

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**

**REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT
- ÎMBUNĂTĂȚIREA COMPORTĂRII STRUCTURILOR
METALICE CONTRAVÂNTUITE CENTRIC LA ACȚIUNI
SEISMICE -**

Profesor conducător de doctorat
Prof.univ.dr.ing. Luca Oana

Student doctorand
ing. Zburătură (Marcu) Elena Ramona

Cuprins:

1	Aspecte introductive	12
1.1	Scopul și principalele obiective ale lucrării	12
1.2	Concepte de proiectare antiseismică a structurilor	13
1.3	Tipuri de cadre contravântuite centric	16
1.4	Comportarea la încărcări ciclice a barelor utilizate ca diagonale în structuri metalice contravântuite centric	19
1.5	Observații și concluzii	30
2	Compararea prevederilor de proiectare la acțiuni seismice pentru structuri metalice contravântuite centric	31
2.1	Prevederile de proiectare la acțiuni seismice conform P100-1/2013	31
2.1.1	Aspecte generale pentru construcții din oțel	31
2.1.2	Prevederi pentru cadrele contravântuite centric	32
2.1.3	Prevederi pentru calculul diagonalelor	33
2.1.4	Prevederi pentru calculul grinzilor și stâlpilor	34
2.2	Prevederile de proiectare la acțiuni seismice conform SR EN 1998-1:2004	35
2.2.1	Aspecte generale pentru construcții din oțel	35
2.2.2	Prevederi pentru cadrele contravântuite centric	35
2.2.3	Prevederi pentru calculul diagonalelor	36
2.2.4	Prevederi pentru calculul grinzilor și stâlpilor	36
2.3	Prevederile de proiectare la acțiuni seismice conform AISC 341-16	37
2.3.1	Aspecte generale pentru construcții din oțel	37
2.3.2	Prevederi pentru cadrele contravântuite centric	39
2.3.3	Prevederi pentru calculul diagonalelor	39
2.3.4	Prevederi pentru calculul grinzilor și stâlpilor	40
2.4	Structuri dimensionate în diferite variante ținând seama de prescripțiile normativului românesc P100-1/2013	41
2.4.1	Descrierea analizelor efectuate	41
2.4.2	Comentarii cu privire la stările de eforturi din analiza static liniară	45
2.4.2.1	Eforturi maxime în diagonale	45
2.4.2.2	Eforturi maxime în grinzi	46
2.4.2.3	Eforturi maxime în stâlpii centrali	47
2.4.2.4	Eforturi maxime în stâlpii marginali	48
2.4.3	Analize static neliniare	49
2.4.4	Consumul estimat de oțel	58
2.4.5	Observații și recomandări	60
2.5	Structuri dimensionate conform normativelor P100-1/2013, SR EN 1998-1:2004 și AISC 341-2016	61
2.5.1	Descrierea analizelor efectuate	61
2.5.2	Comentarii cu privire la stările de eforturi din analiza static liniară	64
2.5.2.1	Eforturi maxime în diagonale	64
2.5.2.2	Eforturi maxime în grinzi	64
2.5.2.3	Eforturi maxime în stâlpii centrali	65
2.5.2.4	Eforturi maxime în stâlpii marginali	66
2.5.3	Consumul estimat de oțel	67
2.5.4	Analize static neliniare	69
2.5.5	Necesitatea prevederii de zone potențial plastice suplimentare în rigle	81
2.5.6	Observații și recomandări	83

3	Avantaje și dezavantaje ale principalelor sisteme de contravântuire centrică cu diagonale întinse utilizate în structuri antiseismice	85
3.1	Descrierea structurilor analizate	85
3.2	Valori extreme pentru forțe tăietoare de bază și deplasări orizontale ale planșelor	89
3.3	Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor	91
3.3.1	Lungiri plastice maxime în diagonale	91
3.3.2	Rotiri maxime în zonele potențial plastice din grinzi	92
3.3.3	Energia consumată în timpul analizei dinamic neliniară	94
3.4	Valori maxime ale eforturilor secționale	95
3.4.1	Eforturi în grinzi	95
3.4.2	Eforturi în stâlpii centrali	96
3.4.3	Eforturi în stâlpii marginali	97
3.5	Stări de eforturi în analiza static liniară	98
3.5.1	Forțele axiale în elementele structurale produse de încărcarea gravitațională	98
3.5.2	Forțele axiale în elementele structurale produse de acțiunea seismică orizontală	100
3.5.3	Momentele încovoietoare în elementele structurale produse de acțiunea seismică orizontală	105
3.6	Consumul estimat de oțel pentru structurile analizate	107
3.7	Rezultate și comentarii asupra sistemelor de contravântuire analizate	109
4	Particularități de alcătuire pentru structuri metalice contravântuite centric	111
4.1	Variante de fixare a diagonalelor și grinzilor de stâlpii de cadru	111
4.1.1	Soluții constructive analizate	111
4.1.2	Analize dinamic neliniare efectuate	114
4.1.3	Rezultate și comentarii	114
4.1.3.1	Valori extreme pentru forțe tăietoare de bază și deplasări orizontale ale planșelor	114
4.1.3.2	Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor	116
4.1.3.3	Comportarea în timpul analizelor dinamic neliniare	119
4.1.3.4	Valori maxime ale eforturilor secționale constatate în timpul analizelor dinamic neliniare	122
4.1.3.5	Consumul estimat de oțel	125
4.1.4	Observații și recomandări	127
4.2	Influența poziționării zonelor potențial plastice în lungul riglelor de cadru	129
4.2.1	Soluții constructive analizate	129
4.2.2	Analize efectuate	132
4.2.2.1	Valori extreme pentru forțe tăietoare de bază și deplasări orizontale ale planșelor	132
4.2.2.2	Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor	134
4.2.2.3	Energia consumată în timpul analizei dinamic neliniară	135
4.2.2.4	Valori maxime ale eforturilor secționale în diferite categorii de elemente structurale	136
4.2.2.5	Consumul estimat de oțel pentru structurile analizate	138
4.2.3	Observații și recomandări	140
5	Concluzii. Contribuții personale. Direcții de continuare a cercetării	141
5.1	Observații și concluzii asupra comportării diagonalelor la cicluri alternante întindere-compresiune	141
5.2	Observații și concluzii asupra prevederilor de proiectare a cadrelor contravântuite centric la acțiuni seismice	141
5.3	Observații și concluzii legate de diferitele sisteme de contravântuire centrică analizate	143
5.4	Observații și concluzii legate de alcătuirea cadrelor contravântuite centric	145
5.5	Contribuții personale	146
5.6	Direcții de continuare a cercetării	146
6	Bibliografie	148

1 Aspecte introductive

1.1 Scopul și principalele obiective ale lucrării

Scopul principal al lucrării este acela de a evidenția comportarea structurilor contravântuite centric echipate cu diagonale care lucrează preponderent la întindere sub acțiuni seismice severe, atât din punct de vedere a normelor de proiectare, cât și din punct de vedere al diferitelor variante constructive de alcătuire.

Obiectivele principale ale lucrării de doctorat sunt:

A) Compararea prevederilor de proiectare la acțiuni seismice pentru structuri metalice contravântuite centric;

B) Evidențierea principalelor avantaje și dezavantaje pentru cele mai des întâlnite sisteme de contravântuire centrică utilizate în structuri antiseismice;

C) Analize comparative pentru diferite variante de alcătuire a structurilor metalice contravântuite centric echipate cu diagonale care lucrează preponderent la întindere.

În ceea ce privește compararea prevederilor de proiectare la acțiuni seismice pentru structuri metalice contravântuite centric, s-au evidențiat diferențele existente în prescripțiile de proiectare cuprinse în următoarele standarde:

- P 100-1/2013, Cod de proiectare seismică - Partea I - Prevederi de proiectare pentru clădiri;
- SR EN 1998-1:2004, Eurocod 8: Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur - Partea I: Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri;
- AISC 341-2016, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings - American Institute of Steel Construction.

S-au analizat două sisteme structurale contravântuite centric cu zece niveluri, care au fost dimensionate pe rând în mai multe variante de proiectare la acțiuni seismice având în vedere prescripțiile de proiectare cuprinse în normele analizate. Cadrele dimensionate în diferitele variante considerate sub aceeași încărcare seismică de proiectare și au fost supuse ulterior unor analize static neliniare comparându-se:

- solicitările maxime în diferite categorii de elemente structurale;
- succesiunea formării articulațiilor plastice;
- energia consumată prin deformări postelastice;
- consumul estimat de oțel.

Pentru a evidenția diferențele de comportare la acțiuni seismice severe a celor mai frecvent folosite sisteme de contravântuire centrică cu diagonale care lucrează preponderent la întindere, s-au considerat două grupuri de cadre cu șase și zece niveluri echipate fiecare cu sistemele de contravântuire indicate în Fig. 1.1. Cadrele analizate au avut aceleași dimensiuni pentru deschideri și înălțimea de nivel.

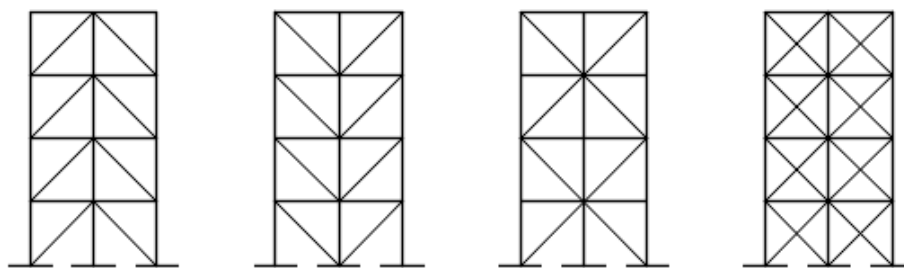


Fig. 1. 1 Sisteme de contravântuire centrică analizate

Fiecare din cele două grupuri de cadre au fost încărcate cu aceeași valoare a încărcării seismice de proiectare, evaluată în conformitate cu prescripțiile normativului P100-1/2013 [1]. Cadrele dimensionate au fost supuse la analize dinamic neliniare, utilizând trei accelerograme distincte. S-au evidențiat diferențele de comportare favorabile și nefavorabile din timpul analizelor.

Două cadre contravântuite centric cu șase și zece niveluri s-au dimensionat pe rând în trei variante de alcătuire:

- având prinderi articulate (pe bolț) la extremitățile diagonalelor și riglelor;
- având prinderi articulate la capetele diagonalelor și prinderi rigide la extremitățile riglelor;
- având prinderi rigide între toate categoriile de elemente structurale.

S-au mai analizat diferențele de comportare în timpul unor analize dinamic neliniare, a unor cadre contravântuite centric la care zonele potențial plastice din grinzi au fost dispuse pe rând la aproximativ 1m și la aproximativ 2m de axele stâlpilor de cadru.

1.2 Concepte de proiectare antiseismică a structurilor

Metoda proiectării capacității de rezistență presupune dimensionarea zonelor potențial plastice la solicitările produse de încărcarea seismică de proiectare neamplificată. Restul elementelor structurale se vor dimensiona la solicitările care permit atingerea capacității de rezistență a zonelor potențial plastice ținând seama de suprazistența materialului, obținându-se astfel o supradimensionare a celorlalte elemente structurale comparativ cu zonele potențial plastice.

Principiile care stau la baza metodei de proiectare a capacității de rezistență:

- a) Controlul solicitărilor în structură - forța orizontală maximă care acționează asupra structurii nu trebuie să depășească valoarea forței orizontale care conduce la atingerea efortului capabil în toate zonele potențial plastice, respectiv la mecanismul plastic de cedare impus.
- b) Stabilirea zonelor pentru disiparea energiei - se vor alcătui constructiv și stabili precis prin proiectare, zone de disipare a energiei astfel încât să se asigure o ductilitate ridicată.
- c) Protejarea zonelor cu ductilitate redusă împotriva suprasolicitării - zonele cu ductilitate redusă (comportare fragilă, casantă) vor fi menținute în domeniul elastic indiferent de intensitatea acțiunii seismice.
- d) Comportarea ductilă a structurii de rezistență - structura de rezistență în ansamblul ei, trebuie să prezinte o comportare ductilă cu o capacitate mare de deformare, evitând cedarea fragilă a elementelor care sunt proiectate să rămână în domeniul elastic.

Chiar dacă energia indusă în structură de un eveniment seismic sever este mai mare decât cea preconizată în momentul proiectării, deformațiile suferite de structură vor fi probabil mai mari sub acțiunea unui cutremur cu intensitate mai ridicată decât cea considerată la momentul dimensionării, dar colapsul structural va fi evitat. Metoda proiectării capacității de rezistență asigură astfel o comportare predictibilă a structurii dimensionate, la o gamă largă de evenimente seismice.

1.3 Tipuri de cadre contravântuite centric

Cadrele metalice contravântuite centric sunt sisteme structurale la care încărcările orizontale sunt preluate de componente care lucrează în special la forțe axiale.

Cadrele contravântuite centric, în care se acceptă dezvoltarea de deformații postelastice în timpul cutremurelor severe, sunt împărțite în două categorii, în funcție de modul de lucru considerat în momentul proiectării pentru contravântuirile cadrului:

- cadre la care în proiectare se consideră active doar contravântuirile întinse, la care preluarea forțelor seismice orizontale se face în special prin diagonalele întinse, efectul diagonalelor comprimate putând fiind neglijat (vezi Fig. 1.6);

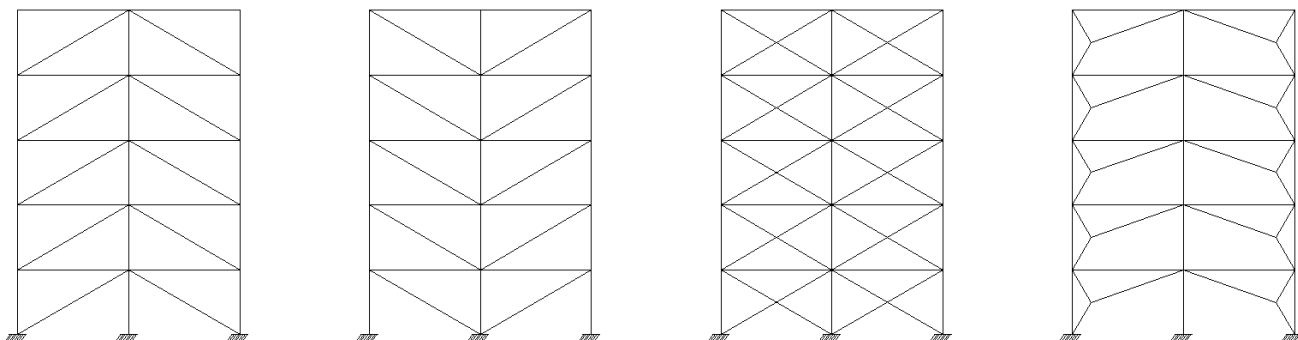


Fig. 1. 6 Cadre cu contravântuiri centrice diagonale sau echivalente (la care în proiectarea seismică se poate neglija efectul barelor de contravântuire comprimate)

- cadre la care în proiectare efectul elementelor de contravântuire comprimate nu poate fi neglijat, la care forțele seismice orizontale sunt preluate atât de diagonalele întinse cât și de cele comprimate (vezi Fig. 1.7).

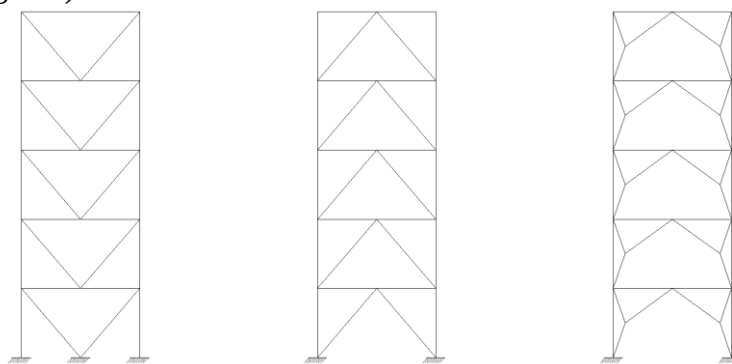


Fig. 1. 7 Cadre contravântuite centric în sistem V sau echivalent (la care în proiectarea seismică nu se poate neglija efectul barelor de contravântuire comprimate)

În cazul sistemului de contravântuire centric cu diagonale dispuse în K, ieșirea din lucru prin flambaj al diagonalelor comprimate, conduce la acest sistem de contravântuire la apariția de forțe tăietoare și momente încovoietoare semnificative în stâlpi (vezi Fig. 1.9), deoarece forța axială din diagonală întinsă nu mai este echilibrată de efortul axial din diagonală comprimată. Structurile în cadre contravântuite centric cu diagonale în K nu pot fi proiectate în conceptul preluării încărcărilor seismice cu disipare de energie [2].

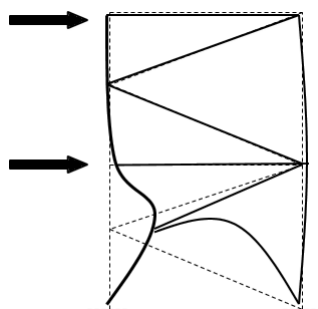


Fig. 1. 9 Modul de cedare al cadrului contravântuit centric în sistem K [3]

Pentru obținerea unei bune performanțe sub acțiunea cutremurelor care produc incursiuni în domeniul postelastice al structurii, contravântuirea trebuie să fie primul element al unei structuri care cedează (care iese din lucru prin flambaj la compresiune, respectiv care se plastifică la întindere).

În structurile metalice în cadre contravântuite centric zonele disipative sunt dirijate în diagonale, care în timpul acțiunii seismice sunt supuse alternativ la solicitări de întindere și de compresiune. Disiparea de energie are loc preponderent prin deformarea postelatică a diagonalelor întinse. În normativele de proiectare seismică în vigoare, obiectivul proiectării cadrelor contravântuite centric în conceptul consumului unei fracțiuni semnificative a energiei induse în structură de seism prin deformarea postelatică a structurii, este acela de a asigura zone disipative în diagonale și de a evita plastificarea sau flambajul grinzilor și stâlpilor înainte de ieșirea din lucru a elementelor de contravântuire verticală.

Structurile în cadre contravântuite centric prezintă o rigiditate ridicată la acțiuni laterale, dar au o capacitate redusă de disipare a energiei indusă în structură de seism prin deformații plastice. Din acest motiv cadrele contravântuite centric se combină de regulă cu structuri în cadre cu noduri rigide în așa numitele structuri duale.

Ductilitatea redusă a cadrelor contravântuite centric are în general trei cauze:

- Deformațiilor plastice care se dezvoltă la nivelul diagonalelor sub solicitări de întindere (pentru un sens de aplicare al încărcărilor seismice orizontale) nu le corespund deformații postelastice de compresiune (pentru sensul opus de aplicare al încărcărilor seismice orizontale).
- Flambajul repetat al diagonalei comprimate conduce la o comportare nesatisfăcătoare (cu degradări de rigiditate și/sau de rezistență) la solicitări ciclice în domeniul postelatic. Când o diagonală comprimată iese din lucru prin flambaj au loc diferite fenomene nefavorabile pentru comportarea structurii:
 - a) atunci când diagonală comprimată iese din lucru, diagonalei întinse i se transferă brusc solicitări adiționale;
 - b) flambajul diagonalei poate genera fenomene de voalare (în bara propriu-zisă sau în guseele de prindere), care la solicitări ciclice ulterioare pot favoriza amorsarea de fisuri care favorizează riscul de cedare fragilă a barei sau a prinderii;
 - c) chiar și în cazul structurilor cu dispunere simetrică în plan a cadrelor contravântuite (dispunere care favorizează reducerea efectelor de torsiune generală), flambajul diferit al diagonalelor unui cadru contravântuit în raport cu diagonalele altui cadru (identice din punct de vedere al alcătuirii cu primul), poate conduce în timpul seismelor puternice, la efecte de torsiune generală semnificative, greu de controlat sau anticipat;
 - d) dacă flambajul diagonalei are loc în lateral (în afara planului cadrului contravântuit) se pot produce degradări ale elementelor nestructurale.
- După ieșirea din lucru a diagonalei (prin flambajul diagonalei comprimate și prin plastificarea celei întinse) și după apariția de plastificări la nivelul bazei tuturor stâlpilor, nu se obține de regulă un mecanism structural favorabil de disipare a energiei pentru cadrul contravântuit centric.

Incursiunile în domeniul postelatic apar mai întâi în diagonale deoarece prin proiectare celelalte categorii de elemente structurale (grinzilor și stâlpilor) li s-a asigurat un spor de capacitate de rezistență sub acțiunea solicitărilor seismice în raport cu diagonalele. Din acest motiv, pentru anumite cutremure ce solicită în mai mică măsură structura, deformațiile plastice se concentrează exclusiv la nivelul diagonalelor cadrelor contravântuite centric.

Atâta timp cât deformațiile plastice se concentrează doar la nivelul diagonalelor, comportarea structurii în cadre contravântuite centric este predictibilă. Dacă solicitările cresc astfel încât în grinzi și stâlpi se depășește surplusul de capacitate de rezistență asigurat prin dimensionare în raport cu diagonalele, deformațiile plastice încep să apară în mod necontrolat în toate categoriile de elemente structurale. Neimpunerea prin proiectare a unui mecanism global favorabil de plastificare face ca valorile maxime ale forțelor seismice orizontale cu care se poate încărca structura în timpul seismelor puternice să poată fi apreciate cu greu.

1.4 Comportarea la încărcări ciclice a barelor utilizate ca diagonale în structuri metalice contravântuite centric

Prevederea de contravântuiri fixate centric la noduri constituie o variantă economică pentru a asigura o rigiditate suficientă structurilor metalice multietajate sub încărcări laterale, și de a transmite forțele tăietoare de nivel produse de aceste încărcări de la un nivel la altul al construcției. În cazul cadrelor contravântuite centric barele sistemului vertical de contravântuire conlucrează împreună cu stâlpii și grinzile adiacente, formând sisteme structurale de tipul unor console zăbrelete verticale ancorate în sistemul de fundare.

Prezența contravântuirilor în structură conduce la încărcarea sistemului structural preponderent cu forțe axiale, conducând în raport cu alte sisteme structurale, cum ar fi cadrele cu noduri rigide sau cadrele contravântuite excentric, la valori mai reduse de momente încovoietoare în grinzi și stâlpi și implicit la secțiuni mai puțin dezvoltate ale acestora. În timpul cutremurelor severe, diagonalele cadrelor contravântuite centric lucrează alternant la întindere și compresiune în funcție de schimbarea sensului de aplicare al încărcărilor seismice orizontale. În urma încărcării ciclice (compresiune-întindere) se obțin curbe histeretice de tipul celor indicate în Fig. 1.10 ÷ 1.12.

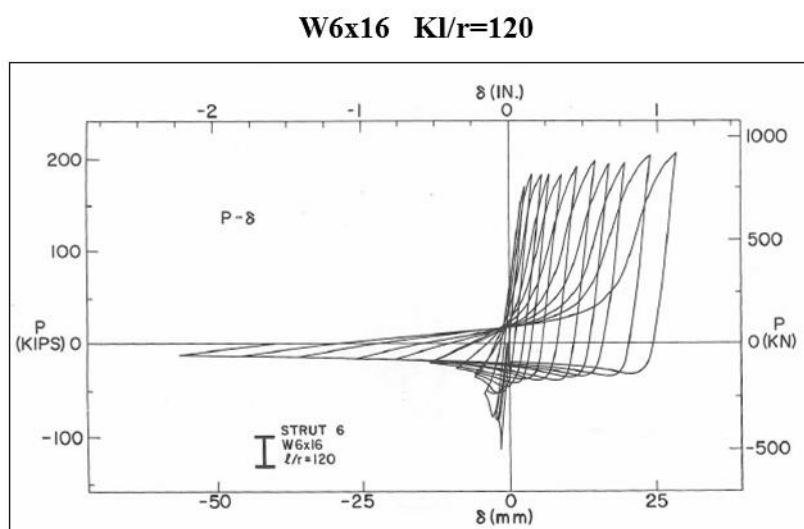


Fig. 1. 10 Curbe P- δ pentru o bară cu zveltețe 120 realizată dintr-un profil laminat I [3]

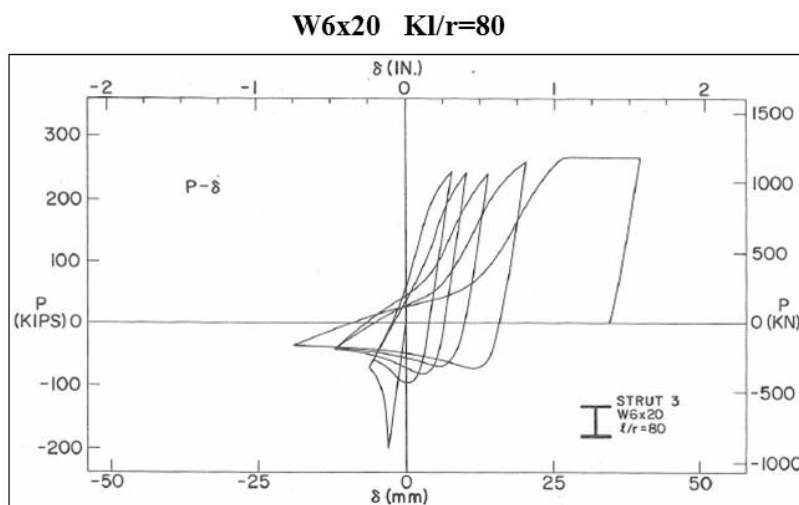


Fig. 1. 11 Curbe P- δ pentru o bară cu zveltețe 80 realizată dintr-un profil laminat I [3]

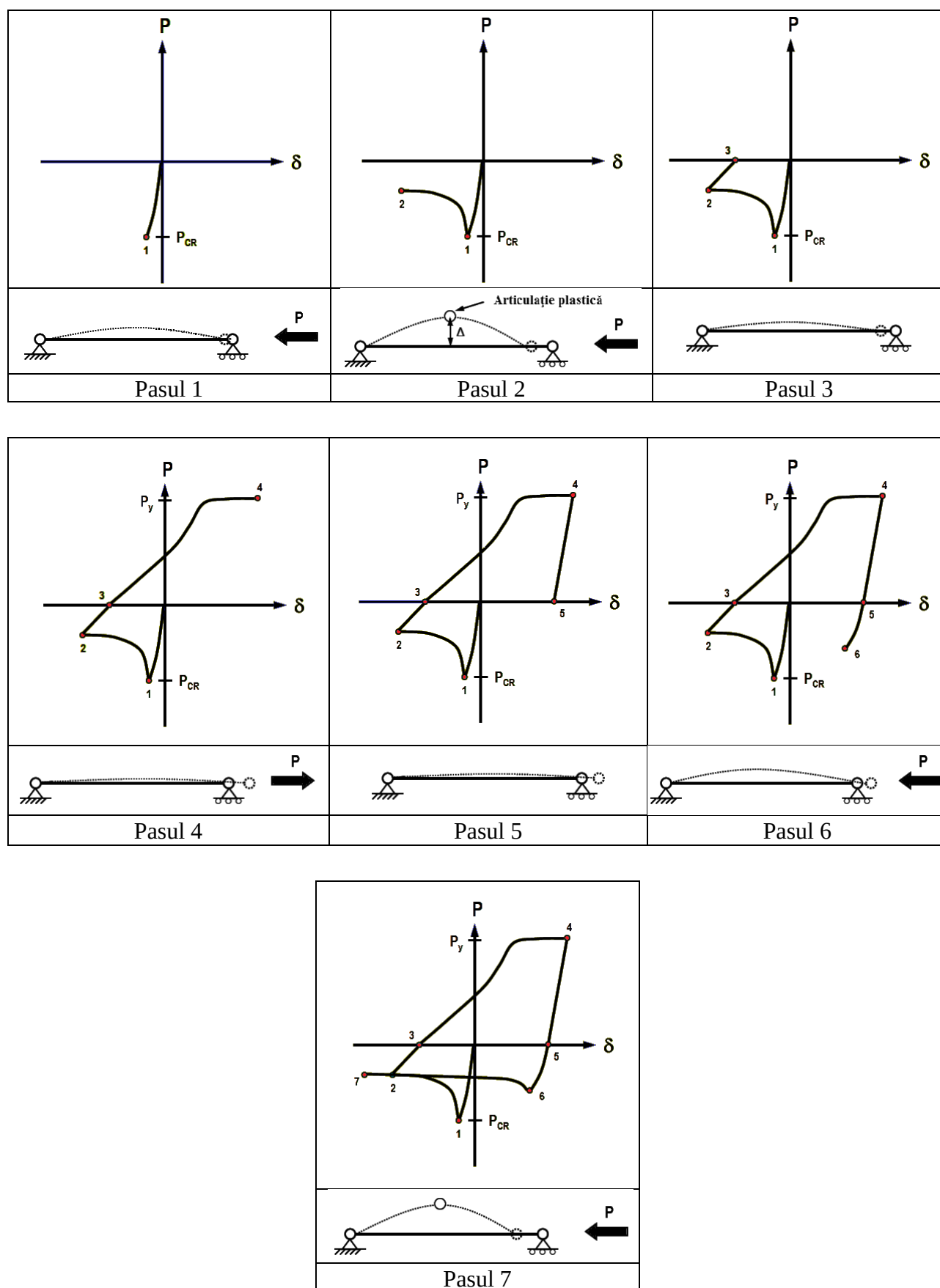


Fig. 1. 13 Comportarea diagonalelor sub încărcări axiale ciclice [3]

Pe diagramele P- δ obținute în urma încărcării ciclice (compresiune-întindere) a diferitelor bare dublu-articulate, care se pot utiliza ca diagonale în cadrele contravântuite centric, se pot distinge următoarele puncte caracteristice (corespunzătoare anumitor stadii caracteristice vezi Fig. 1.13):

Punctul 1 - diagonala este încărcată pentru prima oară la compresiune până la atingerea capacității de rezistență la flambaj (pierderea stabilității generale a barei); flambajul barei se poate produce în domeniul elastic de comportare pentru bare cu zveltețe ridicată ($\lambda \geq 120$, respectiv $\lambda_r \geq 1,3$) sau în domeniul postelastice pentru bare cu zveltețe mai redusă (caz în care în bara rămâne cu deformații remanente de compresiune generate de regulă și de diferite forme de voalare (așa cum se pot observa în Fig. 1.14 ÷ 1.16);

Punctul 2 - este punctul până la care este continuată deformarea barei sub încărcarea de compresiune; flambajul barei se poate produce în domeniul elastic și chiar deformațiile ulterioare ale barei sub acțiunea încărcărilor de compresiune pot rămâne în domeniul elastic de comportare; în funcție de mărimea deformațiilor de compresiune, la mijlocul barei se poate dezvolta o articulație plastică din flambajul prin încovoiere al barei; valoarea efortului de compresiune preluat de bară se reduce semnificativ (de la punctul 1 la punctul 2);

Punctul 3 - este punctul în care prin descărcare diagonala nu mai este solicitată axial; chiar dacă încărcarea din bară este zero, diagonala prezintă o deformație remanentă de compresiune semnificativă (scurtare);

Punctul 4 - reprezintă punctul până în care diagonala este încărcată la întindere dincolo de atingerea limitei de curgere;

Punctul 5 - este punctul în care printr-o altă descărcare forța axială din bară este eliminată din nou ($P = 0$); diagonala prezintă o deformație remanentă de întindere (lungire);

Punctul 6 - reprezintă punctul în care diagonala încărcată din nou la compresiune își pierde din nou stabilitatea generală; flambajul barei se produce la o forță de compresiune mai redusă față de punctul 1, datorită faptului că bara prezintă o lungire și o curbura remanentă în raport cu situația încărcării inițiale cu forțe de compresiune; capacitatea de rezistență la flambaj a barei; adică capacitatea barei de a prelua eforturi de compresiune, este redusă față de ciclul anterior (punctul 1);

Punctul 7 - se continuă încărcarea sub eforturi de compresiune, iar deformațiile ulterioare ale barei sub acțiunea încărcărilor de compresiune se accentuează față de încărcarea anterioară de compresiune (în raport cu punctul 2); deformațiile de compresiune pot rămâne în domeniul elastic de comportare sau funcție de mărimea deformațiilor de compresiune, la mijlocul barei se poate dezvolta o articulație plastică din flambajul barei (prin încovoiere); valoarea efortului de compresiune preluat de bară se reduce mai puțin semnificativ din punctul 6 în punctul 7 (față de reducerea forței de compresiune din punctul 1 în punctul 2, corespunzătoare ciclului anterior de solicitare).

