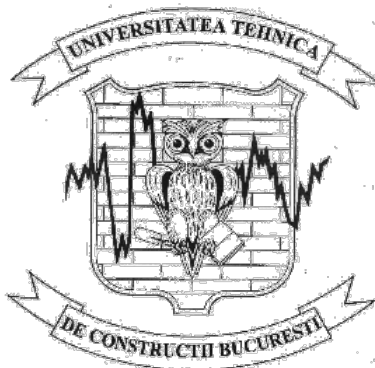


**UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI**

**Facultatea de Construcții Civile, Industriale și Agricole**



**TEZĂ DE DOCTORAT**  
**Rezumat**

**Studiu privind aplicarea proiectării seismice  
bazate pe deplasare la structuri  
în cadre de beton armat**

**Doctorand**

**ing. Mihai - Alin Mîndoiu**

**Coordonator științific**

**Prof. univ. dr. ing. Tudor POSTELNICU**

**BUCUREȘTI**

**2016**

## CUPRINS

1. Introducere .....	3
1.1. Stadiul practicii proiectării seismice a construcțiilor în cadre de beton armat .....	3
1.2. Obiective .....	4
2. Sinteză critică a expresiilor empirice și analitice pentru determinarea rotirii capabile a elementelor de beton armat .....	6
2.1. Analiza bazei de date .....	6
2.1.1. Bază de date pentru grinzi .....	7
2.1.2. Analiza întregii baze de date pentru stâlpi .....	12
3. Procedeu de evaluare a rotirii elementelor de beton armat în funcție de cerința de drift .....	16
3.1. Obiective .....	16
3.2. Descrierea procedurii .....	16
3.3. Modelarea pentru calculul dinamic neliniar .....	16
3.4. Rezultatele obținute din calculul dinamic neliniar.....	17
3.5. Determinarea cerinței de rotire .....	20
3.5.1. Formule pentru determinarea cerinței de rotire a grinzilor și stâlpilor pentru DCH .....	20
3.5.2. Formule pentru determinarea cerinței de rotire a grinzilor și stâlpilor pentru DCM.....	20
3.6. Reprezentarea grafică a formulelor pentru cerința de rotire .....	20
3.6.1. Determinarea cerinței de rotire la moment negativ (DCH).....	21
4. Procedeu de dimensionare a armăturii transversale a elementelor structurilor în cadre de beton armat în funcție de cerința de rotire .....	24
4.1. Sinteza rezultatelor .....	24
4.2. Comparație între rezultatele furnizate de formulele propuse și calculul dinamic neliniar. ....	24
5. Concluzii. Contribuțiile lucrării.....	30
6. Direcții viitoare de cercetare.....	32
7. Bibliografie .....	33

# 1. INTRODUCERE

## *1.1. Stadiul practicii proiectării seismice a construcțiilor în cadre de beton armat*

În ultimii 30 de ani proiectarea seismică bazată pe deplasare a înlocuit proiectarea de tip tradițional bazată pe forțe.

Filosofia proiectării bazate pe forțe constă în a determina un set de forțe laterale cu care va fi încărcată structura pentru a obține eforturile de proiectare pentru elementele acesteia.

Cel mai important avantaj al proiectării bazate pe forțe îl constituie simplitatea metodei în aplicarea acesteia. Analizând și modul de determinare al forței tăietoare de bază din P100-1/2013

[1],  $F_b = \gamma_{1,e} \frac{a_g \beta(T)}{q} m \lambda$ , aceasta depinde de perioada proprie de vibrație, capacitatea de deformare

a structurii (definită de factorul de comportare,  $q$ ) și masa structurii. Mai mult, sistemul de forțe reprezintă instrumentul principal cu ajutorul căruia s-au calculat inițial structurile la diferite acțiuni (calculul gravitațional, calculul la vânt, calculul la împingerea pământului), astfel că inginerii sunt obișnuiți cu “proiectarea bazată pe forțe”. În cazul aplicării acestei metode, perioada proprie de vibrație se calculează cu rigiditatea inițială, metodă care este folosită în majoritatea codurilor de proiectare.

Metodele de proiectare bazate pe deplasare iau în considerare parametrul cel mai semnificativ de care depinde răspunsul seismic și anume deplasarea laterală. Explicația este că de nivelul deplasărilor/deformațiilor depind degradările structurale și nestructurale ale construcției.

Metodele bazate pe deplasare cunosc în practica de proiectare diverse forme de abordare având un caracter mai riguros sau mai aproximativ. Una dintre aceste metode, considerată cea mai rațională prin raportul rigurozitate-aplicabilitate în proiectare, folosește spectrul de deplasare pentru a calcula forța tăietoare de bază. Metoda transformă structura reală cu mai multe grade de libertate (MODF) într-un sistem cu un singur grad de libertate dinamică (SDOF) care este caracterizat de rigiditatea secantă și de o amortizare echivalentă. Filosofia de proiectare a acestei metode constă în a nu depăși o deplasare asociată unei anumite stări limită (de exemplu driftul din P100-1/2013 [1] pentru diferite stări limită). Sistemului cu un singur grad de libertate i se asociază o deplasare țintă de proiectare, o deplasare de curgere (de aici rezultând și factorul ductilități de deplasare), un factor de amortizare, o perioadă efectivă, o masă efectivă și o rigiditate secantă.

În general, normele de proiectare au în vedere mai multe niveluri de performanță legate de comportarea la acțiunea cutremurelor (condiții de deformație).

Astfel, codul american FEMA356 [22] prevede 4 niveluri de performanță: operațional (operational), ocupare imediată (immediate occupancy), siguranța vieții (life safety), prevenirea prăbușirii (collapse prevention). Codul european EN 1998-3 [15] prevede 3 stări limită de degradare: starea limită de prevenire a prăbușirii, starea limită de degradare semnificativă și starea limită de limitare a degradărilor. Codul românesc de proiectare seismică P100-1/2013 [1] definește 2 stări limită, starea limită de serviciu și starea limită ultimă.

Asigurarea la cea mai importantă stare limită (SLU), în viziunea concepției din codul românesc, se realizează prin proiectarea la capacitate, având ca principal obiectiv dezvoltarea unui mecanism favorabil de disipare de energie prin detalierea corespunzătoare a zonelor critice prin condiții constructive și de calcul.

Pentru structurile în cadre de beton armat, există și tendința de a efectua verificarea explicită. Astfel, EN1998-1 [11] introduce expresii de calcul pentru dimensionarea armăturii transversale din zonele critice funcție de factorul ductilității de curbură.

P100-1/2013 [1] furnizează formule pentru determinarea cerinței și capacității ale elementelor unei structuri în cadre de beton armat. Astfel, cerințele de rotire în articulațiile plastice sunt calculate aproximativ, plecând de la calcul în domeniul elastic, prin înmulțirea driftului unghiular sub forțele de cod cu factorul  $cq$ . Capacitatea de rotire în articulațiile plastice ale grinzilor și stâlpilor sunt alese ca valori fixe indiferent de alcătuirea, conformarea sau nivel de solicitare și au fost stabilite pe baza unor analize limitate.

Formula din EN1998-1 [11] furnizează, cel puțin pentru perioade fundamentale scurte și/sau perioade de colț mari, valori excesive ale coeficientului mecanic de armare transversală, care în multe situații nu se poate realiza fizic.

P100-1/2013 [1] stabilește valori fixe pentru evaluarea capacității de rotire în articulațiile plastice, indiferent de caracteristicile geometrice, de starea de eforturi sau de particularitățile de armare ale secțiunii. De aici pot rezulta de multe ori valori neacoperitoare pentru verificarea raportului capacitate/cerință de rotire.

Pentru că aceste două proceduri sunt discutabile, rezultă necesitatea unui studiu mai amplu care să urmărească măsura în care acestea corespund sau nu realității prin stabilirea unor formule pentru determinarea capacității, respectiv a cerinței de rotire în articulațiile plastice pentru elementele structurilor în cadre de beton armat.

## ***1.2. Obiective***

Se dorește evaluarea mai precisă atât a cerințelor cât și a capacităților de rotire prin formule stabilite pe baze raționale. Capacitatea de rotire este stabilită prin analizarea rezultatelor mai multor încercări experimentale iar cerința de rotire este stabilită prin analiza răspunsului dinamic neliniar pentru o varietate de cadre plane.

Capitolele lucrării de doctorat sunt dedicate studiului diferitelor componente ale procedurii propus și validării acestuia prin controlul aplicării în proiectarea curentă.

În capitolul 2 este fundamentată o formulă de calcul pentru determinarea rotirii capabile a stâlpilor și grinzilor. În acest scop se întocmește o bază de date proprie folosind anumite criterii prezentate în capitolul accesând o bază de date a universității Patras din Grecia ce conține încercări experimentale. Se întocmesc diagrame de dispersie a rotirii ultime în funcție de anumiți parametri selectați (forța axială adimensionalizată, procentul de armare transversală, procentul de armare

longitudinală, raportul dintre deschiderea de forfecare și înălțimea secțiunii) și pe baza regresiei liniare se stabilește o formulă de calcul funcție de parametrii cei mai importanți.

În capitolul 3 se propune o formulă pentru determinarea cerinței de rotire. În acest scop se dimensionează cadre folosind metoda forțelor seismice echivalente, de diferite regimuri de înălțime, amplasate în zone caracterizate de diferite perioade de colț și accelerații de proiectare ale terenului. Aceste cadre sunt analizate ulterior folosind calculul dinamic neliniar pentru a obține cerințele de rotire la capetele grinzilor și la baza stâlpilor. Se întocmesc diagrame de dispersie a raportului rotire/drift funcție de perioada fundamentală a structurii, perioada de colț și accelerația de proiectare a terenului. Utilizând regresia liniară se stabilește o formulă pentru determinarea cerinței de rotire funcție de parametrii enumerați.

Capitolul 4 conține o sinteză a celor două capitole anterioare. Este prezentat un procedeu pentru determinarea armăturii transversale în zonele critice pentru grinzi și stâlpi de beton armat aparținând structurilor în cadre.

În capitolul 5 sunt proiectate două tipuri de cadre având trei regimuri de înălțime diferite și se prezintă comparația raportului capacitate/cerință de rotire calculat conform codului de proiectare seismică P100-1/2013 [1] și conform formulelor propuse.

De asemenea, se realizează o comparație între procentul de armare rezultat în urma aplicării procedurii furnizat de codul de proiectare seismică EN1998-1 [11] și cel furnizat conform procedurii propus de dimensionare a armăturii transversale.

În capitolul 6 se prezintă sinteza rezultatelor lucrării și se formulează concluziile principale ale lucrării de doctorat.

## 2. SINTEZĂ CRITICĂ A EXPRESIILOR EMPIRICE ȘI ANALITICE PENTRU DETERMINAREA ROTIRII CAPABILE A ELEMENTELOR DE BETON ARMAT

### 2.1. Analiza bazei de date

Toate informațiile și înregistrările experimentale au fost colectate din baza de date a universității din Patras, Grecia (<http://www.dap.series.upatras.gr/default.aspx>). Această bază centralizează probabil cel mai mare număr de experimente la nivel mondial și este într-o continuă creștere deoarece la aceasta poate contribui orice cercetător cu încercările personale.

Verificarea performanțelor relațiilor de calcul existente în codurile de proiectare și în literatura de specialitate care stabilesc valoarea rotirii capabile a elementelor de beton armat nu poate fi făcută decât comparând valorile obținute cu ajutorul acestor ecuații cu valorile obținute din teste reale. În acest scop s-a procedat la întocmirea unei baze de date cu valori experimentale pentru grinzi și o bază de date cu valori experimentale pentru stâlpi.

Rezultatele acestei comparații sunt prezentate în continuare. Indicatorii de identificare folosiți sunt:

- **1998 E** – este corespunzătoare formulei din EN 1998-3 [15]

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3^v) \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_{cm} \right]^{0.225} \left( \frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25 \left( \alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_{cm}} \right) 1.25^{100 \rho_d} \quad (2.1)$$

- **1992 A** – corespunzătoare formulei aplicând modelul de confinare din EN 1992-1 [7]
- **1998 A** – corespunzătoare formulei aplicând modelul de confinare din EN 1998-3 [15]

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left( 1 - \frac{0.5 L_{pl}}{L_v} \right) \right) \quad (2.2)$$

- **PCK** – se aplică metoda Priestley et. al. [9]

$$\theta_{um} = \frac{\Delta_{yN}}{L_v} + (\phi_u - \phi_{yN}) L_{pl} \quad (2.3)$$

- **H** – se aplică relația Haselton et. al. [20]

$$\theta_{um} = 0.196 \cdot 0.19^v (0.02 + 40 \rho_{sw})^{0.54} \cdot 0.62^{0.01 f_c [MPa]} \quad (2.4)$$

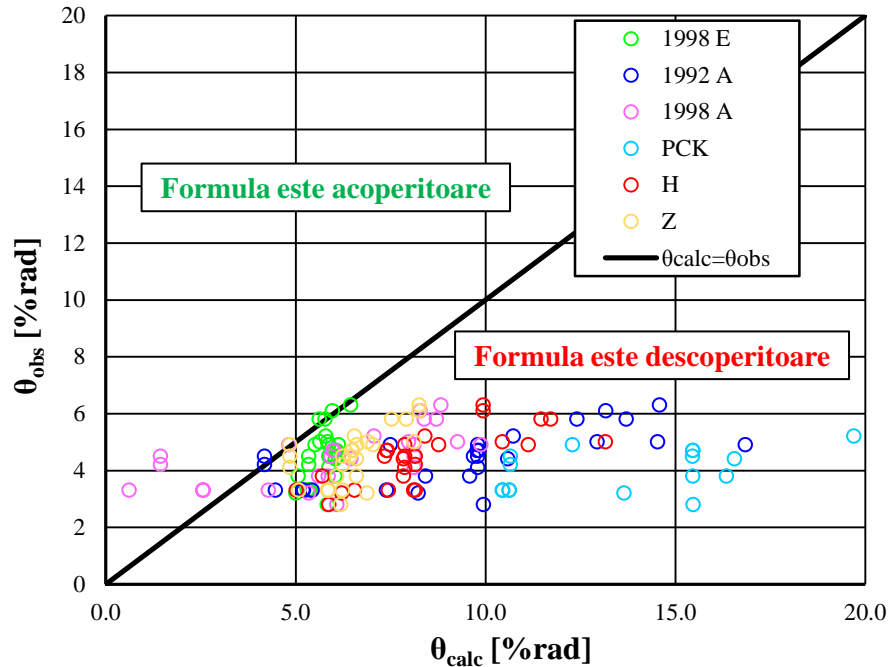
- **Z** – se aplică relația Zhu [21]

$$\theta_{um} = 0.049 + 0.716 \rho_s + 0.12 \rho_{sw} \frac{f_{yw}}{f_c'} - 0.042 \frac{s}{d} - 0.07 \frac{N_{Ed}}{A_c f_c'} \quad (2.5)$$

