

6. Proiectarea antiseismică a structurilor metalice

6.1. Principii de proiectare

Structurile amplasate în zone seismice pot fi proiectate urmărind două abordări principal diferite:

- comportare slab-disipativă a structurii
- comportare disipativă a structurii

Distincția între o comportarea disipativă și nedisipativă a structurilor constă în ductilitatea acestora. Ductilitatea reprezintă capacitatea structurii de a se deforma în domeniul plastic fără o reducere semnificativă a capacității portante și joacă un rol primordial în evitarea colapsului structural în urma acțiunii seismice. În Figura 6.1a este prezentat comportamentul generic al unui element structural ductil. Astfel, după atingerea limitei de curgere, elementul continuă să se deformeze în domeniul post-elastic, până la atingerea forței maxime (palier de consolidare). La atingerea deformației ultime, elementul cedează, dar la elementele ductile cedarea are loc numai după deformații importante în domeniul post-elastic. Structurile ductile pot supraviețui unor forțe seismice ce depășesc limita de curgere, deoarece după atingere limitei de curgere structura se poate deforma în domeniul post elastic fără o degradare a forței.

În cazul unui element cu o comportare fragilă (vezi Figura 6.1b), după atingerea limitei elastice (care coincide cu forța maximă), elementul suferă o degradare bruscă a forței. Structurile cu un comportament fragil nu pot disipa energia seismică prin incursiuni în domeniul post-elastic și de aceea trebuie proiectate astfel ca să nu depășească limita elastică.

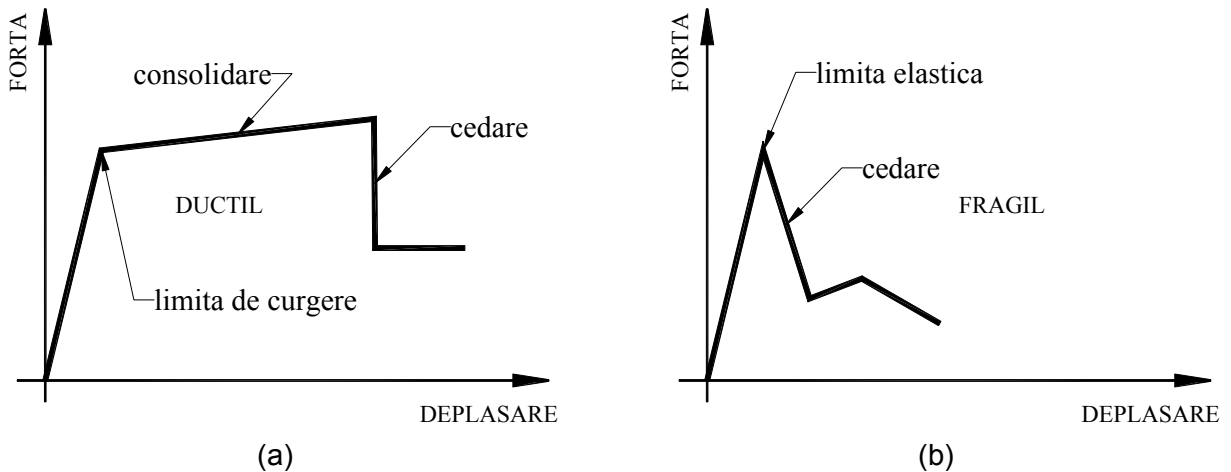


Figura 6.1. Reprezentarea principală a unui comportament ductil (a) și fragil (b).

Tabelul 6.1. Concepte de proiectare, valorile maxime ale factorilor de comportare și clase de ductilitate ale structurii (P100-1/2006).

Conceptul de proiectare	Domeniul valorilor de referință a factorului de comportare q	Clasa de ductilitate structurală
Structuri cu disipare mare	limitat de tipul structurii	H (mare)
Structuri cu disipare medie	$q < 4.0$, limitat de tipul structurii	M (medie)
Structuri slab disipative	$q = 1.0$	L (redușă)

6.1.1. Comportare slab-disipativă a structurii

Prima abordare folosește conceptul de comportare slab disipativă a structurii. Construcțiile proiectate conform acestui principiu posedă o capacitate redusă de disipare a energiei seismice în domeniul post-elastic. cu alte cuvine, structurile slab-disipative au o ductilitate redusă. În consecință aceste structuri vor avea o comportare preponderent în domeniul elastic sub acțiunea încărcărilor seismice de calcul. Pentru asigurarea unui răspuns elastic al structurii, factorul de

comportare folosit la determinarea încărcărilor seismice va avea valoarea $q=1$ (vezi Tabelul 6.1). Structurilor proiectate ca și slab disipative li se atribuie clasa de ductilitate L (reduasă).

