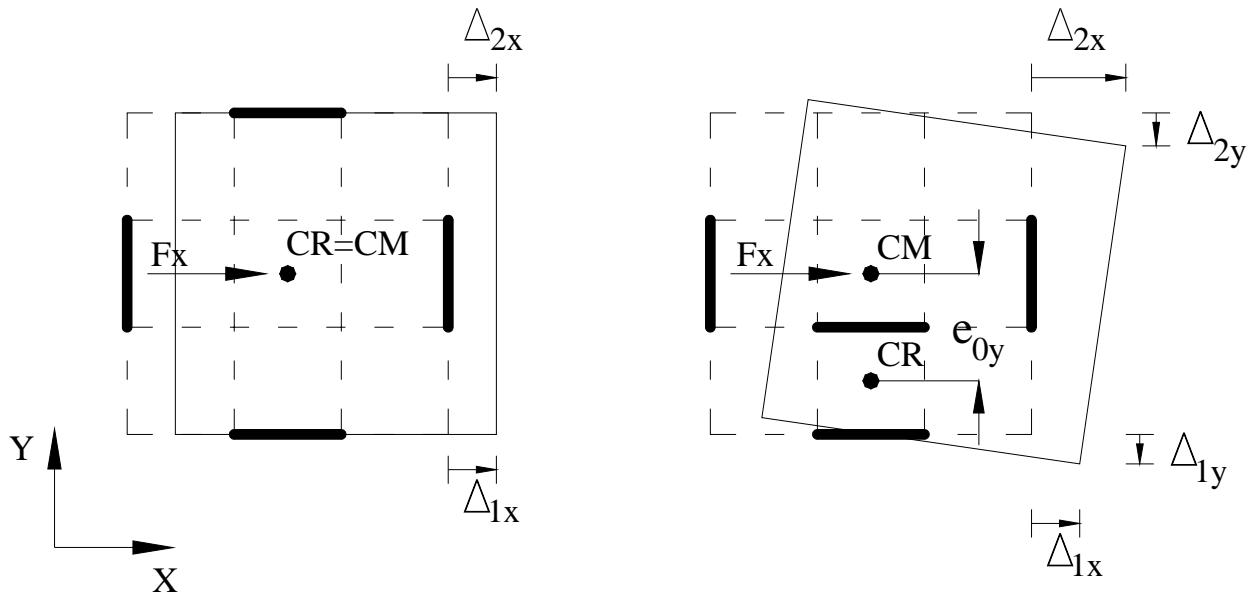


Figura 5.15. Planul unei structuri cu o dispunere simetrică a sistemelor de preluare a forțelor laterale (a) și cu o dispunere nesimetrică a acestora (b).

Planșeele structurilor multietajate joacă un rol foarte important în comportarea de ansamblu a structurii. La structurile compuse din sisteme de preluare a forțelor laterale combinate cu sisteme de preluare a forțelor gravitaționale (vezi Figura 5.14), efectul de diafragmă al planșeelor asigură transmiterea forțelor seismice către sistemele de preluare a forțelor laterale și asigură conlucrarea spațială a structurii. Efectul de diafragmă al planșeelor este deosebit de util în cazul structurilor cu o formă neregulată în plan și atunci când sisteme de preluare a forțelor laterale dispuse pe o direcție au rigidități diferite. Pentru a asigura efectul de diafragmă, planșeele (inclusiv acoperișul) structurilor trebuie să posede o rezistență și o rigiditate adecvate.

"Alcătuirea fundațiilor construcției și a legăturii acestora cu suprastructura trebuie să asigure condiția ca întreaga clădire să fie supusă unei excitații seismice cât mai uniforme. În cazul structurilor alcătuite dintr-un număr de pereți structurali cu rigiditate și capacități de rezistență diferite, infrastructurile de tip cutie rigidă și rezistentă sau de tip radier casetat sunt în general recomandabile. În cazul adoptării unor elemente de fundare individuale (directă sau la adâncime, prin piloți), este recomandabilă utilizarea unei plăci de fundație (radier) sau prevederea unor grinzi de legătură între aceste elemente, în ambele direcții." (P100-1/2006).

## 5.5. Criterii de regularitate structurală

### 5.5.1. Alegerea metodei de calcul structural

Normele de proiectare antiseismică conțin criterii care clasifică structurile în regulate și neregulate. Aceste criterii se referă atât la regularitatea în plan, cât și pe verticală. Clasificarea funcției de regularitatea structurilor are implicații asupra următoarelor aspecte:

- modelul structural, care poate fi plan sau spațial
- metoda de calcul structural, care poate fi metoda mai simplă a forțelor laterale sau metoda de calcul modal cu spectre de răspuns
- valoarea factorului de comportare  $q$ , care trebuie redusă în cazul structurilor neregulate pe verticală

În Tabelul 5.3 este prezentată sintetic relația dintre regularitatea structurală (în plan și pe verticală) și simplificările admise în calculul structural, precum și necesitatea reducerii factorului de comportare  $q$ . P100-1/2006 recomandă o reducere cu 20% a factorului de comportare de referință

în cazul structurilor neregulate pe verticală, și o reducere cu 30% în cazul structurilor neregulate atât pe verticală, cât și în plan.