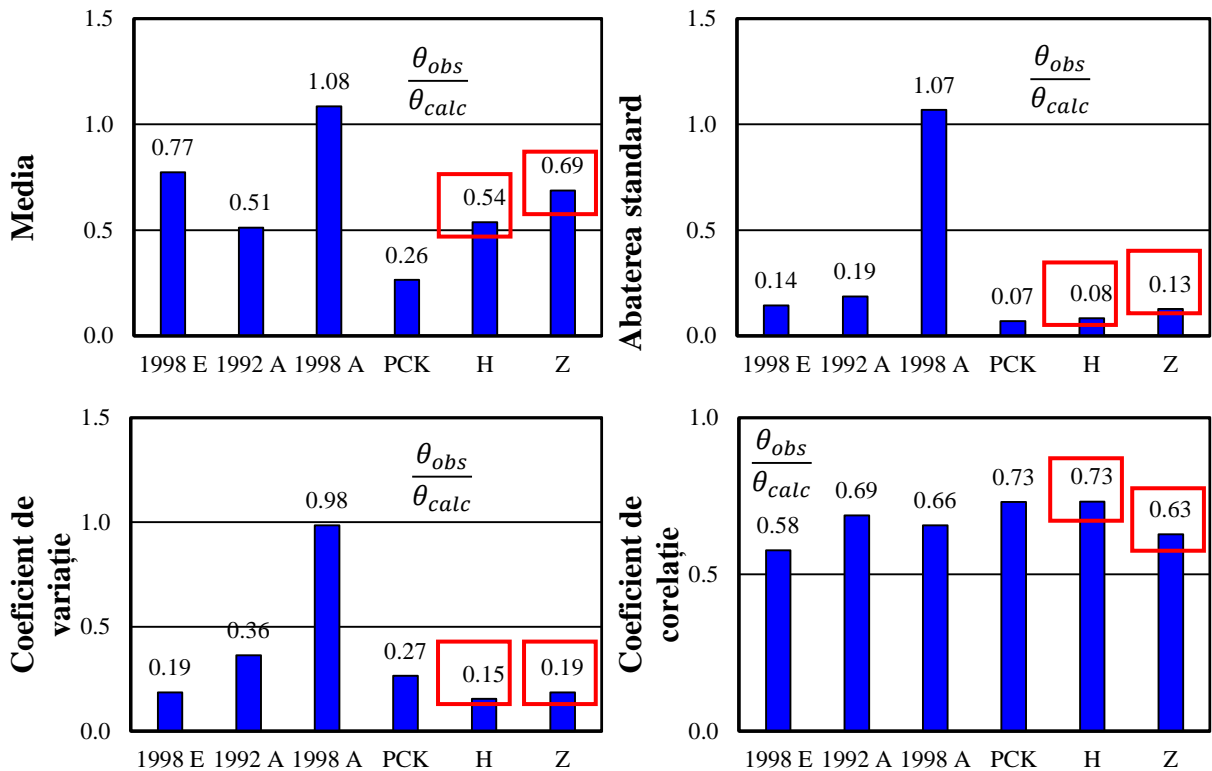
### 2.1.1. Bază de date pentru grinzi

Comparația dintre rotirea calculată cu formulele prezentate anterior și cea obținută din încercările experimentale este reprezentată în figura (2.1).

Indicatorii statistici sunt reprezentați în figura (2.2).

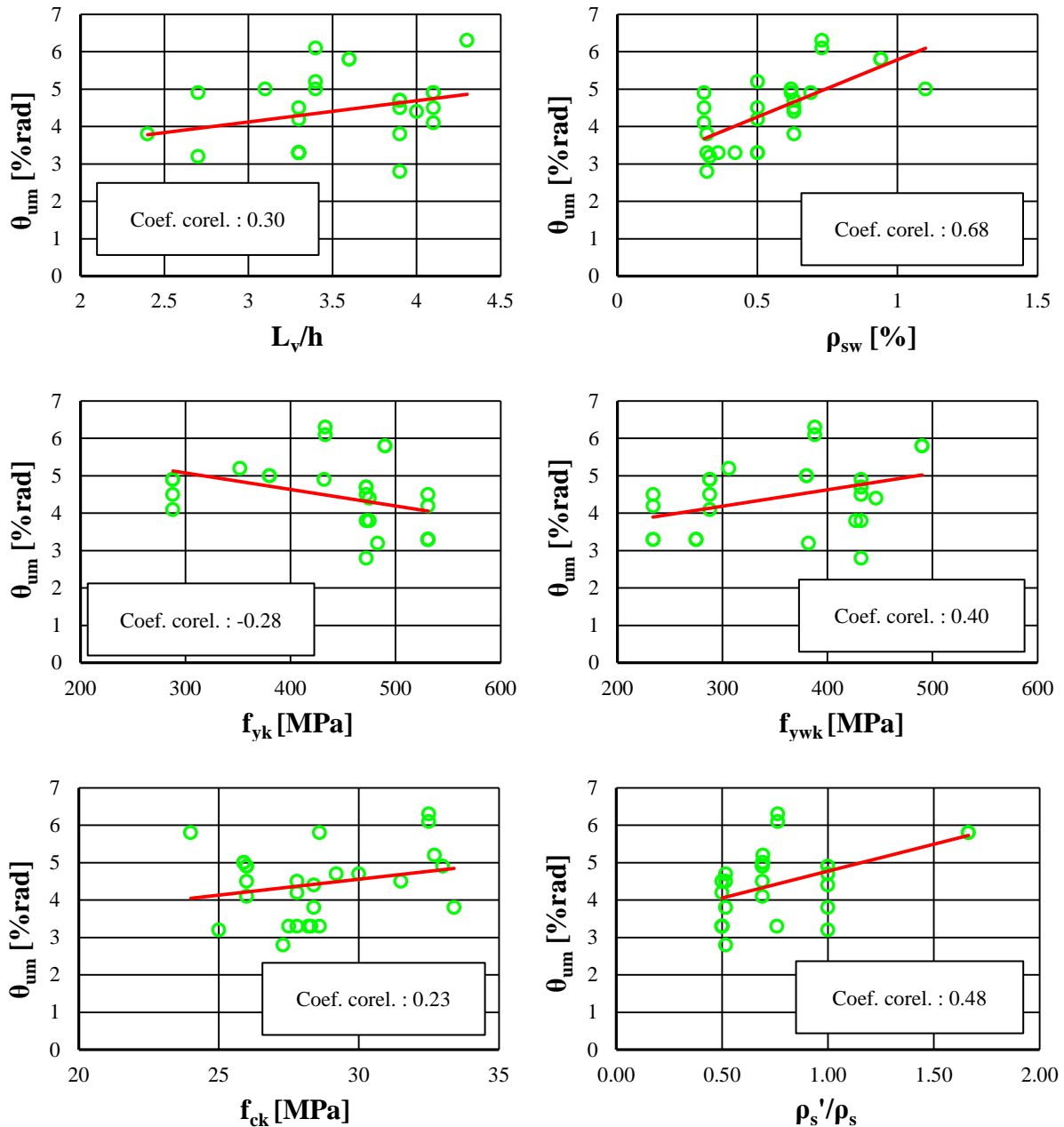


Figură 2.1 – Comparație între valorile calculate și cele obținute experimental la grinzi



Figură 2.2 – Indicatori statistici ai raportului între rotirea capabilă stabilită experimental și cea calculată

În figura (2.3) se evidențiază influența parametrilor secțiunii și rezistenței materialelor în valoarea rotirii ultime a elementului, așa cum rezultă din cercetările experimentale:



Figură 2.3 – Diagramele de dispersie a rotirii capabile măsurate experimental

Așa cum se poate observa în figura (2.3), cei mai importanți parametri care influențează rotirea capabilă în cazul grinzilor sunt raportul dintre deschiderea de forfecare și înălțimea secțiunii  $\frac{L_v}{h}$ , coeficientul de armare transversal, raportul dintre aria de armătură comprimată și aria de armătură întinsă dar și rezistența la curgere a etrierilor.

Se propun 2 relații de calcul pentru determinarea rotirii ultime a grinzilor de beton armat: prima, care ține cont de procentul de armare transversal, raportul  $\frac{\rho'}{\rho}$  și raportul  $\frac{L_v}{h}$ , și cea de-a doua care ține cont doar de primii 2 parametri. Prima relație este necesară deoarece se poate stabili



numeric o valoare pentru rotirea ultimă asociată momentului negativ sau pozitiv prin introducerea în formulă a parametrului  $\frac{L_v}{h}$  cu o valoare de la simplu (rotire negativă) la dublu (rotire pozitivă).

Prin respectarea condițiilor constructive din P100-1/2013 [1] referitoare la zonele plastice potențiale de la extremitățile grinzilor, acestea sunt înzestrare cu o capacitate intrinsecă de rotire. Acest lucru se dorește să se simuleze cu cea de-a doua relație prin apariția termenului liber.

$$\theta_{um} = 2.75 \cdot (\rho_{sw}[\%]) + 0.49 \frac{\rho'}{\rho} + 0.69 \frac{L_v}{h} \quad (2.6)$$

Rotirea capabilă astfel obținută este asociată stării limită de prevenire a prăbușirii.

Pentru a obține capacitatea de rotire asociată stării limită ultime, valoarea furnizată de expresia (2.6) se înmulțește cu factorul  $\frac{3}{4}$ .

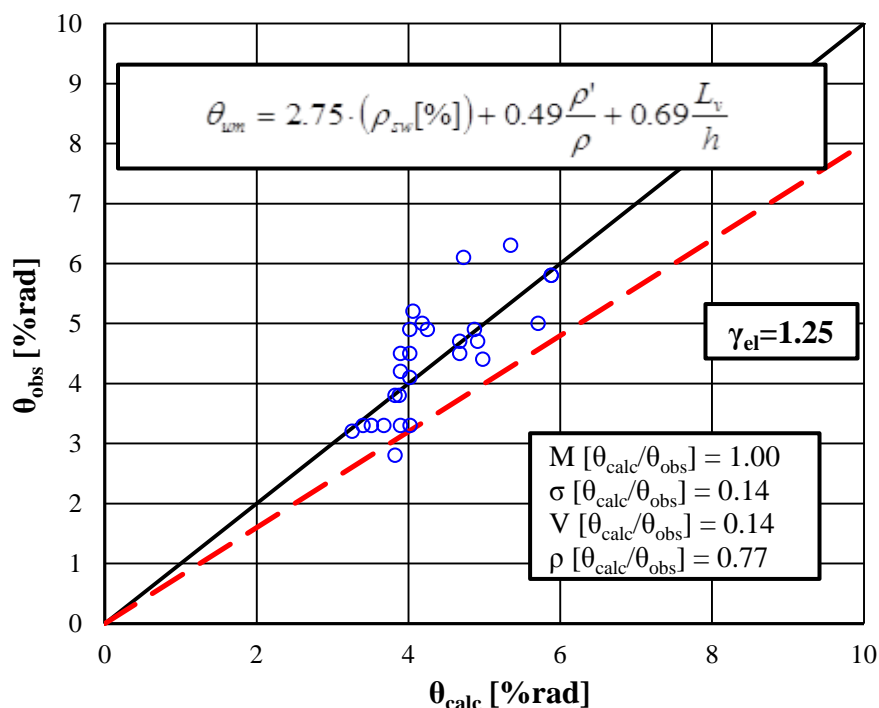
Pentru a obține o rotirea capabilă asociată unei probabilități de depășire de 95% se folosește relația următoare:

$$\theta_{um,95\%} = \frac{\theta_{um}}{\gamma_{el}} \quad (2.7)$$

în care

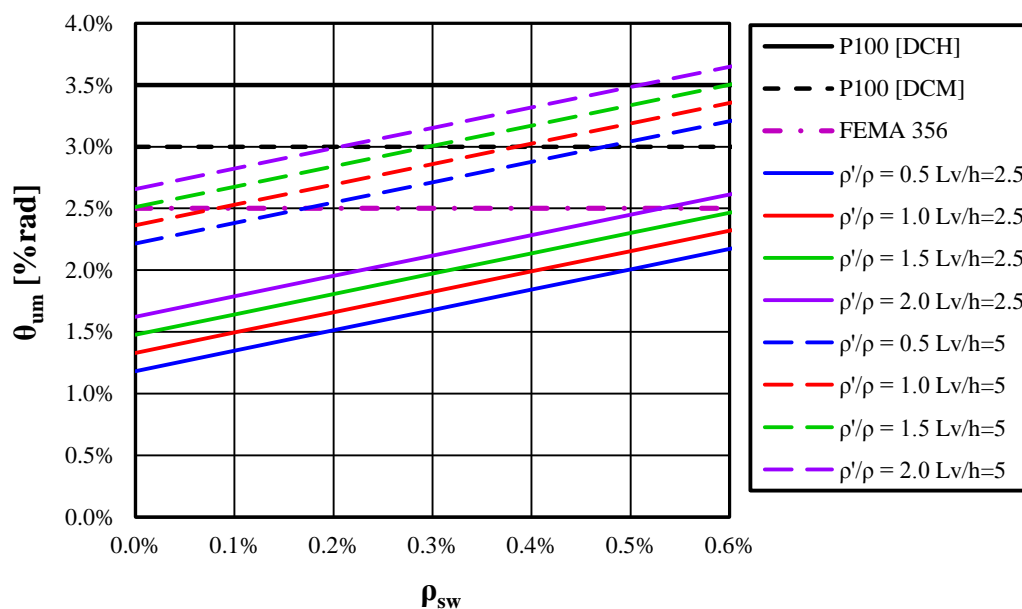
$\gamma_{el} = 1.25$ , coeficient de trecere de la valoarea medie la valoarea cu 95% probabilitate de depășire

În figura (2.4) se reprezintă grafic comparația dintre valorile rotirilor ultime înregistrate în cadrul testelor experimentale și valorile rotirilor ultime calculate cu expresia propusă.