Deoarece structurile proiectate conform principiului slab disipativ vor avea un răspuns preponderent elastic sub acțiunea încărcărilor seismice de calcul, proiectarea acestora se face conform procedurilor de calcul folosite la proiectarea structurilor amplasate în zone neseismice. Astfel, norme de calcul antiseismic (de ex. P100-1/2006) se folosesc doar pentru determinarea încărcărilor de calcul, iar verificările structurii la SLU se efectuează conform normelor de calcul a structurilor metalice (STAS 10108-0/78, EN1993, etc).

După cum s-a menționat în capitolul 5.2.2, factorii de comportare q folosiți pentru reducere forțelor seismice de calcul se datorează atât ductilității, cât și suprarezistenței structurale. De aceea, structurile neductile, dar care au o suprarezistență de proiectare și/sau sunt redundante, pot fi proiectate la forțe seismice reduse față de cele corespunzătoare unui răspuns elastic. În aceste cazuri factorul de comportare q se datorează suprarezistenței și redundanței, și nu ductilității structurii. Norme precum Eurocode 8 (EN1998, 2003) acceptă folosirea unui factor de comportare cuprins între 1.0 și 2.0 pentru proiectarea structurilor slab-disipative. Norma românească este mai conservativă, impunând un factor de comportare $q=1.0$ pentru structurile slab-disipative (care din perspectiva acestor prescripții de calcul ar fi trebuit denumite nedisipative).

6.1.2. Comportare disipativă a structurii

Cea de-a doua abordare în proiectarea structurilor amplasate în zone seismice folosește principiul unei comportări disipative a structurii. Structurile proiectate pe baza acestui principiu sunt proiectate pe baza unor încărcări seismice reduse substanțial față de cele corespunzătoare unui răspuns elastic al structurilor (prin intermediul factorului de comportare q). Reducerea forțelor seismice de calcul are la bază ductilitatea, suprarezistența și redundanța structurii (vezi capitolul 5.2.2). Dintre acestea, reducerea cea mai semnificativă a forțelor de calcul se bazează pe ductilitatea structurii.

Disiparea energiei seismice prin incursiuni în domeniul plastic are loc în anumite zone prestabilite, numite zone disipative. Aceste zone ale structurii sunt astfel concepute și proiectate, ca să posede o ductilitate adecvată. În general nu este economic și nici posibil realizarea tuturor elementelor structurale ca și zone disipative. Inevitabil o structură disipativă (ductilă) va conține atât elemente disipative (ductile), cât și elemente nedisipative (fragile). Pentru a asigura un comportament disipativ (ductil) global, la nivelul structurii, trebuie preîntâmpinată cedarea elementelor fragile. Acest comportament nu se poate însă realiza prin proiectarea elementelor fragile la eforturile de calcul din gruparea seismică, deoarece acestea sunt obținute pe baza unor forțe seismice reduse cu factorul de comportare q . De aceea elementele nedisipative trebuie dimensionate astfel ca acestea să posede o suprarezistență față de elementele disipative (vezi Figura 6.2). Acest principiu poartă denumirea de **proiectare bazată pe capacitate**, deoarece elementele nedisipative sunt proiectate pe baza unor forțe derivate din capacitatea (rezistența) elementelor disipative.

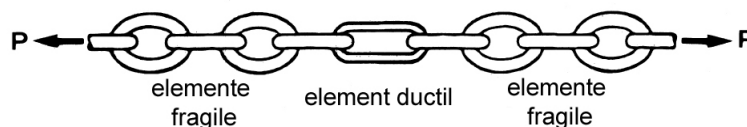


Figura 6.2. Principiile proiectării bazate pe capacitate (Paulay și Priestley, 1992).