Tabelul 5.3. Consecința regularității structurale asupra proiectării structurii (P100-1/2006).

Regularitate		Simplificare de calcul admisă		Factor de comportare pentru calcul elastic liniar ( $q$ )
În plan	Pe verticală	Model	Calcul elastic liniar	
Da	Da	Plan	* Forțe laterale echivalente	Valoarea de referință
Da	Nu	Plan	Modal	Valoare redusă
Nu	Da	Spațial	Modal	Valoarea de referință
Nu	Nu	Spațial	Modal	Valoare redusă

Notă: \*Numai dacă construcția are o înălțime de până la 30 m și o perioadă proprie  $T_1 < 1.50$  s.

O regularitate în plan a structurii implică o excentricitate mică între centrul masă și cel de rigiditate, adică efecte de torsiune reduse. În acest caz toate sistemele de preluare a forțelor laterale se încarcă în mod egal, ceea ce permite analiza fiecărui sistem de preluare a forțelor laterale în parte, adică folosirea unui model plan. La rândul său, o structură reprezentată de o schemă structurală plană, care este regulată pe verticală, are perioada proprie  $T_1 < 1.50$  s și are sub 30 m înălțime răspunde preponderent în primul mod propriu de vibrație, și de aceea poate fi analizată folosind metoda forțelor laterale. Dacă o structură este regulată în plan, dar nu și pe verticală, modelul plan mai este posibil, dar răspunsul total al acestuia are contribuții semnificative din modurile superioare de vibrație. De aceea, astfel de structuri pot fi analizate folosind modele plane, dar utilizând o analiză modală cu spectre de răspuns.

Structurile care nu sunt regulate în plan implică efecte de torsiune importante, și, în consecință, sistemele structurale de preluare a forțelor laterale se încarcă în mod neuniform. Determinarea aportului diverselor elemente structurale la preluare încărcării seismice totale se determină cel mai simplu folosind un model spațial al structurii și un calcul modal cu spectre de răspuns.

Factorul de comportare  $q$  reflectă capacitatea structurii de disipare a energiei seismice. Valoarea de referință a acestui factor depinde de ductilitatea și de suprarezistența structurii. Structurile care nu sunt regulate pe verticală sunt susceptibile la concentrări ale deformațiilor plastice în anumite părți ale structurii (o distribuție neuniformă a cerinței de ductilitate), ceea ce este echivalent cu o ductilitate redusă a structurii. Acest fapt implică necesitatea folosirii un factor de comportare  $q$  redus față de valoarea de referință.

### 5.5.2. Criterii de regularitate în plan

O structură regulată în plan trebuie să aibă o distribuție simetrică în plan a rigidității și maselor în raport cu două axe ortogonale. Configurația în plan trebuie să fie compactă, apropiată de o formă poligonală convexă. Atunci când există retrageri în plan, acestea nu trebuie să fie cât mai reduse (15% din aria totală conform P100-1/2006). Pentru a permite o distribuție a forțelor seismice la sistemele de preluare a forțelor laterale, rigiditatea în plan a planșeelor trebuie să fie suficient de mare pentru a permite modelarea acestora ca și diafragme rigide.

P100-1/2006 mai conține următoarea cerință pentru regularitatea în plan. La fiecare nivel, în fiecare din direcțiile principale ale clădirii, excentricitatea va satisface condițiile:

$$e_{ox} \leq 0.30 r_x \quad (5.28)$$

$$e_{oy} \leq 0.30 r_y \quad (5.29)$$

unde:

$e_{ox}$ ,  $e_{oy}$  – distanța între centrul de rigiditate și centrul maselor, măsurată în direcție normală pe direcția de calcul (vezi Figura 5.15)

$r_x$ ,  $r_y$  – rădăcina pătrată a raportului între rigiditatea structurii la torsiune și rigiditatea laterală în direcția de calcul

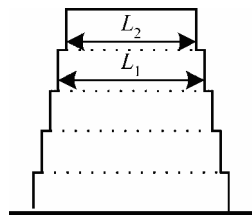
În cazul structurilor monotone pe verticală, rigiditatea laterală a componentelor structurale (cadre, pereți) se poate considera proporțională cu un sistem de forțe laterale cu o distribuție simplificată (vezi capitolul 5.3.1) care produce acestor componente o deplasare unitară la vârful construcției. Alternativ condițiilor date de relațiile (5.28) și (5.29), structura este considerată regulată, cu

sensibilitate relativ mică la răsucirea de ansamblu, dacă deplasarea maximă, înregistrată la o extremitate a clădirii este de cel mult 1.35 ori mai mare decât media deplasărilor celor două extremități." (P100-1/2006)