- Degradări de rezistență și rigiditate în cazul diagonalelor cu zveltețe ridicată

În cazul diagonalelor cu zveltețe ridicată, flambajul are loc preponderent în domeniul elastic de comportare, fără deformații remanente semnificative. Atunci când diagonala este supusă la întindere în domeniul postelastic, ea suferă deformații plastice și prezintă o alungire remanentă la descărcare. Datorită faptului că flambajul diagonalei se produce fără deformații plastice semnificative, alungirea remanentă la întindere nu este compensată de o scurtare remanentă datorată solicitărilor de compresiune. Lungirile remanente suferite de diagonale la întindere nu sunt reduse în cazul solicitărilor de compresiune, ci se cumulează treptat de la un ciclu de solicitare la altul. Din acest motiv bara rămâne cu o alungire remanentă care va crește din ce în ce mai mult, la solicitări de întindere ulterioare până când la un moment dat se atinge deformația ultimă și bara sau guseul cedează prin rupere. Datorită faptului că alungirea remanentă a barei crește de la un ciclu de solicitare la altul, diagonala întinsă va intra în lucru la deformații orizontale din ce în ce mai mari ale cadrului, ceea ce va conduce la o degradare (diminuare) semnificativă a rigidității. Datorită creșterii deformațiilor relative de la un ciclu de solicitare la altul, se ajunge la curburi inițiale din ce în ce mai mari atunci

când bara este supusă la compresiune. Având curburi inițiale din ce în ce mai mari diagonală comprimată își pierde stabilitatea generală (flambează) la eforturi de compresiune din ce în ce mai reduse, ceea ce se traduce printr-o degradare de rezistență.

- Degradări de rezistență și rigiditate în cazul diagonalelor cu zveltețe redusă

În cazul acestor diagonale, flambajul barei are loc în domeniul postelatic, prezentând deformații remanente după încheierea solicitării de compresiune. După ce diagonală întinsă rămâne cu o alungire la descărcare, dacă flambajul aceleiași diagonale are loc în domeniul postelatic, o parte din această alungire remanentă poate fi compensată eventual printr-o scurtare remanentă. Flambajul în domeniul postelatic este însă, de regulă, însoțit de fenomenul de voalare, de curbarea remanentă a barei (vezi Fig. 1.14) sau a guseelor de prindere (vezi Fig. 1.15). Bara își pierde rapid forma rectilinie inițială.



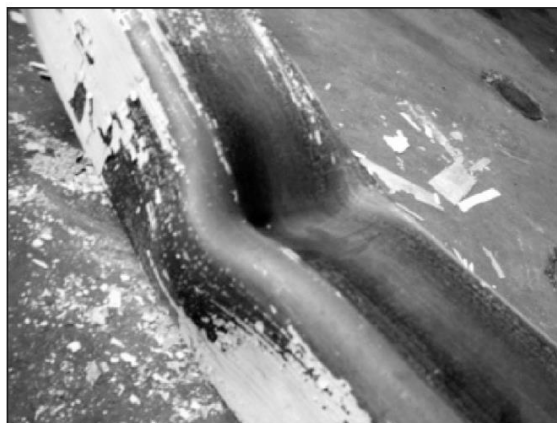
Fig. 1. 14 Deformații remanente sub solicitări de compresiune produse de fenomene de voalare [5]

În urma solicitărilor ulterioare de întindere, bara nu revine la forma rectilinie inițială, ci rămâne curbă. La următoarea pierdere a stabilității generale a diagonalei, curbarea barei se accentuează. Creșterea curbării barei de la un ciclu de solicitare la altul, face ca aceasta să-și piardă stabilitatea la eforturi de compresiune din ce în ce mai reduse. Pe de altă parte, creșterea curbării barei face ca bara întinsă să se lungească din ce în ce mai mult și să intre în lucru la deformații pe orizontală din ce în ce mai mari ale cadrului. În raport cu diagonală cu zveltețe mare, în cazul diagonalei cu zveltețe redusă supusă la solicitări ciclice în domeniul postelatic, se constată și o degradare mai rapidă a capacității de rezistență la compresiune și a rigidității de la un ciclu la altul.

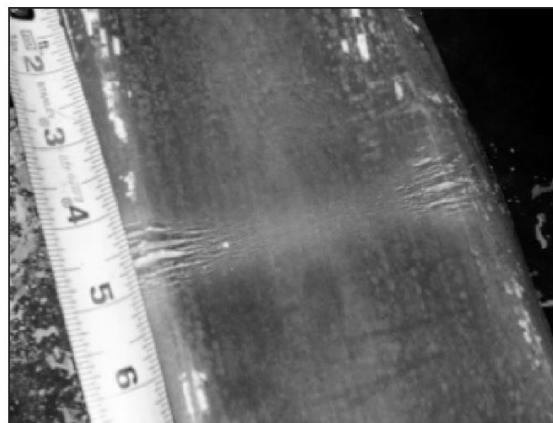


Fig. 1. 15 Deformații remanente la nivelul guseelor sub solicitări de compresiune [3]

La barele cu zveltețe redusă, deformațiile alternante de compresiune/întindere pot produce ruperea diagonalelor la un număr relativ redus de cicluri de solicitare. Deformațiile remanente produse sub eforturi de compresiune de fenomenele de voalare, constituie la încercările ulterioare de întindere concentratori de eforturi care favorizează amorsarea de fisuri și ruperea barelor sub eforturi de întindere (vezi Fig 1.16).



a) Concentratori de eforturi (zona voalată) [6]



b) Inițierea rupei [6]



c) Progresia rupei [6]



d) Ruperea finală [6]

Fig. 1. 16 Principalele etape ale rupei barelor cu zveltețe redusă la solicitări ciclice [6]

În Fig. 1.16 sunt prezentate principalele etape de propagare a rupei unei diagonale supuse la cicluri de încărcare alternante întindere-compresiune. Datorită valorii relativ reduse a zvelteței diagonalei ($\lambda \approx 1/r = 80$), flambajul barei are loc în domeniul postelast. În zona centrală a barei (acolo unde se dezvoltă deformațiile laterale cele mai mari din flambajul barei) apar deformații remanente (plastice) generate de fenomene de voalare (vezi Fig.1.16 a).

Sub acțiunea eforturilor de întindere, zona voalată anterior sub acțiunea eforturilor de compresiune, are tendința să se îndrepte. Flambajul repetat și tendințele de întreprtare repetată sub acțiunea încărcărilor ciclice de compresiune/întindere favorizează amorsarea de fisuri în zona în care pereții secțiunii diagonalei voalează (vezi Fig.1.16 b). În zonele de colț ale secțiunii rectangulare a diagonalei se amorsează fisuri care se propagă rapid pe secțiunea diagonalei în următoarele cicluri de solicitare (vezi Fig.1.16 c). În câteva cicluri de solicitare fisurile se propagă pe întreaga secțiune a diagonalei și are loc ruperea secțiunii diagonalei (vezi Fig.1.16 d).

Forma curbelor histeretice $P-\Delta$ și modul de cedare al diagonalelor depinde foarte mult de detaliile constructive care au influență asupra flambajului barei: secțiunea diagonalei, conformarea guseelor, modul de dimensionare și alcătuire al prinderilor.

În Fig. 1.20 și în Fig. 1.21 se poate observa modul asemănător de cedare al unor diagonale alcătuite din țevi rectangulare, ce fac parte din cadre contravântuite centric, în urma cutremurului care a avut loc la Northridge California în anul 1994 [3].

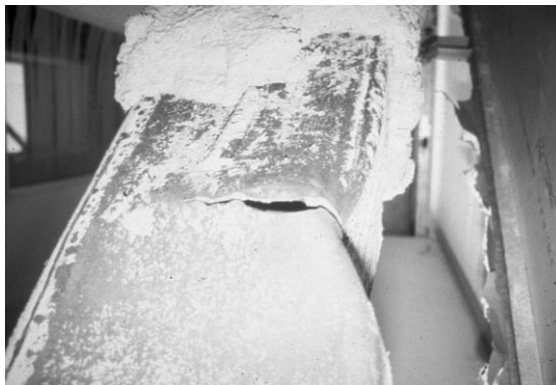


Fig. 1. 20 Propagarea fisurii într-o diagonală din țevă rectangulară, în urma cutremurului de la Northridge 1994 [3]



Fig. 1. 21 Diagonală din țevă rectangulară, cedată în urma cutremurului de la Northridge 1994 [3]



Fig. 1. 23 Flambajul diagonalei cu secțiune „I” în planul cadrului, în urma cutremurului de la Kobe 1995 [3]

Dacă diagonalele au secțiuni „I” realizate din table sudate sau profile laminate, cedarea diagonalelor comprimate are de regulă loc prin flambaj în raport cu axa slabă a secțiunii. În Fig. 1.23 și Fig. 1.24 sunt arătate două situații cu diagonale care au cedat prin flambaj în urma cutremurului de la Kobe, Japonia din 1995. În funcție de orientarea secțiunii elementului de contravântuire și de tipul de prindere de la capetele barelor, contravântuirile pot ceda prin flambaj în planul cadrului (vezi Fig. 1.23), fie prin flambaj în afara planului cadrului (vezi Fig. 1.24).



Fig. 1. 24 Flambajul diagonalei cu secțiune „I” în afara planului cadrului , în urma cutremurului de la Kobe 1995 [3]

În Fig. 1.25 se poate observa flambajul diagonalelor dintr-un cadru contravântuit centric în sistem „X” în urma cutremurului de la Kobe, Japonia din 1995. Diagonalele au avut secțiuni transversale alcătuite din două profile U puțin depărtate solidarizate cu plăcuțe.



Fig. 1. 25 Flambajul diagonalelor unui cadru contravântuit în sistem „X”, în urma cutremurului de la Kobe 1995 [3]

Dacă nu se asigură o capacitate de rezistență superioară a îmbinărilor în raport cu cea a elementelor fixate, cedarea poate avea loc și la nivelul prinderii diagonalelor cadrelor contravântuite centric, așa cum este arătat în Fig. 1.26 și Fig. 1.27.

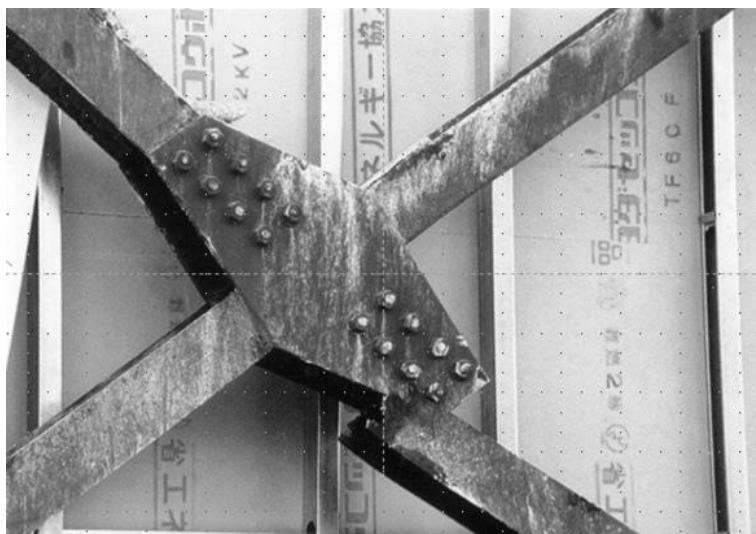


Fig. 1. 26 Cedarea prinderii diagonalei la un cadru contravântuit în sistem „X”, în urma seismului de la Kobe 1995 [3]



Fig. 1. 27 Cedarea prinderii diagonalei la un cadru contravântuit în sistem „V inversat”, în urma cutremurului de la Kobe 1995 [3]

1.5 Observații și concluzii

Forma curbelor histeretice $P-\Delta$ depinde de detaliile constructive care influențează flambajul barei: secțiunea diagonalei, conformarea guseelor, modul de dimensionare și alcătuire al prinderilor.

În cazul încărcărilor ciclice întindere-compresiune analizate, forma curbelor histeretice nu este stabilă de la un ciclu de încărcare la altul. În cazul solicitării ciclice sub acțiunea forțelor de compresiune se poate observa atât o degradare a capacității de rezistență (de la un ciclu de solicitare la altul, barele analizate flambează la valori din ce în ce mai mici ale solicitării axiale), cât și o degradare a rigidității barei (de la un ciclu de solicitare la altul, curbele $P-\Delta$ se apropie de axa orizontală din ce în ce mai mult). În cazul solicitării ciclice sub acțiunea forțelor de întindere se poate observa doar o degradare de rigiditate (curbele $P-\Delta$ se aplatizează din ce în ce mai mult), fără o degradare a capacității de rezistență la întindere.

2 Compararea prevederilor de proiectare la acțiuni seismice pentru structuri metalice contravântuite centric

Analizele efectuate în prezentul capitol urmăresc să scoată în evidență, diferențele existente în diferite coduri de proiectare referitor la prevederile de proiectare la acțiuni seismice a structurilor metalice în cadre contravântuite centric.

2.1 Structuri dimensionate în diferite variante ținând seama de prescripțiile normativului românesc P100-1/2013

2.1.1 Descrierea analizelor efectuate

În cele ce urmează va fi analizat un cadru contravântuit centric (în două variante de dispunere a contravântuirilor: cu diagonale ascendente de la stâlpii marginali către stâlpul central - în sistemul de contravântuire de tip DC, cu diagonale descendente de la stâlpii marginali către stâlpul central - în sistemul de contravântuire de tip DM) ce face parte dintr-un sistem structural cu 10 niveluri (parter + 9 etaje), amplasat în București (vezi Fig. 2.5). Înălțimea de nivel este de 3,5 m. Structura are 2 deschideri și 4 travei de 6 m și va fi dimensionată pe rând în trei variante conform normei românești de proiectare la acțiuni seismice P100-1/2013 [1] (vezi Fig. 2.4).

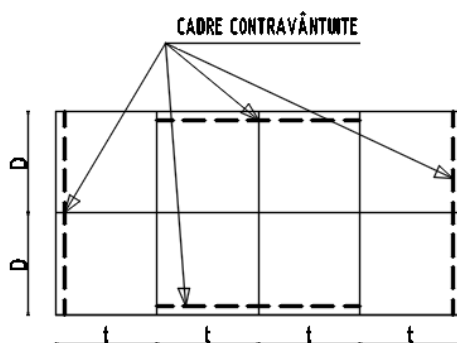


Fig. 2. 4 Forma structurii în plan

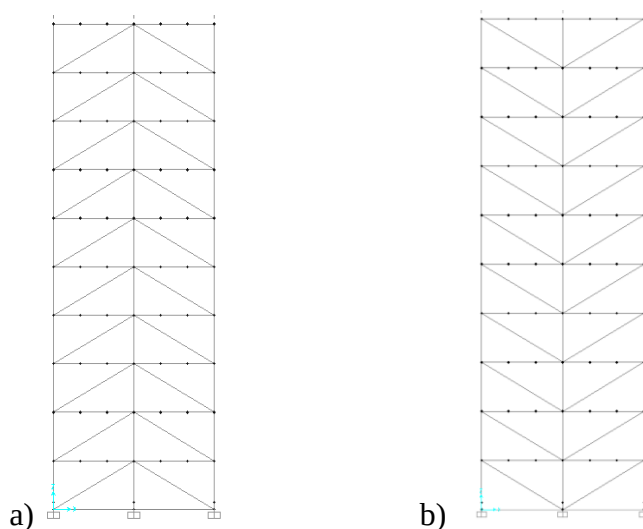


Fig. 2. 5 Structurile analizate: a) cadrul DC; b) cadrul DM

Toate elementele structurale (diagonale, grinzi și stâlpi) au secțiuni de tip „I” dublu-simetrice alcătuite din table sudate. Prinderile dintre elementele structurale au fost de tip rigid. Pentru a evita

flambajul diagonalelor în afara planului cadrului contravântuit, secțiunile diagonalelor au avut inimile orientate perpendicular pe planul contravântuirilor, adică lucrează în planul cadrului în raport cu axa slabă a secțiunii „I”.

Cadrele contravântuite centric analizate (sistem structural de tip DC și respectiv DM) au fost dimensionate în trei variante ținând seama de prescripțiile normativului românesc de proiectare la acțiuni seismice P100-1/2013 [1]:

- Varianta A: diagonalele comprimate au fost modelate cu o valoare redusă a modului de elasticitate $E_{\text{reduc}} = 0.3 \cdot E_{\text{oțel}} \approx \chi_{\text{mediu}} \cdot E_{\text{oțel}}$, în timp ce materialul folosit în cazul diagonalelor întinse a avut modulul de elasticitate al oțelului neredus $E_{\text{oțel}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$;

- Varianta B: s-au scos din lucru complet diagonalele comprimate pentru dimensionarea tuturor categoriilor de elemente structurale (diagonale, grinzi și stâlpi);

- Varianta C: s-au luat în considerare ambele tipuri de diagonale atât cele întinse cât și cele comprimate pentru dimensionarea grinzilor și stâlpilor de cadru, diagonalele comprimate fiind modelate cu $E_{\text{reduc}} = 0.3 \cdot E_{\text{oțel}}$ (la proiectarea diagonalelor s-a ținut seama doar de diagonalele întinse).

2.1.2 Analize static neliniare

Prin calculul static neliniar [13] se urmărește punerea în evidență a succesiunii formării articulațiilor plastice în structură în ipoteza în care încărcările gravitaționale se mențin constante iar încărcările orizontale se cresc monoton. S-a adoptat pentru analiză o distribuție pe verticală a încărcărilor laterale de tip „modal” (o distribuție corespunzătoare modului fundamental de vibrație).

S-a încercat punerea în evidență a succesiunii formării articulațiilor plastice prin următoarele stadii caracteristice:

- stadiul „I” reprezintă momentul în care a ieșit din lucru prima diagonală comprimată;
- stadiul „II” reprezintă momentul în care au ieșit din lucru toate diagonalele comprimate;
- stadiul „III” reprezintă momentul în care a ieșit din lucru prima diagonală întinsă;
- stadiul „IV” reprezintă momentul de plastificare a tuturor diagonalelor;
- stadiul „V” reprezintă momentul în care apare prima articulație în afara diagonalelor;
- stadiul „VI” reprezintă momentul de apariție a primului mecanism local sau global de cedare.

Pentru varianta A de dimensionare, succesiunea formării articulațiilor plastice din analizele static neliniare sunt prezentate în Fig. 2.14 (pentru cadrul DC) și în Fig. 2.15 (pentru cadrul DM).

Analizând etapele calculului biografic pentru cadrul DC, proiectat în varianta A, se pot observa următoarele aspecte:

- primul element în care se dezvoltă articulații plastice este reprezentat de diagonala comprimată de la nivelul șapte (vezi stadiul „I” din Fig. 2.14);
- toate diagonalele comprimate ies din lucru (prin flambaj) înainte de plastificarea primei diagonale întinse (vezi stadiul „II” din Fig. 2.14);
- ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor comprimate și întinse (stadiul „IV”) este precedat de apariția primei articulații plastice în afara diagonalelor (stadiul „V”);
- prima articulație plastică în afara diagonalelor se dezvoltă la baza stâlpului central de la nivelul șapte (vezi stadiul „V” din Fig. 2.14);
- în momentul apariției articulațiilor plastice la nivelul tuturor diagonalelor, se constată numeroase deformații plastice în alte categorii de elemente structurale: în lungul stâlpului central de la nivelurile 4, 5 și 7; în grinzile de la nivelurile 4 ÷ 10; respectiv într-un stâlp marginal de la nivelul șapte (vezi stadiul „IV” din Fig. 2.14);
- cadrul DC cedează prin apariția de articulații plastice în toate barele din jurul nodului de intersecție dintre stâlpul central și riglele de la nivelul șase (vezi stadiul „VI” din Fig. 2.14).

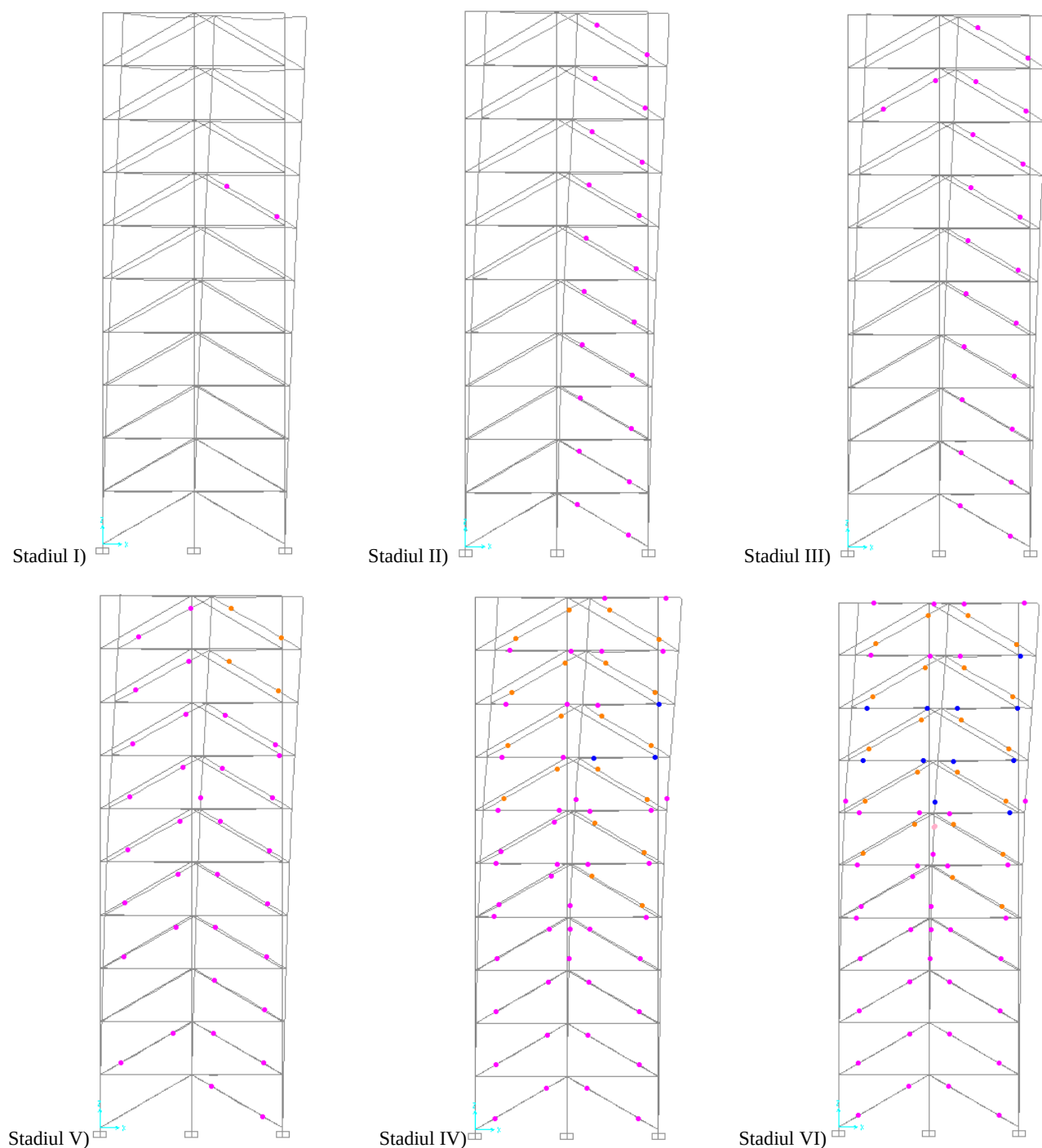


Fig. 2. 14 Stadiul I, II, III, IV, V, VI (varianta A de dimensionare - sistemul de contravântuire DC)

Analizând etapele calculului biografic pentru cadrul DM, proiectat în varianta A, se observă:

- primul element în care se dezvoltă articulații plastice este reprezentat de diagonală comprimată de la nivelul nouă (vezi stadiul „I” din Fig. 2.15);
- toate diagonalele comprimate ies din lucru înainte de plastificarea primei diagonale întinse (vezi stadiul „II” din Fig. 2.15), iar stadiul „IV” precede stadiul „V”;
- prima articulație plastică în afara diagonalelor se dezvoltă la baza stâlpului central de la nivelul șapte (vezi stadiul „V” din Fig. 2.15);
- cadrul DM cedează prin apariția unui mecanism local de etaj la nivelul șapte (vezi stadiul „VI” din Fig. 2.15).

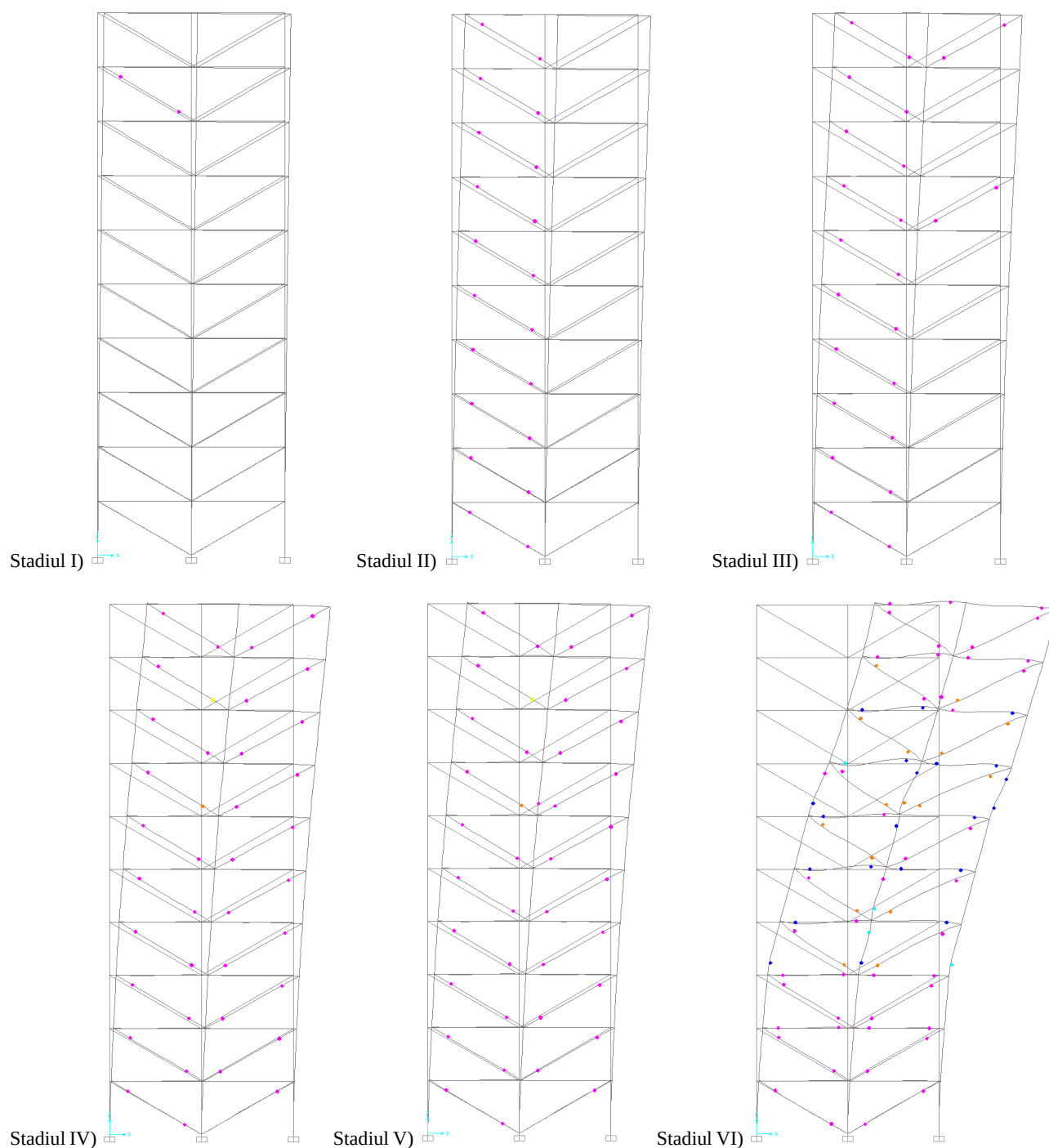


Fig. 2. 15 Stadiul I, II, III, IV, V, VI (Varianta A de dimensionare – sistemul de contravântuire DM)

Pentru toate calculele biografice efectuate (vezi stadiul „VI” din Fig. 2.14 ÷ 2.19) se constată că cedarea cadrului are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel (în trei situații), fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod (în celelalte trei situații). Se observă că în nici una din situațiile analizate, cedarea nu are loc prin apariția unui mecanism global de plastificare!

În toate calculele biografice efectuate ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor comprimate precede ieșirea din lucru a primei diagonale întinse. În schimb în trei din cele șase situații analizate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor (comprimate și întinse) este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale (stâlpi și grinzi). Prin urmare capacitatea de

rezistență a grinzilor și stâlpilor nu este întotdeauna suficient de mare în raport cu diagonalele cadrului în diferitele situații seismice de încărcare!

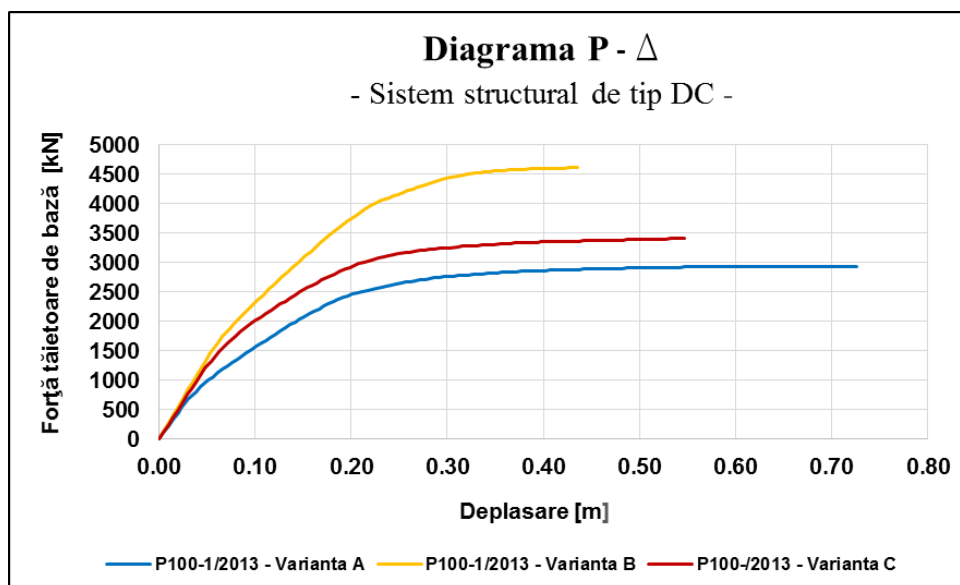


Fig. 2. 20 Diagrama P - Δ pentru sistemul de contravântuire DC

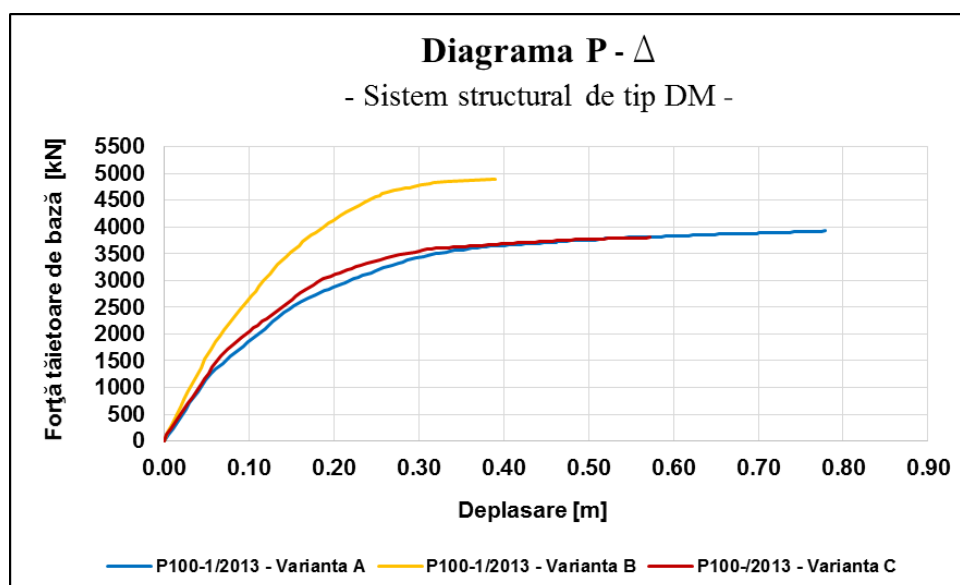
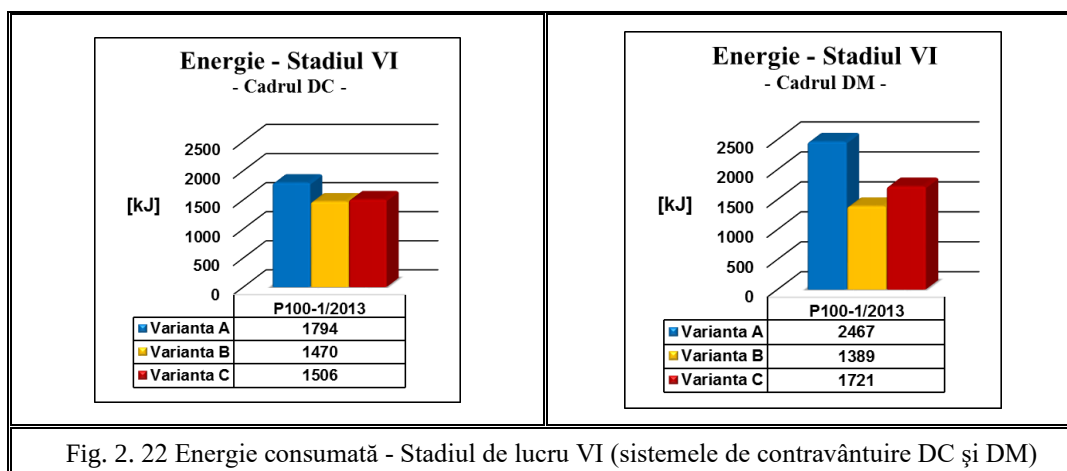


Fig. 2. 21 Diagrama P - Δ pentru sistemul de contravântuire DM

Analizând graficele din Fig. 2.20 și 2.21 se observă că pentru ambele cadre dimensionate în varianta A, aria subgraficului diagramei P- Δ , care este proportional cu lucrul mecanic consumat prin deformații plastice la nivelul cadrului pe parcursul analizei static neliniare, a rezultat semnificativ mai mare decât în cazul cadrelor proiectate în variantele B și C. Din punct de vedere al consumului de energie disipată prin deformații plastice în toate categoriile de elemente structurale, varianta A de dimensionare este cea mai avantajoasă. În cazul cadrului DC în varianta A de dimensionare, energia consumată prin deformații plastice (proporțională cu aria subgraficului diagramei P- Δ) a rezultat cu circa 18% mai mare decât pentru cadrul dimensionat în varianta B și cu aproximativ 16% mai mare decât a cadrului dimensionat în varianta C. Pentru sistemul de contravântuire DM, energia consumată

este mai mică cu aproximativ 44% în varianta B de dimensionare și respectiv cu circa 30% mai redusă în varianta C de dimensionare, decât valoarea obținută în varianta A (vezi Fig. 2.22).