Valorile de referință ale factorilor de comportare q folosiți la proiectarea structurilor disipative sunt specificate în normele de proiectare antiseismică funcție de material și tipul structural folosit. Valorile maxime (de referință) ale factorilor de comportare pot fi obținuți dacă materialul, elementele structurale, îmbinările acestora și structura în ansamblu respectă criteriile specifice de proiectare care asigură o ductilitate ridicată a structurii. Aceste structuri sunt încadrate în clasa de ductilitate H (mare), vezi Tabelul 6.1. Dacă unele dintre aceste cerințe sunt mai relaxate, structura va avea o ductilitate globală mai redusă, acestea putând fi încadrate în clasa de ductilitate M (medie). La stabilirea încărcărilor seismice de calcul pentru structurile cu o disipare medie, factorul de comportare de referință nu poate fi mai mare decât valoarea $q=4$. După cum s-a specificat în capitolul 5.5.1, factorul de comportare de referință este specificat pentru structuri regulate pe

verticală, și trebuie redus cu 20% (conform P100-1/2006 și EN1998, 2003) atunci când structura proiectată nu îndeplinește condițiile de regularitate pe verticală.

6.1.3. Alegerea principiului de proiectare

Proiectarea unei structuri ca și disipativă sau slab-disipativă este la latitudinea proiectantului. Principial, orice tip de structură poate fi proiectată conform uneia dintre cele două abordări. Alegerea principiului de proiectare este de natură economică și depinde de tipul structurii și de zona seismică. Astfel, structurile ușoare (cum ar fi hale metalice fără pod rulant) atrag forțe seismice relativ reduse, datorită masei și a înălțimii mici ale structurii. Proiectarea cea mai economică a unor astfel de structuri se bazează în cele mai multe cazuri pe principiul de structură slab-disipativă, deoarece acesta nu necesită cerințe speciale impuse elementelor structurale. Un alt exemplu în care proiectare pe baza principiului de structură slab-disipativă poate reprezenta o soluție economică sunt construcțiile amplasate în zone cu o seismicitate redusă. Și în acest caz forțele seismice sunt mici, astfel încât structura poate fi proiectată să răspundă în domeniul elastic sub acțiunea încărcărilor seismice de calcul, astfel încât nu este necesară o conformare antiseismică a structurii.

Structurile multietajate amplasate în zone cu o seismicitate ridicată atrag forțe seismice ridicate, astfel încât proiectarea acestora în domeniul elastic (ca și structuri slab-disipative) este în general neeconomică. În aceste cazuri este adoptat principiul de proiectare disipativă a structurii.

Toate criteriile de proiectare care sunt prezentate în cele ce urmează se referă la structurile proiectate conform principiului de comportare disipativă a structurii.

6.2. Tipuri de structuri

Din punct de vedere al comportării la acțiunea seismică, structurile metalice pot fi încadrate în unul din următoarele tipuri principale de structuri: (1) cadre necontravântuite, (2) cadre contravântuite centric, (3) cadre contravântuite excentric, (4) structuri de tip pendul inversat, (5) structuri duale (cadre necontravântuite asociate cu cadre contravântuite). Valorile de referință ale factorilor de comportare pentru aceste tipuri de structuri sunt date în Tabelul 6.2.

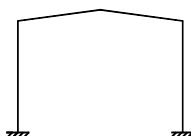

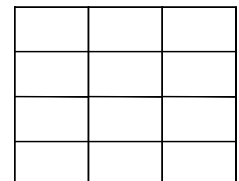
În tabelul de mai jos parametrii α_1 și α_u au următoarea semnificație:

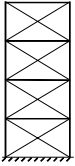
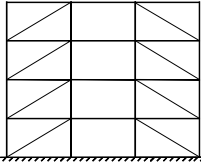
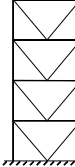
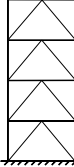
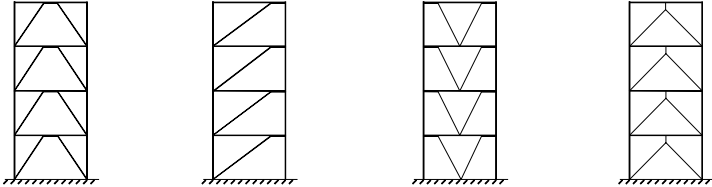
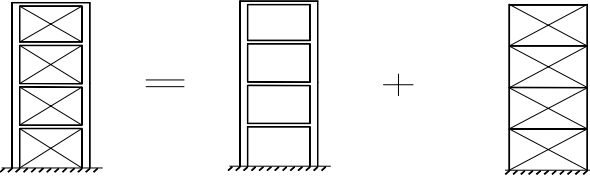
α_1 – coeficient de multiplicare al forței seismice orizontale care corespunde apariției primei articulații plastice