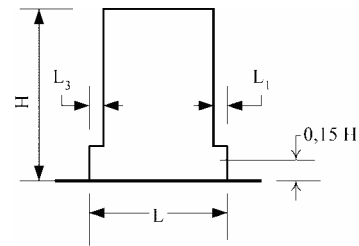
### 5.5.3. Criterii de regularitate pe verticală

Pentru ca o structură să fie considerată regulată pe verticală, ea trebuie să respecte condițiile următoare:

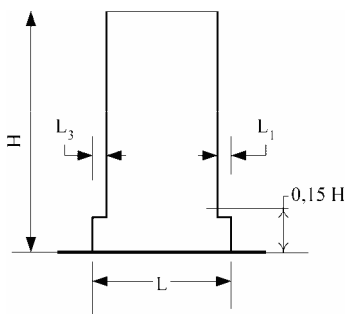
- Sistemele de preluare a forțelor laterale trebuie să se dezvolte fără întreruperi de la fundații până la ultimul nivel al structurii
- Masa și rigiditatea laterală a structurii trebuie să fie constante sau să se reducă gradual cu înălțimea
- La structurile în cadre nu trebuie să existe variații bruște ale raportului între rezistența necesară și cea capabilă la etaje adiacente



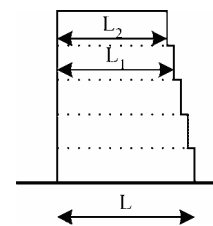
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.2$$



$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.2 \text{ (retrageri la o înălțime peste } 0.15H)$$



$$\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0.5 \text{ (retrageri la o înălțime sub } 0.15H)$$



$$\frac{L - L_2}{L} \leq 0.3$$

$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0.1$$

Figura 5.16. Criterii de regularitate pentru structuri cu retrageri pe înălțime (Eurocode 8, 2003).

Atunci când există retrageri, acestea trebuie să se încadreze în limitele exemplificate în Figura 5.16 (Eurocode 8, 3003).

### 5.6. Modelul structural

Pentru determinarea forțelor seismice se folosesc modele structurale care trebuie să reprezinte într-un mod adecvat distribuția de rigiditate și mase în structură. Atunci când se folosește o analiză inelastică, modelul structural trebuie să conțină și modelarea rezistenței elementelor structurale. În general, structura poate fi considerată ca fiind alcătuită din sisteme de preluare a forțelor gravitaționale și sisteme de preluare a forțelor laterale, conectate la nivelul planșeeilor.

Atunci când planșeele nu pot fi considerate infinit rigide în planul lor (de exemplu cazul planșeeilor de lemn, sau a celor de beton armat cu goluri de dimensiuni mari), masele distribuite în structură pot fi considerate concentrate în nodurile structurii, conform suprafeței aferente (vezi capitolul 4.1.3 și Figura 5.17a). În astfel de cazuri se pot neglija componentele de rotire ale maselor, în calculul structural considerându-se doar componentele de translație. Astfel, pentru un model spațial, în

fiecare nod al structurii se consideră concentrate componentele de translație după cele două direcții orizontale.

În cazul în care planșeele pot fi considerate infinit rigide în planul lor (de exemplu în cazul planșeelor de beton armat, cu o formă regulată și goluri de dimensiuni mici), masele aferente unui nivel pot fi concentrate în centrul de masă al aceluși nivel. Masele concentrate vor avea componente după direcțiile gradelor de libertate ale diafragmelor rigide (două translații în plan orizontal și o rotație față de axa verticală, vezi capitolul 4.1.3 și Figura 5.17b). Componentele de translație ale masei se determină însumând toate masele aferente nivelului respectiv:

$$M_x = M_y = \sum m_i \quad (5.30)$$

Componenta de rotație a masei de nivel  $M_{zz}$  poartă denumirea de moment de inerție al masei și se poate determina conform formulei:

$$M_{zz} = \sum m_i d_i^2 \quad (5.31)$$

unde  $d_i$  este distanța de la centrul de masă la masa concentrată discretă  $m_i$  (vezi Figura 5.17c). În cazul unei mase distribuite uniform pe o suprafață, momentul de inerție al masei se calculează ca și produsul dintre momentul de inerție polar și valoarea masei uniform distribuită pe suprafață.