Figură 2.4 – Comparație între valorile calculate și cele observate pentru rotirea ultimă

În figura (2.5) este reprezentată grafic formula pentru determinarea rotirii capabile la starea limită ultimă a unei grinzi de beton armat, în care este inclus și factorul de siguranță,  $\gamma_{el} = 1.25$  și coeficientul  $\frac{3}{4}$ .



Figură 2.5 – Determinarea rotirii capabile a grinzii funcție de procentul de armare transversal

Formula de calcul a rotirii capabile care ține cont de procentul de armare transversal și raportul dintre aria de armătură comprimată și cea întinsă este:

$$\theta_{um} = 2.62 + 2.74 \cdot (\rho_{sw} [\%]) + 0.37 \frac{\rho'}{\rho} \quad (2.8)$$

Rotirea capabilă astfel obținută este asociată stării limită de prevenire a prăbușirii.

Pentru a obține capacitatea de rotire asociată stării limită ultime, valoarea furnizată de expresia

(2.8) se înmulțește cu factorul  $\frac{3}{4}$ .

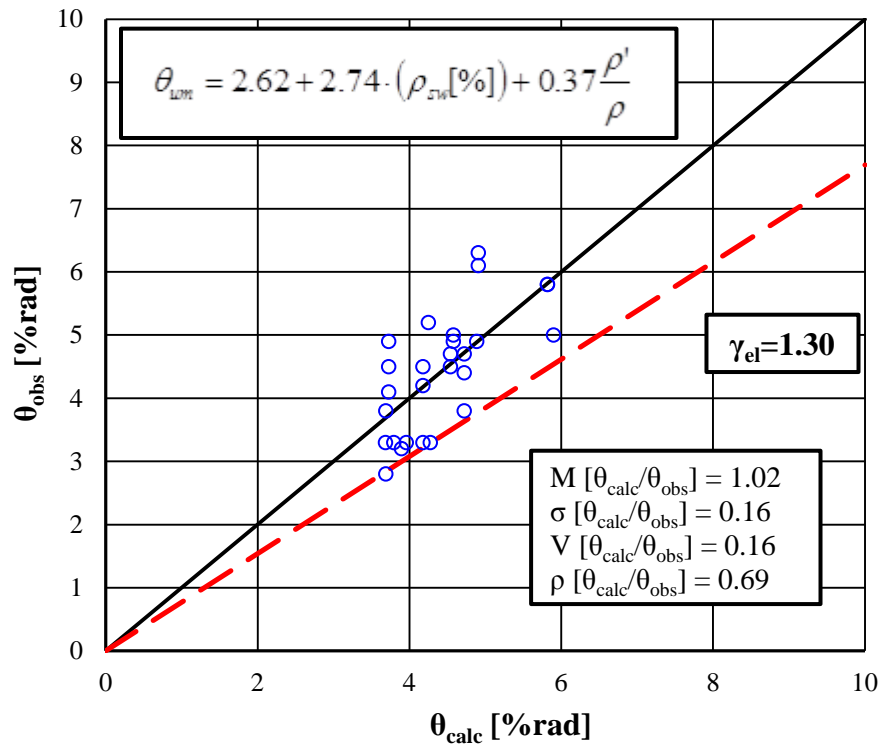
Pentru a obține o rotire capabilă asociată unei probabilități de depășire de 95% se folosește relația următoare:

$$\theta_{um,95\%} = \frac{\theta_{um}}{\gamma_{el}} \quad (2.9)$$

în care

$\gamma_{el} = 1.30$ , coeficient de trecere de la valoarea medie la valoarea cu 95% probabilitate de depășire

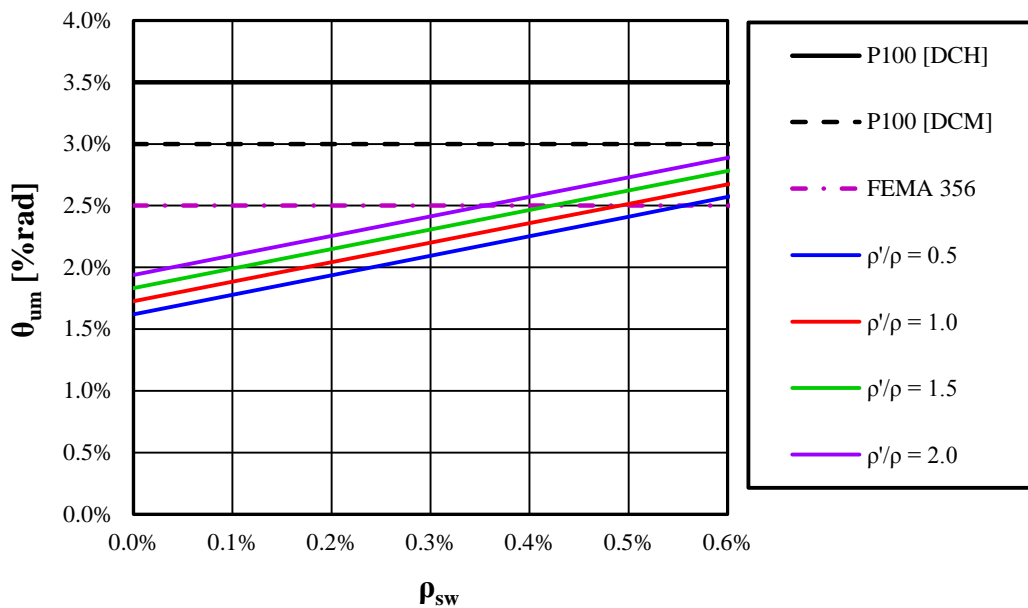
În figura (2.6) se reprezintă grafic comparația dintre valorile rotirilor ultime înregistrate în cadrul testelor experimentale și valorile rotirilor ultime calculate cu expresia propusă.



Figură 2.6 – Comparație între valorile calculate și cele observate pentru rotirea ultimă

În figura (2.7) este reprezentată grafic formula pentru determinarea rotirii capabile a unei grinzi de beton armat la starea limită ultimă, în care este inclus și factorul de siguranță,  $\gamma_{el} = 1.30$  și

coeficientul  $\frac{3}{4}$ .

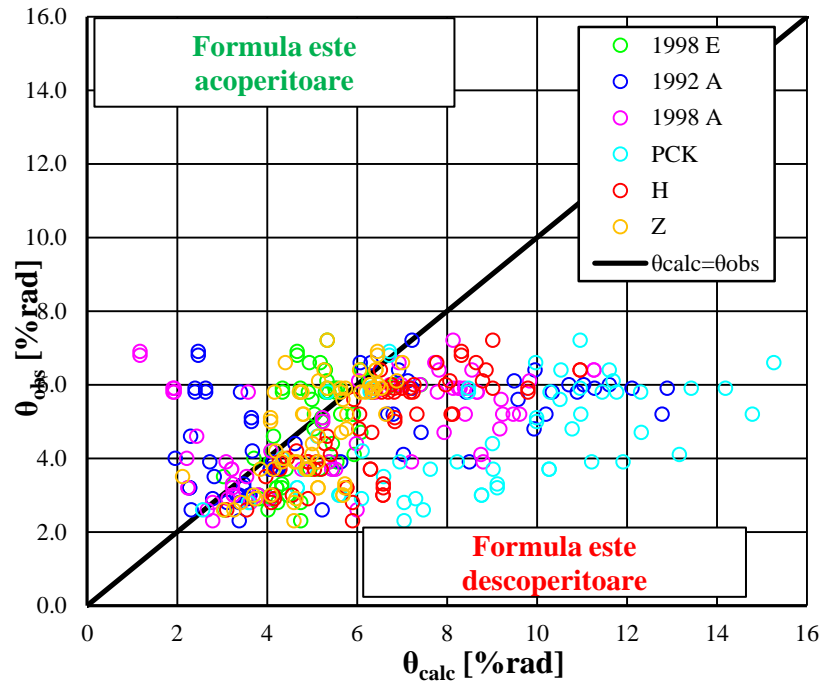


Figură 2.7 – Determinarea rotirii capabile a grinzii funcție de procentul de armare transversal

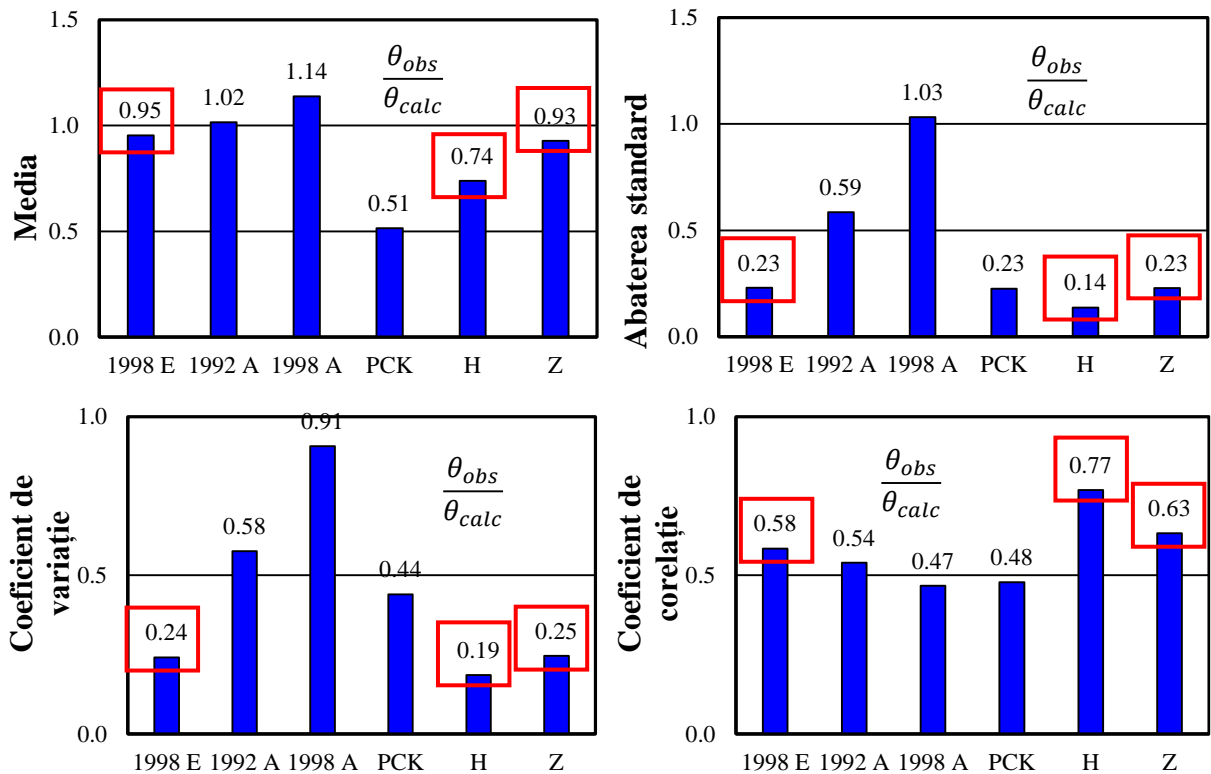
### 2.1.2. Analiza întregii baze de date pentru stâlpi

Comparația dintre rotirea calculată cu formulele prezentate anterior și cea obținută din încercările experimentale este reprezentată în figura (2.8).

Indicatorii statistici sunt reprezentați în figura (2.9).