α_u – coeficient de multiplicare al forței seismice orizontale care corespunde formării unui mecanism plastic

Raportul α_u/α_1 corespunde redundanței q_R , definită în capitolul 5.2.2 și reprezentată grafic în Figura 5.5. În lipsa unor calcule specifice de determinare a raportului α_u/α_1 , valorile acestuia pot fi luate din Tabelul 6.2. Atunci când acest raport este determinat prin calcul, pot rezulta valori mai mari decât cele din Tabelul 6.2, totuși, acestea nu pot fi luate mai mari decât 1.6.

Tabelul 6.2. Factori de comportare q de referință pentru structuri metalice (EN1998, 2003 și parțial P100-1/2006)

Tipul structurii	Clasa de ductilitate	
	M	H
<p>Cadre necontravântuite: $\alpha_u/\alpha_1=1.1$</p>  <p>$\alpha_u/\alpha_1=1.2$</p>  <p>$\alpha_u/\alpha_1=1.3$</p> 	4	$5\alpha_u/\alpha_1$

<p>Cadre contravântuite centric:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ contravântuiri diagonale   <ul style="list-style-type: none"> ▪ contravânturi în V  	<p>4</p> <p>2</p>	<p>4</p> <p>2.5</p>
<p>Cadre contravântuite excentric: $\alpha_u/\alpha_1=1.2$</p> 	<p>4</p>	<p>$5\alpha_u/\alpha_1$</p>
<p>Structuri duale (cadre necontravântuite asociate cu cadre contravântuite)</p> 	<p>4</p>	<p>$4\alpha_u/\alpha_1$</p>

6.3. Ductilitatea structurilor metalice

Oțelul folosit în construcțiile moderne este un material cu o ductilitate excelentă, în comparație cu alte materiale de construcții (betonul, zidăria, etc). Totuși, această proprietate intrinsecă a oțelului nu asigură în mod implicit o ductilitate adecvată la nivel de structură. Există o serie de cerințe care trebuie respectate pentru a obține o ductilitate adecvată a întregii structuri. Aceste cerințe se referă la material, la secțiunile din care sunt alcătuite elementele structurale, la elementele structurale în sine, la îmbinările acestora și la cerințele legate de alcătuirea de ansamblu a structurii.

6.3.1. Ductilitatea de material

Oțelurile uzuale de construcții sunt materiale ductile. P100-1/2006 impune totuși o serie de cerințe minime oțelului folosit în zonele disipative. Acestea sunt următoarele:

- un raport între rezistența la rupere f_u și rezistența minimă de curgere f_y de cel puțin 1.20
- o alungire la rupere de cel puțin 20%
- un palier de curgere distinct, cu alungirea specifică la sfârșitul palierului de curgere, de cel puțin 1.5%

6.3.2. Ductilitatea de secțiune

Efortul capabil și ductilitatea secțiunii transversale a element structural întins este controlată de rezistența și ductilitatea oțelului din care este fabricat acesta. Secțiunea transversală a unui element structural comprimat poate să voaleze dacă pereții secțiunii sunt foarte zvelteți. Voalarea reduce nu doar efortul capabil al secțiunii, ci și ductilitatea acesteia. Fenomenul de voalare se poate produce atât la elementele structurale supuse la compresiune (întreaga secțiune transversală comprimată), cât și la cele încovoiate (când doar o parte a secțiunii transversale este comprimată). Pentru a asigura o ductilitate cât mai bună la nivel de secțiune, aceasta trebuie împiedecată să voaleze, prin asigurarea unor zvelteți cât mai mici ale pereților secțiunii.

Eurocode 3 (EN1993, 2003) împarte secțiunile elementelor metalice în 4 clase de secțiune, funcție de zveltețea pereților. Secțiunile cu pereții cel mai puțin zvelți sunt cele de clasă 1. Aceste secțiuni pot dezvolta momentul plastic al secțiunii și au deformație plastică înaltă fără o reducere a momentului plastic (vezi Figura 6.3). Secțiunile de clasă 2 pot dezvolta momentul plastic al secțiunii, dar au o capacitate redusă de deformare în domeniul plastic, datorită voalării în domeniul plastic. Secțiunile de clasă 3 ating momentul elastic al secțiunii, dar nu pot dezvolta momentul plastic, acestea având o ductilitate redusă. Secțiunile de clasă 4 voalează în domeniul elastic, momentul capabil fiind inferior momentului elastic al secțiunii. Ductilitatea secțiunilor de clasă 4 este cea mai redusă.