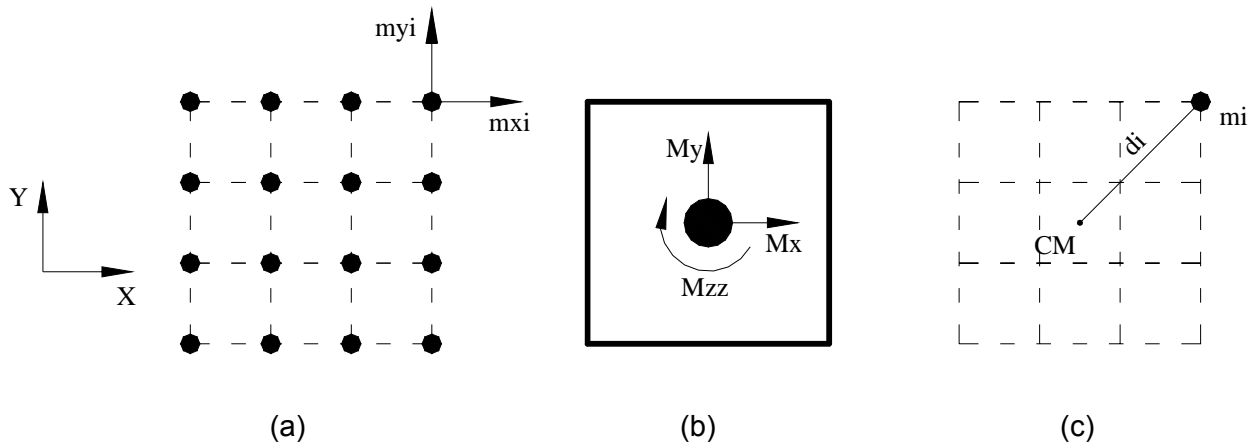


Figura 5.17. Concentrarea maselor în noduri la planșee flexibile (a); concentrarea masei în centrul de masă în cazul unor diafragme rigide (b); masa  $m_i$  și distanța  $d_i$  pentru calcul momentului de inerție al masei (c).

Structurile din beton armat, mixte oțel-beton și din zidărie care sunt proiectate să răspundă în domeniul inelastic în timpul unui cutremur de calcul, trebuie să reflecte rigiditatea redusă a elementelor structurale datorită fisurării betonului sau zidăriei.

Deformabilitatea fundației și/sau deformabilitatea terenului trebuie considerate, dacă acestea au o influență semnificativă asupra răspunsului structural.

### 5.7. Efectele de torsiune accidentală

În cazul construcțiilor cu planșee indeformabile în planul lor, efectele generate de incertitudinile asociate distribuției maselor de nivel și/sau a variației spațiale a mișcării seismice a terenului se consideră prin introducerea unei excentricități accidentale adiționale. Aceasta se consideră pentru fiecare direcție de calcul și pentru fiecare nivel și se raportează la centrul maselor. Excentricitatea accidentală se calculează cu expresia (vezi Figura 5.18):

$$e_{1i} = \pm 0.05 L_i \quad (5.32)$$

unde:

$e_{1i}$  excentricitatea accidentală a masei de la nivelul  $i$  față de poziția calculată a centrului maselor, aplicată pe aceeași direcție la toate nivelurile

$L_i$  dimensiunea planșeului perpendiculară pe direcția acțiunii seismice.



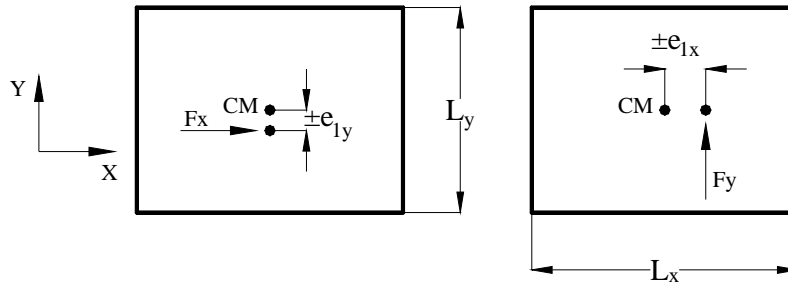


Figura 5.18. Definiția excentricității accidentale.

"În cazul în care pentru obținerea răspunsului seismic se utilizează un model spațial, efectul de torsiune produs de o excentricitate accidentală se poate considera prin introducerea la fiecare nivel a unui moment de torsiune:

$$M_{li} = e_{li} F_i \quad (5.33)$$

în care:

$M_{li}$  moment de torsiune aplicat la nivelul  $i$  în jurul axei sale verticale

$e_{li}$  excentricitate accidentală a masei de la nivelul  $i$  conform relației

$F_i$  forța seismică orizontală aplicată la nivelul  $i$

Momentul de torsiune se va calcula pentru toate direcțiile și sensurile considerate în calcul."