2.1.3 Observații și recomandări

Din punct de vedere al volumului de energie disipată prin deformări plastice în toate categoriile de elemente structurale varianta A de dimensionare este cea mai avantajoasă, iar varianta B de dimensionare cea mai dezavantajoasă.

Pentru aprecierea mai realistă a stării de eforturi în grinzile și stâlpii cadrelor contravântuite centric analizate când diagonalele adiacente ies din lucru, modelarea diagonalelor comprimate cu un modul de elasticitate redus (folosită în varianta A de dimensionare) este mai avantajoasă comparativ cu modelările folosite în variantele de dimensionare B și C.

Cele mai reduse deplasări orizontale s-au înregistrat în analizele biografice efectuate cu cadrele dimensionate în varianta B.

Din punct de vedere al consumului total estimat de oțel varianta C de dimensionare este cea mai avantajoasă, iar varianta B de dimensionare conduce la consumul estimat de oțel cel mai ridicat.

În toate cele trei variantele de proiectare analizate, care țin seama de prevederile normativului românesc de proiectare P100-1/2013 [1], nu se impune în mod explicit prin proiectare un mecanism general favorabil de plastificare pentru cadrele contravântuite centric analizate. În calculele biografice efectuate, cedarea cadrelor contravântuite centric are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel, fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod.

În jumătate din analizele static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor este precedată de apariția de articulații plastice în alte categoriile de elemente structurale. Se constată că în situațiile seismice de încărcări nu se asigură întotdeauna o capacitate de rezistență suficient de mare riglelor și stâlpilor de cadru în raport cu diagonalele.

2.2 Structuri dimensionate conform normativelor P100-1/2013, SR EN 1998-1:2004 și AISC 341-2016

2.2.1 Descrierea analizelor efectuate

Cele două cadre analizate în subcapitolul precedent 2.4 (vezi Fig. 2.5), au fost dimensionate pe rând ținând seama de prevederile de proiectare cuprinse în normativele SR EN 1998-1:2004 [10] și AISC 341-2016 [11]. Pentru analizele comparative efectuate în continuare, s-au avut în vedere și cadrele DC și DM rezultate în urma variantei A de dimensionare conform prescripțiilor din normativul românesc P100-1/2013 [1].

Pentru a aprecia mai bine stările de eforturi, care apar în stâlpii și în grinzile cadrelor contravântuite centric în situațiile când diagonalele adiacente își ating capacitatea de rezistență (efortul capabil la flambaj pentru diagonalele comprimate, respectiv efortul plastic capabil la întindere pentru diagonalele întinse), diagonalele comprimate ale cadrelor au fost modelate cu un modul de elasticitate redus, în timp ce materialul folosit în cazul diagonalelor întinse a avut modulul de elasticitate al oțelului neredus $E_{o\text{țel}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

În cazul proiectării conform P100-1/2013 [1] și SR EN 1998-1:2004 [10] pentru a aprecia mai bine stările de eforturi în grinzile și stâlpii de cadru în situațiile în care diagonalele adiacente își ating capacitatea de rezistență la compresiune și respectiv întindere, diagonalele comprimate au fost modelate cu o valoare redusă a modulului de elasticitate $E_{\text{reduc}} = 0,3 \cdot E_{o\text{țel}} \approx \chi_{\text{mediu}} \cdot E_{o\text{țel}}$ [14].

În cazul proiectării conform AISC 341-16 [11] s-au luat în considerare două stări de eforturi (practic s-a luat în considerare cea mai defavorabilă stare de eforturi din următoarele două situații):

1. pentru a aprecia stările de eforturi în grinzile și stâlpii de cadru în situația în care diagonalele întinse își ating capacitatea de rezistență la întindere, iar diagonalele comprimate își ating capacitatea la compresiune, diagonalele comprimate au fost modelate cu o valoare redusă a modulului de elasticitate redus $E_{\text{reduc}} = 0,3 \cdot E_{o\text{țel}}$.

2. pentru a aprecia stările de eforturi în grinzile și stâlpii de cadru în situația în care diagonalele întinse își ating capacitatea de rezistență la întindere, iar diagonalele comprimate își ating capacitatea redusă postflambaj la compresiune, diagonalele comprimate au fost modelate cu o valoare redusă a modulului de elasticitate $E_{\text{reduc}} = (14 \cdot \text{N/mm}^2 / F_y) \cdot E_{o\text{țel}} = (14 \cdot \text{N/mm}^2 / 235 \text{ N/mm}^2) \cdot E_{o\text{țel}} \approx 0,06 \cdot E_{o\text{țel}}$. (Conform paragrafului F.2.3 din AISC 341-16 [11], pentru contravântuirile cu un coeficient de zveltețe cel mult egal cu 200 ce flambează în domeniul elastic, iar valoarea tensiunii de compresiune postflambaj $0,3 \cdot F_{cr}$ poate fi considerată 14MPa (14 N/mm^2)).

2.2.2 Comentarii cu privire la stările de eforturi din analiza static liniară

2.2.2.1 Eforturi maxime în stâlpii marginali

Valorile cele mai mari pentru forțele axiale din stâlpii marginali au rezultat în cazul cadrului DC pentru dimensionarea conform normei P100-1/2013 [1], iar în cazul cadrului DM pentru dimensionarea conform normei americane AISC 341-16 [11].

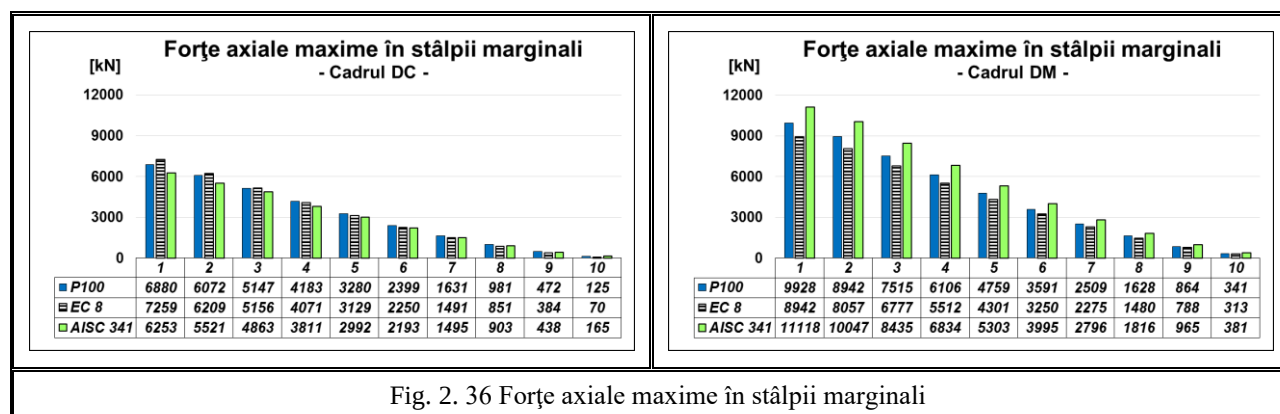


Fig. 2. 36 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali

Pentru cadrul DC, valorile de forțe axiale din stâlpii marginali raportate la cele obținute din P100-1/2013 [1] sunt în medie cu aproximativ 1,0% mai scăzute pentru cadrul dimensionat conform SR EN 1998-1:2004 [10] și respectiv cu circa 8,1% mai mici pentru cadrul dimensionat conform AISC 341-16 [11] (vezi Fig. 2.36). Valorile de forțe axiale din stâlpii marginali ai cadrului DM sunt în medie cu circa 10,7% mai mici pentru cadrul dimensionat conform P100-1/2013 [1] și respectiv în medie cu aproximativ 19,3% mai scăzute pentru cadrul dimensionat conform normei europene SR

EN 1998-1:2004 [10], comparativ cu valorile de forțe axiale obținute pentru cadrul dimensionat conform normei americane (vezi Fig. 2.36).

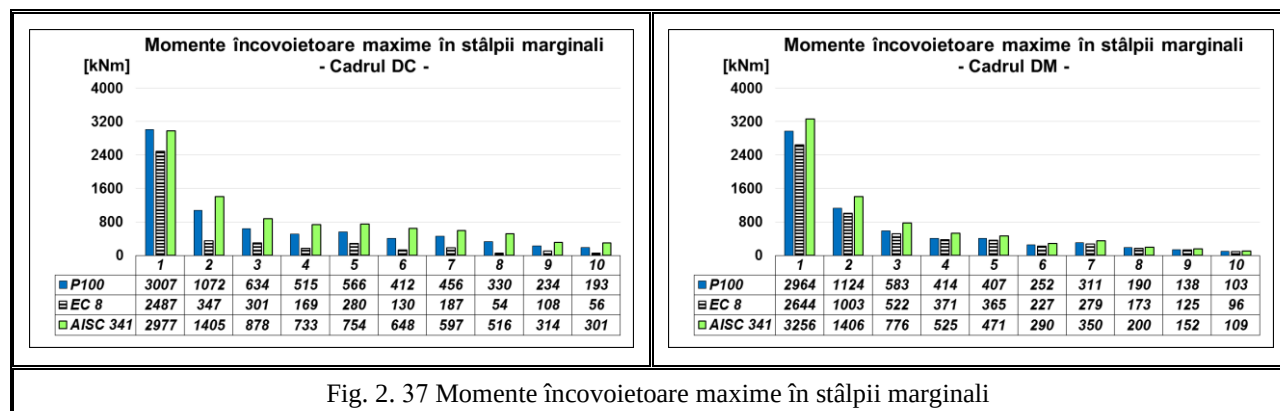


Fig. 2. 37 Momente încovoietoare maxime în stâlpii marginali

În ceea ce privește momentele încovoietoare din stâlpii marginali, acestea prezintă valorile cele mai mari la primul nivel, pentru toate cele trei norme analizate. Valorile cele mai mari de momente încovoietoare din stâlpii marginali au fost obținute pentru ambele sisteme de contravântuire, din dimensionarea ce a urmărit prescripțiile normei americane AISC 341-16 [11]. Comparativ cu acestea, valorile momentelor încovoietoare din stâlpii marginali ai cadrului DC sunt cu circa 18,7% mai mici pentru dimensionarea conform P100-1/2013 [1] și respectiv cu aproximativ 54,8% mai scăzute pentru dimensionarea conform SR EN 1998-1:2004 [10]. Pentru cadrul DM, valorile momentelor încovoietoare din stâlpii marginali, raportate la cele obținute din dimensionarea ce a urmărit prescripțiile normei americane, sunt în medie cu aproximativ 23,0% mai mici pentru dimensionarea conform SR EN 1998-1:2004 [10] și respectiv cu circa 13,9% mai reduse pentru dimensionarea conform P100-1/2013 [1] (vezi Fig. 2.37).

2.2.3 Consumul estimat de oțel

Valorile cele mai scăzute pentru consumul total estimat de oțel, au fost obținute în cazul cadrelor DC și DM dimensionate conform normei SR EN 1998-1:2004 [10]. Valorile cele mai mari pentru consumul estimat de oțel au rezultat pentru ambele cadre analizate (DC și DM) pentru dimensionarea ce a urmărit prescripțiile normei americane AISC 341-16 [11].

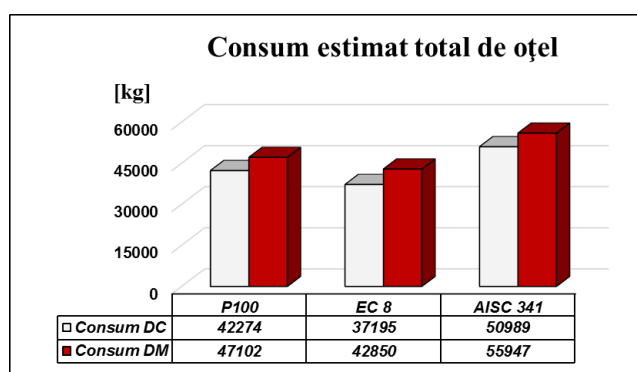


Fig. 2. 42 Consum estimat total de oțel

În cazul cadrului DC, comparativ cu valoarea consumului estimat obținută pentru dimensionarea conform EC 8, pentru dimensionarea conform P100 și AISC 341, consumul total estimat de oțel a rezultat cu circa 12,0% și respectiv cu aproximativ 27,0% mai ridicat (vezi Fig. 2.42). Pentru cadrul DM, în comparație cu valoarea cea mai mică a consumului total de oțel obținută pentru dimensionarea conform normei europene, în cazul dimensionării pe baza prescripțiilor normei

românești, consumul estimat de material a rezultat cu aproximativ 9,0% mai mare, iar în cazul dimensionării conform AISC 341 cu circa 23,4% mai ridicat (vezi Fig. 2.42).

2.2.4 Analize static neliniare

În analizele biografice efectuate [13] cu cadrele dimensionate în conformitate cu diferitele norme analizate, au fost urmărite aceleași stadii caracteristice (I, II, III, IV, V și VI), prezentate în subcapitolul 2.4.3 (vezi Fig. 2.43 ÷ 2.46).

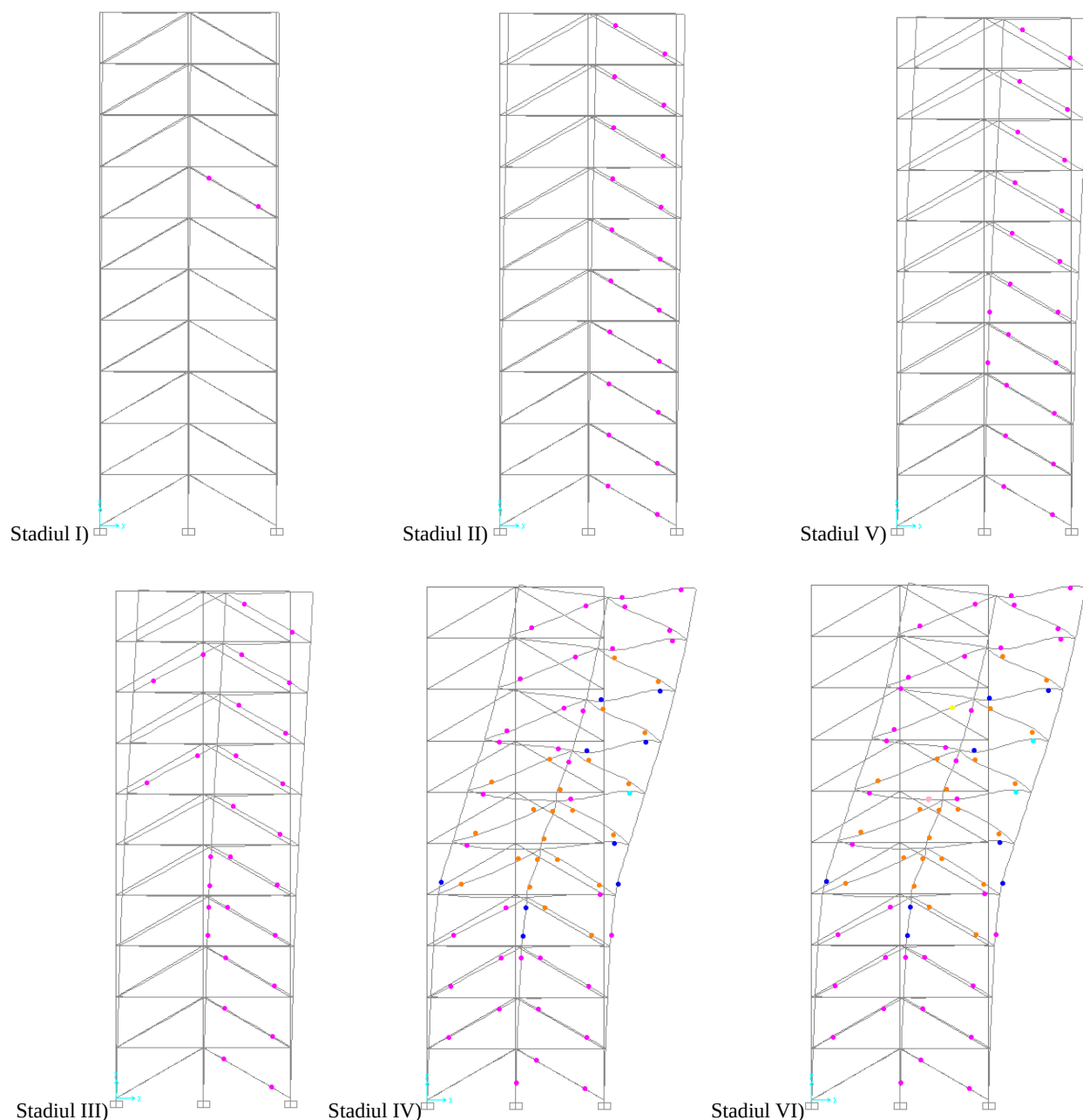


Fig. 2. 43 Stadiul I, II, III, IV, V, VI (SR EN 1998-1:2004 – sistemul de contravântuire DC)

Analizând etapele calculului biografic pentru cadrul DM, proiectat conform AISC 341-16 [11], se poate observa:

- primul element care iese din lucru este reprezentat de diagonala comprimată de la nivelul nouă (vezi stadiul „I” din Fig. 2.46);

- toate diagonalele comprimate ies din lucru în același timp cu plastificarea primelor diagonale întinse (vezi stadiul „II” din Fig. 2.46);
- cadrul DM cedează prin apariția unui mecanism local de etaj la nivelul șapte (vezi stadiul „VI” din Fig. 2.46).

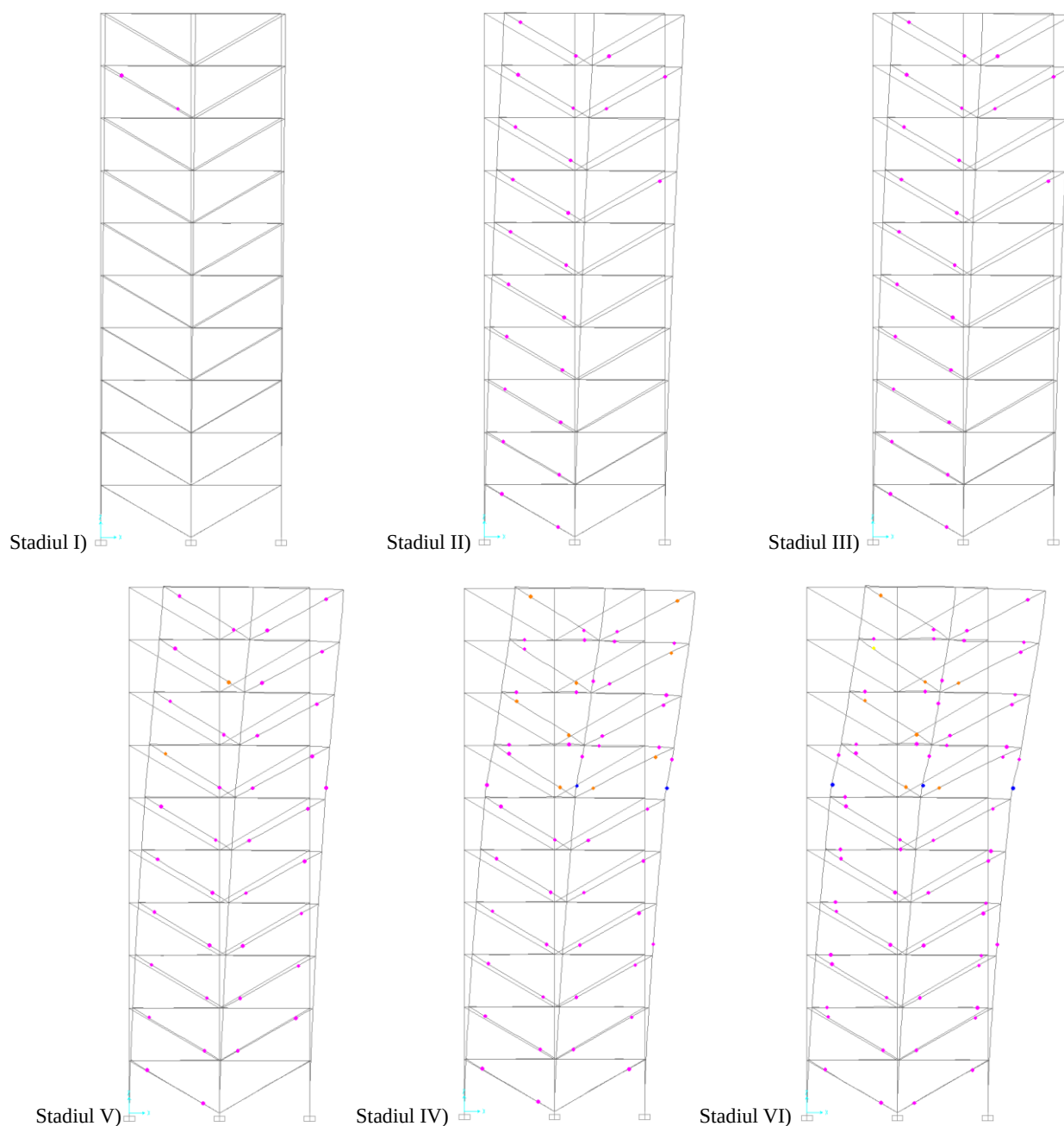


Fig. 2. 46 Stadiul I, II, III, IV, V, VI (AISC 341-16 – sistemul de contravântuire DM)

Se poate observa, că și în urma calculelor biografice efectuate pentru cadrele contravântuite centric proiectate ținând seama de prevederilor normei europene SR EN 1998-1:2004 [10] și americane AISC 341-16 [11], cedarea cadrului are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel, fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod (vezi stadiul „VI” din Fig. 2.43 ÷ 2.46). Se poate constata de asemenea, că în nici una din situațiile analizate, cedarea nu are loc prin apariția unui mecanism global de plastificare!

În toate analizele static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor comprimate precede ieșirea din lucru a primei diagonale întinse. În schimb în două din cele patru situații analizate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor (comprimate și întinse) este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale (stâlpi și grinzi). Prin urmare, capacitatea de rezistență a grinzilor și stâlpilor nu este întotdeauna suficient de mare în raport cu aceea a diagonalelor cadrului în diferitele situații seismice de încărcare! Neavând un mecanism global de cedare favorabil impus explicit prin procedura de dimensionare, în calculul biografic, cedarea cadrelor contravântuite centric analizate s-a produs prin apariția unor mecanisme locale:

- fie prin ieșirea din lucru a tuturor barelor din jurul unui nod de cadru (prin flambaj sau plastificare);
- fie prin apariția unui mecanism de etaj (prin flambajul sau plastificarea stâlpilor de la un nivel).

Pentru a impune prin proiectare în mod explicit un mecanism global de plastificare favorabil s-au prevăzut la nivelul tuturor riglelor de cadru zone potențial plastice, sub forma unor secțiuni de grindă cu secțiuni de tălpi cu lățime redusă, situate la aproximativ 1m de axul stâlpilor. Așa cum sunt indicate în Fig. 2.53, zonele potențial plastice din lungul riglelor de cadru sunt prevăzute către extremitățile deschiderii grinzilor, în imediata vecinătate a guseelor ramificațiilor de care sunt fixate diagonalele de stâlpii de cadru. Practic zonele potențial plastice din lungul grinzilor sunt dispuse la aproximativ 1m de axul stâlpilor, între guseele prin care sunt fixate diagonalele de stâlpi și prinderile cu eclise, prin care sunt fixate tronsoanele de grindă de stâlpii de cadru [15].

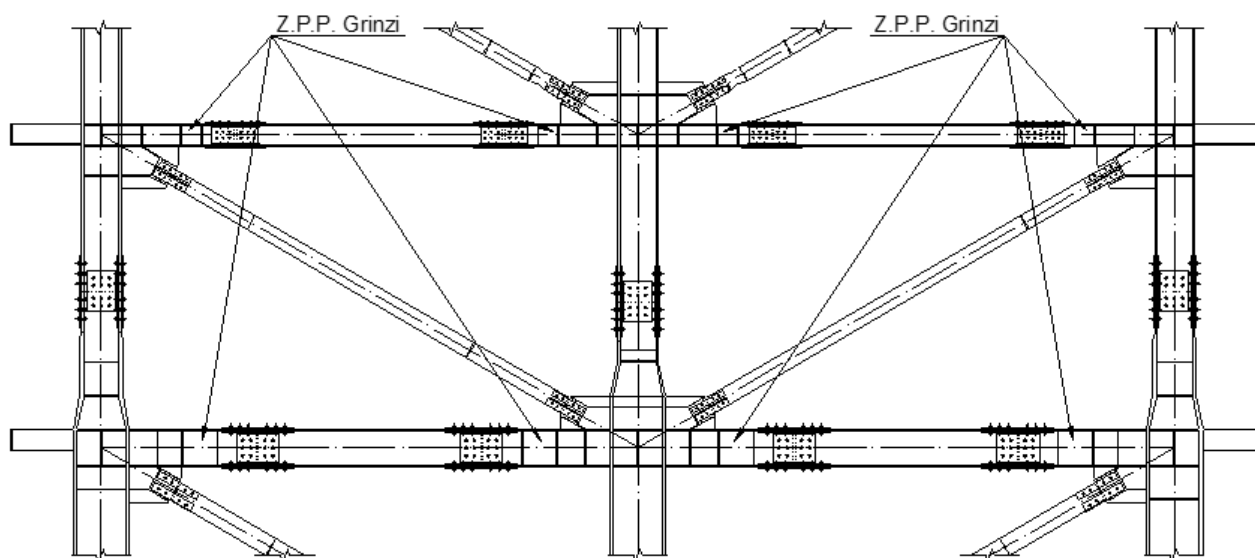


Fig. 2. 53 Dispunerea zonelor potențial plastice în lungul grinzilor la 1m față de axul stâlpilor [15]

Pentru cele două cadre dimensionate conform AISC 341, la care s-au prevăzut aceste zone potențial plastice suplimentare la nivelul extremităților tuturor riglelor de cadru, s-au repetat analizele biografice și s-a îmbunătățit foarte mult comportarea cadrelor în timpul analizelor static neliniare.

Pe de o parte cresc destul de mult depășirile cadrelor (cu aproximativ 27% în cazul cadrului DC și 35% în cazul cadrului DM), mărindu-se semnificativ lucrul mecanic consumat prin deformări plastice la nivelul cadrului pe parcursul analizei static neliniare. Pentru ambele sisteme de contravântuire analizate, aria subgraficului diagramei $P-\Delta$, este mai mare pentru cadrele la care s-au prevăzut gâtuirii la nivelul grinzilor (vezi Fig. 2.54 și 2.55).

Pe de altă parte, chiar dacă valoarea maximă a forței tăietoare de bază cu care se încarcă cadrele în timpul analizelor static neliniare scade puțin (cu aproximativ 3,5% în cazul cadrului DC și circa 5,6% în cazul cadrului DM), valoarea energiei consumate prin deformarea plastică a structurilor în timpul calculului biografic crește semnificativ în cazul cadrelor prevăzute cu secțiuni reduse în grinzi, în raport cu cadrele dimensionate conform normei americane AISC 341-16 [11] fără secțiuni

reduse în grinzi. Pentru sistemul de contravântuire DC, energia consumată este cu circa 30% mai mare, iar pentru sistemul de contravântuire DM, energia consumată este cu aproximativ 41% mai mare (vezi Fig. 2.56).