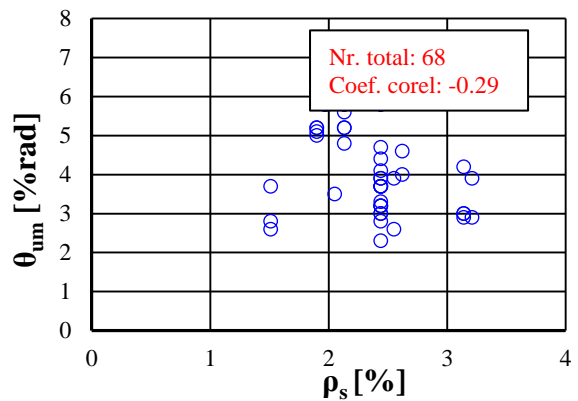
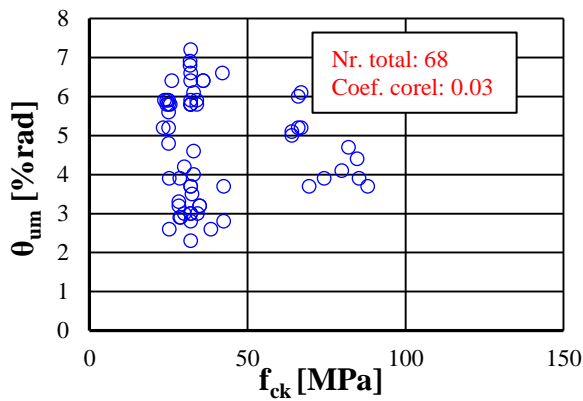
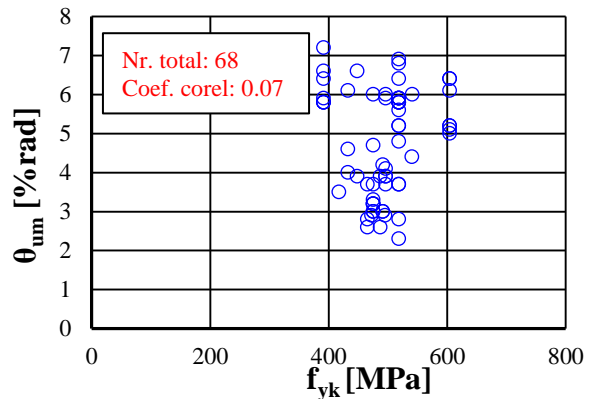
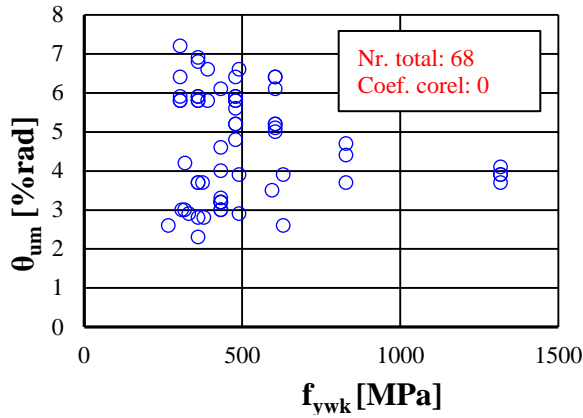
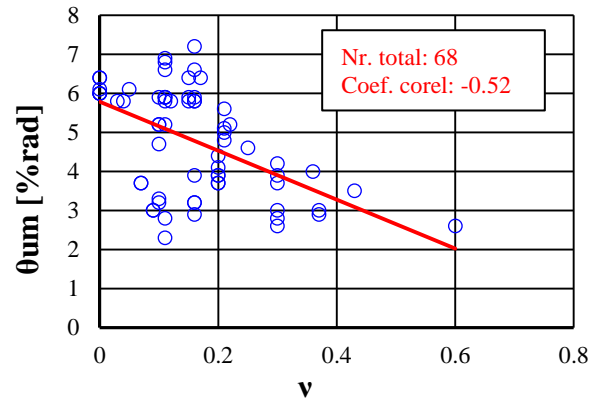
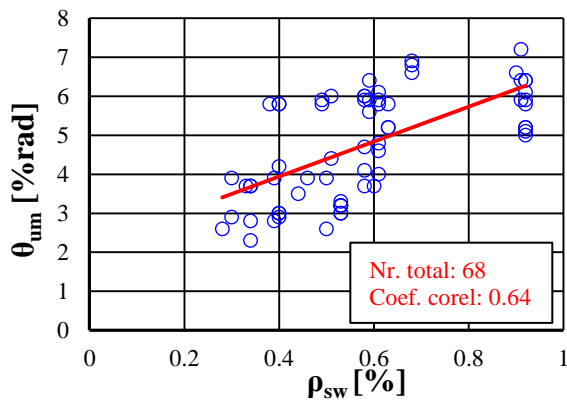
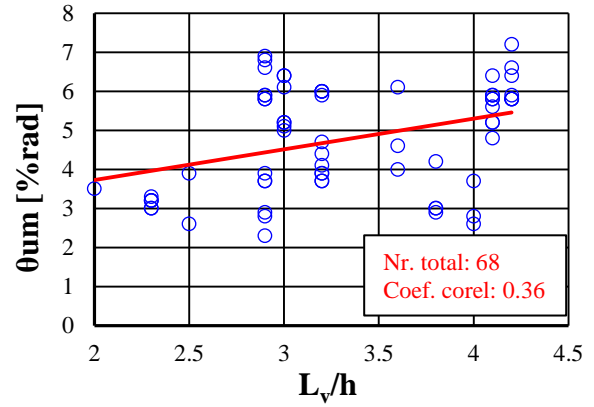
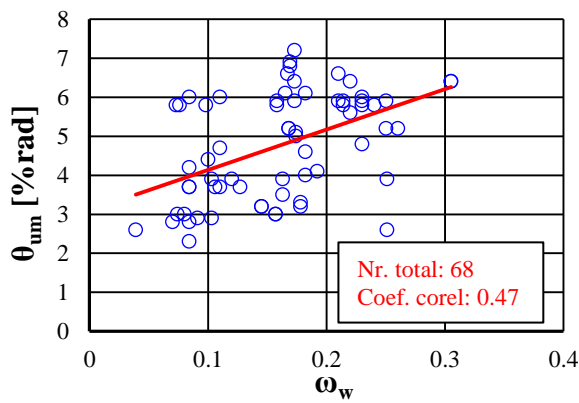


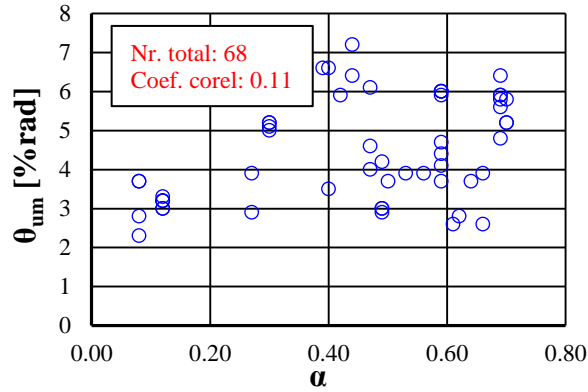
Figură 2.8 – Comparație între rotirea calculată și cea observată la stâlpi



Figură 2.9 – Indicatori statistici ai raportului între rotirea capabilă observată și cea calculată

În figura (2.10) se evidențiază influența parametrilor secțiunii și rezistenței materialelor asupra valorii rotirii ultime a elementului.





Figură 2.10 – Diagramele de dispersie a rotirii capabile observate

Așa cum se poate observa în figura (2.10), cei mai importanți parametri care influențează rotirea capabilă în cazul stâlpilor sunt procentul de armare transversală, forța axială adimensionalizată și raportul  $\frac{L_v}{h}$ .

Pornind de la valorile astfel obținute, se propune următoarea relație de calcul pentru rotirea ultimă a stâlpilor, bazată pe regresia liniară a datelor:

$$\theta_{um} = 0.74 + 3.68 \cdot (\rho_{sw} [\%]) - 3.28 \cdot \nu + 0.81 \frac{L_v}{h} \quad (2.10)$$

Forța axială adimensionalizată se determină cu rezistențe de calcul.

Rotirea capabilă astfel obținută este asociată stării limită de prevenire a prăbușirii.

Pentru a obține capacitatea de rotire asociată stării limită ultime, valoarea furnizată de expresia (2.10) se înmulțește cu factorul  $\frac{3}{4}$ .

Pentru a obține o rotirea capabilă asociată unei probabilități de depășire de 95% se folosește relația următoare:

$$\theta_{um,95\%} = \frac{\theta_{um}}{\gamma_{el}} \quad (2.11)$$

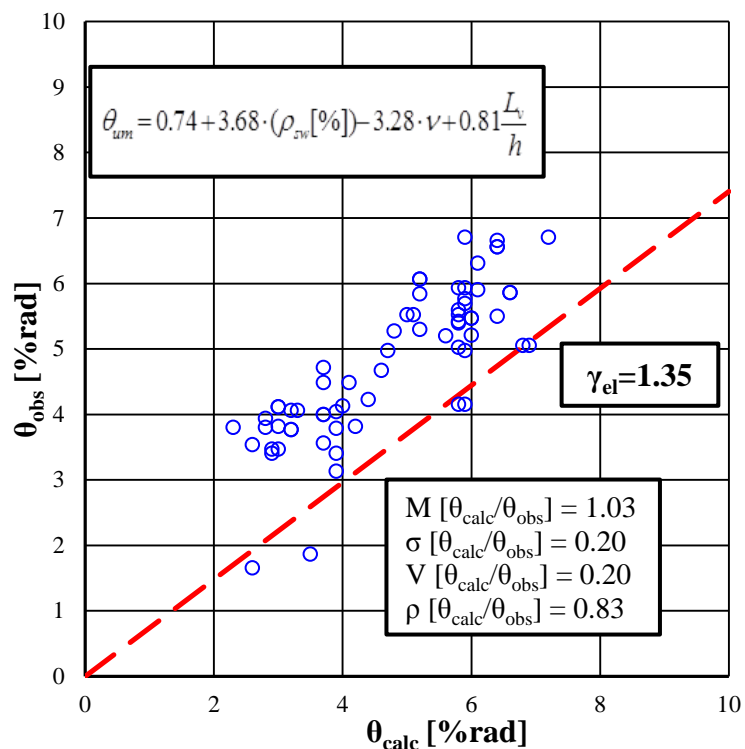
în care

$\gamma_{el} = 1.35$ , coeficient de trecere de la valoarea medie la valoarea cu 95% probabilitate de depășire

În figura (2.11) se reprezintă grafic comparația dintre valorile rotirilor ultime înregistrate în cadrul testelor experimentale și valorile rotirilor ultime calculate cu expresia propusă.

FEMA356 [22] furnizează doar valori plastice ale rotirii ultime. Pentru o reprezentare comparativă cu celelalte rezultate s-a considerat valoarea rotirii elastice 0.5%.

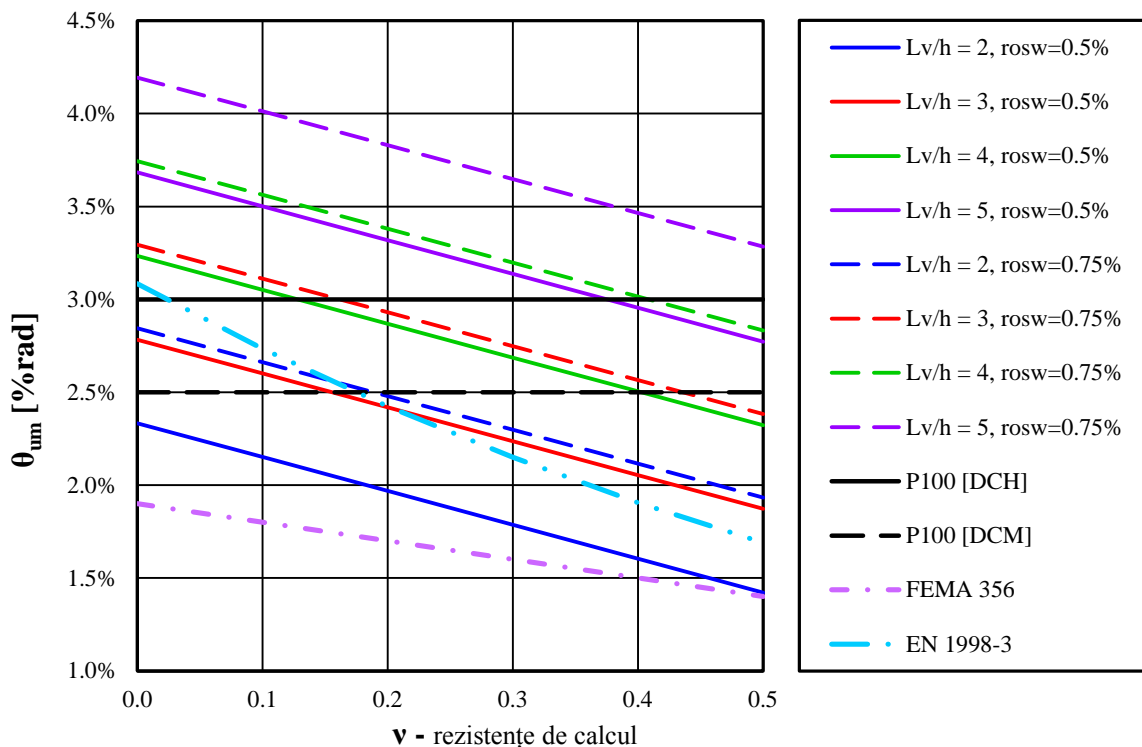
Pentru reprezentarea grafică a valorilor rotirii ultime furnizate de formula din EN 1998-3 [15], s-a considerat o secțiune 60x60 a unui cadru P+8E, dimensionat conform P100-1/2013 [1].



Figură 2.11 – Comparație între valorile calculate și cele observate pentru rotirea ultimă

În figura (2.12) este reprezentată grafic formula pentru determinarea rotirii capabile a unei grinzi de beton armat la starea limită ultimă, în care este inclus și factorul de siguranță,  $\gamma_{el} = 1.35$  și

coeficientul  $\frac{3}{4}$ .



Figură 2.12 – Determinarea rotirii capabile a unui stâlp de beton armat

### **3. PROCEDEU DE EVALUARE A ROTIRII ELEMENTELOR DE BETON ARMAT ÎN FUNCȚIE DE CERINȚA DE DRIFT**

#### ***3.1. Obiective***

Obiectivul principal al prezentului capitol este de a obține formule fundamentate pentru determinarea cerinței de rotire pentru elementele unei construcții în cadre de beton armat în funcție de parametrii specifici calculului elastic, de exemplu: perioada proprie de vibrație a structurii, clasa de ductilitate a structurii, perioada de colț a spectrului de răspuns elastic, accelerația de proiectare a terenului.

#### ***3.2. Descrierea procedurii***

Cercetarea raportată în prezentul capitol are ca principal obiectiv propunerea unor relații cu un nivel de încredere superior pentru determinarea cerințelor de rotire plastică în zonele critice ale stâlpilor și grinzilor în cadre de beton armat proiectate pe baza codului național.

Calea pentru a atinge acest obiectiv este de a prelucra statistic rezultatele obținute pe un număr mare de cazuri și tipuri de cadre etajate de beton armat utilizând instrumentul de calcul cel mai performant de care se dispune, calculul dinamic neliniar. Volumul de situații investigate trebuia să fie suficient de cuprinzător pentru a acoperi domeniul acestui sistem structural în condițiile țării noastre, din punct de vedere al caracteristicilor structurale și din punctul de vedere a acțiunii seismice considerate.

#### ***3.3. Modelarea pentru calculul dinamic neliniar***

Programul folosit pentru calculul dinamic neliniar este Open Sees [24].