### 5.8. Clase de importanță și de expunere

Funcție de destinația construcțiilor, diferite structuri necesită nivele diferite de siguranță. Importanța construcțiilor depinde de consecințele prăbușirii asupra vieții oamenilor, de importanța lor pentru siguranța publică și protecția civilă în perioada de imediat după cutremur și de consecințele sociale și economice ale prăbușirii sau avarierii grave. P100-1/2006 specifică nivelul necesar al siguranței prin clasificarea structurilor în diferite clase de importanță și de expunere la cutremur. Fiecărei clase de importanță  $i$  se atribuie un factor de importanță  $\gamma_i$  (vezi Tabelul 5.4). Diferitele niveluri de siguranță se obțin multiplicând parametrii acțiunii seismice de referință cu factorul de importanță.

Tabelul 5.4. Clase de importanță și de expunere la cutremur pentru clădiri (P100-1/2006).

Clasa de importanță	Tipuri de clădiri	$\gamma_i$
I	Clădiri cu funcțiuni esențiale, a căror integritate pe durata cutremurelor este vitală pentru protecția civilă: stațiile de pompieri și sediile poliției; 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: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ clădiri de locuit și publice având peste 400 persoane în aria totală expusă</li> <li>▪ spitale, altele decât cele din clasa I, și instituții medicale cu o capacitate de peste 150 persoane în aria totală expusă</li> <li>▪ penitenciare</li> <li>▪ aziluri de bătrâni, creșe</li> <li>▪ școli cu diferite grade, cu o capacitate de peste 200 de persoane în aria totală expusă</li> <li>▪ auditorii, săli de conferințe, de spectacole cu capacități de peste 200 de</li> </ul>	1.2

	persoane ▪ clădirile din patrimoniul național, muzee etc.	
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

### 5.9. Combinarea acțiunii seismice cu alte tipuri de acțiuni

Combi-națiile de încărcări pentru verificarea structurilor se întocmesc conform CR0-2005. În cazul încărcării seismice, combinarea încărcărilor pentru verificarea la starea limită ultimă se face conform relației:

$$\sum_{j=1}^N G_{k,j} + \gamma_I A_{Ek} + \sum_{i=1}^N \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.34)$$

unde:

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

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

$A_{Ek}$  este valoarea caracteristică a acțiunii seismice ce corespunde intervalului mediu de recurență corespunzător SLU (IMR=100 în P100-1/2006)

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

$\gamma_I$  - coeficient de importanță (vezi Tabelul 5.4)

Tabelul 5.5. Coeficientul  $\psi_{2,i}$  pentru determinarea valorii cvasipermanente a acțiunii variabile (CR0-2005)

Tipul acțiunii	$\psi_{2,i}$
Acțiuni din vânt și acțiuni din variații de temperatură	0
Acțiuni din zăpadă și acțiuni datorate exploatarei	0.4
Încărcări în depozite	0.8

În combinația de încărcări pentru verificarea la SLU, încărcările permanente sunt introduse cu valoarea lor caracteristică. Încărcările variabile sunt considerate doar cu fracțiunea cvasipermanentă din încărcarea caracteristică. Această abordare reflectă probabilitatea foarte mică de producere a unui cutremur cu IMR corespunzător SLU concomitent cu atingerea valorii maxime a încărcării variabile. Acțiunile variabile care se consideră în combinația seismică sunt cele din zăpadă și din exploatare. Încărcările variabile din vânt și din variații de temperatură nu se combină cu acțiunea seismică ( $\psi_{2,i} = 0$  în acest caz).

Pentru a determina valoarea caracteristică a acțiunii seismice  $A_{Ek}$ , este necesară cunoașterea masei structurii. Aceste mase sunt cele care corespund încărcărilor gravitaționale (permanente și variabile) care intră în combinația de încărcări (5.34). Astfel, masele structurii pe baza cărora se determină  $A_{Ek}$  sunt cele corespunzătoare următoarelor încărcări:

$$\sum_{j=1}^N G_{k,j} + \sum_{i=1}^N \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.35)$$

### 5.10. Verificarea la SLU

Conform Eurocode 8 (2003) verificarea unei structuri la SLU necesită îndeplinirea următoarelor cerințe principale: rezistență, ductilitate, rezistența fundațiilor și rosturi seismice. P100-1/2006 impune suplimentar limitarea deplasărilor laterale de nivel.