În Tabelul 6.3 sunt prezentate cerințele impuse de P100-1/2006 clasei de secțiune funcție de clasa de ductilitate și factorul de comportare de referință. Astfel, zonele disipative ale structurilor cu o ductilitate ridicată (clasa de ductilitate H și un factor de comportare $q > 4.0$) trebuie să fie realizate din secțiuni de clasă 1. Pentru structurile cu o ductilitate medie (clasa de ductilitate M și factori de comportare cuprinși între 2.0 și 4.0) în zonele disipative se pot utiliza atât secțiuni de clasă 1, cât și cele de clasă 2. Elementele structurilor nedisipative, proiectate pe baza unui factor de comportare $q=1.0$, pot fi alcătuite din secțiuni de orice clasă, deoarece răspunsul structurii sub acțiunea încărcărilor seismice de calcul este în domeniul elastic. Se menționează că P100-1/2006 omite (din motive necunoscute) secțiunile de clasă 4 din opțiunile posibile pentru realizarea elementelor structurale ale structurilor nedisipative.

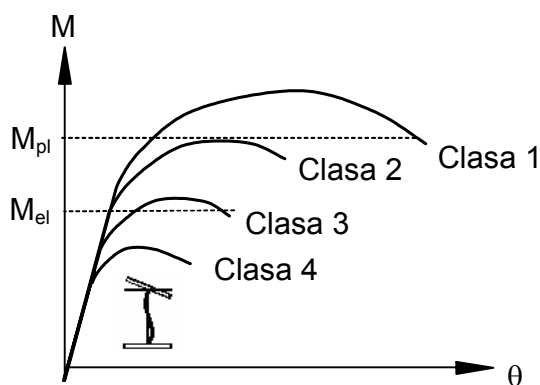


Figura 6.3. Relația moment-rotire pentru diferite clase de secțiuni.

Tabelul 6.3. Cerințe impuse clasei de secțiune funcție de clasa de ductilitate și factorul de comportare de referință (conform P100/1-2006)

Clasa de ductilitate	Factorul de comportare q	Clasa de secțiune
H	$q > 4.0$	clasa 1
M	$2.0 < q \leq 4.0$	clasa 2 sau 1
L	$q = 1.0$	clasa 3, 2 sau 1

6.3.3. Ductilitatea de element

Oțelul este un material cu o rezistență ridicată în comparație cu alte materiale de construcție. În consecință, elementele structurale metalice dimensionate doar din criterii de rezistență sunt relativ zvelte. Elementele structurale zvelte au o capacitate portantă la compresiune redusă față de solicitarea la întindere, lucru care trebuie considerat la dimensionarea elementelor. Fenomenul de flambaj, care afectează elementele comprimate, reduce nu doar capacitatea portantă, ci și ductilitatea și capacitatea elementului de disipare a energiei în domeniul inelastic. Energia disipată de elementele structurale în domeniul post-elastic este egală cu aria cuprinsă în interiorul ciclurilor forță-deplasare (Figura 6.4).

În Figura 6.4 este prezentată schematic comportarea ciclică (întindere-compresiune) a unor contravântuiri de diferite zvelteți. În cazul unor zvelteți mici, elementul structural dezvoltă aceeași capacitate portantă la întindere și compresiune (Figura 6.4a), având niște cicluri histeretice pline și

stabile. Atunci când zveltețea este foarte mică, elementul structural are o capacitate portantă la compresiune neglijabilă (Figura 6.4b), deformațiile de compresiune dezvoltându-se la forțe apropiate de zero. Se poate observa o capacitate redusă de disipare a energiei seismice în comparație cu elementele cu o zveltețe mică. Răspunsul elementelor cu o zveltețe medie este prezentat în (Figura 6.4c). Capacitatea portantă la compresiune este mai mică decât la întindere, iar forța scade rapid după flambajul elementului (punctul B). Cea mai mare parte a energiei seismice este disipată la deformații de întindere.