La capetele grinzilor au fost definite articulații plastice punctuale cărora li s-a atribuit un model hysteretic de comportare de tip Takeda [22].

Stâlpul a fost modelat cu plasticitate distribuită, folosind 5 puncte de integrare pe element (forcebasedbeamcolumnelement [26]). Pentru oțel s-a folosit un model biliniar cu consolidare cinematică, iar pentru beton s-a folosit modelul Kent-Scott-Park [27].

Acțiunea seismică este reprezentată de un set de 40 de accelerograme compatibile cu spectrul elastic de accelerații, generate artificial utilizând programul MSIMQKE [29], program elaborat de Vanmarke și Gasparini [30] în anul 1976 la MIT.

Pentru amortizare s-a folosit modelul Rayleigh [28]. Frațiunea din amortizarea critică s-a considerat 5% pentru perioadele  $0.2 \cdot T_1$  și  $1.5 \cdot T_1$ , unde  $T_1$  este perioada fundamentală a structurii.



### **Tipurile de cadre selectate pentru calculul dinamic neliniar**

Se dimensionează 4 familii de cadre folosind metoda forțelor seismice statice echivalente. Cadrele au înălțimea curentă de nivel de 3.5 m și deschiderea de 5m, cu următoarele regimuri de înălțime:

- P+1E
- P+2E
- P+5E
- P+8E

Cadrele sunt dimensionate considerând toate combinațiile între accelerația de proiectare a terenului, perioada de control (colț) și clasa de ductilitate:

➤ $a_g$	➤ $T_c$	➤ Clasa de ductilitate
• 0.2 g	• 0.7 sec	• DCM
• 0.3 g	• 1.0 sec	• DCH
• 0.4 g	• 1.6 sec	

Cadrele sunt dimensionate și verificate respectând prevederile codului seismic de proiectare P100-1/2013 [1].

### **3.4. Rezultatele obținute din calculul dinamic neliniar**

În figurile următoare se prezintă diagramele de dispersie a următoarelor rapoarte:

- $\theta_{\max}^- / Dr, cod$
- $\theta_{\max}^+ / Dr, cod$
- $\theta_{\max}^s / Dr, cod$

În funcție de  $T_1$ ,  $T_c$ ,  $T_1/T_c$ ,  $a_g/g$

Valoarea maxima a rapoartelor se înregistrează la baza structurii și nu la nivelul unde se înregistrează driftul unghiular maxim pe structură. Acoperitor, s-a optat pentru prelucrarea rezultatelor prin considerarea rapoartelor maxime.

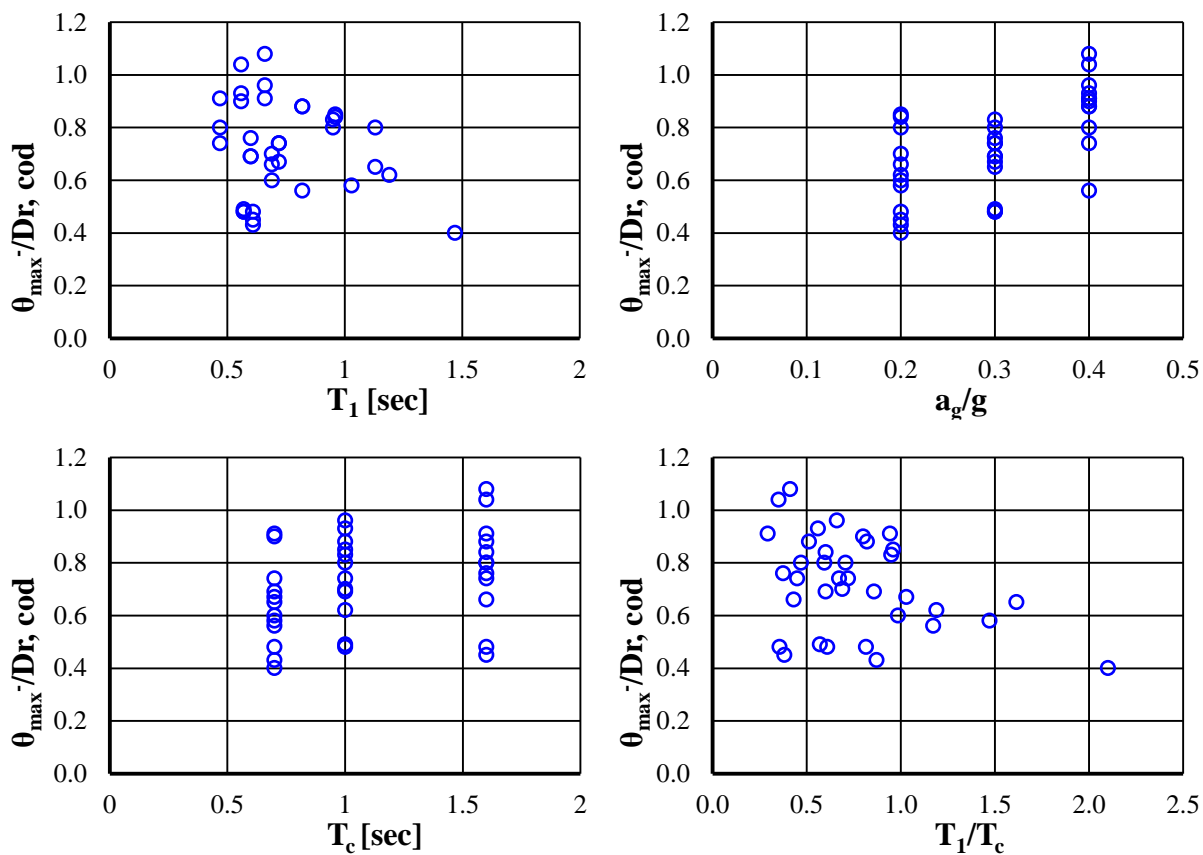
$\theta_{\max}^+$  este rotirea asociată momentului pozitiv (care întinde fibra de jos a grinzii)

$\theta_{\max}^-$  este rotirea asociată momentului negativ (care întinde fibra de sus a grinzii)

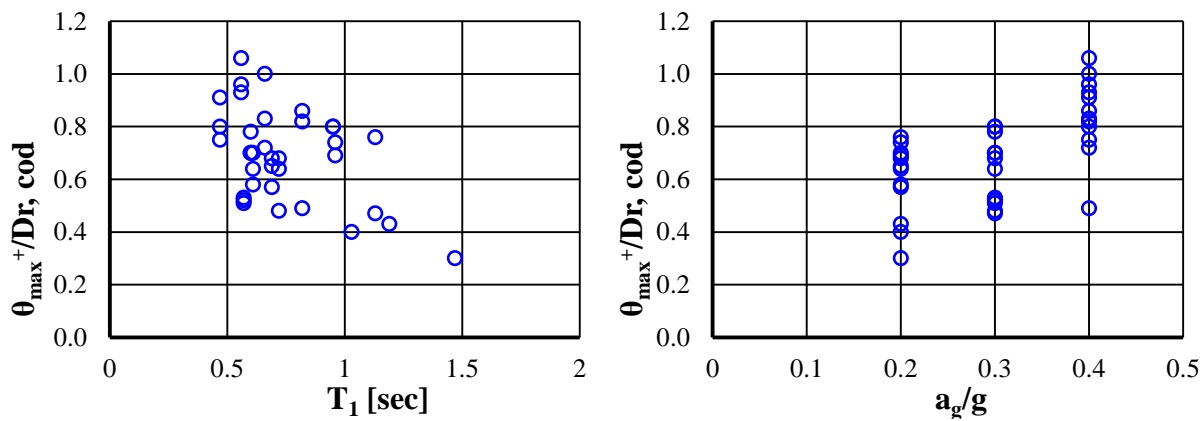
$\theta_{\max}^s$  este rotirea maximă a stâlpului; întrucât în condițiile aplicării metodei de proiectare la capacitate, cerințele de rotire plastică în stâlpi sunt maxime la bază (în secțiunea de încastrare teoretică) valorile  $\theta_{\max}^s$  se referă la primul nivel.

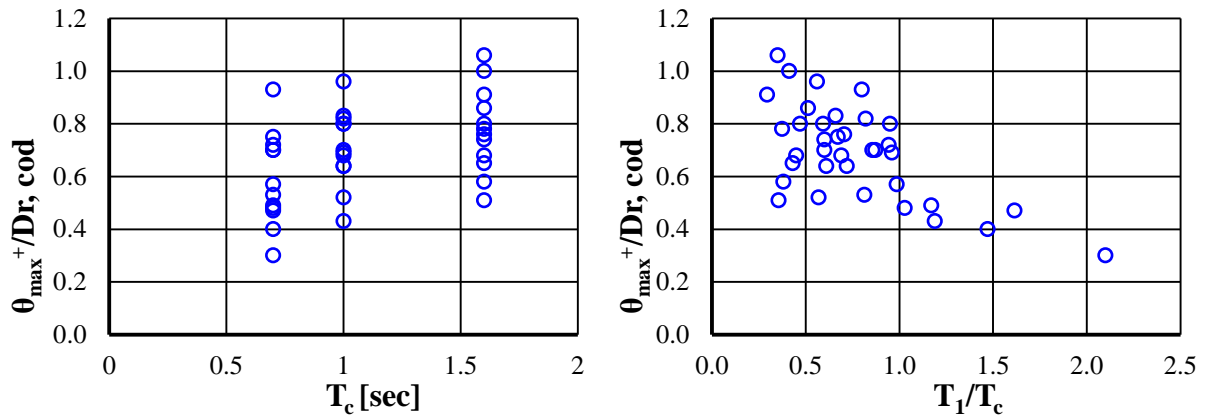
$Dr, cod$  - este driftul unghiular calculat cu metoda forțelor seismice staice echivalente

În figurile (3.1), (3.2) și (3.3) se reprezintă, exemplificativ pentru DCH, diagrama de dispersie a rapoartelor considerate în funcție de perioada fundamentală a structurii,  $T_1$ , perioada de control a spectrului de răspuns elastic,  $T_c$ , raportul  $T_1/T_c$  și accelerația terenului  $a_g/g$ .

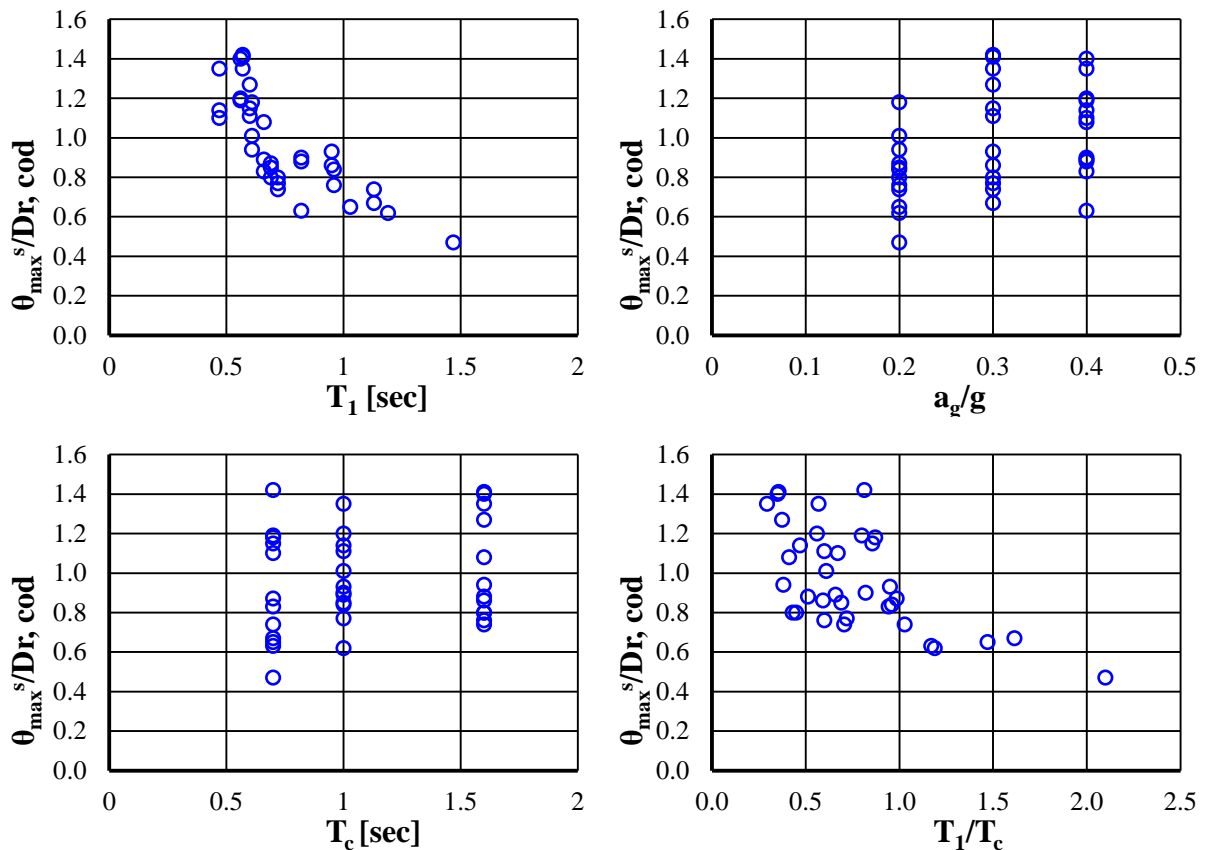


Figură 3.1 – Diagramele de dispersie a raportului  $\theta_{\max}^- / Dr, \text{cod}$  pentru DCH





Figură 3.2 – Diagramele de dispersie a raportului  $\theta_{\max}^+ / Dr, cod$  pentru DCH



Figură 3.3 – Diagramele de dispersie a raportului  $\theta_{\max}^s / Dr, cod$  pentru DCH