#### 5.10.1. Condiția de rezistență

Condiția de rezistență implică verificarea elementelor structurale (și în unele cazuri a celor nestructurale) la eforturile de calcul determinate din combinația de încărcări corespunzătoare acțiunii seismice. Relația de verificare generică are forma:

$$E_d \leq R_d \quad (5.36)$$

unde:

$E_d$  – este valoarea de proiectare a efectului acțiunii, în combinația care conține acțiunea seismică  
 $R_d$  – valoarea corespunzătoare efortului capabil

În general, în calculul structural trebuie considerate și efectele de ordinul doi (calcul geometric nelinier). Într-un calcul geometric nelinier încărcările sunt aplicate pe forma deformată a structurii, iar eforturile și deplasările structurii sunt în general mai mari decât într-un calcul linier elastic. Efectele de ordinul doi sunt deosebit de importante în cazul acțiunii seismice, deoarece deplasările laterale sunt considerabile în acest caz, iar efectul acestora trebuie considerat în calcul. Totuși, efectele de ordinul doi pot fi neglijate dacă pentru fiecare nivel este îndeplinită următoarea condiție:

$$\theta = \frac{P_{tot} d_r}{V_{tot} h} \leq 0.10 \quad (5.37)$$

unde:

$\theta$  coeficientul 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 cea inferioară nivelului considerat, determinată pe baza deplasărilor corespunzătoare SLU - calculate conform relației (5.38)  
 $V_{tot}$  forța tăietoare totală de nivel  
 $h$  înălțimea nivel

"Dacă  $0.1 < \theta \leq 0.2$ , efectele de ordinul doi pot fi luate în considerare în mod aproximativ, multiplicând valorile de calcul ale eforturilor cu factorul  $1/1-\theta$ . Dacă  $0.2 < \theta < 0.3$  determinarea valorilor eforturilor secționale se face pe baza unui calcul structural cu considerarea echilibrului pe poziția deformată a structurii (printr-un calcul de ordinul doi consecvent). Nu se admit valori  $\theta \geq 0.3$ ". (P100-1/2006).

### 5.10.2. Limitarea deplasărilor laterale la SLU

Calculul deplasărilor laterale pentru SLU se face cu relația:

$$d_s = c q d_e \quad (5.38)$$

unde:

$d_s$  deplasarea unui punct din sistemul structural ca efect al acțiunii seismice  
 $q$  factorul de comportare specific tipului de structură  
 $d_e$  deplasarea aceluiași punct din sistemul structural, determinată prin calcul static elastic sub încărcări 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 structuri cu perioada de oscilație mai mică decât  $T_C$  (vezi capitolul 3.6.3 și Figura 3.17)

Valorile coeficientului  $c$  se determină conform relației:

$$1 \leq c = 3 - 2.5 \frac{T}{T_C} \leq 2 \quad (5.39)$$

unde  $T$  este perioada proprie fundamentală de vibrație a structurii.

Conform P100-1/2006, verificarea deplasărilor relative de nivel la starea limită ultimă are drept scop evitarea pierderilor de viați omenești prin prevenirea prăbușirii totale a elementelor nestructurale. Se urmărește deopotrivă realizarea unei marje de siguranță suficiente față de stadiul cedării elementelor structurale. Verificarea la deplasare se face pe baza expresiei:

$$d_r^{ULS} = c q d_{re} \leq d_{r,a}^{ULS} \quad (5.40)$$

unde:

$d_r^{ULS}$  deplasarea relativă de nivel sub acțiunea seismică asociată SLU  
 $d_{re}$  deplasarea relativă de nivel, determinată prin calcul static elastic din încărcări seismice de proiectare

$d_{r,a}^{ULS}$  valoare admisibilă a deplasării relative de nivel, egală cu  $0.025h$  (unde  $h$  este înălțimea de nivel)

În Figura 5.19a este prezentată relația dintre forța laterală totală și deplasarea unui nod al unei structuri multietajate. Deplasarea corespunzătoare încărcării seismice de proiectare  $F_e$  este  $d_e$ . Aceste forțe și deplasări sunt determinate pe baza spectrului de proiectare, redus prin intermediul factorului  $q$  față de spectrul elastic. Dacă structura ar avea un comportament infinit elastic, acțiunii seismice nereduse i-ar corespunde forța elastică  $qx F_e$  și deplasarea  $qxd_e$ . Atunci când perioada fundamentală a structurii este mai mare decât perioada de control  $T_C$  a spectrului de răspuns, deplasările elastice sunt egale cu cele inelastice ( $d_s=qxd_e$ ), coeficientul  $c$  având valoarea 1. Dacă perioada proprie de vibrație a structurii este mai mică decât perioada de control  $T_C$  a spectrului de răspuns, deplasările inelastice sunt mai mari decât cele elastice ( $d_s=cxqxd_e$ ), coeficientul  $c$  având valori supraunitare.