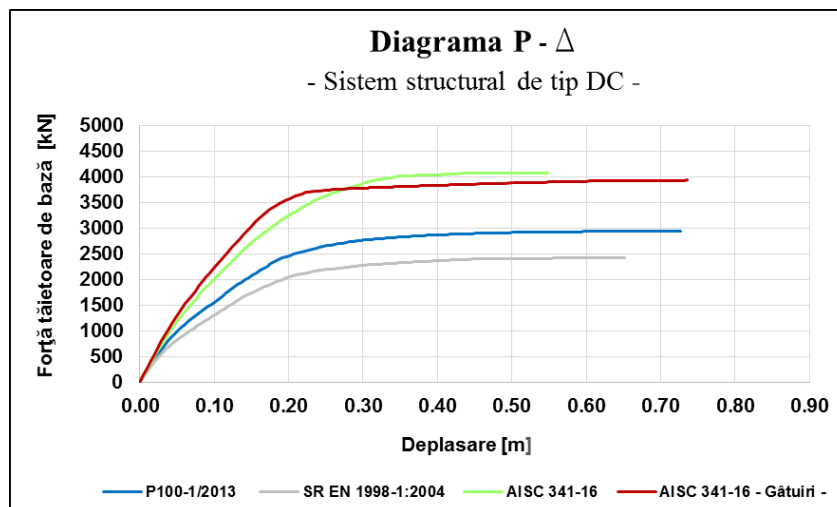


Fig. 2. 54 Diagrama P – Δ pentru sistemul structural de tip DC cu zone potențial plastice în grinzi

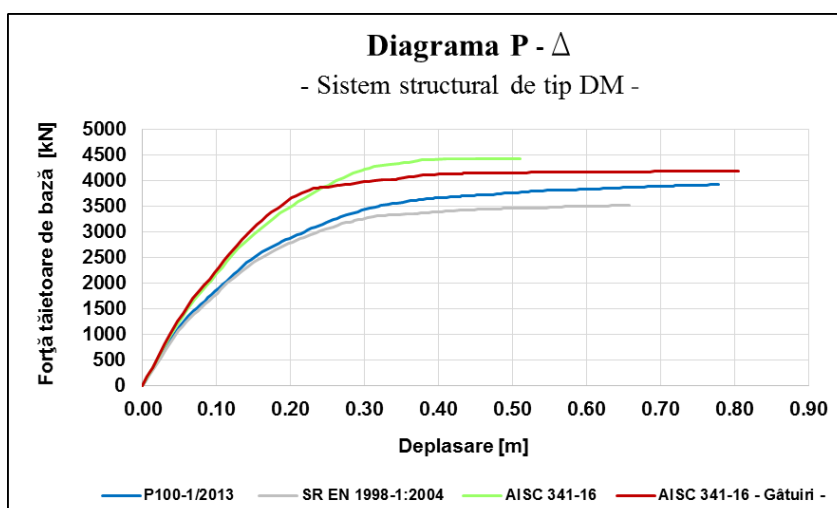


Fig. 2. 55 Diagrama P – Δ pentru sistemul structural de tip DC cu zone potențial plastice în grinzi

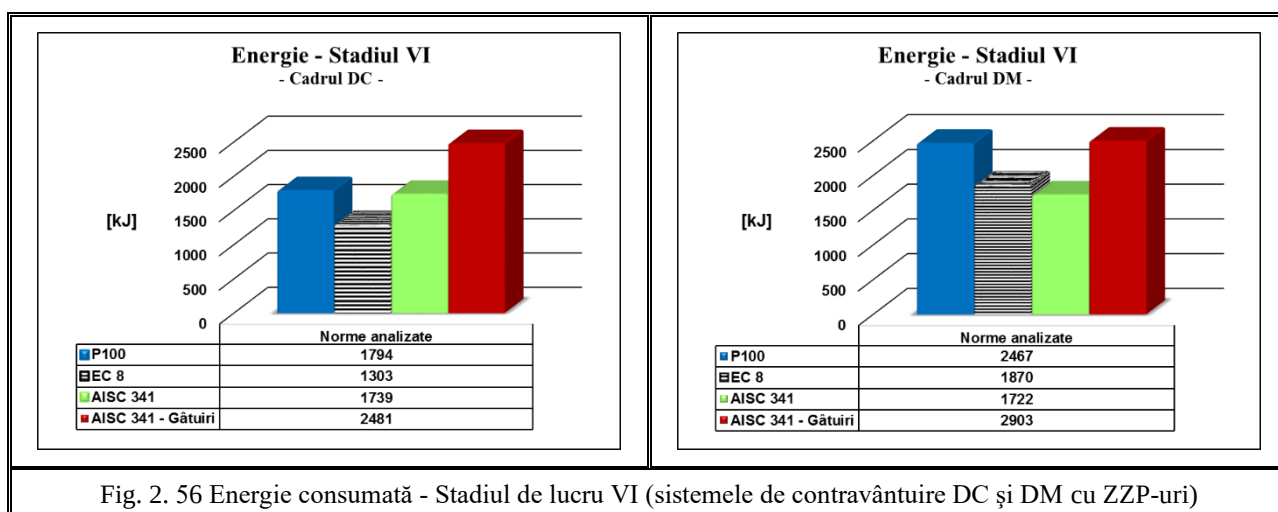


Fig. 2. 56 Energie consumată - Stadiul de lucru VI (sistemele de contravântuire DC și DM cu ZZP-uri)

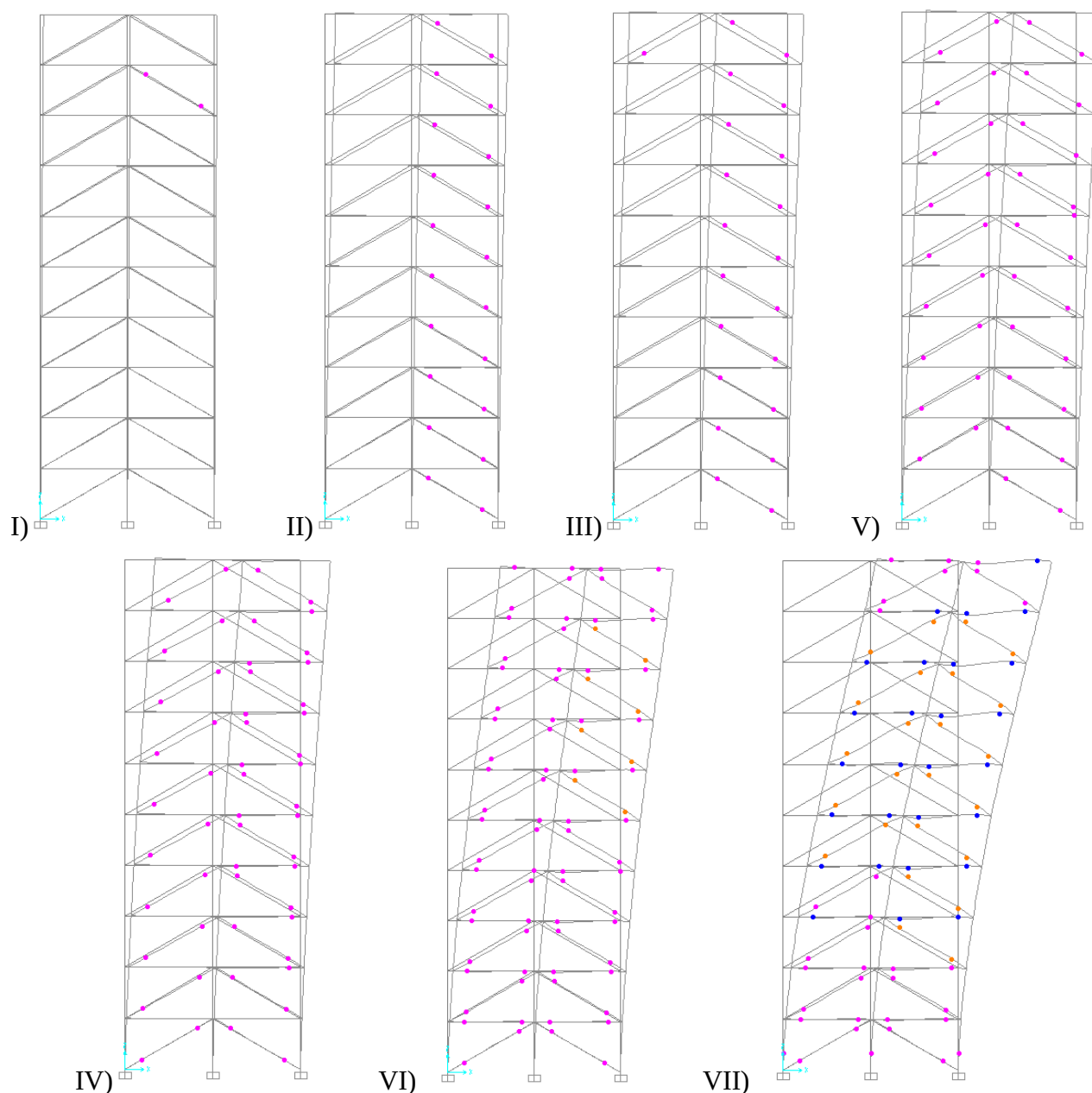


Fig. 2. 57 Etape din calculul biografic pentru cadrul prevăzut cu secțiuni reduse în lungul grinzilor la care s-a impus un mecanism global favorabil de cedare – sistem structural de tip DC

Analizând distribuțiile articulațiilor plastice din Fig. 2.57 și Fig. 2.58, pentru ambele cadre prevăzute cu secțiuni reduse în vecinătatea capetelor tuturor grinzilor de cadru, se poate observa că:

- deformățiile postelastice se dezvoltă numai la nivelul zonelor potențial plastice considerate: în lungul diagonalelor, în apropierea extremităților grinzilor și în vecinătate bazei tuturor stâlpilor de cadru de la primul nivel;
- ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor comprimate (prin flambaj), precede ieșirea din lucru a primei diagonale întinse (prin plastificare);
- apariția primei articulații plastice în zonele potențial plastice prevăzute la nivelul grinzilor precede dezvoltarea deformățiilor plastice în toate diagonalele întinse ale cadrului (vezi stadiul „IV”);
- înainte de dezvoltarea de deformății plastice în zonele potențial plastice dispuse în vecinătatea bazei tuturor stâlpilor de la primul nivel, ies din lucru toate diagonalele (comprimate și întinse) și se dezvoltă articulații plastice în vecinătatea extremităților tuturor grinzilor;

- cedarea cadrelor are loc prin dezvoltarea unui mecanism global de cedare favorabil.

2.2.5 Necesitatea prevederii de zone potențial plastice suplimentare în rigle

Atâta timp cât deformările plastice se concentrează doar la nivelul diagonalelor, adică atâta timp cât nu se dezvoltă deformări postelastice la nivelul grinzilor și stâlpilor, comportarea cadrelor contravântuite centric în timpul analizelor static sau dinamic neliniare, poate fi caracterizată ca fiind favorabilă, predictibilă (vezi Fig. 2.59).

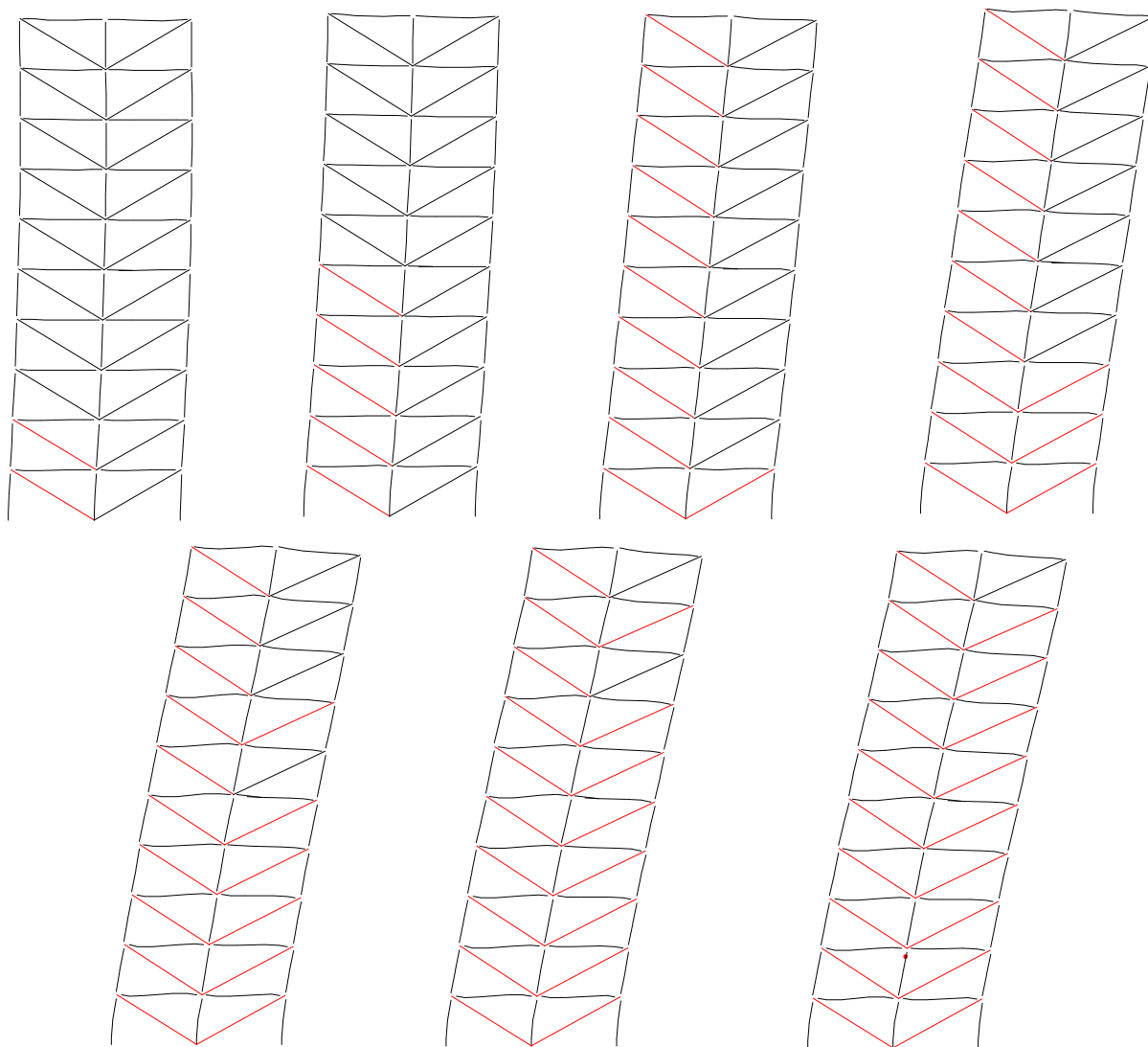


Fig. 2.59 Etape din analiza dinamic neliniară pentru cadrul DM

În toate procedurile de dimensionare cuprinse în normativele de proiectare la acțiuni seismice analizate, nu s-a impus în mod explicit prin dimensionare o ierarhizare a capacității de rezistență între riglele și stâlpii cadrelor contravântuite centric. Dacă în timpul analizelor static sau dinamic neliniare nivelul de solicitare crește, deformările plastice se dezvoltă în mod necontrolat în lungul riglelor și stâlpilor de cadru, iar comportarea la acțiuni seismice a cadrelor contravântuite centric nu mai este predictibilă. Distribuțiile necontrolate nefavorabile ale articulațiilor plastice în structură pot conduce la diferite mecanisme locale de cedare și chiar la colapsul cadrului contravântuit centric.

Dezvoltarea necontrolată a deformărilor plastice în lungul riglelor cadru, poate conduce la apariția de mecanisme locale de cedare la nivelul grinzilor (vezi Fig. 2.60).

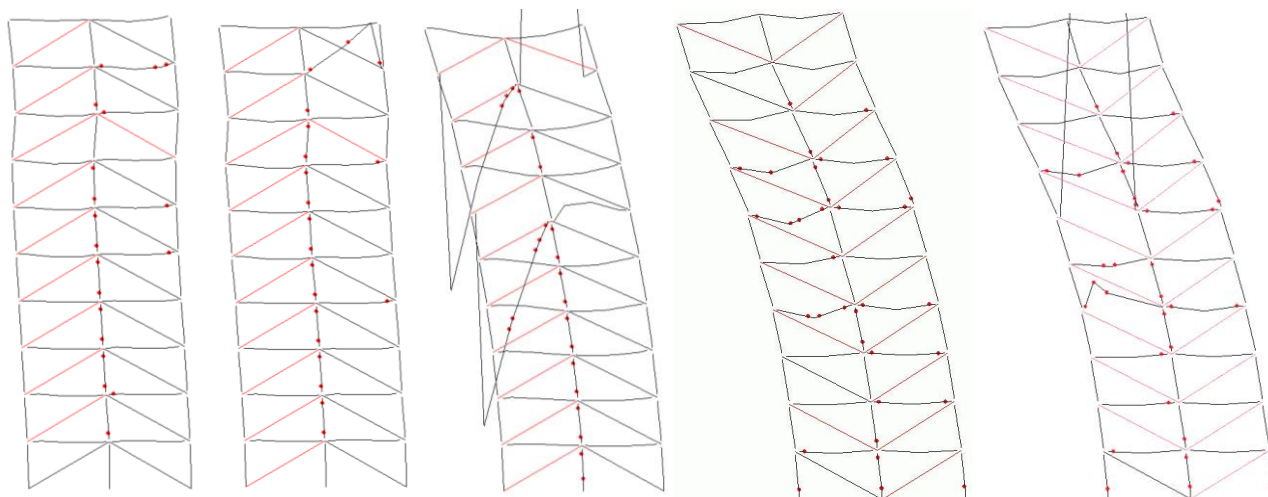


Fig. 2. 60 Apariția unor mecanisme locale de cedare în lungul riglelor în timpul analizelor dinamic neliniare [18]

În timpul analizelor static și dinamic neliniare, dezvoltarea necontrolată a deformațiilor plastice în lungul stâlpilor de cadru, poate conduce la apariția de mecanisme locale de cedare la nivelul stâlpilor de cadru sau la mecanisme de nivel slab (vezi Fig. 2.61).

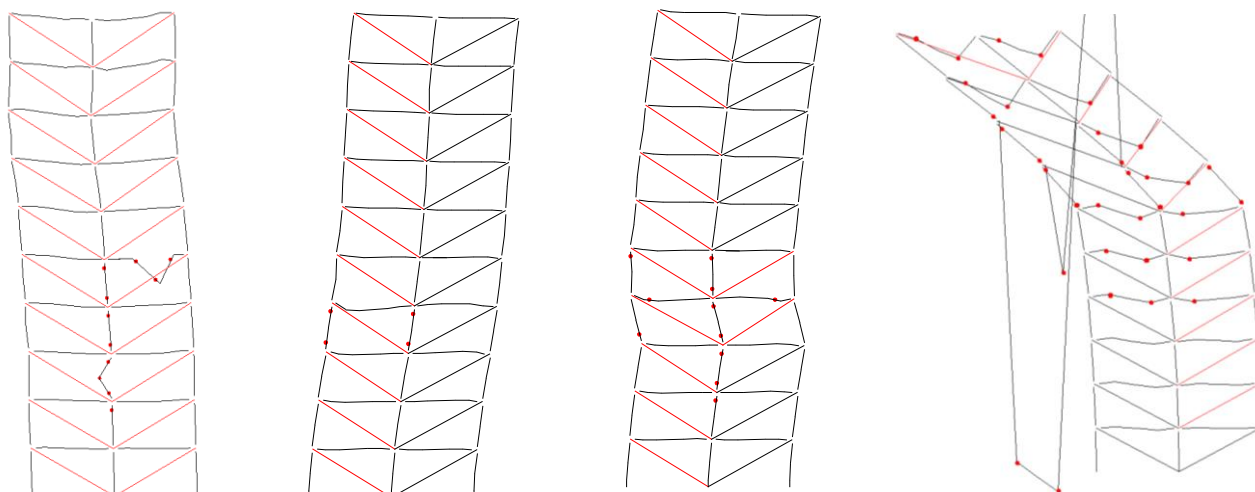


Fig. 2. 61 Apariția unor mecanisme locale de cedare în lungul stâlpului central sau a unor mecanisme de nivel slab în timpul analizelor dinamic neliniare [18]

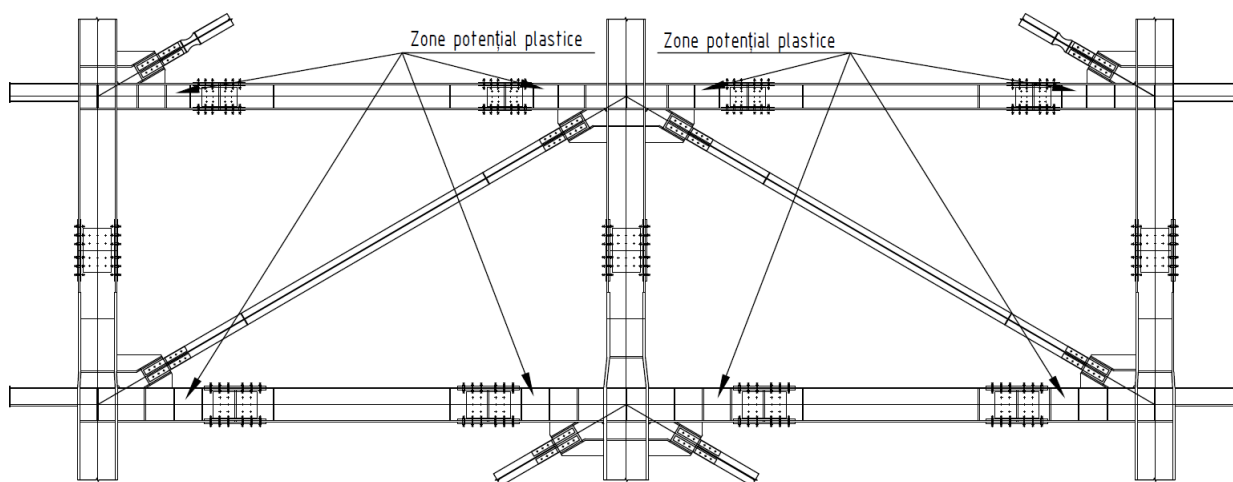


Fig. 2. 62 Prevederea unor zone potențial plastice în lungul riglelor de cadru

Prin prevederea unor zone potențial plastice suplimentare în vecinătatea capetelor tuturor riglelor de cadru sub forma unor secțiuni gătuite de grindă, se controlează poziția apariției articulațiilor plastice în lungul riglelor (vezi Fig. 2.62). Se evită apariția mecanismelor locale de cedare în lungul riglelor de cadru.

Controlul pozițiilor din lungul riglelor de cadru, în care se pot dezvolta deformările plastice, permite o mai bună predictibilitate a mărimii deformărilor plastice, care se pot dezvolta la nivelul grinzilor în timpul unor cutremure severe (vezi Fig. 2. 63).

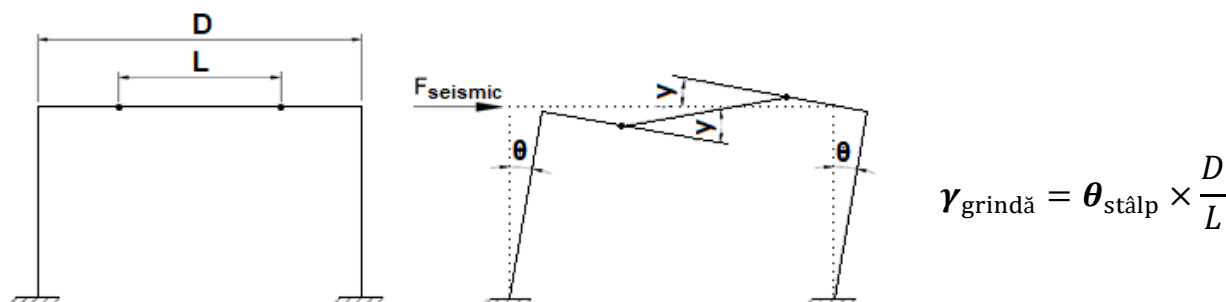


Fig. 2. 63 Controlul pozițiilor zonelor potențial plastice din lungul riglelor de cadru

Prin dispunerea unor zone potențial plastice suplimentare în vecinătatea capetelor tuturor riglelor de cadru sub forma unor secțiuni gătuite de grindă, se evită apariția necontrolată a deformărilor plastice în lungul stâlpilor și mecanismele locale de cedare în stâlpii de cadru.

Prevăzând pe lângă diagonale (care sunt considerate elemente disipative primare), a unor zone potențial plastice suplimentare în vecinătatea capetelor tuturor riglelor de cadru sub forma unor secțiuni gătuite de grindă (considerate ca fiind elemente disipative secundare) s-a realizat:

- asigurarea unui spor de capacitate de rezistență sub solicitări seismice a stâlpilor în raport cu riglele de cadru și evitarea apariției necontrolate a deformărilor plastice în lungul stâlpilor;
- controlul apariției deformărilor plastice în lungul riglelor de cadru, adică evitarea apariției mecanismelor locale de cedare în lungul acestora și un mai bun control al mărimii deformărilor plastice în lungul grinzilor.

2.2.6 Observații și recomandări

Dintre cele trei normative de proiectare la acțiuni seismice analizate, cele mai mari valori ale forțelor tăietoare de bază și cele mai reduse deplasări orizontale s-au înregistrat în analizele static neliniare efectuate cu cadrele dimensionate conform normei americane AISC 341-16 [11]. Cele mai reduse valori ale forțelor tăietoare de bază au putut fi observate în cazul cadrelor dimensionate conform standardului european SR EN 1998-1:2004 [10], iar cele mai mari deplasări în cazul cadrelor dimensionate conform normativului românesc P100-1/2013 [1].

În ceea ce privește lucrul mecanic consumat prin deformări plastice în toate categoriile de elemente structurale pe parcursul analizelor static neliniare, varianta de dimensionare conform normei P100-1/2013 [1] este cea mai avantajoasă, pentru ambele sisteme de contravântuire analizate.

Din punct de vedere al consumului total estimat de oțel varianta de dimensionare conform normativului european SR EN 1998-1:2004 [10] este cea mai avantajoasă, iar varianta de dimensionare conform AISC 341-16 [11] conduce la consumul estimat de oțel cel mai ridicat. Diferențele dintre valorile consumului total de oțel estimat au fost de circa 27,0% pentru cadrul DC și respectiv de aproximativ 23,4% pentru cadrul DM.

În toate cele trei variantele de proiectare analizate, care țin seama de prevederile normativului românesc P100-1/2013 [1], de prescripțiile normei europene SR EN 1998-1:2004 [10] și respectiv de prevederile standardului american AISC 341-16 [11], nu se impune în mod explicit prin proiectare

un mecanism general favorabil de plastificare pentru cadrele contravântuite centric analizate. În calculele biografice efectuate, cedarea cadrelor contravântuite centric are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel, fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod. În jumătate din analizele static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale. Se constată pe de o parte că, în diferitele situații seismice de încărcare, capacitatea de rezistență a grinzilor și stâlpilor nu este întotdeauna suficient de mare în raport cu aceea a diagonalelor cadrului contravântuit centric. Pe de altă parte, după ce majoritatea diagonalelor ies din lucru, nu se asigură nici o ierarhizare a capacității de rezistență între riglele și stâlpii cadrului, ceea ce conduce la distribuții dezavantajoase de articulații plastice și la cedarea cadrelor prin mecanisme plastice locale de cedare.

Prevederea de zone potențial plastice suplimentare în vecinătatea capetelor tuturor riglelor de cadru, are efecte benefice asupra comportării cadrelor contravântuite centric în timpul analizelor static neliniare efectuate:

- se evită apariția necontrolată a deformațiilor plastice în lungul riglelor și stâlpilor de cadru;
- cedarea are loc prin dezvoltarea unui mecanism plastic global de cedare favorabil;
- se consumă mai multă energie prin deformații plastice la nivelul cadrului.

3 Avantaje și dezavantaje ale principalelor sisteme de contravântuire centrică cu diagonale întinse utilizate în structuri antiseismice

3.1 Descrierea structurilor analizate

În prezentul capitol s-a urmărit evidențierea comportării sub acțiuni seismice severe a principalelor sisteme de contravântuire centrică cu diagonale întinse, punându-se în valoare avantajele și dezavantajele acestora. Structurile au fost dimensionate în conformitate cu prevederile normelor de proiectare P100-1/2013 [1] și SR EN 1998-1:2004 [10].

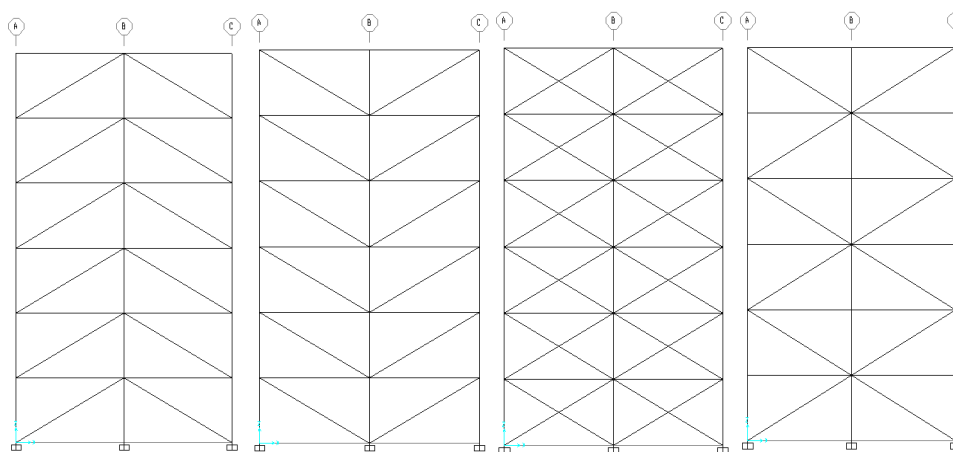


Fig. 3. 2 Cadrele analizate cu șase niveluri cu contravântuiri de tip DC, DM, X și 2X [16]

Cadrele contravântuite centric (cu șase și respectiv zece niveluri) au fost proiectate în patru variante de dispunere a contravântuirilor: ascendente de la stâlpii marginali către stâlpul central (tip DC), descendente de la stâlpii marginali către stâlpul central (tip DM), tip X pe un nivel și tip X pe două niveluri (vezi Fig.3.2 și Fig. 3.3).

Toate elementele structurale (diagonale, grinzi și stâlpi) au secțiuni “I” dublu-simetrice alcătuite din table sudate. Prinderile dintre elementele structurale au fost de tip rigid. Pentru a evita flambajul diagonalelor în afara planului cadrului, secțiunile diagonalelor au fost rotite cu înima perpendicular pe planul cadrului.

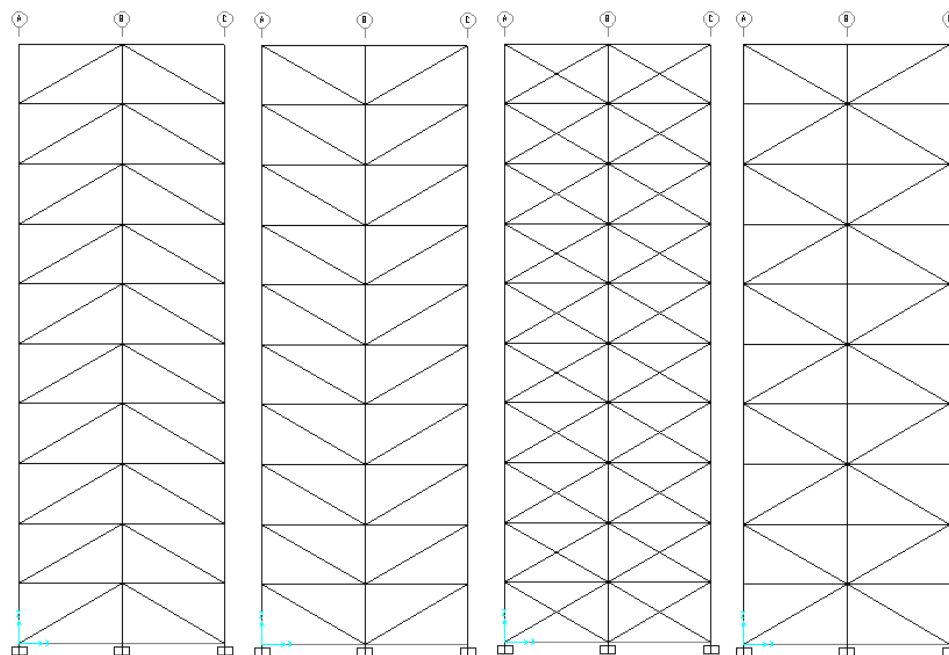


Fig. 3. 3 Cadrele analizate cu zece niveluri cu contravântuiri de tip DC, DM, X și 2X [17]

Procedura de dimensionare la acțiuni seismice a fost următoarea [16, 17]:

- Diagonalele cadrului contravântuit centric, au fost dimensionate la eforturile generate de încărcarea seismică de proiectare neamplificată S_{cod} (pe un cadru în care s-au luat în considerare doar diagonalele întinse). Pentru secțiunile dimensionate ale diagonalelor s-a evaluat un factor de amplificare (Ω^N); $\Omega^N = \min\{\Omega_i^N\}$; $\Omega_i^N = N_{pl,Rd,i}/N_{Ed,i}$.
- S-au prevăzut zone potențial plastice în lungul grinzilor (secțiuni cu tălpi de lățime redusă, situate la aproximativ 1,0m de axul stâlpilor) ca elemente disipative secundare. Secțiunile acestora au fost dimensionate la eforturile produse de gruparea accidentală de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot (\Omega^N) \cdot S_{cod}$. Pentru secțiunile zonelor potențial plastice din grinzi, rezultate în urma dimensionării, s-a evaluat un alt factor de amplificare (Ω^M); $\Omega^M = \min\{\Omega_i^M\}$; $\Omega_i^M = M_{pl,N,Rd,i}/M_{Ed,i}$.
- Celelalte categorii de elemente structurale (stâlpii de cadru și segmentele curente de grinzi) au fost dimensionate la solicitările generate de încărcarea seismică amplificată suplimentar $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot (\Omega^N) \cdot 1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot (\Omega^M) \cdot S_{cod}$.

3.2 Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor

3.2.1 Lungiri plastice maxime în diagonale

Cu mici excepții, deformațiile plastice cele mai mari s-au constatat în timpul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 77, atât în ceea ce privește lungirile plastice din diagonale, cât și în ceea ce privește rotirile plastice din lungul grinzilor.

La nivelul diagonalelor, lungirile cele mai semnificative au putut fi observate în cadrul X06 respectiv X10 (în diagonalele dispuse la nivelurile 1-3 ale cadrului X06 și la nivelurile 1-6 pentru cadrul X10) și în cadrele DC06, DC10, 2X06 respectiv 2X10 (în diagonalele situate la ultimele niveluri). În medie lungirile plastice înregistrate în diagonalele cadrului X06 au fost cu până la 27% mai reduse față de cele din cadrul DC06 (în cazul accelerografei Vrancea 77), cu aproximativ 17% mai mici față de cele din cadrul 2X06 (în cazul accelerografei Vrancea 90) și în jur de 25% mai reduse față de cele din cadrul DC06 (în cazul accelerografei Vrancea 86).

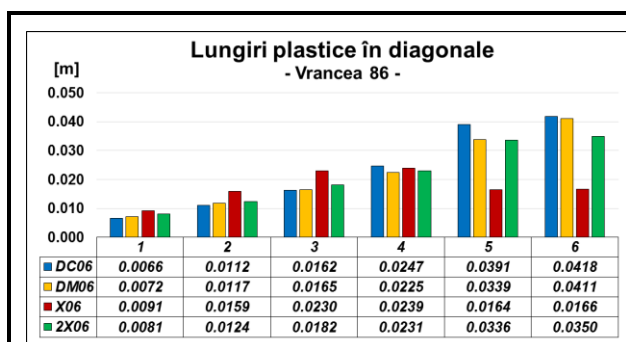


Fig. 3. 9 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu șase niveluri

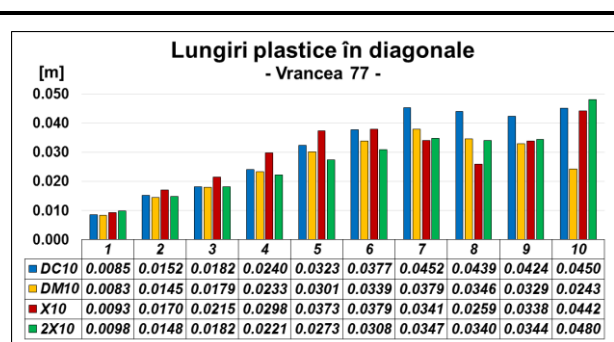


Fig. 3. 10 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu zece niveluri

Valorile medii ale deformațiilor plastice de la nivelul diagonalelor cadrului X10 au fost cu până la 19% mai reduse față de cele din cadrul 2X10 (în cazul accelerogramei Vrancea 86), cu aproximativ 10% mai mici față de cele din cadrul DC10 (în cazul accelerogramei Vrancea 90) și respectiv cu 18% mai reduse în cazul cadrului DM10 față de cele din cadrul DC10 (în cazul accelerogramei Vrancea 77).