Ca o concluzie preliminară, valorile raportului dintre rotirile maxime impuse (cerințele de rotire) elementelor unei structuri în cadre de beton armat și driftul calculat cu metoda forțelor seismice statice echivalente crește o dată cu creșterea accelerației terenului și scade o dată cu creșterea raportului dintre perioada fundamentală a structurii și perioada de colț (și cu perioada proprie fundamentală a structurii). Prin urmare relațiile pentru evaluarea cerințelor de rotire în elementele structurilor în cadre de beton armat trebuie să țină seama de influența acestor factori,

$$\text{adică trebuie să fie de forma: } \theta = f\left(\frac{T_1}{T_c}, \frac{a_g}{g}\right) \cdot Dr, cod, \text{ sau } \theta = f\left(T_1, \frac{a_g}{g}\right) \cdot Dr, cod$$

### 3.5. Determinarea cerinței de rotire

#### 3.5.1. Formule pentru determinarea cerinței de rotire a grinzilor și stâlpilor pentru DCH

$$\theta_{\max}^- = \left( 0.45 - 0.1 \frac{T_1}{T_c} + 1.18 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.3 \quad (3.1)$$

$$\theta_{\max}^+ = \left( 0.61 - 0.24 \frac{T_1}{T_c} + 0.91 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.225 \quad (3.2)$$

$$\theta_{\max}^s = \left( 1.06 - 0.38 \frac{T_1}{T_c} + 0.66 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.35 \quad (3.3)$$

#### 3.5.2. Formule pentru determinarea cerinței de rotire a grinzilor și stâlpilor pentru DCM

$$\theta_{\max}^- = \left( 0.64 - 0.11 \frac{T_1}{T_c} + 0.2 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.375 \quad (3.4)$$

$$\theta_{\max}^+ = \left( 0.47 - 0.23 \frac{T_1}{T_c} + 0.92 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.325 \quad (3.5)$$

$$\theta_{\max}^s = \left( 0.97 - 0.3 \frac{T_1}{T_c} + 1.13 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{ cod}, \text{ cu } \gamma_{el} = 1.3 \quad (3.6)$$

### 3.6. Reprezentarea grafică a formulelor pentru cerința de rotire

Reprezentarea grafică a formulelor de tipul  $\theta_{\max} = f\left(\frac{T_1}{T_c}, \frac{a_g}{g}\right) \cdot Dr, \text{ cod}$  se realizează în 3

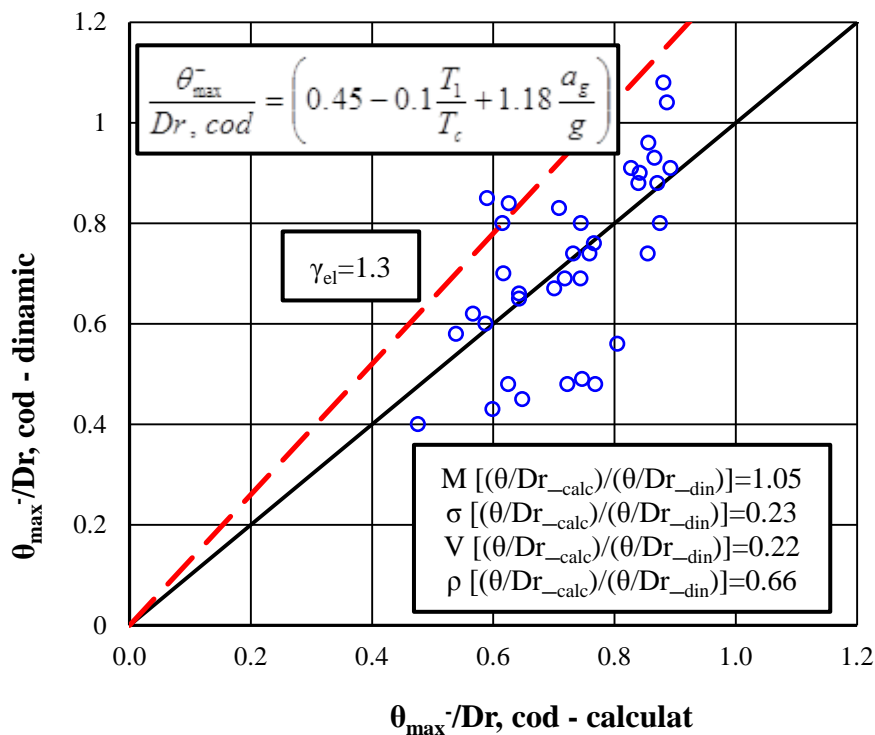
ipoteze:

- i) Se consideră  $Dr, \text{ cod} = 2.5\%$  la SLU (structuri tip A)
- i) Se consideră  $Dr, \text{ cod} = 0.5\%$  la SLS și natura legăturilor între componentele nestructurale și structura de beton armat sunt de tipul celor care contribuie la rigiditatea de ansamblu a structurii [P100-1]; se determină driftul la SLU (structuri tip B)
- ii) Se consideră  $Dr, \text{ cod} = 0.5\%$  la SLS și natura legăturilor între componentele nestructurale și structura de beton armat sunt de tipul celor care nu interacționează cu structura [P100-1]; se determină driftul la SLU (structuri tip C)

### 3.6.1. Determinarea cerinței de rotire la moment negativ (DCH)

În figura (3.4) se prezintă valorile  $\frac{\theta_{\max}^-}{Dr, \text{cod}}$  obținute din calcul dinamic neliniar împreună cu reprezentarea formulelor propuse pentru acest raport în proiectarea la DCH:

$$\theta_{\max}^- = \left( 0.45 - 0.1 \frac{T_1}{T_c} + 1.18 \frac{a_g}{g} \right) \cdot Dr, \text{cod} \quad (3.7)$$



Figură 3.4 – Expresie propusă pentru evaluarea  $\theta_{\max}^- = f\left(\frac{T_1}{T_c}, \frac{a_g}{g}\right)$  pentru DCH

Reprezentările grafice ale relației (3.7) pentru diferite combinații ale parametrilor sunt date în figurile (3.5) și (3.6).

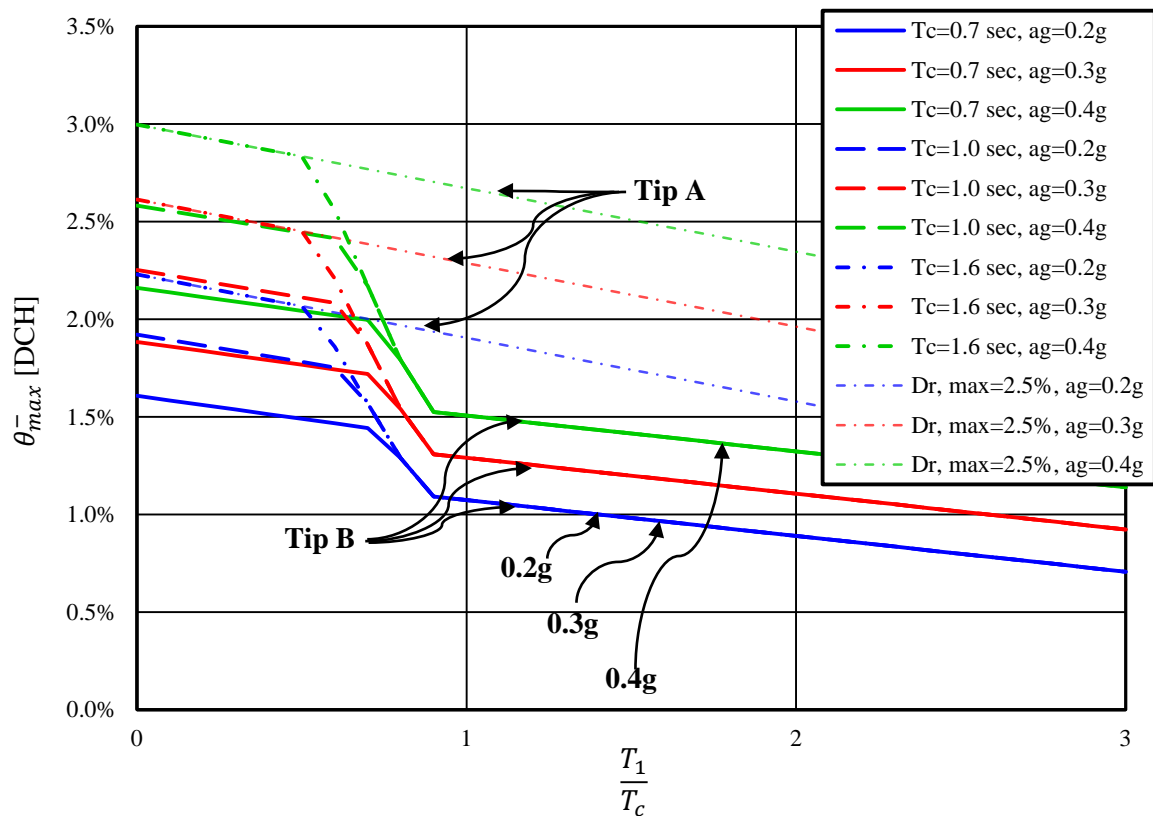
Analizând graficele din figurile (3.5) și (3.6) se pot concluziona următoarele:

- Cerința de rotire maximă pentru  $T_c = 0.7 \text{ sec}$  și  $a_g = 0.3g$  este *1.8% radiani*;

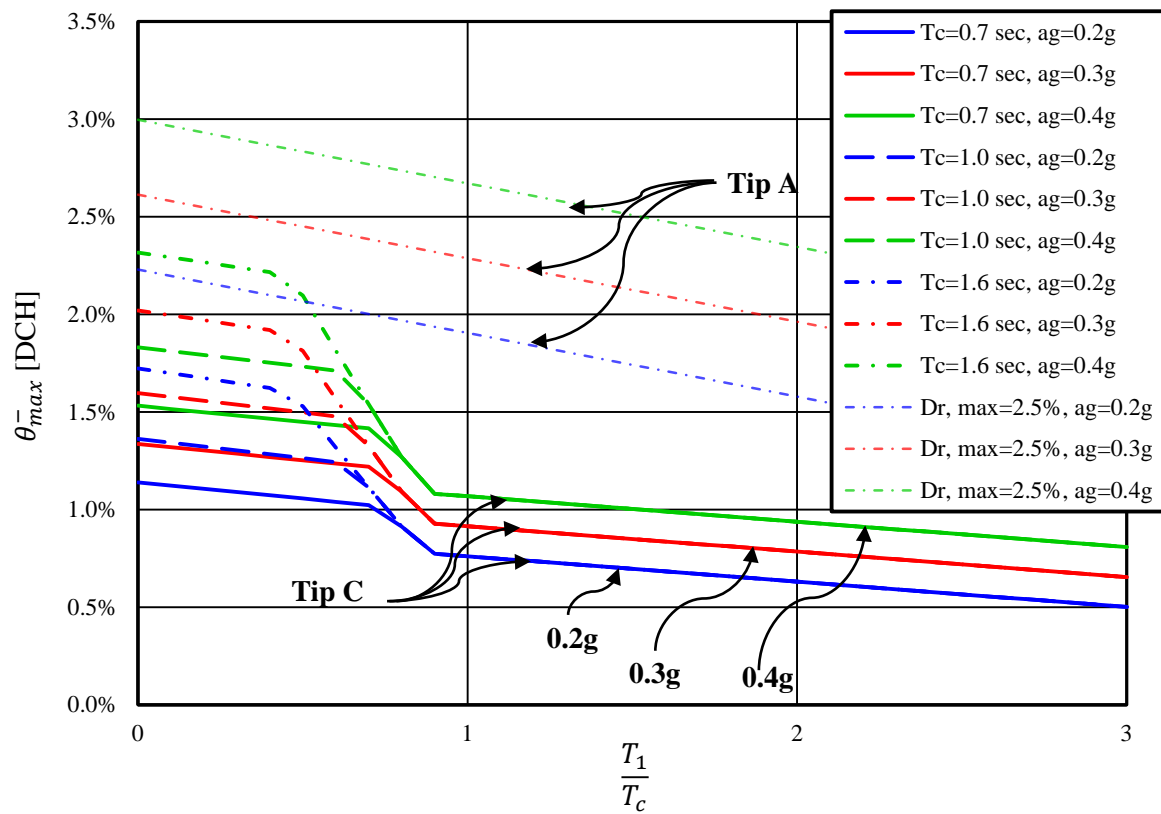
- Cerința de rotire maximă pentru  $T_c = 1.0$  sec și  $a_g = 0.3g$  este  $2.3\%$  *radiani*;
- Cerința de rotire maximă pentru  $T_c = 1.6$  sec și  $a_g = 0.3g$  este  $2.6\%$  *radiani*;

Rotirea minimă, stabilită conventional pentru valoarea  $\frac{T_1}{T_c} = 2$  pentru  $a_g = 0.3g$  este  $1.2\%$