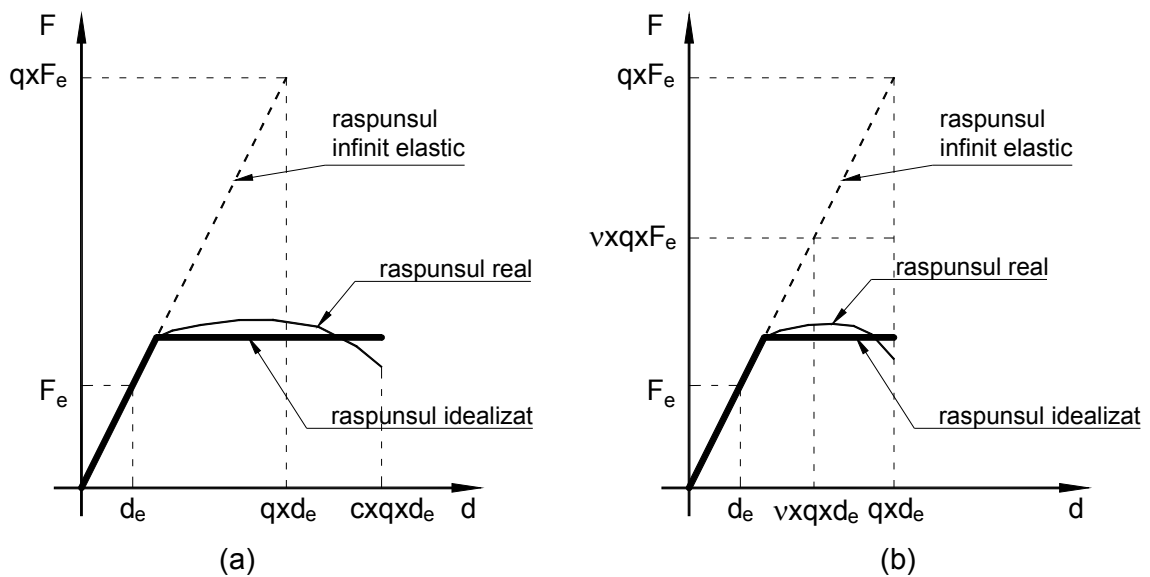


Figura 5.19. Calculul deformațiilor la SLU (a) și la SLS (b).

### 5.10.3. Verificarea ductilității locale și globale

Componenta principală a factorului de comportare  $q$  se datorează ductilității structurii. Factorii de comportare  $q$  pe care se bazează determinarea forțelor seismice de calcul sunt specificați în normele de proiectare antisismică funcție de material, tipul structurii (și poate fi afectat de regularitatea pe verticală a structurii). Structura proiectată trebuie să posede ductilitatea locală și globală pe care s-a bazat determinarea factorilor de comportare  $q$ .

Cerințele de ductilitate locală (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, corespunzătoare unui mecanism plastic global (vezi Figura 5.20a). Acest mecanism asigură un număr maxim de zone plastice și o disipare uniformă a energiei seismice în întreaga structură. Trebuie evitate mecanismele plastice de nivel (vezi Figura 5.20b), deoarece în acest caz energia seismică este disipată într-un număr redus de zone plastice. În plus, la aceeași deplasare globală a structurii  $\delta$ , elementele structurale care participă la formarea unui mecanism plastic de nivel suferă deformații plastice mai mari decât cele care participă la formarea unui mecanism plastic global.

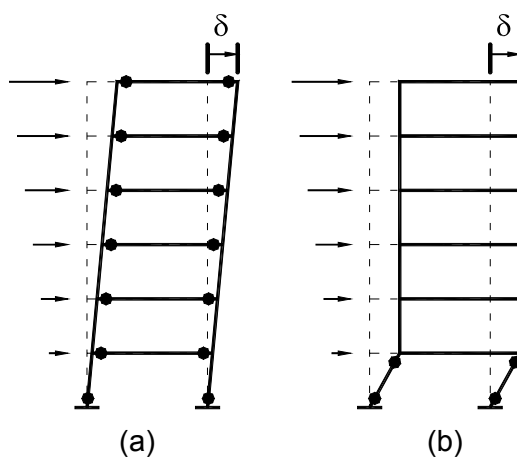


Figura 5.20. Mecanism plastic global (a) și mecanism plastic de nivel (b).

#### 5.10.4. Rezistența fundațiilor

Reacțiunile în fundații determinate pe baza forțelor seismice de proiectare sunt mai mici decât cele care vor apărea în cazul unui cutremur corespunzător SLU, deoarece acestea au fost determinate pe baza spectrului de proiectare. În consecință, dimensionarea fundațiilor și a prinderilor elementelor structurale în fundații trebuie dimensionate în ipoteza că elementele structurale adiacente acestora au intrat în domeniul plastic. Eforturile de calcul trebuie să considere și efectele suprazistenței elementelor structurale adiacente fundațiilor.