3.2.2 Rotiri maxime în zonele potențial plastice din grinzi

În ceea ce privește rotirile plastice din lungul grinzilor de cadru în timpul analizelor dinamic neliniare, valorile cele mai reduse s-au constatat în cazul cadrului X06 (pentru accelerogramele Vrancea 77 și Vrancea 86) și respectiv pentru cadrul 2X06 (în cazul accelerogramei Vrancea 90), în timp ce valorile cele mai mari au fost observate în cazul cadrului DC06 (pentru accelerogramele Vrancea 77 și Vrancea 86) și respectiv pentru cadrul DM06 (în cazul accelerogramei Vrancea 86), vezi Tabelul și Figura. Pentru niciunul dintre cele patru cadre supuse analizelor dinamic neliniare cu cele trei accelerograme ale cutremurelor Vrancea, nu se observă rotiri plastice la primul nivel.

Pentru cadrele cu zece niveluri, rotirile plastice cu valorile cele mai mari au fost observate în timpul analizelor cu accelerograma Vrancea 77. În cele mai multe situații rotirile plastice cele mai semnificative s-au înregistrat în zonele potențial plastice amplasate în lungul grinzilor cadrului DC10. Raportate la acestea, rotirile plastice sunt în medie cu aproximativ 32% mai mici pentru cadrul DM10, cu 27% mai reduse pentru cadrul X10 și respectiv cu 28% mai mici pentru cadrul 2X10.

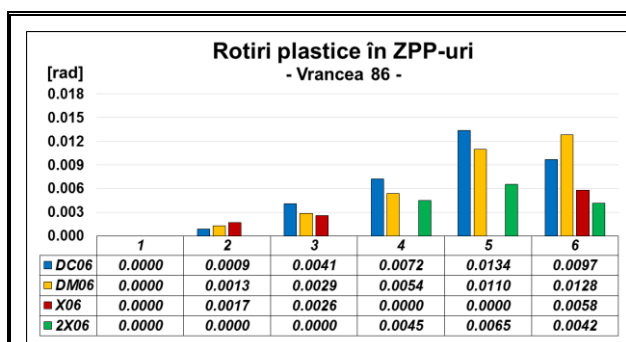


Fig. 3. 11 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu șase niveluri

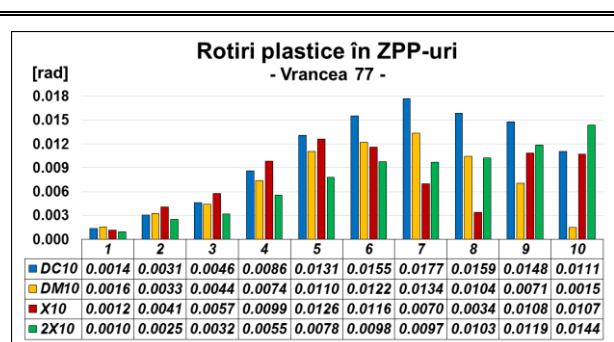


Fig. 3. 12 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu zece niveluri

3.2.3 Energia consumată în timpul analizelor dinamic neliniare

Componentele energiei disipată pentru cadrele analizate, în timpul analizei dinamic neliniare sunt indicate în Fig. 3.13 - 3.20. În toate aceste figuri, suprafața colorată în galben reprezintă energia consumată prin amortizare, suprafața colorată în roșu este proporțională cu energia cinetică.

Suprafețele albe reprezintă energia consumată prin deformarea elastică a elementelor structurale. Suprafața colorată în verde reprezintă energia disipată prin deformații plastice la nivelul diagonalelor iar suprafața colorată în albastru reprezintă energia consumată prin deformații plastice la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi.

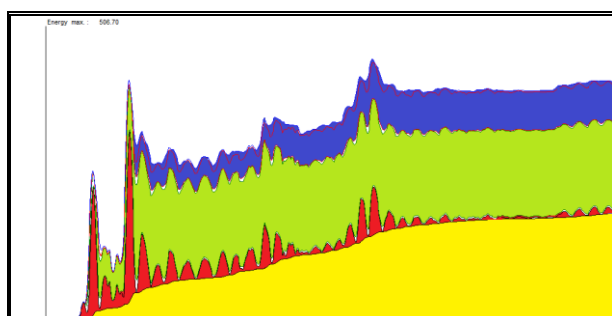


Fig. 3. 13 Distribuție energii VN86 – Cadrul DC06

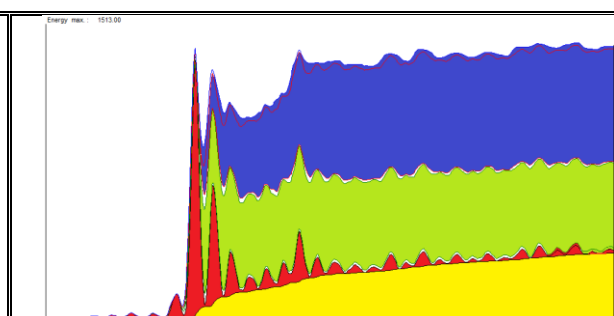


Fig. 3. 14 Distribuție energii VN77 – Cadrul DC10

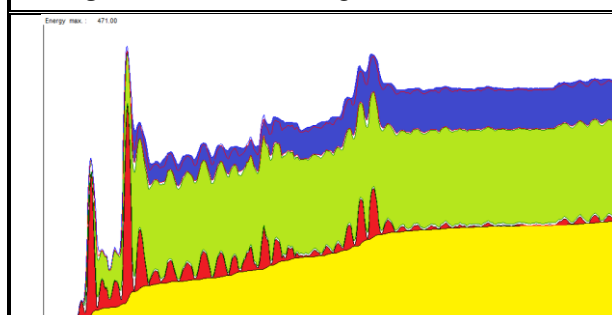


Fig. 3. 15 Distribuție energii VN86 – Cadrul DM06

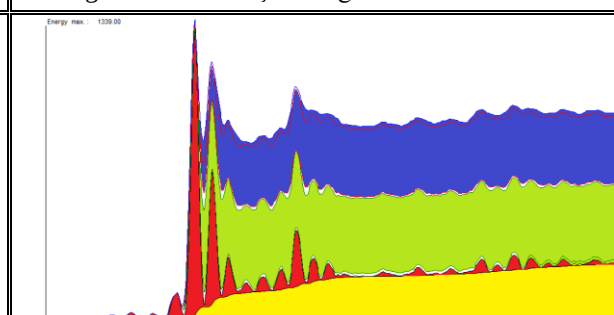


Fig. 3. 16 Distribuție energii VN77 – Cadrul DM10

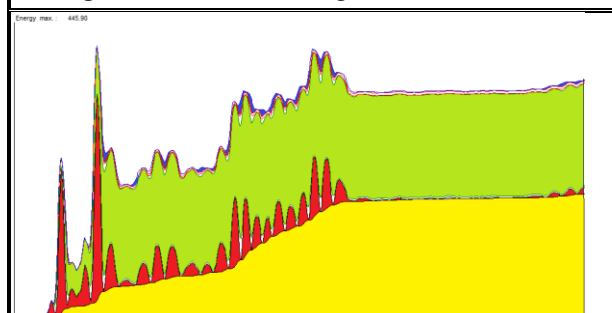


Fig. 3. 17 Distribuție energii VN86 – Cadrul X06

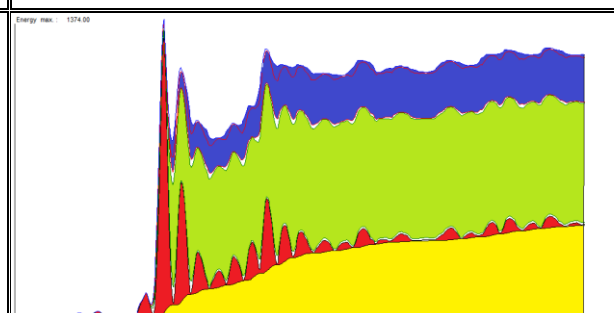


Fig. 3. 18 Distribuție energii VN77 – Cadrul X10

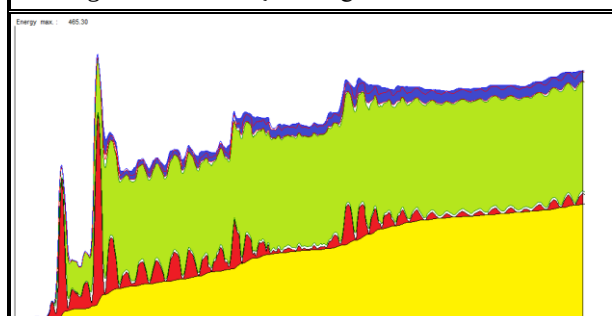


Fig. 3. 19 Distribuție energii VN86 – Cadrul 2X06

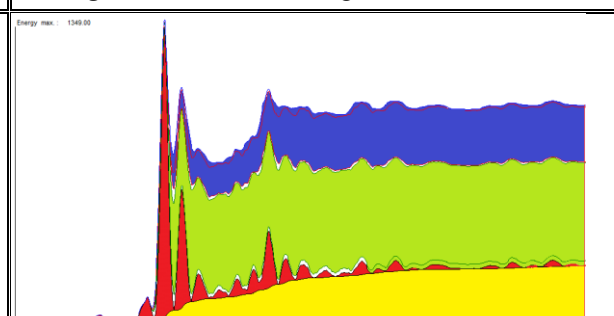


Fig. 3. 20 Distribuție energii VN77 – Cadrul 2X10

Analizând graficele din figurile 3.13, 3.15, 3.17 și 3.19, se poate observa că aria zonei verzi respectiv energia consumată prin deformații plastice în diagonalele cadrelor cu șase niveluri, are o pondere mai mare decât energia consumată în zonele potențial plastice din grinzi. Aria suprafeței din diagonalele și zonele potențial plastice din lungul grinzilor ale cadrului DC06 este similară cu ariile

suprafețelor cadrului DM06. Pentru cadrele X06 și 2X06, cantitatea de energie disipată este mult mai mare în diagonale comparativ cu energia disipată de zonele potențial plastice din grinzi. Se poate observa că pentru toate cele patru cadre de șase niveluri, cantitatea de energie disipată în timpul analizei dinamic neliniare în diagonale prezintă valori mai mari în diagonale decât în zonele potențial plastice din grinzi.

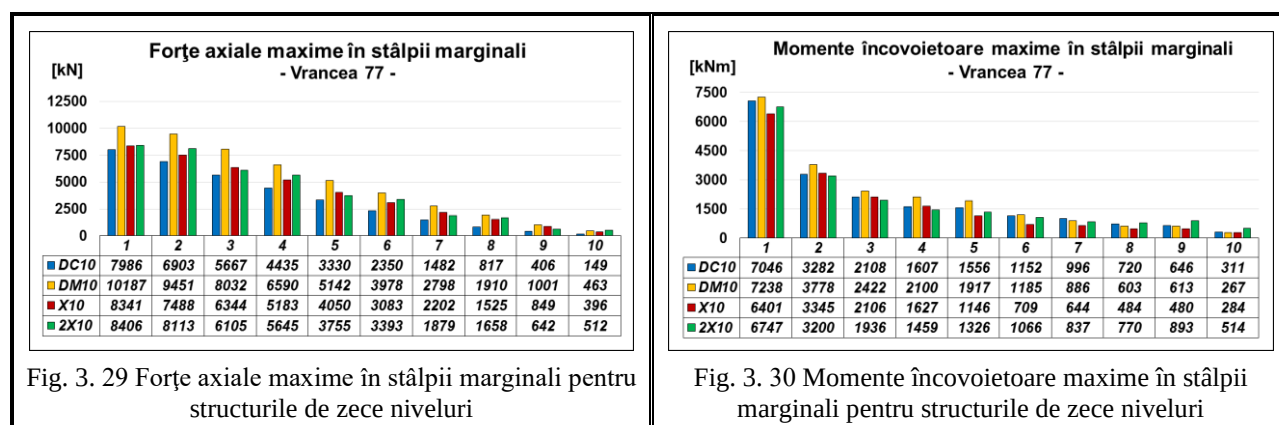
Pentru cadrul DC10, energia consumată prin deformații plastice în diagonale are o pondere mai mică decât energia consumată în zonele potențial plastice din grinzi (vezi Fig. 3.14). În cadrul DM10 se poate observa că aria suprafeței din diagonale este aproximativ egală cu cea din zonele potențial plastice de la nivelul grinzilor (vezi Fig. 3.16). Similar cadrelor cu șase niveluri, pentru cadrele X10 și 2X10 cantitatea de energie disipată este mult mai mare în diagonale comparativ cu energia disipată de zonele potențial plastice din grinzi conform figurilor 3.18 și 3.20.

3.3 Valori maxime ale eforturilor secționale

În cele mai multe cazuri, din analizele dinamic neliniare efectuate cu cele trei accelerograme (Vrancea 77, Vrancea 86 și Vrancea 90), cele mai mari valori ale eforturilor din elementele structurale s-au înregistrat pentru structurile de zece niveluri din analiza efectuată cu accelerograma Vrancea 77 iar pentru structurile de șase niveluri cu accelerograma Vrancea 86.

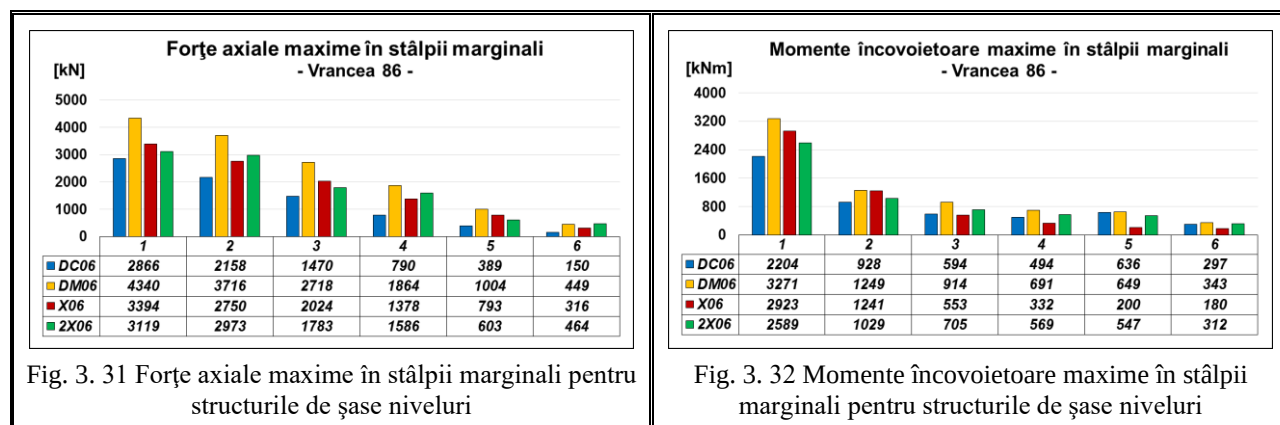
3.3.1 Eforturi maxime în stâlpii marginali

Cele mai mari valori de forțe axiale din lungul stâlpilor marginali au fost obținute pentru cadrul DM10. Forțele axiale din stâlpii marginali, înregistrează valori cu aproximativ 32% (pentru cadrul DC10), cu circa 20% (pentru cadrul de X10) și respectiv cu 19% (pentru cadrul 2X10) mai mici, comparativ cu cele obținute în cazul cadrului DM10 (vezi Fig. 3.29). Valorile de forțe axiale din stâlpii marginali ai cadrului 2X10 sunt intermediare între valorile înregistrate în cazul cadrelor DC10 și respectiv DM10. În ceea ce privește valorile de momente încovoietoare din stâlpii marginali, acestea prezintă un vârf de valoare la etajul 1. Pentru structurile cu zece niveluri, cele mai mari valori de momente încovoietoare din stâlpii marginali au rezultat pentru cadrul DM10. Valorile de momente încovoietoare pentru cadrele X10, 2X10 și DC10 sunt cu 18%, cu aproximativ 11% și respectiv cu circa 8% mai mici comparativ cu valorile obținute pentru cadrul DM10 (vezi Fig. 3.30).



Pentru cadrele cu șase niveluri, valorile de forțe axiale din lungul stâlpilor marginali ai cadrului DM06 sunt cu aproximativ 44% mai mari decât cele înregistrate în cazul cadrului DC06, cu aproximativ 24% mai mari decât cele obținute pentru cadrul X06 și respectiv cu circa 25% mai mari decât cele ale cadrului 2X06 (vezi Fig. 3.31). Momentele încovoietoare din stâlpii marginali ai cadrelor de șase niveluri prezintă ca și în cazul cadrelor cu zece niveluri același vârf de valoare la etajul 1, pentru toate cele patru cadre analizate. Se poate observa că, valorile cele mai mari au rezultat pentru cadrul DM06 iar valorile cele mai mici au fost obținute pentru cadrul X06. Comparativ cu

valorile obținute în cazul cadrului DM06, momentele încovoietoare observate pentru cadrele DC06, X06 și respectiv 2X06 sunt cu 28%, cu circa 24% și respectiv cu 19% mai mici (vezi Fig. 3.32).



3.4 Stări de eforturi în analiza static liniară

Pentru compararea stărilor de eforturi din analiza static liniară [13] s-au avut în vedere aceleași secțiuni transversale pentru diferite categorii de elemente structurale (diagonale, rigle de cadru, stâlpi centrali și stâlpi marginali) la ambele familii de cadre contravântuite centric analizate (cu șase și respectiv cu zece niveluri) [16, 17].

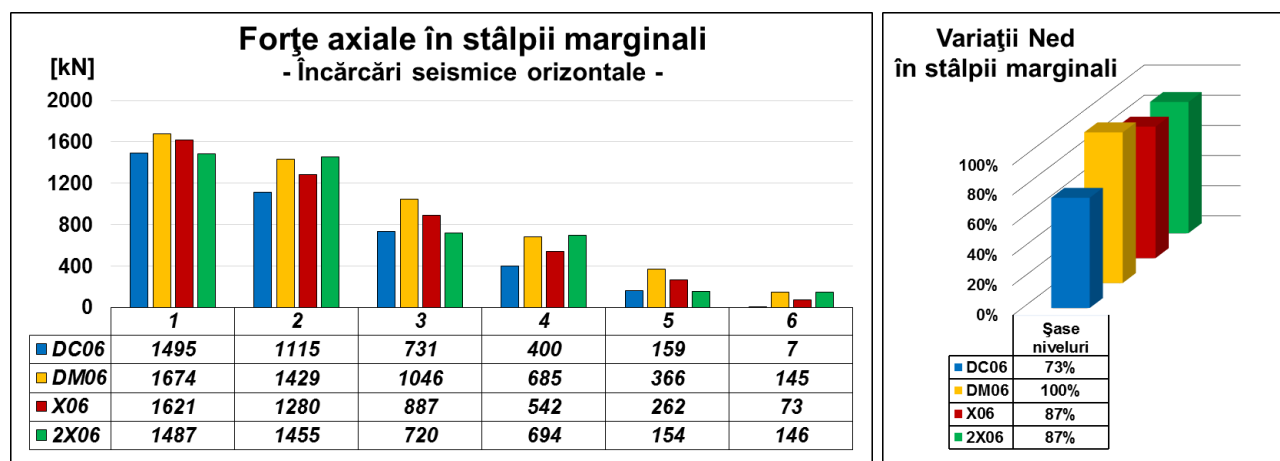


Fig. 3. 37 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru cadrele de șase niveluri produse de încărcările seismice

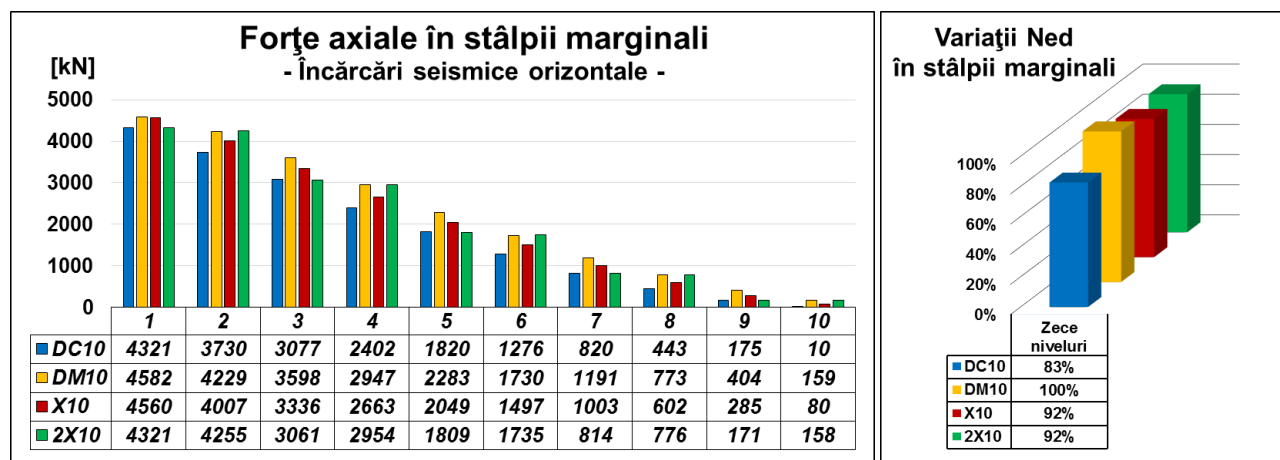


Fig. 3. 38 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru cadrele de zece niveluri produse de încărcările seismice

Valorile cele mai mari ale forțelor axiale generate în stâlpii marginali de încărcările seismice orizontale au fost înregistrate în cadrele DM și 2X pentru nivelurile pare și doar în cadrele contravântuite în sistem DM pentru nivelurile impare (vezi Fig. 3.37 și 3.38). Valorile minime ale forțelor axiale generate în stâlpii marginali de încărcările seismice orizontale au fost observate în cazul cadrelor DC și 2X pentru nivelurile impare și doar în cadrele contravântuite în sistem DC pentru nivelurile pare.

Valorile de forțe axiale din stâlpii marginali generate de acțiunea seismică orizontală pot fi explicate prin faptul că, acestea sunt proporționale cu valorile momentului încovoietor care acționează pe întregul cadru.

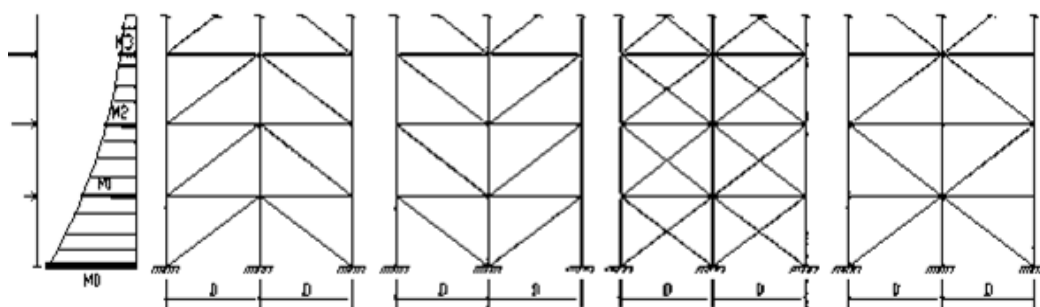


Fig. 3. 39 Momentul încovoietor produs de acțiunea seismică orizontală pe întregul cadru [16]

Scriind relațiile de echilibru la partea de jos a stâlpilor marginali, se obține:

$$N_{jos}^{DC} \approx \frac{M_1}{2 \cdot D} \quad (1); \quad N_{jos}^{DM} \approx \frac{M_0}{2 \cdot D} \quad (2); \quad M_0 > M_1 \quad (3);$$

$$(1), (2), (3) \Rightarrow N_{jos}^{DC} < N_{jos}^{DM}$$

Unde:

M_1 – momentul încovoietor al întregului cadru la partea de sus a stâlpului de la primul nivel

M_0 – momentul încovoietor al întregului cadru la partea de jos a stâlpului de la primul nivel

D – deschiderea dintre stâlpi

În cazul sistemului de contravântuire DM, valoarea forțelor axiale generate în stâlpii marginali de încărcările seismice orizontale este direct proporțională cu valoarea momentului M_0 . În cazul sistemului de contravântuire DC, valoarea forțelor axiale generate în stâlpii marginali de încărcările seismice orizontale este direct proporțională cu valoarea momentului M_1 . Valoarea momentului M_0 este mai mare decât cea a momentului M_1 ceea ce conduce la valori de eforturi axiale produse de încărcarea seismică orizontală în stâlpii marginali ai cadrelor DM06 și DM10 mai mari decât cele înregistrate în stâlpii marginali ai cadrelor DC06 respectiv DC10.

Forțele axiale produse de încărcarea seismică orizontală în stâlpii marginali ai cadrelor X06 respectiv X10 prezintă valori intermediare față de cele obținute pentru cadrele la care diagonalele sunt poziționate în sistem DC și cele în sistem DM. Pentru cadrele 2X06 și 2X10, valorile de forțe axiale din stâlpii marginali sunt apropiate cu cele ale cadrelor DC06 respectiv DC10 pentru nivelurile impare și cu cele ale cadrelor DM06 și DM10 pentru nivelurile pare.

Datorită faptului că stâlpii centrali se găsesc în axul de simetrie al cadrelor forțele axiale produse de încărcările seismice orizontale în stâlpii centrali au valori relativ apropiate.

Cele mai mari valori de forțe axiale din grinzi produse de acțiunea seismică, au putut fi observate pentru cadrele contravântuite în sistemele DC și DM, în timp ce valorile cele mai mici au fost înregistrate în cele mai multe cazuri pentru cadrele contravântuite în sistem X (vezi Tab.3.21 și respectiv Fig. 3.40 și 3.41).

Pentru cadrele cu șase niveluri, diferența dintre valorile extreme de forțe axiale produse de acțiunea orizontală în grinzi este de aproximativ șase ori mai mare iar pentru cadrele de zece niveluri de aproximativ opt ori mai mare. Valorile forțelor axiale din grinzile cadrelor 2X06 și 2X10 sunt cu aproximativ 68% respectiv cu aproximativ 45% mai mari, comparativ cu cele obținute pentru cadrele X06 și respectiv X10.

În cazul cadrelor contravântuite în sistemele DC și DM componenta orizontală a forțelor axiale din diagonale produce forțe axiale în grinzi, iar componenta verticală generează forțe axiale în stâlpii de cadru. Din acest motiv în grinzile cadrelor DC și DM se înregistrează forțele axiale cele mai mari.

Numărul mai mare (dublu) de diagonale ale cadrelor X06 și X10 explică în parte valorile mici de forțe axiale obținute pentru aceste cadre. Pe de altă parte, pentru cadrele contravântuite în sistem X, câte două diagonale se întrec la fiecare nivel în dreptul stâlpilor marginali și preiau împreună forțele axiale generate de lungirea sau scurtarea stâlpilor marginali, iar în dreptul stâlpilor centrali câte patru diagonale se intersectează între ele la fiecare nivel. Forțele axiale din toate aceste diagonale se echilibrează parțial direct între ele, iar grinzile au de preluat o forță orizontală mai mică de la diagonale.

În cazul cadrelor 2X06 și 2X10 acest lucru se întâmplă la fiecare al doilea nivel, ceea ce explică valorile intermediare ale forțelor axiale din grinzile acestor cadre, (valori mai mari față de cele din riglele cadrelor contravântuite în sistem X, dar mai reduse decât cele din cadrele DM și DC).

Forțele axiale mai reduse produse de încărcările seismice orizontale în lungul riglelor cadrelor 2X, comparativ cu cele din riglele cadrelor DM și DC se pot explica prin faptul că în cazul sistemului 2X de contravântuire în dreptul stâlpilor marginali se intersectează câte două diagonale, (cu excepția ultimului nivel, vezi Fig. 3.40 și 3.41). Proiecțiile pe orizontală ale eforturilor axiale din cele două diagonale ce se intersectează în dreptul stâlpului marginal, (care generează forțe axiale în rigla de cadru), se anulează în parte, iar în rigla de cadru din dreptul punctului de intersecție al diagonalelor se va dezvolta o forță axială mai redusă, proporțională cu diferența valorilor forțelor axiale din cele două diagonale concurente, proiectate în lungul grinzii pe orizontală!

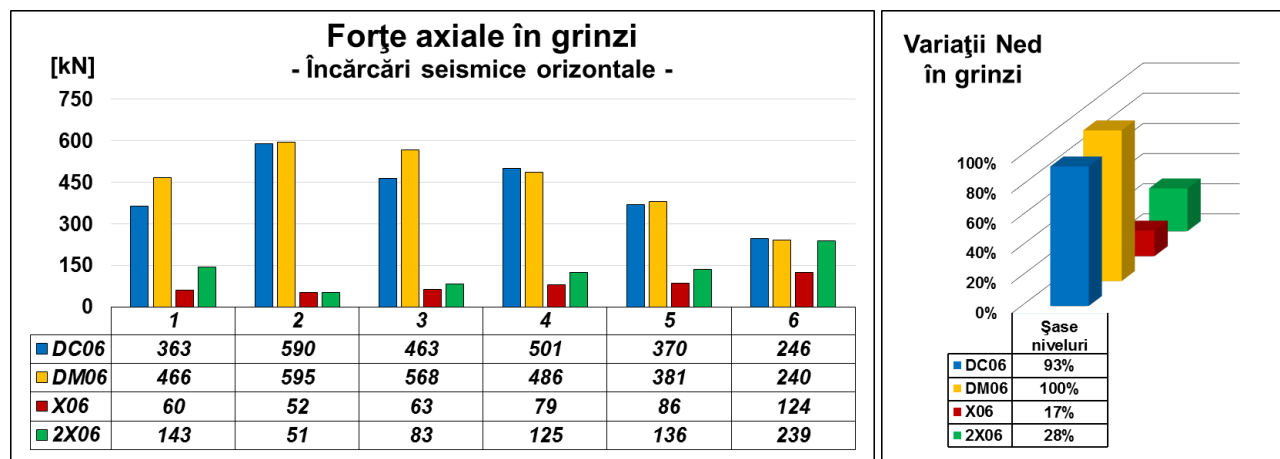


Fig. 3. 40 Forțe axiale maxime în grinzile cadrelor de șase niveluri produse de încărcările seismice

Scurtarea respectiv lungirea stâlpilor marginali produsă de forța seismică orizontală afectează valorile de forțe axiale din diagonale. Prin aplicarea „metodei de izolare a nodului” pentru cadrele DC06, DC10 și respectiv DM06, DM10 se poate observa că, componentele orizontale ale forțelor axiale din diagonale vor fi echilibrate de forțele axiale din grinzi în timp ce componenta verticală va fi echilibrată de forțele axiale ce apar în stâlpi.

Pentru cadrele DC06, DC10, DM06 și DM10 forțele din diagonalele de pe două niveluri consecutive nu se condiționează direct, iar forțele orizontale din grinzi au rezultat mai mari.

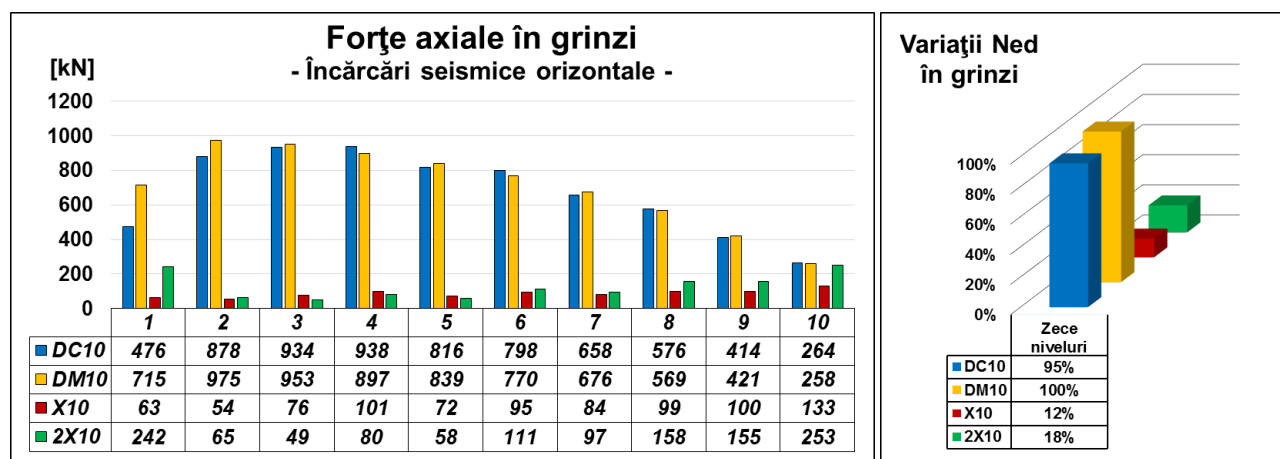


Fig. 3. 41 Forțe axiale maxime în grinzile cadrelor de zece niveluri produse de încărcările seismice

3.5 Consumul estimat de oțel pentru structurile analizate

Structurile cu zece niveluri dimensionate în cele patru variante de dispunere a diagonalelor, au condus la obținerea unui consum total estimat de oțel cel mai redus în cazul cadrului X10. Consumul cel mai mare de oțel a fost observat în cazul cadrului DM10, fiind cu 22% mai mare comparativ cu valoare minimă a consumului (vezi Fig. 3.53). Pentru cadrele DC10 și 2X10 consumul estimat de oțel total a fost cu circa 12% și respectiv cu 9% mai mare decât valoarea obținută pentru cadrul X10.