*radiani*



Figură 3.5 – Determinare  $\theta_{max}^-$  pentru structuri tip A și B

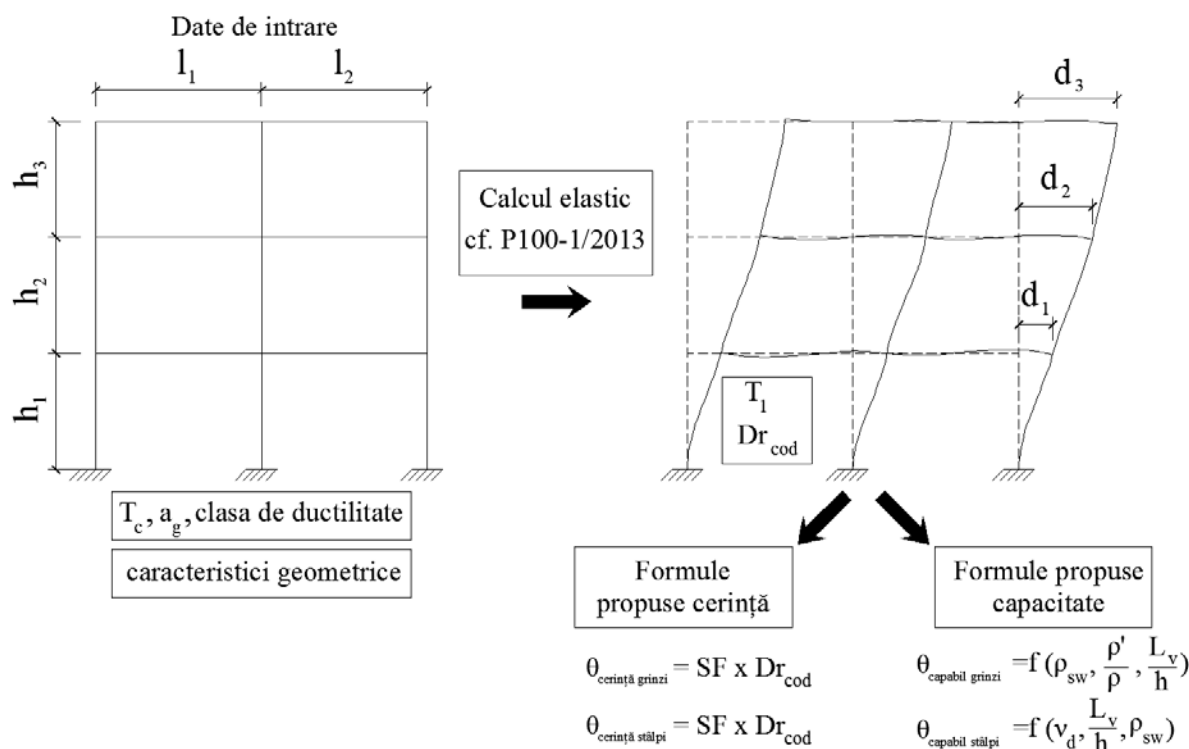


Figură 3.6 – Determinare  $\theta_{max}^-$  pentru structuri tip A și C

## 4. PROCEDEU DE DIMENSIONARE A ARMĂTURII TRANSVERSALE A ELEMENTELOR STRUCTURILOR ÎN CADRE DE BETON ARMAT ÎN FUNCȚIE DE CERINȚA DE ROTIRE

### 4.1. Sinteza rezultatelor

Așa cum s-a arătat în capitolele anterioare, obiectivul cercetării este determinarea procentelor de armare transversală necesare în cazul grinzilor și stâlpilor, care asigură acoperirea cerințelor de ductilitate. Schema de calcul este prezentată în figura (4.1).



Figură 4.1 – Procedeu determinare armare transversală

### 4.2. Comparație între rezultatele furnizate de formulele propuse și calculul dinamic neliniar.

Verificarea rezultatelor formulelor propuse pentru cerința de rotire a grinzilor și stâlpilor aparținând structurilor în cadre de beton armat se realizează prin raportarea acestora la calculul dinamic neliniar.

Calculul dinamic neliniar se efectuează cu programul de calcul PERFORM 3D [32].

Grinzile sunt modelate cu articulații plastice punctuale cărora li s-a atribuit un model histeretic de comportare de tip Takeda [22].

Stâlpii sunt modelați cu articulații plastice punctuale de tip P-M-M cu comportare biliniară.



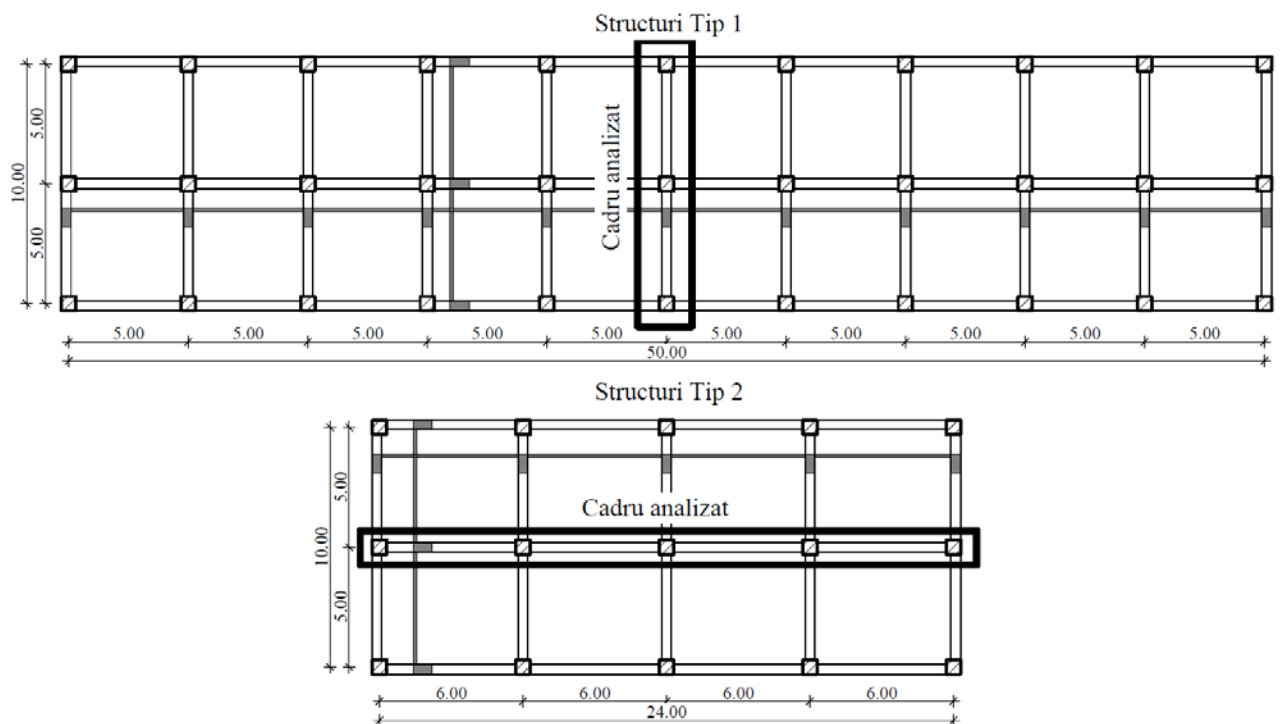
Acțiunea seismică este reprezentată de un set de 40 de accelerograme compatibile cu spectrul elastic de accelerații, generate artificial utilizând programul MSIMQKE [29], program elaborat de Vanmarke și Gasparini [30] în anul 1976 la MIT.

Pentru amortizare s-a folosit modelul Rayleigh [28]. Frațiunea din amortizarea critică s-a considerat 5% pentru perioadele  $0.2 \cdot T_1$  și  $1.5 \cdot T_1$ , unde  $T_1$  este perioada fundamentală a structurii.

### **Structurile propuse pentru calculul dinamic neliniar**

Structurile propuse pentru calculul dinamic neliniar sunt proiectate în 2 configurații în plan, prezentate în figura (4.2), și au regimul de înălțime:

- P+1E
- P+8E



Figură 4.2 – Configurația structurilor proiectate

Clădirile sunt proiectate pentru clasa de ductilitate DCH, situate în zone caracterizate de accelerația maximă a terenului  $0.3g$  și perioade de colț  $0.7$  sec,  $1.0$  sec și  $1.6$  sec, astfel:

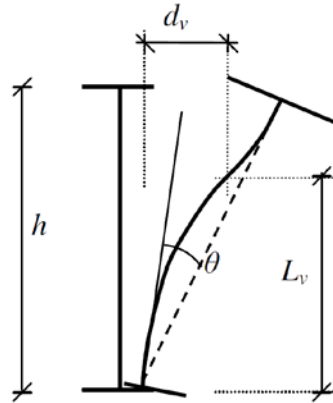
- București:  $a_g = 0.3g$  și  $T_c = 1.6$  sec
- Târgoviște:  $a_g = 0.3g$  și  $T_c = 1.0$  sec
- Sinaia:  $a_g = 0.3g$  și  $T_c = 0.7$  sec

În anexa E a codului de proiectare seismică românesc P100-1/2013 [1] se tratează verificarea capacității de deformare a elementelor de beton armat la starea limită ultimă.

Verificarea se face cu următoarea relație:

$$\theta^{ULS} = c \cdot q \cdot \theta_e \leq \theta_u^{ULS} \quad (4.1)$$

În cazul grinzilor structurilor în cadre de beton armat, valorile  $\theta_e$  se pot aproxima prin raportul între deplasarea relativă de nivel  $d_r$  și înălțimea nivelului,  $h$  (fig. 4.3):



Figură 4.3 – Rotirea corzii pentru o structură în cadre de beton armat [1]

$$\theta_e = \frac{d_r}{h} \quad (4.2)$$

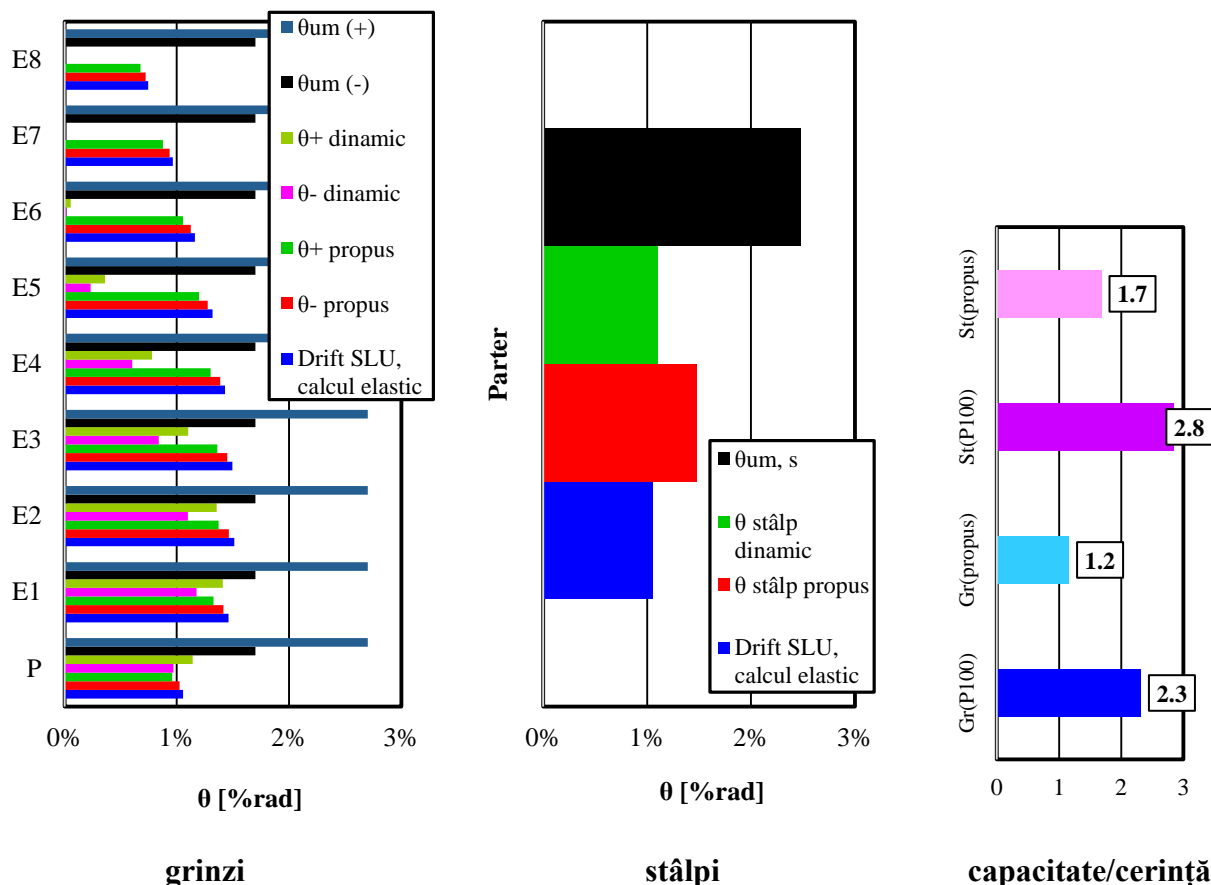
Similar se determină cerința de rotire a stâlpului la baza construcției, ținând cont de diagrama de momente din acțiunea seismică și anume dacă diagrama de moment este în simplă curbură sau în dublă curbură.

Tabel 4-1. Valori admisibile ale rotirilor  $\theta_u^{ULS}$  [1]

Tipul de element	Clasa de ductilitate	
	DCH	DCM
Grinzi de cadru	3,5%	3,0%
Grinzi de cuplare armate cu bare ortogonale	1,5%	1,5%
Grinzi de cuplare armate cu carcasa diagonale	4,0%	4,0%
Stâlpi	3,0%	2,5%
Pereți structurali și sisteme verticale contravântuite	2,0%	1,5%

În figura (4.4) se reprezintă exemplificativ pe același grafic pentru cadrul tip 1, P+8E, amplasat în București valorile rotirilor ultime calculate cu formulele propuse, valorile cerințelor de rotire calculate cu formulele propuse și valorile cerințelor de rotire obținute din calcul dinamic neliniar.

Ulterior se calculează raportul capacitate/cerință cu formulele propuse și se compară cu cel determinat cu formulele prevăzute în P100-1/2013 [1].