#### 5.10.5. Rosturi seismice

"Rosturile seismice se prevăd cu scopul de a separa între ele corpuri de construcție cu caracteristici dinamice diferite pentru a le permite să oscileze independent sub acțiunea mișcărilor seismice sau pentru a limita efectele eventualelor coliziuni, la un nivel situat sub capacitatea de rezistență a acestor clădiri, dimensionate în ipoteza unei comportări independente." (P100-1/2006)

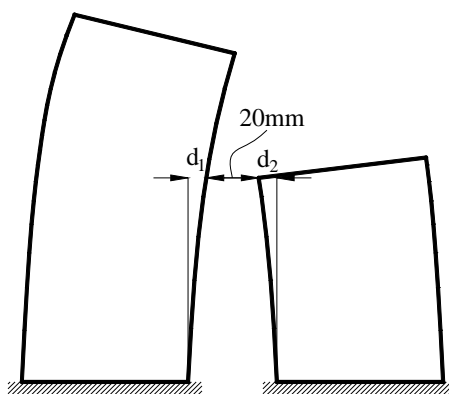


Figura 5.21. Rostul seismic necesar între două clădiri.

În cazul clădirilor cu caracteristici dinamice diferite, dimensiune rostului dintre cele două clădiri se stabilește pe baza relației (vezi Figura 5.21):

$$\Delta = d_1 + d_2 + 20 \text{ mm} \quad (5.41)$$

unde:  $\Delta$  este lățimea necesară a rostului seismic;  $d_1$ ,  $d_2$  sunt deplasările maxime ale celor două clădiri sub acțiunea încărcărilor seismice orizontale la nivelul extremităților superioare a corpului de clădire cu înălțimea mai mică, deplasări calculate conform relației (5.38).

#### 5.11. Verificarea la SLS

"Verificarea la starea limita de serviciu are drept scop menținerea funcțiunii principale a clădirii în urma unor cutremure, ce pot apărea de mai multe ori în viața construcției, prin limitarea degradării

elementelor nestructurale și a componentelor instalațiilor construcției. Prin satisfacerea acestei condiții se limitează implicit și costurile reparațiilor necesare pentru aducerea construcției în situația premergătoare seismului." (P100-1/2006).

Calculul deplasărilor laterale pentru SLS se face cu relația:

$$d_s = \nu q d_e \quad (5.42)$$

unde:

- $d_s$  deplasarea unui punct din sistemul structural ca efect al acțiunii seismice la SLS
- $q$  factorul de comportare specific tipului de structură
- $d_e$  deplasarea aceluiași punct din sistemul structural, determinată prin calcul static elastic sub încărcări seismice de proiectare
- $\nu$  factor de reducere care ține seama de intervalul de recurență al acțiunii seismice asociat verificărilor pentru SLS. Pentru structuri din clasa de importanță III și IV, P100-1/2006 prevede o valoare  $\nu=0.5$ .

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

$$d_r^{SLS} = \nu q d_{re} \leq d_{r,a}^{SLS} \quad (5.43)$$

unde:

- $d_r^{SLS}$  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
- $d_{r,a}^{SLS}$  valoarea admisă a deplasării relative de nivel.

Pentru clădiri cu elemente nestructurale din materiale fragile atașate structurii:

$$d_{r,a}^{SLS} = 0.005h \quad (5.44)$$

Pentru clădiri având elemente nestructurale fixate astfel încât nu afectează deformațiile structurale sau având elemente nestructurale cu deformabilitate înaltă:

$$d_{r,a}^{SLS} = 0.008h \quad (5.45)$$

unde  $h$  este înălțimea de nivel.

În Figura 5.19b este prezentată relația dintre forță laterală totală și deplasarea unui nod al unei structuri multietajate. Deplasarea corespunzătoare încărcării seismice de proiectare  $F_e$  este  $d_e$ . Aceste forțe și deplasări sunt determinate pe baza spectrului de proiectare, redus prin intermediul factorului  $q$  față de spectrul elastic. Dacă structura ar avea un comportament infinit elastic, acțiunii seismice nereduse i-ar corespunde forța elastică  $qx F_e$  și deplasarea  $qx d_e$ . Deoarece intervalul mediu de recurență corespunzător SLS este mai mic decât cel corespunzător SLU, forțele seismice corespunzătoare SLS vor fi mai mici decât cele corespunzătoare SLU. Valoarea forțelor seismice corespunzătoare SLS va fi, astfel,  $\nu qx F_e$ , iar a deplasărilor corespunzătoare:  $d_s = \nu qx d_e$ . Acest raționament, care explică relația (5.42) se bazează pe principiul deplasărilor egale și este corectă în mod riguros numai pentru structuri cu perioada proprie fundamentală mai mare decât  $T_C$ . Cu toate acestea, din motive de

Este de menționat faptul că verificarea la SLS cuprinde doar limitarea deplasărilor relative de nivel, care au o legătură directă cu limitarea degradărilor structurale. Aceste verificări nu limitează în mod direct degradările nestructurale ale construcțiilor.