Dintre cele patru variante de dispunere a diagonalelor, consumul estimat total de oțel al cadrelor cu șase niveluri cel mai redus a fost obținut pentru cadrul X06, iar consumul cel mai mare pentru cadrul DM06 (vezi Fig. 3.52). Față de cadrul X06 consumul estimat total de oțel a rezultat cu 12% (pentru cadrul DC06), cu 20% (cadrul DM06) și respectiv cu 9% (cadrul 2X06) mai ridicat.

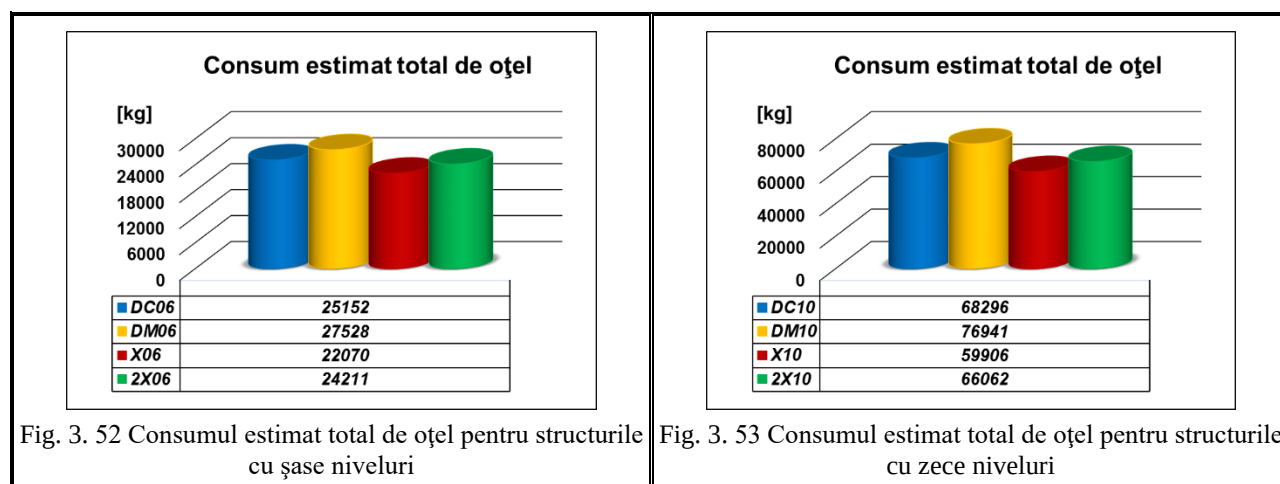


Fig. 3. 52 Consumul estimat total de oțel pentru structurile cu șase niveluri

Fig. 3. 53 Consumul estimat total de oțel pentru structurile cu zece niveluri

3.6 Rezultate și comentarii asupra sistemelor de contravântuire analizate

Cadrele X06 și respectiv X10 au rezultat cu rigiditatea laterală cea mai mare, iar cadrele DC06 respectiv DC10 cu valoarea cea mai redusă pentru rigiditatea laterală și prin urmare cele mai mari

deplasări orizontale la nivelul planșeelor apar la cadrele DC06 și DC10, iar valorile cele mai mici în cazul cadrelor X06 și X10.

Cele mai mari valori ale deformațiilor postelastice s-au observat în cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 86 pentru structurile de șase niveluri și respectiv cu accelerograma Vrancea 77 pentru structurile de zece niveluri, atât în cazul alungirilor diagonalelor, cât și în cazul rotirilor din zonele potențial plastice din grinzile de cadru.

În cazul cadrelor cu șase niveluri, deformațiile plastice cele mai mari de la nivelul diagonalelor au putut fi observate la ultimele trei niveluri ale cadrului DC06 și respectiv la primele trei niveluri ale cadrului X06, iar rotirile inelastice cele mai mari, de la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi au fost observate în cazul cadrului DC06, iar cele mai reduse în cazul cadrului X06. Pentru cadrele cu zece niveluri, deformațiile plastice cele mai mari de la nivelul diagonalelor au putut fi observate la ultimele patru niveluri ale cadrului DC10 și respectiv la primele șase niveluri ale cadrului X10, iar rotirile inelastice cele mai mari de la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi au putut fi observate în cazul cadrului DC10, iar cele mai reduse în cazul cadrului DM10. Diferențele maxime au fost în medie de aproximativ 25% în cazul diagonalelor și respectiv de circa 71% în cazul grinzilor cadrelor cu șase niveluri, și în medie de aproximativ 18% în cazul diagonalelor și de circa 32% în cazul grinzilor cadrelor cu zece niveluri.

În timpul analizelor dinamic neliniare eforturile axiale cele mai reduse s-au constatat la nivelul cadrelor 2X06 și 2X10 (în cazul grinzilor și stâlpilor centrali) și la nivelul cadrului DC06 respectiv DC10 (pentru stâlpii marginali). Valorile cele mai ridicate de forțe axiale s-au observat în cadrele DM06, DM10 (pentru stâlpii marginali și grinzi), respectiv în cadrele DC06 și DC10 (pentru stâlpii centrali).

Pentru structurile de șase niveluri, momentele încovoietoare cu valorile cele mai mici au fost obținute pentru cadrul X06 atât pentru grinzi cât și pentru stâlpii centrali. Pentru stâlpii marginali valorile cele mai reduse ale momentelor încovoietoare s-au constatat pentru cadrul DC06. Pentru structurile de zece niveluri, valorile cele mai reduse au fost obținute din cadrul X10 atât pentru grinzi, stâlpi centrali și stâlpi marginali. Valorile cele mai mari ale momentelor încovoietoare înregistrate atât la nivelul grinzilor cât și pentru stâlpii centrali și marginali, au fost observate în cazul cadrului DM06 pentru structurile cu șase niveluri, iar în cazul structurilor de zece niveluri au rezultat pentru cadrul DM10 în cazul grinzilor și stâlpilor marginali și pentru cadrul DC10 în cazul stâlpilor centrali.

Cantitatea cea mai mare de energie consumată prin deformații plastice în timpul analizelor dinamic neliniare s-a observat pentru cadrele de tip X (X06, X10) la nivelul diagonalelor și pentru cadrul DC06 și respectiv DC10 la nivelul grilelor de cadru.

Consumul estimat de oțel cel mai redus s-a obținut pentru grinzile și stâlpii (centrali și marginali) din cadrele X06 și X10, iar pentru diagonale consumul de oțel cu valoarea cea mai mică s-a observat pentru cadrele DC06 și respectiv DC10. Consumul estimat total de oțel cel mai ridicat s-a obținut pentru cadrele DM06 și DM10, iar cel mai redus pentru cadrele X06 respectiv X10. Diferența maximă a pentru structurile de șase niveluri a fost de aproximativ 20%, iar pentru cele de zece niveluri de circa 22%.

Datorită faptului că sistemul de contravântuire de tip X, conduce, comparativ cu celelalte sisteme de contravântuire analizate, pe de o parte la deformațiile postelastice cele mai mici (în diagonale și în zonele potențial plastice din grinzi), iar pe de altă parte la consumul cel mai redus de oțel, se poate considera că acest sistem de contravântuire este cel mai eficient dintre cele analizate.

Dacă, din punct de vedere arhitectural acest sistem de contravântuire nu poate fi acceptat datorită dificultății dispunerii eventualelor goluri de uși și ferestre, se recomandă utilizarea sistemului de contravântuire de tip 2X (consum estimat de oțel cu aproximativ 9% mai mare față de sistemul de tip X dar cu până la 14% mai redus față de sistemele de contravântuire de tip DC și DM, respectiv deformații plastice reduse în cele mai multe cazuri comparativ cu sistemele de tip DC și DM).

4 Particularități de alcătuire pentru structuri metalice contravântuite centric

4.1 Variante de fixare a diagonalelor și grinzilor de stâlpii de cadru

În acest subcapitol, s-a urmărit punerea în evidență a influenței prinderilor articulate și încastrate a diagonalelor și grinzilor de stâlpii de cadru. Prinderile rigide vor fi realizate cu eclise fixate cu tije sau sudură de inima și tălpile secțiunii diagonalelor respectiv grinzilor, iar cele articulate vor fi realizate cu un singur bolț.

4.1.1 Soluții constructive analizate

Pentru construcții cu șase niveluri (parter+5etaje) și zece niveluri (parter+9etaje), cu două deschideri și patru travei de câte șase metri, amplasate în București, s-au analizat șase variante de fixare a diagonalelor și grinzilor de stâlpii de cadru. Înălțimea de nivel este de 3,5m. Elementele structurale (diagonalele, grinzile, stâlpii centrali și marginali) ale cadrelor analizate au secțiuni „I” dublu-simetrice alcătuite din table sudate.

Cadrelor propuse spre analiză au fost dimensionate pe rând în trei variante constructive:
 Varianta A - prinderea diagonalelor și a grinzilor de tip articulată (cadrele A06 și A10);
 Varianta B - prinderea articulată a diagonalelor și prinderea rigidă a grinzilor (cadrele B06 și B10);
 Varianta C - prinderea rigidă atât a diagonalelor cât și a grinzilor (cadrele C06 și C10).

Cele șase cadre propuse spre analiză au avut următoarea procedură de dimensionare la acțiuni seismice:

❖ Pentru cadrele A06 și A10:

- Diagonalele cadrelor A06 și A10, au fost dimensionate la eforturile generate de încărcarea seismică de proiectare neamplificată S_{cod} (pe un cadru în care s-au luat în considerare doar diagonalele întinse). Pentru secțiunile dimensionate ale diagonalelor s-a evaluat un factor de amplificare (Ω^N); $\Omega^N = \min\{\Omega^N_i\}$; $\Omega^N_i = N_{pl,Rd,i}/N_{Ed,i}$;
- Secțiunile de grinzi au fost dimensionate la forța produsă de solicitările cele mai defavorabile din gruparea seismică de încărcări ce cuprinde și acțiunea seismică amplificată: $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega^N \cdot S_{code}$ sau de solicitările generate de gruparea fundamentală de acțiuni;
- Stâlpii centrali și marginali au fost dimensionați la solicitările generate de încărcarea seismică amplificată suplimentar: $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega^N \cdot 1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot 1.05 \cdot S_{code}$ (pentru a asigura o suprazistență a stâlpilor în comparație cu grinzile, atunci când sunt supuse acțiunilor seismice severe).

❖ Pentru cadrele B06, B10, C06 și C10:

- Mai întâi au fost dimensionate diagonalele cadrului contravântuit centric, ca elemente disipative primare, la eforturile generate de încărcarea seismică de proiectare neamplificată S_{cod} (pe un cadru în care s-au luat în considerare doar diagonalele întinse). Pentru aceste secțiuni s-a evaluat un factor de amplificare (Ω^N).
- S-au prevăzut zone cu tălpi de lățime redusă (zone potențial plastice) în lungul grinzilor, în vecinătatea prinderii diagonalelor de grinzi, ca elemente disipative secundare. Secțiunile acestora au fost dimensionate la eforturile produse de gruparea accidentală de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată: $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega^N \cdot S_{code}$. Pentru secțiunile dimensionate ale zonelor potențial plastice din grinzi s-a evaluat un alt factor de amplificare (Ω^M); $\Omega^M = \min\{\Omega^M_i\}$; $\Omega^M_i = M_{pl,N,Rd,i}/M_{Ed,i}$;
- La dimensionarea secțiunilor pentru zonele curente de grinzi, stâlpi marginali și stâlpi centrali s-au avut în vedere eforturile generate de încărcarea seismică amplificată suplimentar: $1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega^N \cdot 1.1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega^M \cdot S_{code}$.

4.1.2 Analize dinamic neliniare efectuate

Pentru a se determina răspunsul structurilor la acțiunea seismică, fiecare variantă de fixare distinctă, a fost supusă unei analize dinamic neliniare în care s-au folosit componentele N-S de la trei accelerograme ale unor curemure cu focarul în zona Vrancea (1977, 1986 și 1990), înregistrate la INCERC București, toate scalate pentru a se obține o valoare a accelerației terenului de 0,3g.

4.1.3 Rezultate și comentarii

4.1.3.1 Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor

În cazul analizei cu accelerograma Vrancea 77, valorile maxime ale deformațiilor plastice din diagonale, au fost înregistrate pentru primele patru niveluri în cazul cadrului B06, iar pentru ultimele două niveluri în cazul cadrului A06. În cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerogramele Vrancea 86 și Vrancea 90, doar la ultimul nivel deformațiile maxime de la nivelul diagonalelor se înregistrează în cazul cadrului A06, la celelalte niveluri valorile maxime se constată în cazul cadrului B06.

Pentru toate accelerogramele, lungirile cele mai mici de la nivelul diagonalelor au putut fi observate în cazul cadrului C06. În medie diferențele dintre lungirile plastice maxime de la nivelul diagonalelor cadrelor B06 și C06 au fost de aproximativ 40,4% în cazul accelerogramei Vrancea 77, de circa 19,5% în cazul accelerogramei Vrancea 86 și de aproximativ 13,0% în cazul accelerogramei Vrancea 90 (vezi Fig. 4.6).

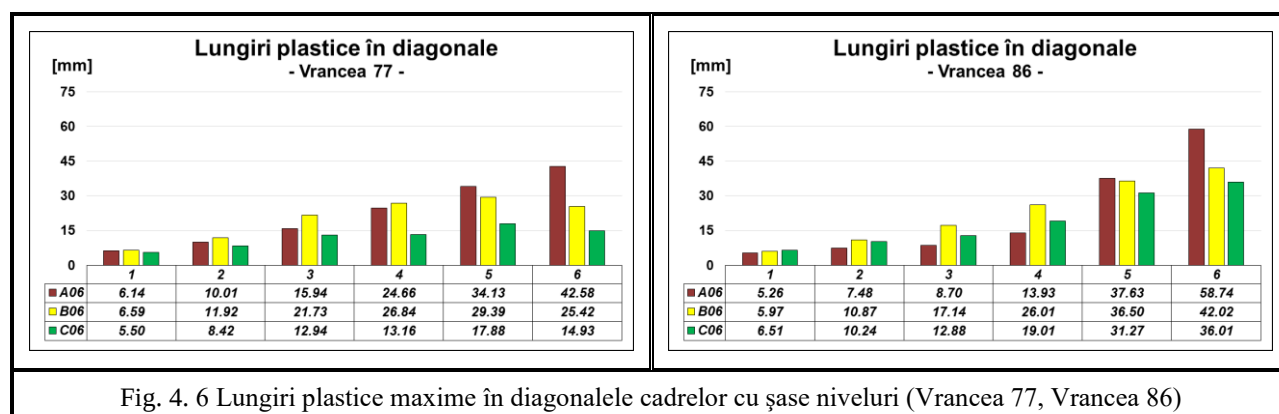


Fig. 4. 6 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu șase niveluri (Vrancea 77, Vrancea 86)

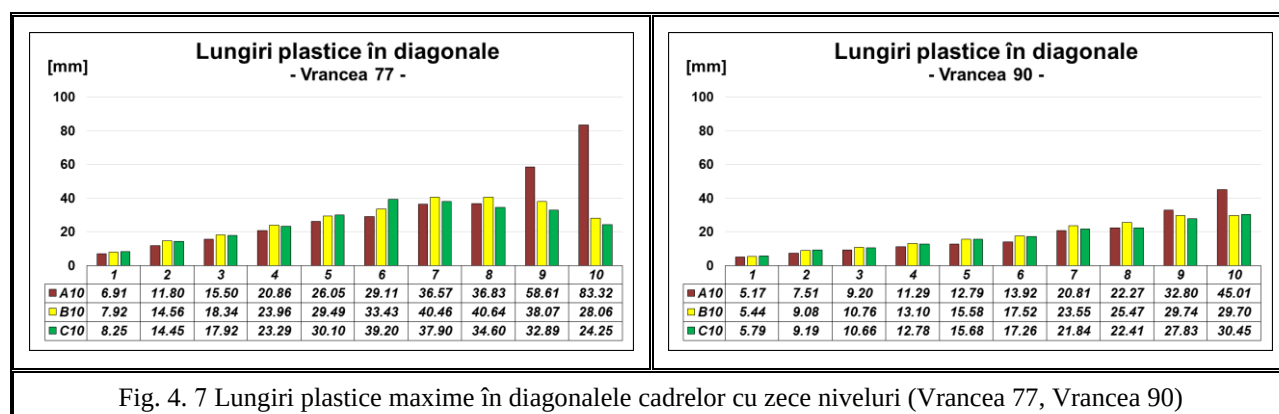


Fig. 4. 7 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu zece niveluri (Vrancea 77, Vrancea 90)

În cazul cadrelor cu șase niveluri lungirile plastice cele mai semnificative au putut fi constatate la nivelul diagonalelor în timpul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 86. Pentru cele trei cadre cu zece niveluri, deformațiile plastice cele mai mari s-au înregistrat la nivelul diagonalelor, în urma analizei dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 77.

La cadrele cu zece niveluri, în cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerogramele Vrancea 77 și Vrancea 90, deformațiile plastice cele mai mari s-au constatat la nivelul diagonalelor cadrului

A10, iar cele mai reduse în cazul cadrului C10. În medie, diferențele deformațiilor au fost de aproximativ 23,9% în cazul accelerogramei Vrancea 77 și de circa 4,0% în cazul accelerogramei Vrancea 90, (vezi Fig. 4.7). În cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 86, valorile lungirilor diagonalelor sunt mult mai mici, chiar dacă procentual diferențele dintre valori rezultă mai mari (vezi valorile din Tab. 4.8).

În ceea ce privește rotirile în domeniul postelastice, constatate la nivelul zonelor potențial plastice de la nivelul riglelor de cadru, cele mai semnificative valori s-au observat în cazul analizelor cu accelerograma Vrancea 86, în cazul cadrelor cu șase niveluri și respectiv cu accelerograma Vrancea 77, în cazul cadrelor cu zece niveluri (vezi Tab. 4.9).

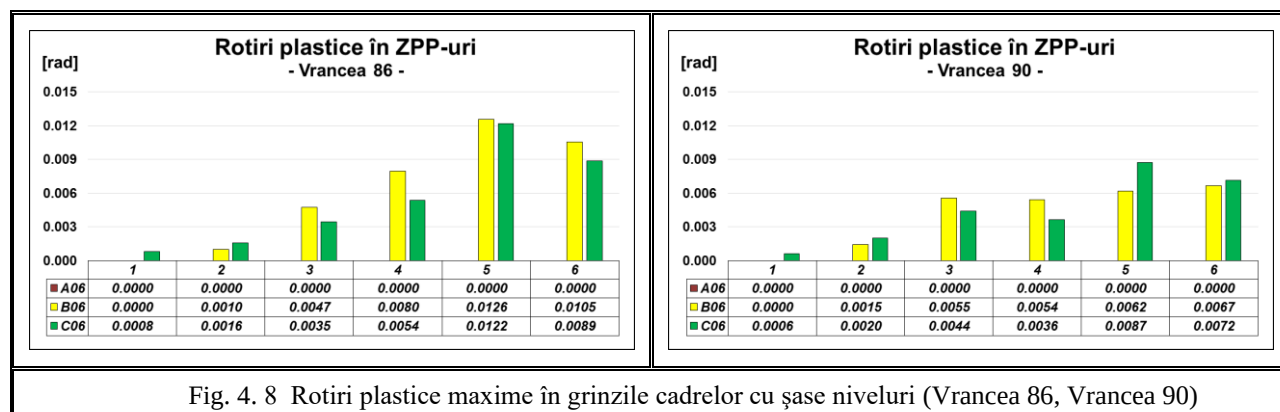


Fig. 4. 8 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu șase niveluri (Vrancea 86, Vrancea 90)

Datorită prinderii articulate a grinzii de stâlpii de cadru, cadrul A10 nu înregistrează rotiri plastice (vezi Fig. 4.8 și Fig. 4.9). Cu excepția analizei dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 90, valorile cele mai reduse ale rotirilor plastice s-au înregistrat în cazul cadrelor cu prinderi rigide între rigle/stâlpi și diagonale/stâlpi (adică în cadrele C06 și C10). În medie, diferențele dintre valorile rotirilor plastice de la nivelul grinzilor au fost de circa 14% între cadrele B06 și C06 în cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 86, respectiv de aproximativ 11,9% între cadrele B10 și C10 în cazul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 77.

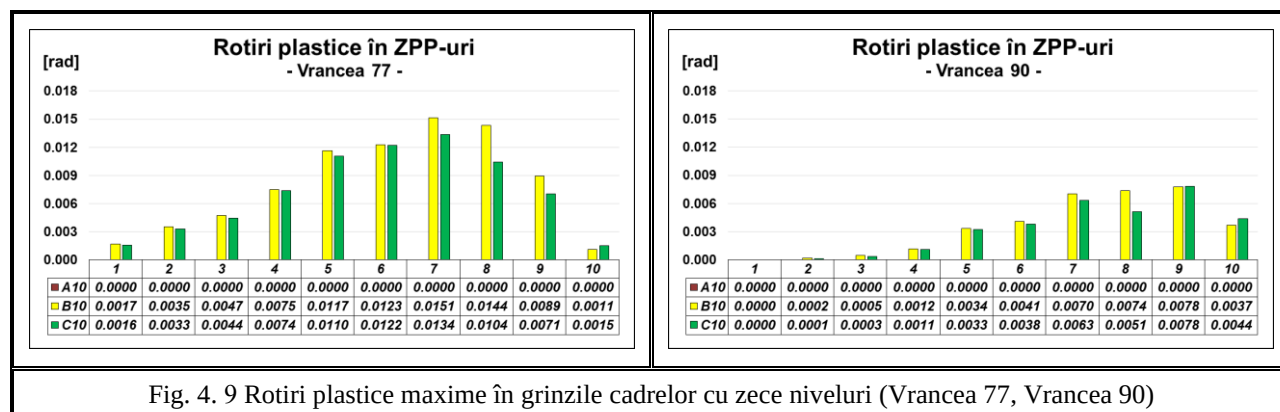


Fig. 4. 9 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu zece niveluri (Vrancea 77, Vrancea 90)

4.1.3.2 Comportarea în timpul analizelor dinamic neliniare

În Fig. 4.16 și 4.17 sunt indicate componentele energiei disipate de cadrele analizate în timpul analizelor dinamic neliniare [20].

Analizând graficele în care sunt prezentate energiile disipate de cadrele cu șase niveluri în timpul analizelor dinamic neliniare (vezi Fig. 4.16), se poate observa că în cazul cadrului A06 aria zonei verzi (reprezentând energia consumată prin deformații plastice în diagonalele cadrului) și aria zonei gri (reprezentând energia consumată prin amortizare) au o pondere mai mare comparativ cu cele corespunzătoare cadrelor B06 și C06.

Pentru cadrul B06, cantitatea de energie disipată atât în diagonale cât și în zonele potențial plastice din grinzi este mai mare comparativ cu cea disipată în cadrul C06, fapt confirmat și de mărimea deformațiilor plastice din diagonale și grinzi (vezi lungirile diagonalelor din Fig. 4.6 și respectiv rotirile plastice din grinzi din Fig. 4.8). Atât suprafața verde cât și cea roșie au o arie mai mare în cazul cadrului B06, comparativ cu cadrul C06. Se mai poate observa că, pentru cadrele B06 și C06, cantitatea de energie disipată în timpul analizelor dinamic neliniare în diagonale este mai mare decât cea disipată la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi.

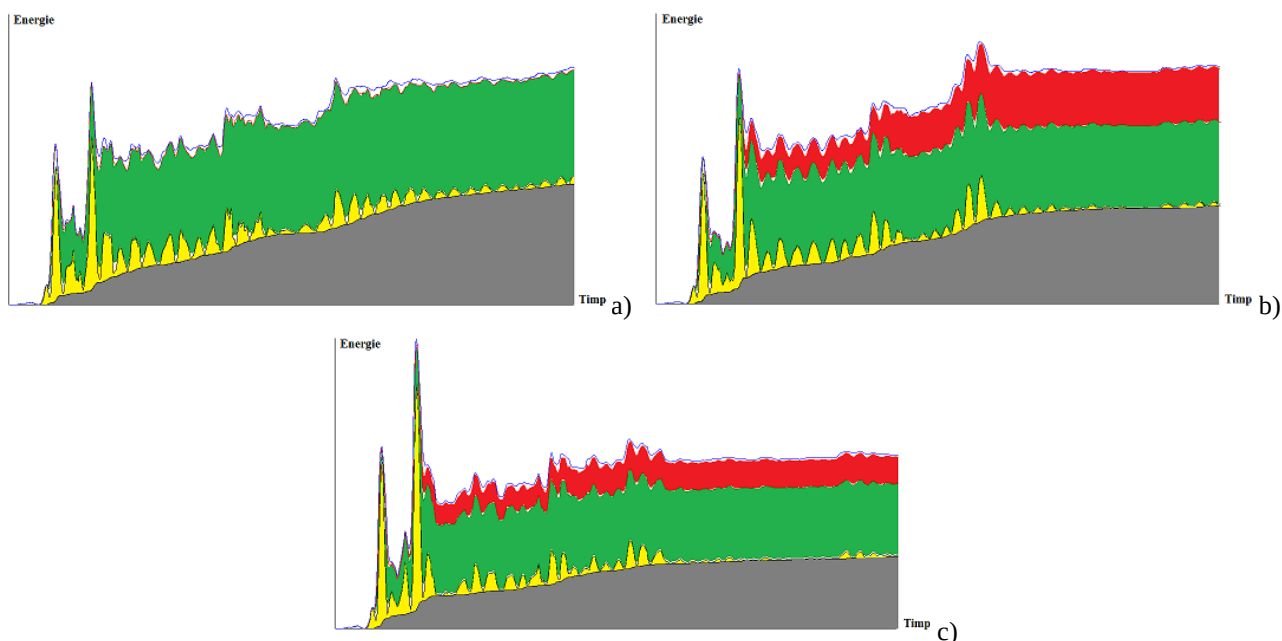


Fig. 4. 16 Energia disipată în timpul analizelor dinamic neliniare de cadrele cu șase niveluri (Vrancea 86): a)A06, b)B06, c)C06

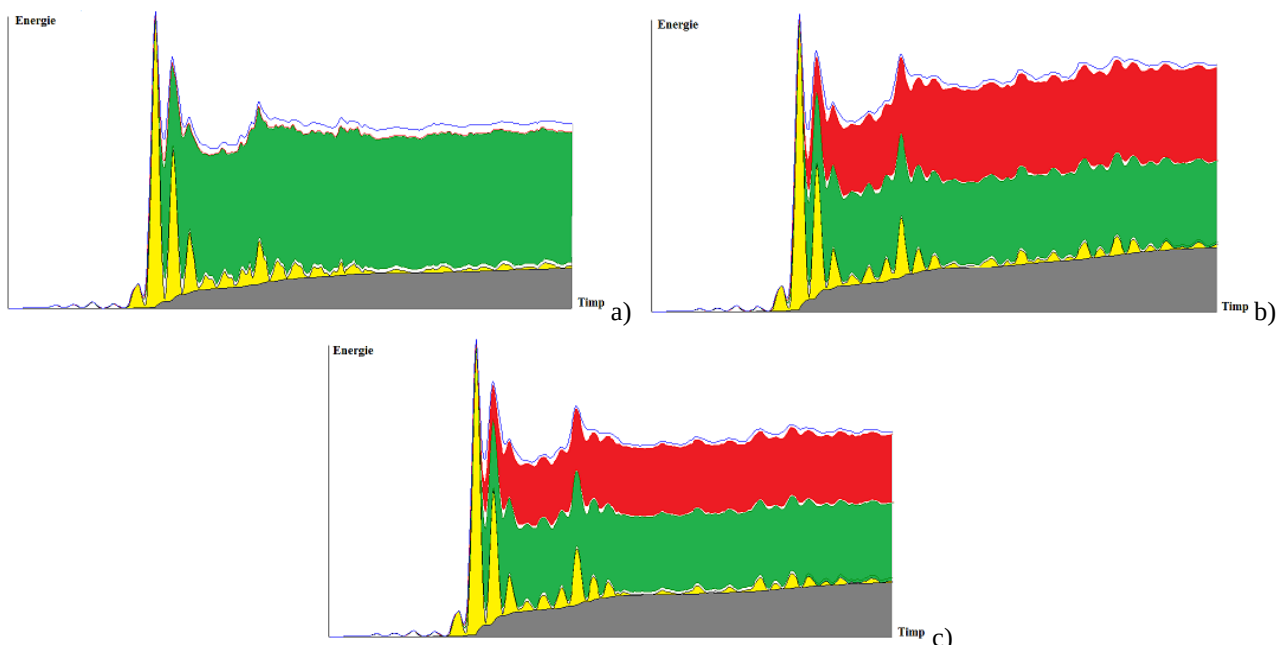


Fig. 4. 17 Energii disipate în timpul analizelor dinamic neliniare de cadrele cu zece niveluri (Vrancea 77): a) A10, b)B10, c)C10

Analizând graficele în care sunt prezentate energiile disipate de cadrele cu zece niveluri în timpul analizelor dinamic neliniare (vezi Fig. 4.17), se poate observa, spre deosebire de comportarea

cadrelor cu șase niveluri, că în cazul cadrului A10 doar aria zonei verzi (reprezentând energia consumată prin deformații plastice în diagonalele cadrului) are o pondere mai mare comparativ cu cantitățile de energie disipată prin deformații plastice la nivelul diagonalelor corespunzătoare cadrelor B10 și C10. În cazul cadrului C10 se poate observa că aria suprafeței energiei consumate prin deformații plastice la nivelul diagonalelor (suprafața verde) este aproximativ egală cu cea corespunzătoare zonelor potențial plastice de la nivelul grinzilor (suprafața roșie). Similar cadrelor cu șase niveluri, aria suprafeței aferentă energie disipată în zonele potențial plastice din grinzi este mai mare în cazul cadrului B10 comparativ cu aria suprafeței cadrului C10 (vezi Fig. 4.17).

4.1.3.3 Valori maxime ale eforturilor secționale constatate în timpul analizelor dinamic neliniare

În marea majoritate a situațiilor, valorile cele mai mari ale diferitelor eforturi secționale s-au înregistrat în timpul analizelor dinamic neliniare cu accelerograma Vrancea 86 pentru structurile de șase niveluri, iar pentru structurile de zece niveluri în timpul analizelor efectuate cu accelerograma Vrancea 77.