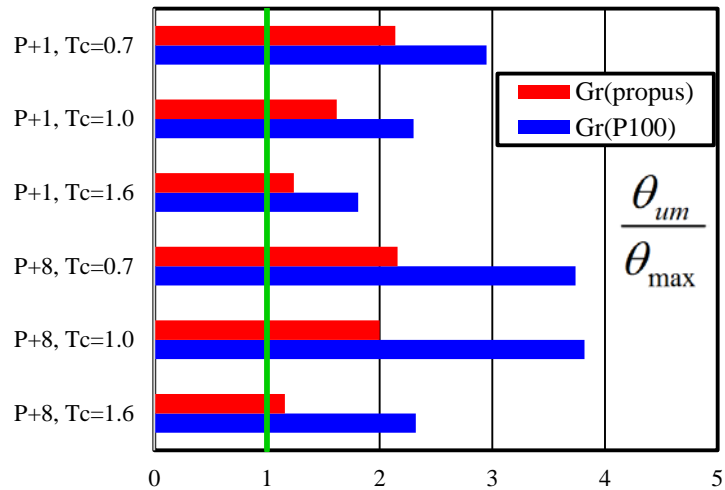


Figură 4.4 – Rezultate structură tip 1, P+8E, amplasament București

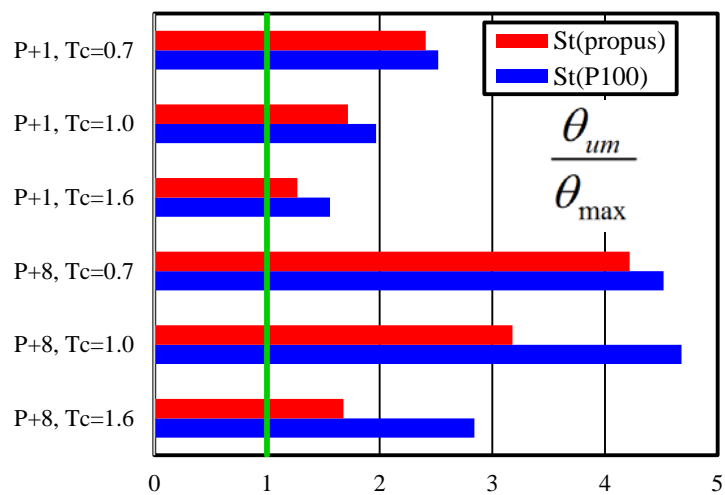
Pentru a avea o imagine globală despre variația raportului  $\frac{\theta_{um}}{\theta_{max}}$ , se reprezintă valorile acestuia pe un singur grafic pentru toate cadrele proiectate.

Analizând graficele din figurile 4.5 – 4.8, se poate afirma că valorile numerice ale raportului capacitate/cerință scad o dată cu creșterea perioadei de colț și cu scăderea numărului de etaje ale structurii.

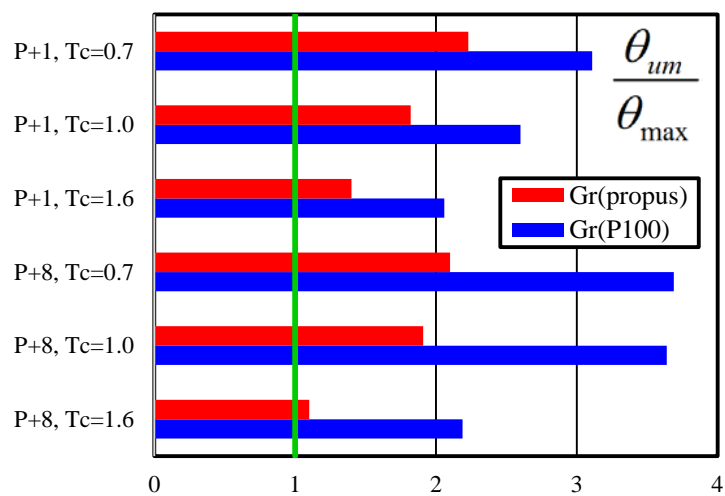
Se constată că raportul  $\frac{\theta_{um}}{\theta_{max}}$  determinat prin procedeele date în cod sunt în toate cazurile mai mari decât valorile aceluiași raport determinat mai riguros prin procedeul propus; cu alte cuvinte procedeul din cod este descoperitor. Cu toate acestea, se observă că valorile  $\frac{\theta_{um}}{\theta_{max}}$  determinate conform prevederilor codului sunt întotdeauna supraunitare, ceea ce pune în evidență faptul că proiectarea după codul menționat asigură siguranță. Deși valorile capabile ale rotațiilor din articulațiile plastice sunt substanțial mai mari decât cele reale, cerințele de rotire determinate prin procedeul din cod sunt și ele mai mari decât cele stabilite printr-un calcul mai riguros, astfel încât întotdeauna raportul capacitate/cerință să rămână  $>1$ .



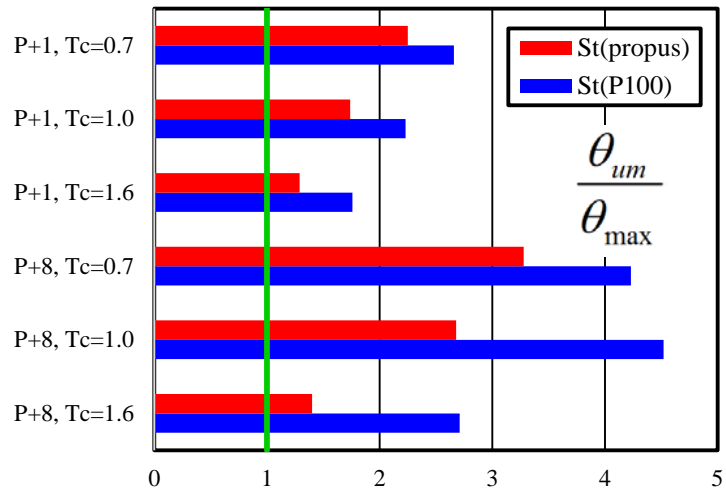
Figură 4.5 – Rezultate capacitate/cerință rotiri grindă – structură tip 1



Figură 4.6 – Rezultate capacitate/cerință rotiri stâlp – structură tip 1



Figură 4.7 – Rezultate capacitate/cerință rotiri grindă – structură tip 2



Figură 4.8 – Rezultate capacitate/cerință rotiri stâlp – structură tip 2

## 5. CONCLUZII. CONTRIBUȚIILE LUCRĂRII

În finalul lucrării se reiau principalele rezultate obținute în studiul efectuat în cadrul lucrării de doctorat, care reprezintă și principalele contribuții ale lucrării la clarificarea domeniului cercetat, respectiv proiectarea bazată pe deplasare a structurilor în cadre de beton armat.

Aceste rezultate pot fi sintetizate astfel:

### 1. Cu privire la evaluarea capacității de deformație plastică a elementelor

**1.1.** În lucrare s-au calibrat expresii pentru evaluarea capacității de deformație a grinzilor și stâlpilor structurilor în cadre de beton armat. Plecând de la rezultatele cercetărilor experimentale, aceste relații de calcul au o bază obiectivă și pot fi considerate superioare procedurilor din coduri sub aspectul fidelității reprezentării comportării reale. În mod special este de subliniat că valorile prescrise în P100-1/2013 [1] pentru evaluarea capacității de rotire plastică sunt excesive.

**1.2.** În cazul grinzilor, prelucrarea diagramelor de dispersie ale rotirilor capabile permite identificarea principalilor parametri care influențează această mărime:

- cantitatea de armătură transversală;
- raportul dintre aria de armătură comprimată și cea întinsă;
- raportul dintre deschiderea de forfecare și înălțimea secțiunii,  $\frac{L_v}{h}$ .

**1.3.** În cazul stâlpilor, parametri principali care influențează capacitatea de deformație sunt:

- cantitatea de armătură transversală de la baza stâlpului;
- valoarea forței axiale adimensionalizate;
- raportul dintre deschiderea de forfecare și înălțimea secțiunii.

### 2. Cu privire la evaluarea cerinței seismice de deformație:

**2.1.** Studiile efectuate au permis calibrarea unor relații de calcul pentru evaluarea cerințelor de rotire plastică în grinzile și stâlpii structurilor în cadre de beton armat. Expresiile de calcul au fost stabilite utilizând calea cea mai rațională: sinteza rezultatelor furnizate de calculul dinamic neliniar al unui număr semnificativ de tipuri caracteristice de cadre. În felul acesta, valorile obținute prin aplicarea acestor relații pot fi considerate în normele de proiectare. Se constată că procedeul de evaluare a cerințelor de rotire din P100-1/2013 [1], constând din amplificarea deplasărilor obținute dintr-un calcul liniar elastic sub forțele seismice de proiectare, amplificat cu produsul  $cq$ , duce la valori mai mari, în unele cazuri mult mai mari decât cerințele seismice efective.

**2.2.** Prelucrarea diagramelor de dispersie ale cerințelor de rotire pune în evidență principalii parametri de care depind aceste valori:

- perioada de control,  $T_c$ , a spectrului de accelerații. Cerințele au valori mai mari pentru perioade de colț scurte;

- perioada proprie de vibrație  $T_1$  a structurii. În domeniul  $T_1 > T_c$ , cerințele variază relativ puțin ca urmare a faptului că în acest domeniu spectrul elastic de deplasare variază puțin și reprezintă o limită superioară a spectrului neliniar de deplasare. În domeniul  $T_1 < T_c$  valorile cerințelor de deplasare sunt mai mari, întrucât spectrul neliniar de deplasare are ordonate semnificativ mai mari decât spectrul elastic;
- accelerația de proiectare.

### 3. În ceea ce privește siguranța oferită de codurile de proiectare:

Expresiile de calcul calibrate în cadrul lucrării de doctorat pentru evaluarea cerințelor seismice și a capacităților de rotire în zonele plastice ale elementelor structurilor în cadre constituie un instrument util și credibil pentru estimarea siguranței structurale.

Un parametru semnificativ pentru evaluarea siguranței structurale îl constituie raportul dintre capacitatea și cerința de rotire plastică,  $\frac{\theta_{um}}{\theta_{max}}$ . Prevederile codului P100-1/2013 [1] duc la valori supraestimate ale acestui raport, în special din cauza valorilor prea mari ale capacităților cu care sunt creditate elementele de beton armat. Cu toate acestea, deoarece valorile  $\frac{\theta_{um}}{\theta_{max}}$  conform P100-1/2013 [1] au rezultat în toate cazurile supraunitare rezultă că prevederile de calcul și de alcătuire constructivă din cod sunt în măsură să asigure dezvoltarea unui mecanism de plastificare corect.

Capacitatea de deformare este dependentă de cantitatea și modul de alcătuire a armăturii transversale. Expresiile din EN1998-1 [11] sunt excesive și, în majoritatea cazurilor, duc la armări inacceptabil de mari. În locul acestor expresii de calcul se pot folosi formulele propuse în lucrare.

## 6. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

În vederea îmbunătățirii relațiilor de evaluare a capacității de rotire, ca direcție viitoare de cercetare, se propune fundamentarea unei metodologii de estimare a rotirilor capabile în articulațiile plastice bazat pe integrarea curburilor care să estimeze cu acuratețe satisfăcătoare, care să ia în considerare și influența parametrilor de care depinde rotirea capabilă.

O altă direcție de dezvoltare a cercetării poate fi aplicarea unui procedeu de prelucrare diferit ale rezultatelor din testele experimentale, de exemplu prin calibrarea relațiilor de calcul folosind regresia exponențială.

Deși la calibrarea expresiilor pentru evaluarea cerințelor seismice de deformație au fost considerate o tipologie de structuri în cadre caracteristice pentru clădirile din România, în vederea obținerii unor valori de calcul acoperitoare pentru cele mai multe situații, va trebui ca studiul să fie completat cu analize și a altor configurații de cadre etajate (structuri cu deschideri inegale, cu diferite proporții – raportul dintre înălțimea de etaj și deschidere).

O categorie de interes deosebit o constituie structurile pentru clădiri industriale și de comerț care prezintă particularități specifice.

O dată studiul astfel completat, lucrarea se poate valorifica în elaborarea unor ghiduri de proiectare completă pentru structuri tip cadru, care pot constitui un material foarte util pentru proiectare.

Pasul următor care se impune este întocmirea unui studiu pentru structuri cu pereți de beton armat, care să preia conceptele și prevederile folosite în lucrarea de doctorat.



## 7. BIBLIOGRAFIE

1. **MDRAP (2013)** MDRAP, “*Cod de proiectare seismică: Partea I—Prevederi de proiectare pentru clădiri*”, P100-1, Septembrie 2013
7. **EN 1992-1-1 (2004)** CEN, “Eurocode 2—Design of Concrete Structures: Part 1-1— General Rules and Rules for Buildings,” EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004, 225 pp.
9. **Pristley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J. (2007)** Pristley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J., “Displacement Based Seismic Design of Structures”, IUSS Press, Pavia, Italy, 2007
15. **EN 1998-3 (2005)** CEN, “Eurocode 8—Design of structures for earthquake resistance: Part 3— Assessment an retrofitting of buildings,” EN 1998-3, Brussels, Belgium, June 2005
20. **Haselton, C. B., Liel, A. B., Lange, S. T., Deierlein, G. G. (2008)** Haselton, C. B., Liel, A. B., Lange, S. T., Deierlein, G. G., “ Beam-Column Element Model Calibration for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of RC Frame Buildings”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2007/03, University of California, Berkeley, May 2008
21. **Zhu, L. (2005)** Zhu, L., “ Probabilistic Drift Capacity Models for Reinforced Concrete Columns”, teză de doctorat, University of British Columbia, August 2005
22. **Fema 356** American Society of Civil Engineers (ASCE). 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356. Federal Emergency Management Agency: Washington DC.
24. **Mckenna F, Fenves G, Scott M, Jeremic B (2000)** Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). Berkley, CA
25. **Otani, S.** Hysteretic models for reinforced concrete for earthquake analyses. Faculty of Architecture, University of Tokyo, Tokyo, Vol XXXVI, No.2 1981, pp 125-159
26. **Taucer, Fabio F, E Spacone, FC Filippou. A** Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures
27. **D. C. Kent and R. Park** Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Division, ASCE, 97(7):1969–1990, 1971
28. **Rayleigh, L. (1877)** Theory of Sound (two volumes). Dover Publications, New York, 1945 re-issue, second edition
29. **MSIMQKE** CD lucrare - Postelnicu, T., Damian, I, Zamfirescu, D., Morariu, E., “Proiectarea structurilor de beton armat în zone seismice”, MarLink, București, 2012
30. **Gasparini, D. A., Vanmarke, E. H. (1976)** Gasparini, D. A., Vanmarke, E. H., “Simulated Eathquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra”, Rpt. No. R76-4, Dept. of Civil Engrg., MIT, Cambridge, Massachusetts, 1976
32. **PERFORM-3D user guide** Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures (user guide and getting start), version 4, 2008