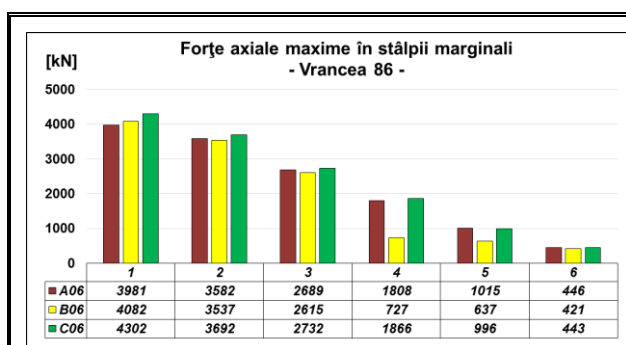


Fig. 4. 26 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru structurile de șase niveluri

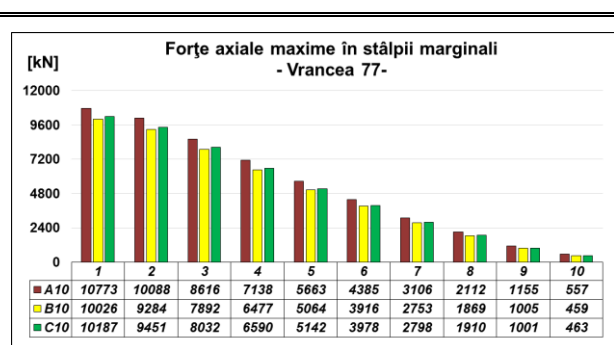


Fig. 4. 27 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru structurile de zece niveluri

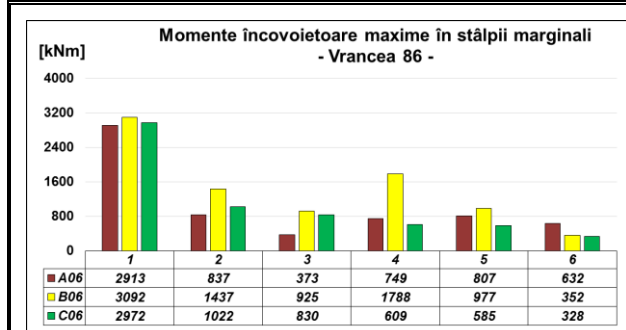


Fig. 4. 28 Momente încovoietoare maxime în stâlpii marginali pentru structurile de șase niveluri

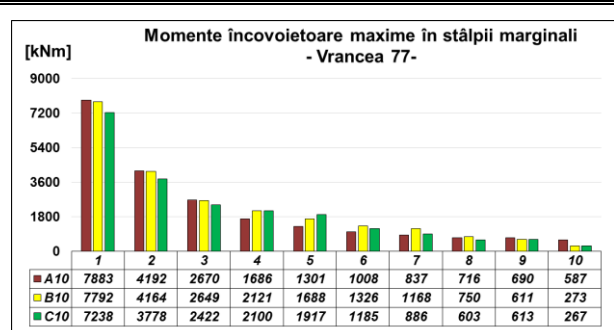


Fig. 4. 29 Momente încovoietoare maxime în stâlpii marginali pentru structurile de zece niveluri

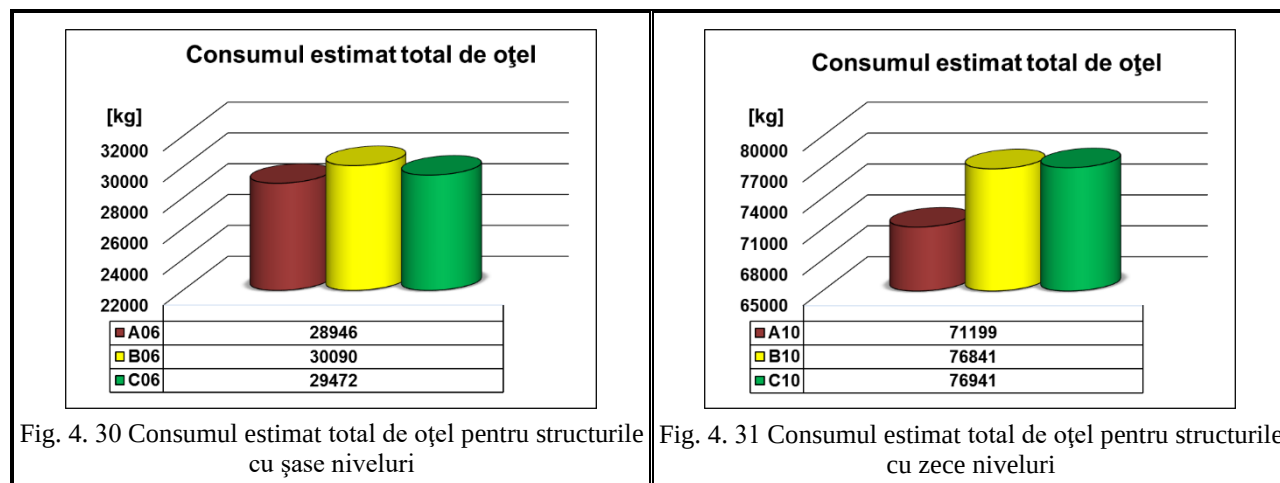
În timpul analizelor dinamic neliniare, valorile cele mai mari ale forțelor axiale din stâlpii marginali, s-au obținut în cele mai multe situații pentru cadrele C06 (în cazul cadrelor cu șase niveluri) și respectiv A10 (în cazul cadrelor cu zece niveluri). În medie valorile maxime ale forțelor axiale din stâlpii marginali au rezultat cu aproximativ 3,7% mai mici pentru cadrul A06 și respectiv cu circa 14,4% mai reduse pentru cadrul B06, comparativ cu valorile obținute pentru cadrul C06 (vezi Fig. 4.26). În cazul cadrelor cu zece niveluri, față de valorile maxime ale forțelor axiale din lungul stâlpilor marginali din cadrul A10, pentru cadrul B10 s-au constatat valori cu circa 9,1% mai mici, iar pentru cadrul C10 valori cu aproximativ 7,5% mai reduse (vezi Fig. 4.27).

Cele mai mari valori ale momentelor încovoietoare din stâlpii marginali din timpul analizelor dinamic neliniare au fost obținute de regulă în cazul cadrelor B06 (pentru cadrele cu șase niveluri) și respectiv B10 (pentru cadrele cu zece niveluri). Valorile maxime ale momentelor încovoietoare din

lungul stâlpilor marginali ai cadrelor A06 și C06 au fost în medie cu aproximativ 26,4% și respectiv 25,9% mai mici decât valorile rezultate în cazul cadrului B06 (vezi Fig. 4.28). Pentru cadrele cu zece niveluri, valorile maxime ale momentelor încovoietoare au fost în medie cu circa 4,3% mai mici pentru cadrul A10 și respectiv cu 6,8% mai reduse pentru cadrul C10, comparativ cu valorile maxime obținute pentru cadrul B10 (vezi Fig. 4.29).

4.1.3.4 Consumul estimat de oțel

Valorile cele mai reduse pentru consumul total estimat de material a fost obținut în cazul cadrelor A06 și respectiv A10. Valorile cele mai ridicate pentru consumul estimat de oțel au fost obținute în cazul cadrului B06, pentru cadrele cu șase niveluri, respectiv în cazul cadrului C10, pentru cadrele cu zece niveluri.



În cazul cadrelor cu șase niveluri, comparativ cu valoarea consumului estimat obținută pentru cadrul A06, pentru cadrele C06 și B06, consumul total estimat de oțel a rezultat cu circa 1,8% și respectiv cu aproximativ 3,8% mai ridicat (vezi Fig. 4.30).

Pentru cadrele cu zece niveluri, în comparație cu valoarea cea mai mică a consumului total de oțel obținută pentru cadrul A10, în cazul cadrului B10 consumul estimat de material a rezultat cu aproximativ 7,3% mai mare, iar în cazul cadrului C10 cu circa 7,5% mai ridicat (vezi Fig. 4.31).

4.1.4 Observații și recomandări

Valorile cele mai ridicate pentru rigiditatea laterală a rezultat pentru cadrele C06 și respectiv C10, iar valorile cele mai reduse pentru cadrele A06 respectiv A10. Prin urmare, valorile cele mai mari ale forței tăietoare de bază, pentru structurile cu șase și respectiv cu zece niveluri, au fost obținute pentru cadrele C06 și C10, în timpul analizei dinamic neliniare în care s-au folosit accelerogramele Vrancea 86 și Vrancea 77. Pentru cadrele cu șase niveluri, pentru sensul pozitiv al acțiunii seismice, diferența dintre valori extreme înregistrate a fost de aproximativ 16,9%, iar pentru sensul negativ al acțiunii seismice a rezultat de circa 7,5%. În cazul cadrelor de zece niveluri, pentru sensul negativ al acțiunii seismice, diferența dintre valorile extreme obținute a fost în jur de 1,9% iar pentru sensul pozitiv al acțiunii seismice, diferența a fost de aproximativ 2,6%.

În ceea ce privește valorile cele mai mari ale deplasărilor orizontale, în cazul cadrelor cu șase niveluri, valorile cele mai ridicate se obțin pentru cadrul A06 pentru ambele sensuri de acțiune ale încărcării seismice. În cazul cadrelor cu zece niveluri, valorile extreme ale deplasărilor orizontale s-au înregistrat în cazul cadrului A10 pentru sensul pozitiv al acțiunii seismice și în cazul cadrului B10 pentru celălalt sens. Totuși valorile cele mai mari ale amplitudinilor deplasărilor orizontale (suma valorilor absolute ale deplasărilor extreme pozitive și negative) s-au înregistrat întotdeauna în cazul cadrului A10.

În cele mai multe cazuri, deformațiile plastice cele mai mari au putut fi constatate în urma analizelor dinamic neliniare efectuate cu accelerograma Vrancea 86 pentru structurile cu șase niveluri și respectiv cu accelerograma Vrancea 77 pentru structurile cu zece niveluri. Cele mai mari deformații plastice de la nivelul diagonalelor, s-au observat de regulă în cazul cadrelor B06 (pentru cadrele cu șase niveluri) și respectiv B10 (pentru cadrele cu zece niveluri). Excepție fac ultimele două niveluri pentru care valorile cele mai mari au rezultat pentru cadrele A06 și A10, datorită unor amplificări dinamice locale la ultimele niveluri de tipul efectului de bici.

Rotirile inelastice cele mai mari, de la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi au fost observate de regulă în cazul cadrelor B06 și respectiv B10. În raport cu valorile înregistrate la nivelul cadrelor C06 și respectiv C10, diferențele au fost în medie de aproximativ 14% în cazul grinzilor cadrelor cu șase niveluri și respectiv de circa 12% în cazul grinzilor cadrelor cu zece niveluri.

Cantitatea cea mai mare de energie consumată prin deformații plastice în timpul analizelor dinamic neliniare s-a observat pentru cadrele A06 și respectiv A10 la nivelul diagonalelor și pentru cadrele B06 și respectiv B10 la nivelul riglelor de cadru.

Eforturile axiale cu valorile cele mai reduse, s-au constatat la nivelul cadrelor B06 și B10 (în cazul grinzilor, stâlpilor centrali și stâlpilor marginali). Pentru cele trei cadre cu șase niveluri, valorile cele mai ridicate de forțe axiale s-au observat în cadrul A06 (pentru grinzi), respectiv în cadrul C06 (pentru stâlpii centrali și marginali). În cazul cadrelor cu zece niveluri, forțele axiale cu valorile cele mai mari au rezultat pentru cadrul A10 (pentru grinzi, stâlpii centrali și respectiv stâlpi marginali).

Pentru structurile cu șase niveluri, momentele încovoietoare cu valorile cele mai mici au fost obținute pentru cadrul A06 atât pentru grinzi, cât și pentru stâlpii centrali și marginali. Pentru structurile cu zece niveluri, valorile cele mai reduse au fost obținute în cazul cadrului A10 (pentru grinzi și stâlpi centrali) și în cazul cadrului C10 (pentru stâlpi marginali).

Valorile cele mai mari ale momentelor încovoietoare au fost înregistrate în cazul structurilor cu șase niveluri, în grinzile cadrului C06 și respectiv în stâlpii centrali și marginali ai cadrului B06. În cazul structurilor cu zece niveluri, valorile cele mai mari de momente încovoietoare au rezultat pentru cadrul B10 atât în cazul grinzilor cât și în cazul stâlpilor centrali și marginali.

Consumul estimat total de oțel cel mai ridicat s-a obținut pentru cadrele B06 și C10, iar cel mai redus pentru cadrele A06 respectiv A10. Diferența maximă înregistrată pentru cadrele cu șase niveluri a fost de aproximativ 3,8% (între cadrele B06 și A06), iar pentru cele cu zece niveluri de circa 7,5% (între cadrele C10 și A10). Diferențele între valorile consumului total estimat de oțel a fost sub 2% între cadrele B06 și C06 și respectiv de sub 0,2% între cadrele B10 și C10. Consumul estimat de oțel cel mai redus, pentru cadrele cu șase niveluri, s-a obținut pentru stâlpii centrali și marginali din cadrul C06, pentru grinzile din cadrul A06 și respectiv pentru diagonalele cadrului B06. Pentru cadrele cu zece niveluri, consumul estimat de oțel cel mai scăzut a rezultat pentru diagonalele și stâlpii marginali ai cadrului B10 și pentru grinzile și stâlpii centrali ai cadrului A10.

Din punct de vedere al consumului estimat de oțel cadrele A06 și respectiv A10, cu prinderi articulate la capetele diagonalelor și grinzilor, au rezultat cele mai avantajoase. La nivelurile superioare ale acestor cadre se constată însă efecte locale de amplificare dinamică (efecte de bici), care conduc la valori ridicate ale deplasărilor orizontale ale planșeelor și ale lungirilor plastice ale diagonalelor și la degradări greu de cuantificat la nivelul elementelor structurale și nestructurale.

Din punct de vedere al deformațiilor plastice constatate în timpul analizelor dinamic neliniare, la nivelul diagonalelor și grinzilor, cele mai reduse valori au putut fi observate în cazul cadrelor C06 și respectiv C10, adică la cadrele cu prinderi rigide pentru diagonale și grinzi. De aceea se preconizează că în urma unor evenimente seismice severe, pentru aceste cadre eventualele degradări suferite la nivelul elementelor structurale și nestructurale, precum și costurile de reparații ale acestora, vor fi cele mai reduse.

4.2 Influența poziționării zonelor potențial plastice în lungul riglelor de cadru

În acest subcapitol s-a urmărit influența poziționării zonelor potențial plastice din lungul grinzilor de cadru în cazul cadrelor contravântuite centric supuse acțiunii seismice severe.

4.2.1 Soluții constructive analizate

Cadrelor supuse analizei fac parte dintr-o structură cu două deschideri de 6m și patru travei de 6m, cu înălțimea de nivel de 3,5m, amplasată în București. Pe fiecare direcție principală a construcției sunt prevăzute câte două cadre contravântuite centric amplasate perimetral. A fost analizat câte un cadru contravântuit centric ce face parte dintr-un sistem structural de șase niveluri (P+5E) și zece niveluri (P+9E). Diagonalele au fost dispuse în structură descendent de la stâlpii marginali către stâlpul central (tip DM), conform următoarelor figuri:

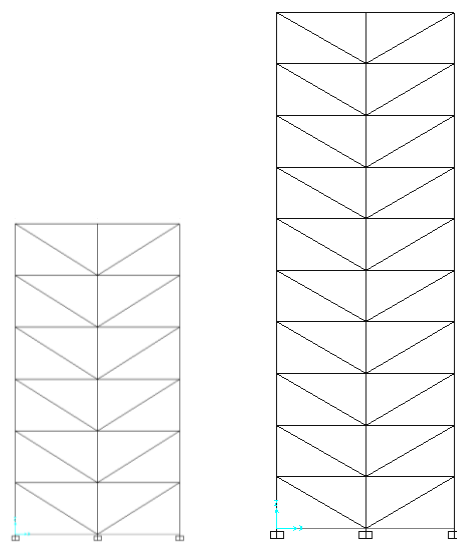


Fig. 4.41 Cadrele analizate cu șase și zece niveluri contravântuite centric în sistem DM

Pentru analiză, zonele potențial plastice din lungul grinzilor (secțiuni de grindă cu lățime de tălpi reduse) au fost poziționate la aproximativ 1,0m și 2,0m de axul stâlpilor (vezi Fig. 4.42 și 4.43).

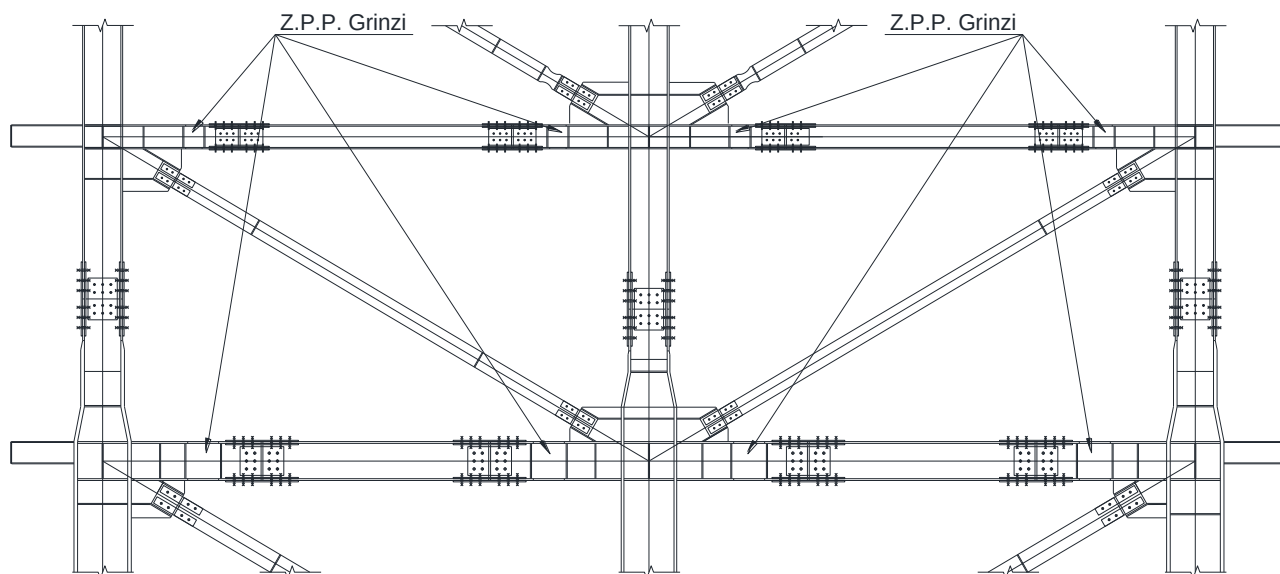


Fig. 4.42 Poziționarea zonelor potențial plastice în lungul grinzilor la 1m față de axele stâlpilor [15]

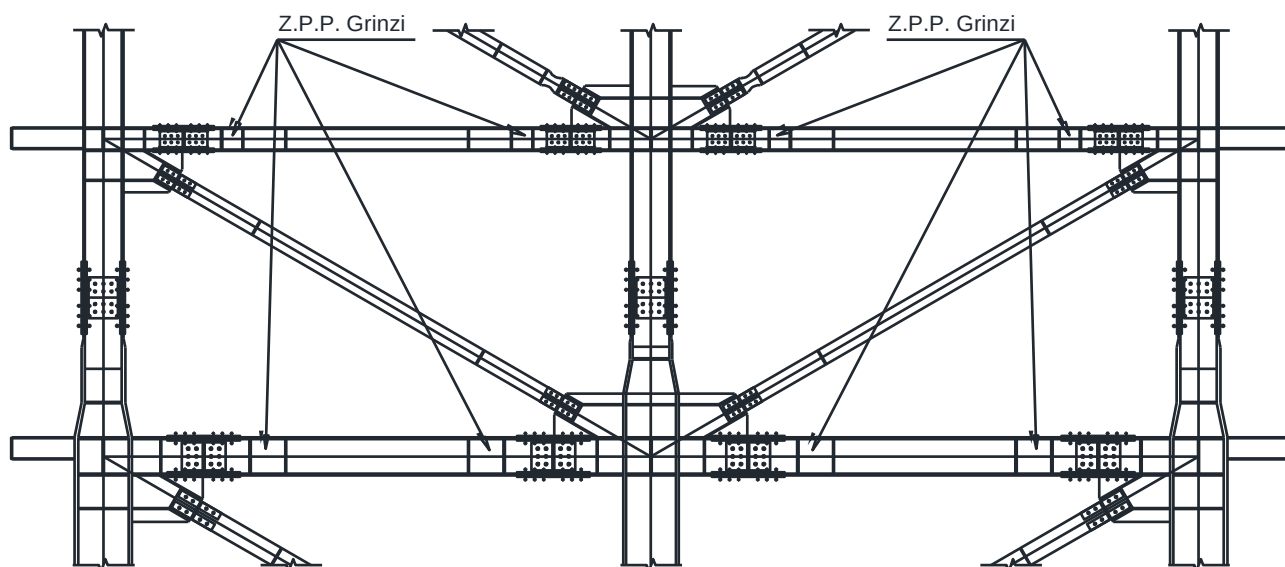


Fig. 4. 43 Poziționarea zonelor potențial plastice în lungul grinzilor la 2m față de axele stâlpilor

4.2.2 Analize efectuate

Cadrele contravântuite centric rezultate în urma dimensionării au fost supuse analizei dinamice nelinare, utilizând componenta N-S a accelerogramelor cutremurelor vrâncene din 04 martie 1977, 31 august 1986 și 30 mai 1990, înregistrate toate la INCERC București. Toate cele trei accelerograme au fost scalate pentru a se obține o valoare a accelerației terenului de 0,3g [18]. S-a luat în considerare amortizarea de tip Rayleigh, folosindu-se factori de amortizare proporționali cu masa și rigiditatea corespunzătoare modurilor unu și trei de vibrație [19].

4.2.2.1 Valori maxime ale deformațiilor inelastice în lungul diagonalelor și grinzilor

Cele mai mari valori ale deformațiilor plastice înregistrate în diagonale s-au obținut pentru cadrele DM06-2m din analiza efectuată cu accelerograma Vrancea 86 respectiv DM10-2m din analiza efectuată cu accelerograma Vrancea 77. În medie, diferența dintre valorile lungirilor plastice din diagonale obținute pentru structurile cu șase niveluri a fost de aproximativ 16% iar pentru cadrele cu zece niveluri de circa 22% (vezi Fig. 4.49 și Fig. 4.50).

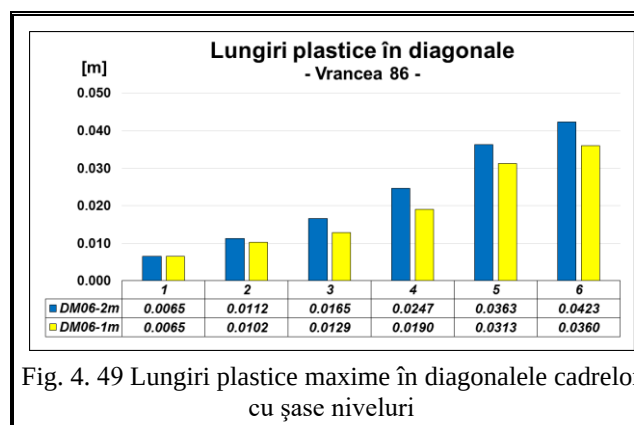


Fig. 4. 49 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu șase niveluri

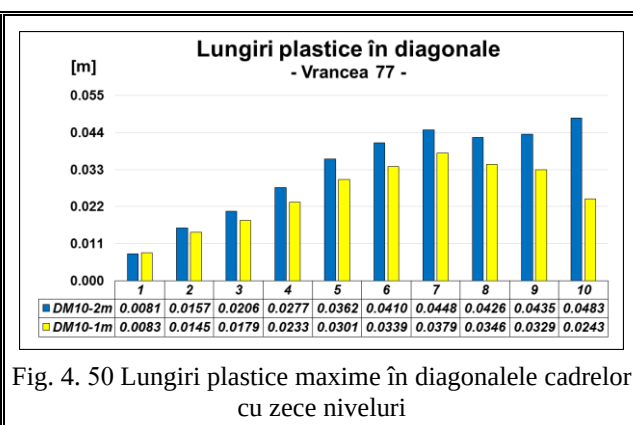


Fig. 4. 50 Lungiri plastice maxime în diagonalele cadrelor cu zece niveluri

În ceea ce privește rotirile din zonele potențial plastice amplasate în lungul grinzilor de cadru se poate observa că valorile cele mai mari s-au obținut pentru cadrele DM06-2m și DM10-2m. Pentru cadrul DM06-2m nu s-au observat rotiri în zonele potențial plastice la primele două niveluri ale structurii pe parcursul analizei dinamice neliniare cu accelerograma Vrancea 86 (vezi Fig. 4.51).

Valorile obținute pentru cadrul DM06-1m au fost în medie cu 34% mai mici decât cele obținute pentru cadrul DM06-2m. Pentru cadrul DM10-1m valorile au fost în medie cu circa 40% mai mici comparativ cu cadrul DM10-2m (vezi Fig. 4.52).

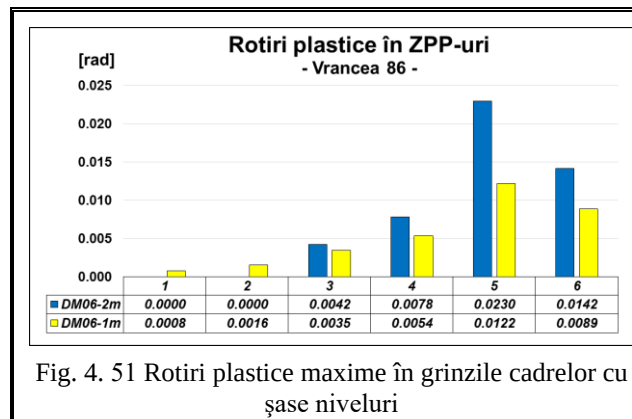


Fig. 4. 51 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu șase niveluri

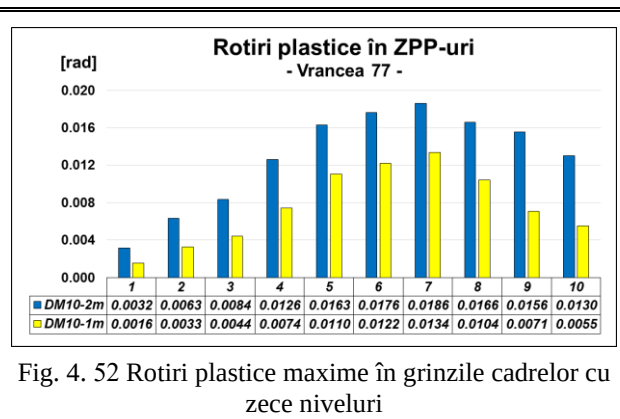


Fig. 4. 52 Rotiri plastice maxime în grinzile cadrelor cu zece niveluri

Cadrela la care zonele potențial plastice din grinzi au fost dispuse la aproximativ 2m de axul stâlpilor de cadru au avut o rigiditate laterală mai scăzută și prin urmare în majoritatea situațiilor pentru aceste cadre s-au constatat deformații plastice mai semnificative la nivelul diagonalelor și grinzilor pentru toate analizele dinamic neliniare efectuate.

4.2.2.2 Energia consumată în timpul analizei dinamic neliniară

În Fig. 4.54 ÷ 4.57 suprafața colorată în galben reprezintă energia consumată prin amortizare, suprafața colorată în gri este proporțională cu energia cinematică, iar suprafața albă reprezintă energia consumată prin deformarea în domeniul elastic a diferitelor categorii de elemente structurale, suprafața colorată în roșu reprezintă energia disipată prin deformații plastice la nivelul diagonalelor, iar suprafața colorată în verde reprezintă energia consumată prin deformații plastice la nivelul zonelor potențial plastice din grinzi.

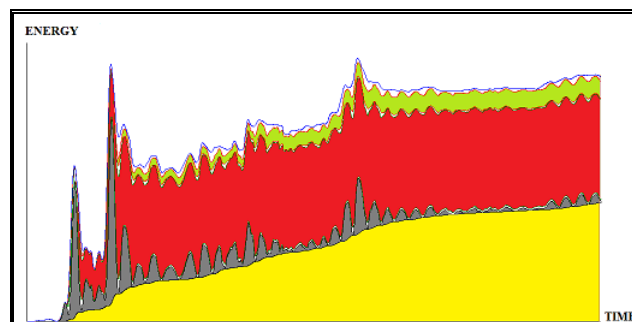


Fig. 4. 54 Distribuție energii VN86 – Cadrul DM06-1m

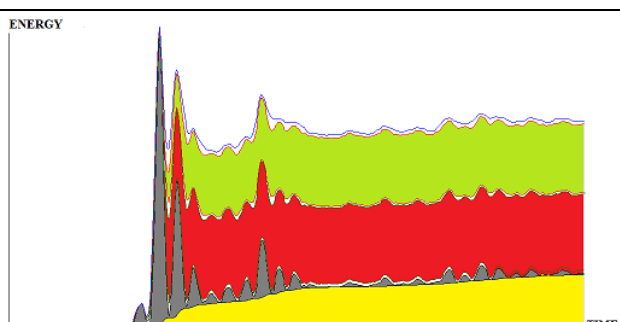


Fig. 4. 55 Distribuție energii VN77 – Cadrul DM10-1m

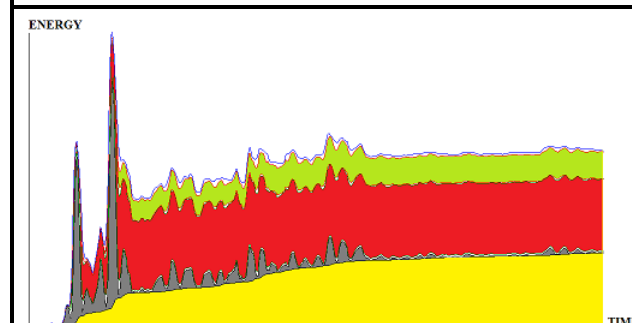


Fig. 4. 56 Distribuție energii VN86 – Cadrul DM06-2m

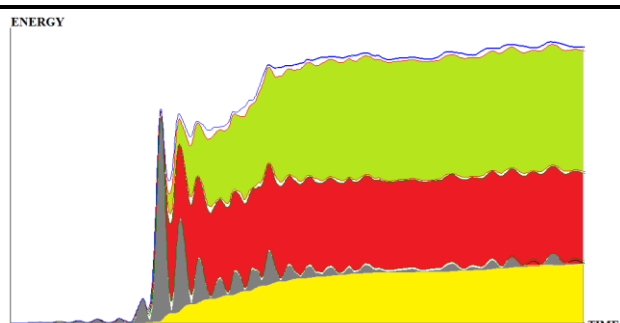


Fig. 4. 57 Distribuție energii VN77 – Cadrul DM10-2m

Analizând Fig. 4.56, se poate constata, că în cazul cadrului DM06-2m, cantitatea de energie consumată prin deformații plastice în diagonale are o pondere mai mare decât energia consumată în zonele potențial plastice din grinzi (suprafața roșie are o arie mai mare decât cea verde). Prin comparație cu Fig. 4.54 se poate observa că lucrul mecanic consumat de zonele potențial plastice din grinzi are valoare mai mare pentru cadrul DM06-2m comparativ cu cadrul DM06-1m (aria suprafeței verzi este mult mai redusă în Fig. 4.54, decât în Fig. 4.56).

Pe de altă parte, analizând Fig. 4.57, se poate constata, că în cazul cadrului DM10-2m, cantitatea de energie consumată prin deformații plastice în diagonale are o pondere mai mică decât energia consumată în zonele potențial plastice din grinzi (suprafața roșie are o arie mai mică decât cea verde). În cazul cadrului DM10-1m (vezi Fig. 4.55) se poate observa în schimb, că aria suprafeței roșii este aproximativ egală cu cea suprafeței verzi, adică valorile lucrului mecanic consumat prin deformații plastice la nivelul diagonalelor și grinzilor sunt comparabile în cazul cadrului DM10-1m. Comparând Fig. 4.55 și Fig. 4.57 se remarcă faptul că energia consumată prin deformații plastice în zonele potențial plastice de la nivelul grinzilor este mult mai mare pentru cadrul DM10-2m comparativ cu cadrul DM10-1m (în Fig. 4.57 aria suprafeței verzi este semnificativ mai mare decât în cazul Fig. 4.55).

Se poate trage concluzia că, în cazul amplasării zonelor potențial plastice din grinzi la distanța de aproximativ 2,0m față de axul stâlpilor de cadru, energia consumată prin deformațiile plastice înregistrate la nivelul acestora este semnificativ mai mare decât în cazul amplasării zonelor potențial plastice din grinzi la distanța de aproximativ 1,0m față de axul stâlpilor de cadru (vezi ariile suprafețelor verzi din Fig. 4.56 și Fig. 4.57 comparativ cu cele din Fig. 4.54 și Fig. 4.55).

4.2.2.3 Valori maxime ale eforturilor secționale în diferite categorii de elemente structurale

În ceea ce privește stâlpii marginali, în timpul analizelor dinamic neliniare s-au constatat de regulă forțe axiale mai mari și momente încovoietoare mai mici în cadrele la care zonele potențial plastice din grinzi au fost dispuse la circa 1m de axul stâlpilor (cadrele DM06-1m și DM10-1m).

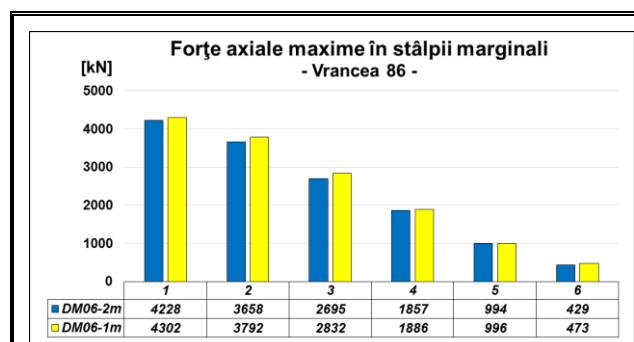


Fig. 4. 66 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru structurile de șase niveluri

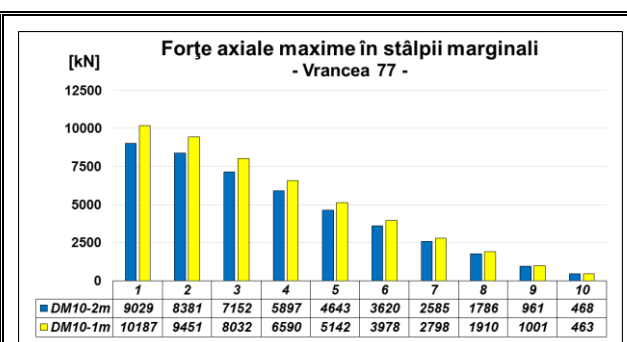


Fig. 4. 67 Forțe axiale maxime în stâlpii marginali pentru structurile de zece niveluri

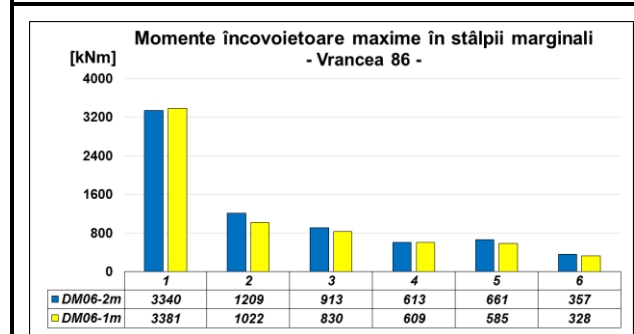


Fig. 4. 68 Momente încovoietoare maxime în stâlpii marginali pentru structurile de șase niveluri

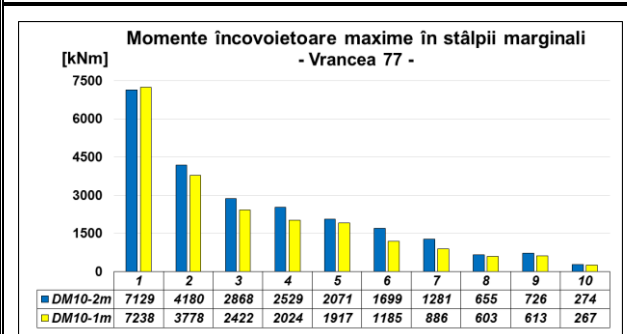


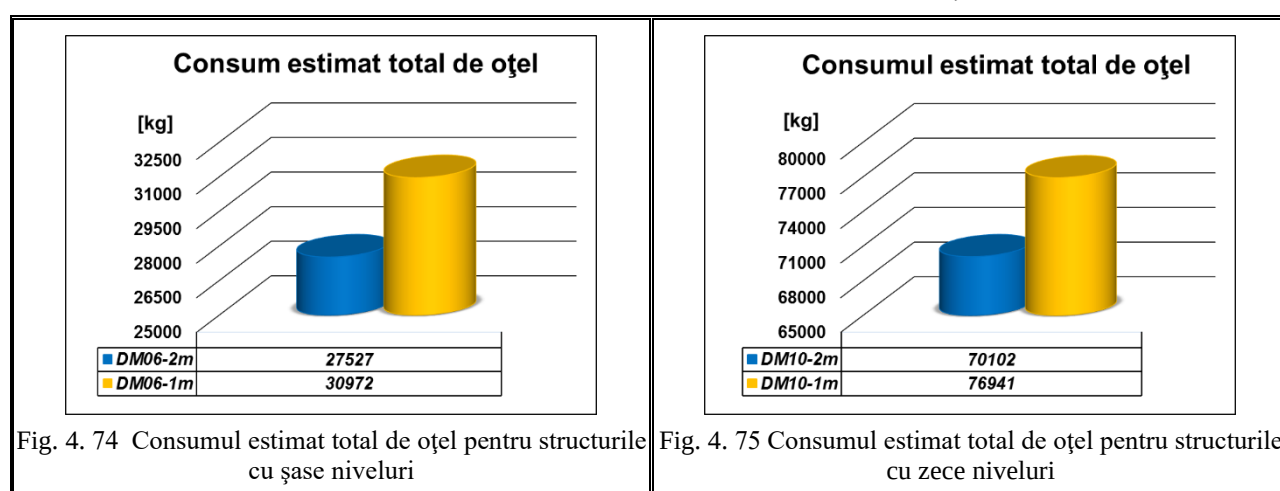
Fig. 4. 69 Momente încovoietoare maxime în stâlpii marginali pentru structurile de zece niveluri

În medie valorile maxime ale forțe axiale din stâlpii marginali au fost mai mari cu circa 10% în cazul cadrului DM10-1m comparativ cu cadrul DM10-2m și cu aproximativ 3% mai ridicate în cazul cadrului DM06-1m față de cadrul DM06-2m (vezi Fig. 4.67 și Fig. 4.66).

Valorile maxime ale momentelor încovoietoare observate în timpul analizelor dinamic neliniare în stâlpii marginali, au fost mai reduse în medie cu circa 5% pentru cadrul DM06-1m față de cadrul DM06-2m și respectiv cu aproximativ 11% pentru cadrul DM10-1m comparativ cu cadrul DM10-2m (vezi Fig. 4.68 și respectiv Fig. 4.69). Se observă că în cele mai multe situații, amplasarea zonelor potențial plastice din grinzi la aproximativ 1m de axul stâlpilor de cadru, conduce la stări de solicitări mai defavorabile în special în cazul structurilor cu zece niveluri.

4.2.2.4 Consumul estimat de oțel pentru structurile analizate

Atunci când zonele potențial plastice au fost amplasate în lungul grinzilor de cadru la aproximativ 1m de axul stâlpilor, consumul estimat total de oțel a fost cu aproximativ 11% mai mare în cazul cadrului DM06-1m comparativ cu cadrul DM06-2m și respectiv cu circa 9% mai ridicat în cazul cadrului DM10-1m comparativ cu cadrul DM10-2m (vezi fig. 4.74 și Fig. 4.75).



4.2.3 Observații și recomandări

Soluția constructivă cu zonele potențial plastice poziționate la aproximativ 2m de axul stâlpilor conduce la valori mai mari ale deplasărilor orizontale în noduri cu până la 16% și la valori de forțe tăietoare de bază mai mici cu cel mult 14% comparativ cu soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 1m de axul stâlpilor.

Valorile cele mai mari ale deformațiilor inelastice din grinzi și diagonale (rotirile din zonele potențial plastice din lungul grinzilor de cadru respectiv lungirile din diagonale) s-au obținut din cadrele în care zonele potențial plastice au fost poziționate la aproximativ 2m de axul stâlpilor. Lungirile din diagonale au fost cu cel mult 22% mai mari iar rotirile din zonele potențial plastice cu până la 40% mai ridicate comparativ cu cadrele în care zonele potențial plastice au fost poziționate la aproximativ 1m de axul stâlpilor.

Soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 1m de axul stâlpilor conduce la valori de momente încovoietoare mai mari în grinzi comparativ cu soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 2m de axul stâlpilor. Valorile extreme înregistrate pentru forțele axiale și momentele încovoietoare în timpul analizelor dinamic neliniare în celelalte categorii de elemente structurale au fost comparabile. S-au constatat diferențe de până la 12,5% pentru forțele axiale din stâlpii marginali, diferențe de până la 10,8% pentru forțele axiale în stâlpii centrali și în general diferențe mai mici de 5% pentru forțele axiale și momentele încovoietoare în celelalte categorii de elemente structurale.

Soluția constructivă în care zonele potențial plastice au fost amplasate în lungul grinzilor de cadru la aproximativ 2m de axul stâlpilor conduce la un consum estimat de oțel cu aproximativ 11% mai redus comparativ cu soluția constructivă în care zonele potențial plastice au fost amplasate în lungul grinzilor de cadru la aproximativ 1m de axul stâlpilor, datorat în special secțiunilor mai dezvoltate pentru grinzele de cadru.

Ambele soluții constructive considerate au avut o comportare favorabilă în timpul analizelor dinamic neliniare cu dezvoltarea de articulații plastic numai în zonele disipative considerate.

Dacă se au în vedere deformații postelastice mai reduse la nivelul elementelor structurale în timpul cutremurelor severe și implicit costuri mai scăzute ale eventualelor operații de reparații este de preferat soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 1m de axul stâlpilor. Dacă în schimb, se urmărește un consum mai redus de oțel, este de preferat soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 2m de axul stâlpilor.

5 Concluzii. Contribuții personale. Direcții de continuare a cercetării

5.1 Observații și concluzii asupra comportării diagonalelor la cicluri alternante întindere-compresiune

În cazul încărcărilor ciclice întindere-compresiune aplicate unor bare dublu articulate cu zveltețe diferită, forma curbelor histeretice nu este stabilă de la un ciclu de încărcare la altul.

În cazul solicitării ciclice sub acțiunea forțelor de compresiune se poate observa atât o degradare a capacității de rezistență (de la un ciclu de solicitare la altul, barele analizate flambează la valori din ce în ce mai mici ale solicitării axiale), cât și o degradare a rigidității barei (de la un ciclu de solicitare la altul, curbele $P-\Delta$ se apropie de axa orizontală din ce în ce mai mult).

În cazul solicitării ciclice sub acțiunea forțelor de întindere se poate observa doar o degradare de rigiditate (curbele $P-\Delta$ se aplatizează din ce în ce mai mult), fără o degradare a capacității barei de a prelua întindere.

5.2 Observații și concluzii asupra prevederilor de proiectare a cadrelor contravântuite centric la acțiuni seismice

5.2.1 Comentarii cu privire la normativul românesc de proiectare P100-1/2013

1. Pentru aprecierea mai realistă a stării de eforturi în grinzele și stâlpii cadrelor contravântuite centric analizate când diagonalele adiacente ies din lucru, modelarea diagonalelor comprimate cu un modul de elasticitate redus (folosită în varianta A de dimensionare) este mai avantajoasă comparativ cu modelările folosite în variantele de dimensionare B și C.

2. Cele mai reduse deplasări orizontale s-au înregistrat în analizele biografice efectuate cu cadrele dimensionate în varianta B de proiectare, în care la dimensionarea riglelor și stâlpilor de cadru s-au neglijat complet diagonalele comprimate.

3. Varianta C de proiectare, în care la dimensionarea riglelor și stâlpilor de cadru se iau în considerare atât diagonalele întinse și cât și cele comprimate conduce la consumul estimat de oțel cel mai redus. Consumul estimat de oțel cel mai ridicat s-a observat pentru cadrele proiectate în varianta B, în care la dimensionarea riglelor și stâlpilor de cadru s-au neglijat complet diagonalele comprimate.

4. Varianta A de proiectare, în care la dimensionarea riglelor și stâlpilor de cadru se iau în considerare diagonalele întinse și diagonalele comprimate modelate cu o rigiditate redusă, este cea mai avantajoasă din punct de vedere al volumului de energie disipată prin deformații plastice în toate categoriile de elemente structurale, iar varianta B de dimensionarea cea mai dezavantajoasă.

5. În toate cele trei variante de proiectare analizate, care țin seama de prevederile normativului românesc de proiectare P100-1/2013 [1], nu se impune în mod explicit prin proiectare un mecanism

general favorabil de plastificare pentru cadrele contravântuite centric analizate. În calculele biografice efectuate, cedarea cadrelor contravântuite centric are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel, fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod.

6. Comparativ cu cadrele proiectate conform SR EN 1998-1:2004 [10] și AISC 341-16 [11], cele mai mari deplasări orizontale se observă în timpul analizelor biografice, în cazul cadrelor dimensionate în varianta A conform normativului românesc P100-1/2013 [1].

7. În jumătate din cele șase analize static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale. Se constată că în situațiile seismice de încărcări, nu se asigură întotdeauna o capacitate de rezistență suficient de mare riglelor și stâlpilor de cadru în raport cu diagonalele.

5.2.2 Comentarii cu privire la standardul european de proiectare SR EN 1998-1:2004

1. Din punct de vedere al consumului total estimat de oțel, cadrele dimensionate conform normativului european sunt cele mai avantajoase.

2. Cele mai reduse valori ale forțelor tăietoare de bază au putut fi observate în timpul analizelor static neliniare, în cazul cadrelor proiectate conform standardului european SR EN 1998-1:2004 [10].

3. Deplasările maxime observate în timpul analizelor biografice în cazul cadrelor proiectate conform normativului european au valori mai mari decât cele constatate în cazul cadrelor dimensionate conform normei americane AISC 341-16 [11], dar mai reduse decât cele observate în cazul cadrelor proiectate conform P100-1/2013 [1].

4. Pentru ambele cadre proiectate conform normativului european, nu se impune în mod explicit prin proiectare un mecanism general favorabil de plastificare. În analizele static neliniare efectuate, cedarea cadrelor contravântuite centric are loc prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod.

5. În toate analizele static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale. Se constată că în multe din situațiile seismice de încărcare, nu se asigură o capacitate de rezistență suficient de mare riglelor și stâlpilor de cadru în raport cu diagonalele.

5.2.3 Comentarii cu privire la norma americană de proiectare AISC 341-16

1. Din punct de vedere al consumului total estimat de oțel cadrele dimensionate conform normei americane sunt cele mai dezavantajoase.

2. Cele mai ridicate valori ale forțelor tăietoare de bază și cele mai reduse valori ale deplasărilor orizontale au putut fi observate în timpul analizelor static neliniare, efectuate cu cadrele proiectate conform standardului american AISC 341-16 [11].

3. Dintre normativele analizate, norma americană este singură care indică valori explicite pentru evaluarea capacității de rezistență postflambaj a diagonalelor comprimate.

4. Pentru ambele cadre proiectate conform normativului american, nu se impune în mod explicit prin proiectare un mecanism general favorabil de plastificare. În analizele static neliniare efectuate, cedarea cadrelor contravântuite centric are loc fie prin apariția unui mecanism local de nivel, fie prin apariția de articulații plastice în toate capetele barelor aflate în jurul unui nod.

5. În toate analizele static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale. Se constată că în multe din situațiile seismice de încărcare nu se asigură o capacitate de rezistență suficient de mare riglelor și stâlpilor de cadru în raport cu diagonalele.

6. Cadrele proiectate inițial, având în vedere prescripțiile normei americane, la care s-au prevăzut ulterior zone potențial plastice la nivelul tuturor riglelor de cadru (sub formă unor porțiuni de grindă cu secțiuni reduse dispuse la aproximativ 1m de axele stâlpilor de cadru), au avut o comportare mult mai favorabilă în timpul analizelor biografice.

5.2.4 Observații și concluzii cu privire la cele trei norme analizate

1. În majoritatea analizelor static neliniare efectuate, ieșirea din lucru a tuturor diagonalelor (comprimate și respectiv întinse) este precedată de apariția de articulații plastice în alte categorii de elemente structurale. Se constată pe de o parte că, în diferitele situații seismice de încărcare, capacitatea de rezistență a grinzilor și stâlpilor nu este întotdeauna suficient de mare în raport cu aceea a diagonalelor cadrului contravântuit centric. Pe de altă parte, după ce majoritatea diagonalelor ies din lucru, nu se asigură o ierarhizare a capacității de rezistență între riglele și stâlpii cadrului, ceea ce conduce la distribuții dezavantajoase de articulații plastice și la cedarea cadrelor prin mecanisme plastice locale de cedare.

2. Prevederea de zone potențial plastice suplimentare în vecinătatea capetelor tuturor riglelor de cadru, are efecte benefice asupra comportării cadrelor contravântuite centric în timpul analizelor static neliniare efectuate:

- se evită apariția necontrolată a deformațiilor plastice în lungul riglelor și stâlpilor de cadru;
- cedarea are loc prin dezvoltarea unui mecanism plastic global de cedare favorabil;
- se consumă mai multă energie prin deformații plastice la nivelul cadrului.

5.3 Observații și concluzii legate de diferitele sisteme de contravântuire centrică analizate

5.3.1 Cadre contravântuite centric în sistem X

Sistemul de contravântuire X este cel mai avantajos din punctul de vedere al consumului de oțel și al distribuției solicitărilor între diferitele categorii de elemente structurale.

Intersecția diagonalelor în dreptul nodurilor riglă-stâlp conduce la eforturi axiale mult mai reduse în lungul grinzilor și stâlpilor de cadru comparativ cu sistemele de contravântuire DC și DM. Forțele axiale din toate aceste diagonale se echilibrează parțial direct între ele, iar grinzile au de preluat pe de o parte o forță orizontală neechilibrată mai mică de la diagonale, iar pe de altă parte stâlpii au de preluat de la diagonale forțe verticale neechilibrate mai reduse.

Numărul mai mare de diagonale explică eforturile axiale și secțiunile transversale mai reduse rezultate la nivelul diagonalelor cadrelor cu diagonale dispuse în sistem X, în raport cu celelalte sisteme de contravântuire analizate.

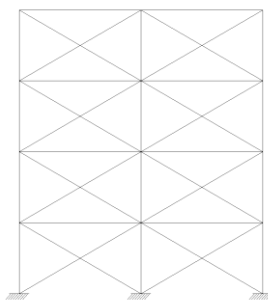


Fig. 5. 1 Sistemul de contravântuire X

Numărul mai mare de diagonale conduce la o rigiditate mai ridicată la acțiuni orizontale a cadrelor contravântuite în sistem X comparativ cu cele echipate cu diagonale alternante sau contravântuite în sistem 2X. Datorită rigidității laterale mai ridicate, sub încărcări seismice orizontale cadrele contravântuite cu diagonale dispuse în sistem X suferă rotiri de nod mai reduse și astfel se pot explica valorile mai reduse de momente încovoietoare observate în toate categoriile de elemente structurale (diagonale, grinzi și stâlpi de cadru). Rigiditatea laterală mai ridicată a cadrelor echipate cu sistemul de contravântuire X și rotirile de nod mai reduse, explică și valorile mai reduse ale

deformațiilor plastice constatate în timpul analizelor dinamic neliniare la nivelul grinzilor cadrelor contravântuite în sistem X, în raport cu celelalte sisteme de contravântuire analizate.

Principalul neajuns al acestui sistem de contravântuire este constituit de faptul că, dispunerea diagonalelor în X în mai multe deschideri sau travei alăturate, face dificilă prevederea de goluri de uși și ferestre (datorită prezenței diagonalelor).

5.3.2 Cadre contravântuite centric în sistem D (DC sau DM)

Sistemele de contravântuire cu diagonale alternante (ascendente și descendente) sunt frecvent întâlnite în cazul structurilor metalice, datorită faptului că diagonalele permit totuși dispunerea de goluri cu dimensiuni relativ mari în deschiderile contravântuite.

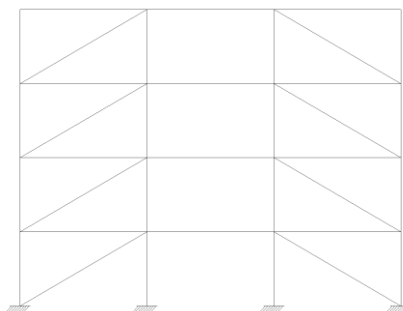


Fig. 5. 2 Sistemul de contravântuire cu diagonale alternante (ascendente și descendente)

Diagonalele pot fi dispuse ascendent sau descendent față de stâlpul central, distingându-se sistemul DC și sistemul DM de contravântuire. În cazul sistemului DC diagonalele sunt dispuse ascendent de la stâlpii marginali către stâlpul central, iar în cazul sistemului DM diagonalele sunt dispuse descendent de la stâlpii marginali către cei centrali (vezi Fig. 5.3).

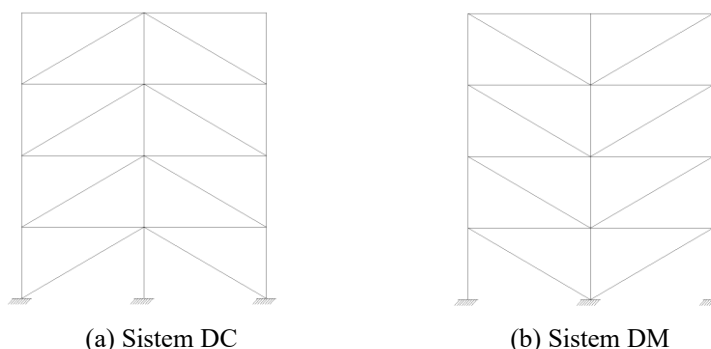


Fig. 5. 3 Sistemele de contravântuire centrică de tip DC și DM

Din punct de vedere al distribuției solicitărilor între diferitele categorii de elemente structurale și din punct de vedere al consumului estimat de oțel, sistemul de contravântuire DC este mai avantajos decât sistemul DM. Sistemul de contravântuire DM conduce față de sistemul DC la secțiuni mai puțin dezvoltate pentru stâlpii centrali. În schimb, sistemul de contravântuire DC conduce, în raport cu sistemul DM, la un consum de oțel mai redus pentru diagonale, grinzi și stâlpi marginali.

În cazul sistemelor de contravântuire DC și DM diagonalele nu sunt dispuse una în prelungirea celeilalte, iar eforturile axiale din diagonale nu se echilibrează direct. Dacă se izolează un nod de intersecție al unei diagonale cu un stâlp marginal și se scriu ecuațiile de proiecție pe verticală și orizontală, se constată pe de o parte că proiecția pe verticală a efortului axial din diagonală este echilibrat de o forță axială din stâlp, iar pe de altă parte că proiecția pe orizontală a efortului axial din diagonală este echilibrat de o forță axială din grindă. Astfel se explică valorile mai mari ale eforturilor axiale din stâlpii și grinzi cadrelor contravântuite în sisteme DC și DM comparativ cu cele ale cadrelor contravântuite în sistem X sau 2X.

Diagonalele care nu se găsesc în prelungire în cazul cadrelor prevăzute cu sistemele de contravântuire DC și DM, explică în mare măsură rigiditatea laterală mai redusă a acestor cadre și valorile mai ridicate ale deformațiilor plastice constatate în general în timpul analizelor dinamic neliniare la nivelul grinzilor cadrelor DC și DM, comparativ cu cele observate în cazul cadrelor echipate cu sistemele de contravântuire X sau 2X.

5.3.3 Cadre contravântuite centric în sistem 2X

Sistemul de contravântuire 2X îmbină cumva avantajele sistemelor de contravântuire DC și DM. În cazul cadrelor contravântuite în sistem 2X consumul estimat de oțel aferent stâlpilor marginali are valori intermediare față de cadrele contravântuite în sistem DC și DM. În schimb, pentru grinzi și stâlpi centrali se constată valori mai reduse ale consumului estimat de material, în raport cu cele obținute pentru cadrele contravântuite în sistem DC și DM. Exceptând diagonalele, sistemul de contravântuire 2X conduce, în raport cu sistemul de contravântuire X, la valori mai ridicate ale consumului de oțel pentru grinzi, stâlpi centrali și marginali.

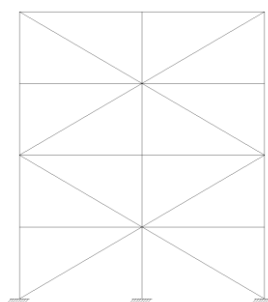


Fig. 5. 4 Sistemul de contravântuire 2X

Spre deosebire de sistemul de contravântuire X, la care diagonalele se intersectează cu stâlpii în dreptul fiecărui nivel, în cazul cadrelor contravântuite în sistem 2X, acest lucru se întâmplă doar la fiecare al doilea nivel, iar forțele axiale observate de regulă în grinzi și stâlpi au valori mai mari în cazul cadrelor contravântuite în sistem 2X, față de cele contravântuite în sistem X.

Pe de altă parte însă, sistemul de contravântuire 2X induce mai puține constrângeri în ceea ce privește dispunerea golurilor de uși și ferestre, în raport cu sistemul de contravântuire X.

Valorile deformațiilor plastice dezvoltate în timpul analizelor dinamic neliniare la nivelul diagonalelor și grinzilor cadrelor contravântuite în sistem 2X sunt de regulă mai reduse decât cele constatate în cazul cadrelor contravântuite în sistem DC și DM, dar mai mari decât cele observate în cazul cadrelor echipate cu contravântuiri dispuse în sistem X.

5.4 Observații și concluzii legate de alcătuirea cadrelor contravântuite centric

5.4.1 Prinderi rigide sau articulate la extremitățile grinzilor și diagonalelor

1. Din punct de vedere al consumului estimat de oțel, varianta de alcătuire cu prinderi articulate la capetele diagonalelor și grinzilor, a rezultat cea mai avantajoasă. La nivelurile superioare ale acestor cadre se constată însă efecte locale de amplificare dinamică (efecte de bici), care conduc la valori ridicate ale deplasărilor orizontale ale planșeelor și ale lungirilor plastice ale diagonalelor și la degradări greu de cuantificat la nivelul elementelor structurale și nestructurale.

2. Din punct de vedere al deformațiilor plastice constatate în timpul analizelor dinamic neliniare, la nivelul diagonalelor și grinzilor, cele mai reduse valori au putut fi observate în cazul cadrelor cu prinderi rigide pentru diagonale și grinzi. De aceea se preconizează că în urma unor evenimente seismice severe, pentru aceste cadre eventualele degradări suferite la nivelul elementelor structurale și nestructurale, precum și costurile de reparații ale acestora, vor fi cele mai reduse.

3. Soluția constructivă cu prinderi rigide ale grinzilor și prinderi articulate ale diagonalelor conduce la valori apropiate ale consumului estimat de oțel comparativ cu soluția constructivă cu prinderi rigide pentru rigle și diagonale. În schimb, deformațiile plastice constatate în timpul analizelor dinamic neliniare la nivelul diagonalelor și grinzilor cadrelor prevăzute cu diagonale și grinzi fixate rigid sunt mai reduse cu până la 41% în cazul structurilor cu șase niveluri și cu până la 24% în cazul structurilor cu zece niveluri, (față de cadrele prevăzute cu prinderi rigide ale grinzilor și prinderi articulate ale diagonalelor).

5.4.2 Dispunerea față de stâlpi a zonelor potențial plastice din riglele de cadru

1. Prevederea de secțiuni reduse în lungul riglelor de cadru în care să se controleze dezvoltarea deformațiilor plastice în lungul grinzilor în timpul seismelor severe, conduce la o comportare favorabilă (controlabilă) a cadrelor contravântuite centric.

2. Soluția constructivă cu zonele potențial plastice poziționate la aproximativ 1m de axul stâlpilor de cadru este de preferat dacă se preconizează deformații postelastice mai reduse la nivelul elementelor structurale în timpul cutremurelor severe și implicit costuri mai scăzute ale eventualelor operații de reparații.

3. Dacă în schimb se urmărește un consum mai redus de oțel este de preferat soluția constructivă în care zonele potențial plastice sunt poziționate la aproximativ 2m de axul stâlpilor.

5.5 Contribuții personale

S-a analizat influența asupra comportării la acțiunea cutremurelor a modului în care sunt luate în considerare contribuțiile diagonalelor întinse și comprimate în preluarea încărcărilor seismice.

Realizând o analiza comparativă între prevederile de proiectare cuprinse în normele: P100-1/2013 [1], Eurocod 8 (SR EN 1998-1:2004 [10]) și AISC 341-16 [11], s-au evidențiat principalele avantaje și dezavantaje. S-a constatat că nici una din cele trei norme analizate nu asigură implicit prin proiectare un mecanism global de plastificare pentru cadrele contravântuite centric, supuse la seisme severe. Pentru a îmbunătăți acest neajuns s-a propus prevederea de zone potențial plastice suplimentare la nivelul riglelor de cadru.

Pentru a pune în evidență diferențele de comportare la acțiuni seismice severe a celor mai frecvent folosite sisteme de contravântuire centrică cu diagonale care lucrează preponderent la întindere, s-au considerat două grupuri de cadre cu regim de înălțime diferit, supuse la analize dinamic neliniare, utilizând trei accelerograme distincte. S-au evidențiat diferențele de comportare favorabile și nefavorabile din timpul analizelor.

S-a analizat influența poziționării zonelor potențial plastice în lungul riglelor de cadru, precum și influența prinderilor articulate sau/și încastrate de la capetele diagonalelor și grinzilor asupra comportării seismice a cadrelor contravântuite centric.

5.6 Direcții de continuare a cercetării

1. Metode de apreciere mai realistă a stărilor de eforturi care se dezvoltă în riglele și stâlpii cadrelor contravântuite centric în situația când diagonalele cadrului ies din lucru (prin flambaj cele comprimate, respectiv prin plastificare cele întinse). Se are în vedere modelarea diagonalelor întinse și comprimate cu valori reduse ale rigidității, pentru a modela mai realist degradările de rigiditate și capacitate de rezistență suferite de diagonale în urma ciclurilor alternante întindere-compresiune din timpul cutremurelor severe.

2. Analiza mai multor metode alternative de ierarhizare a capacității de rezistență a diferitelor categorii de elemente structurale care compun cadrele contravântuite centric în vederea impunerii unui mecanism global de cedare favorabil:

- într-o primă variantă se consideră diagonalele cadrului contravântuit centric ca fiind elemente disipative primare (dimensionate la solicitările produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică neamplificată); se prevăd apoi cu rol de elemente disipative secundare zone potențial plastice în lungul riglelor în vecinătatea prinderii diagonalelor de grinzi (dimensionate la solicitările produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată); secțiunile zonelor curente de grinzi și cele ale stâlpilor de cadru vor fi dimensionate la solicitările generate de produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată suplimentar.

- într-o a doua variantă se consideră drept elemente disipative primare zone potențial plastice în lungul tuturor riglelor de cadru (dipuse către extremitățile grinzilor în apropierea prinderii diagonalelor de rigle și dimensionate la solicitările produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică neamplificată); se consideră apoi diagonalele cu rol de elemente disipative secundare (dimensionate la solicitările produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată); secțiunile zonelor curente de grinzi și cele ale stâlpilor de cadru vor fi dimensionate la solicitările generate de produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată suplimentar.

- într-o a treia variantă nu se urmărește o ierarhizare a capacității de rezistență între diagonalele cadrului și zonele potențial plastice din grinzi, ambele considerate drept zone disipative primare și dimensionate la solicitările produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică neamplificată; secțiunile zonelor curente de grinzi și cele ale stâlpilor de cadru vor fi dimensionate la solicitările generate de produse de o grupare de încărcări ce cuprinde și încărcarea seismică amplificată în raport cu cea folosită la dimensionarea zonelor disipative.

3. Analiza avantajelor și dezavantajelor mai multor detalii de alcătuire pentru zonele potențial plastice localizate lângă baza stâlpilor de cadru de la primul nivel. Se au în vedere diferite moduri de conformare a zonelor potențial plastice: prevăzând rigidizări transversale și longitudinale ale inimii stâlpului sau reducând local lățimea tălpilor secțiunii stâlpului.

6 Bibliografie

- [1] Ministrul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice. *Cod de proiectare seismică - Partea I - Prevederi de proiectare pentru clădiri, indicativ P100-1/2013*, București, România, 2013
- [2] Helmuth Köber - *Comportarea la acțiuni seismice a structurilor metalice în cadre contravântuite excentric*, Editura MATRIX ROM, București 2013
- [3] Michael D. Engelhardt - *Design of Seismic - Resistant Steel Building Structures - Concentrically Braced Frames*, martie 2007 (<https://ro.scribd.com/presentation/377184466/AISC-Seismic-Design-Module3-Concentrically-Braced-Frames>)
- [4] Patxi Uriz, Stephen A. Mahin - *Seismic Performance Assessment of Concentrically Braced Steel Frames* - 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No.1639 (<https://ro.scribd.com/document/101053544/Seismic-Connections>)
- [5] Patxi Uriz, Stephen A. Mahin – *Towards Earthquake Resistant Design of Concentrically Braced Steel Structures* – PEER-2008/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of

California, Berkeley, C.A. (<https://ro.scribd.com/document/402972537/Towards-earthquake-resistant-design-of-concentrically-braced-steel-structures-pdf>)

[6] Rafael Sabelli, Charles W. Roeder, Jerome F. Hajjar - *Seismic Design of Steel Special Concentrically Braced Frame Systems - A Guide for Practicing Engineers* - (<https://ro.scribd.com/document/232595340/Seismic-Design-of-Steel-Special-Concentrically-Braced-Frame-Systems>)

[7] Jiun-Wei Lai, Stephen A. Mahin - *Steel Concentrically Braced Frame using Tubular Structural Sections as Bracing Members: Design, Full-Scale Testing and Numerical Simulation* - International Journal of Steel Structures, 2014 (<https://ro.scribd.com/document/241627823/International-Journal-of-Steel-Structures-Volume-14-Issue-1-2014-Doi-10-1007-2Fs13296-014-1006-4-Lai-Jiun-Wei-Mahin-Stephen-a-Steel-Concentri>)

[8] SR EN 1993-1-1:2006, Eurocod 3 - *Proiectarea structurilor din oțel - Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri*, 2006

[9] SR EN 1998-1:2004/NA:2008, *Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur - Partea I: Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri – Anexa națională*, 2008

[10] SR EN 1998-1:2004, Eurocod 8 - *Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur - Partea I: Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri*, 2005

[11] ANSI/AISC 341-16, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, An American National Standard, American Institute of Steel Construction, 2016

[12] ANSI/AISC 360-10, *Specifications for Structural Steel Buildings*, An American National Standard, American Institute of Steel Construction, 2010

[13] SAP2000, *Static and Dynamic Finite Element Analyses of Structures, Advanced 14.0.0*; Computers and Structures, Inc. 1995 University Avenue Berkeley, California, USA 94704

[14] Helmuth Köber, Ramona Marcu - *Comments Concerning the Seismic Design of Diagonal Braced Frames According to P100-1/2013*, C65 International Conference, Cluj-Napoca, România, 2018

[15] Helmuth Köber, Ramona Marcu - *Advantages of using reduced cross-sections in seismic resistant steel structures*, International Jubilee Scientific Conference “75th Anniversary of UACEG” - Sofia, Bulgaria, 2017

[16] Ramona Marcu, Helmuth Köber - *Comportarea la acțiuni seismice a unor cadre contravântuite centric cu șase niveluri*, a 16-a Conferință Națională de Construcții Metalice, Timișoara, România, 2019

[17] Ramona Marcu, Helmuth Köber - *Seismic behaviour of ten storeyed concentrically braced frames*, 2nd Conference of the UTCB Doctoral School, București, România, 2019

[18] K.C. Tsai, J. W. Li - *Drain2D+, A General Purpose Computer program for Static and Dynamic Analyses of Inelastic 2D Structures*, Taipei, Taiwan, 1994

[19] Anil K. Chopra - *Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Pearson Education Inc., New Jersey, USA, 2007

[20] Helmuth Köber, Ramona Marcu - *Comments about the Seismic Design of Concentrically Braced Frames*, Proc. 6th National Conference on Earthquake Engineering & 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, București, România, pag. 313-320, 2017