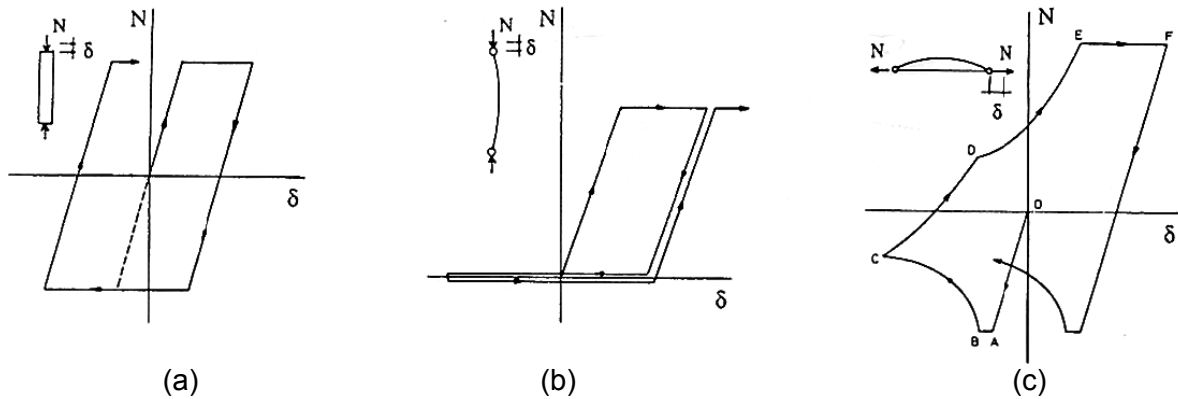


Figura 6.4. Reprezentare schematică a răspunsului ciclic a unor contravântuiri cu zveltețe mică (a), mare (b) și medie (c), Uang et al., 2001.

Ținând cont de efectele nefavorabile ale zvelteții ridicate asupra comportamentului inelastic al elementelor structurale care includ zone disipative, normele de proiectare antiseismică impun limitări ale zvelteții, funcție de tipul elementului și modul de solicitare al acestuia. Este de menționat aici că fenomenul de flambaj afectează atât elementele comprimate (de exemplu contravântuiri – flambaj prin încovoiere), cât și cele supuse la încovoiere (de exemplu grinzile – flambaj prin încovoiere-răsucire).

Zveltețea $\lambda = L_f/i$ (unde L_f este lungimea de flambaj, iar i este raza de girație) unui element poate fi redusă prin două căi. Primă este folosirea unor secțiuni cu raza de girație mare. Cea de-a doua constă în reducerea lungimii de flambaj. Modalitatea practică de realizare a acestui obiectiv este dispunerea unor legături suplimentare de-a lungul elementului structural.

6.3.4. Îmbinările elementelor structurale

Îmbinările reprezintă un punct sensibil pentru rezistența seismică de ansamblu a unei construcții. Calculul și comportarea îmbinărilor este adesea mai complexă decât a elementelor îmbinate. O atenție deosebită trebuie acordată îmbinărilor elementelor care cuprind zone disipative. În general, îmbinările pot fi proiectate ca și îmbinări disipative (deformațiile plastice au loc în îmbinarea propriu-zisă) sau ca îmbinări nedisipative (deformațiile plastice au loc în elementele îmbinate). Datorită complexității comportării îmbinărilor în condiții seismice (solicitări ciclice în domeniul inelastic în îmbinări sau în elementele îmbinate), detaliile constructive și modul de calcul al îmbinărilor folosite trebuie să fie validate de încercări experimentale. În general, derularea unor încercări experimentale pentru lucrări curente nu este economică. De aceea, în practică, detalierea și calculul îmbinărilor structurilor disipative se bazează pe informații disponibile în literatură sau prescripții de specialitate (de exemplu GP 082/2003 sau ANSI/AISC 358-05), elaborate pe baza unor programe ample de încercări experimentale.

Îmbinările disipative, pe lângă criteriile de rigiditate și rezistență trebuie să îndeplinească și cerințe de ductilitate (validate experimental), impuse de normele antiseismice funcție de tipul structurii și clasa de ductilitate.

Îmbinările nedisipative aflate în vecinătatea zonelor disipative trebuie proiectate să rămână în domeniul elastic, asigurând dezvoltarea deformațiilor inelastice în zonele disipative ale elementelor îmbinate. În acest scop, îmbinările nedisipative trebuie proiectate la eforturi corespunzătoare unor zone disipative plasticizate și consolidate. Relația de verificare se poate exprima generic sub forma:

$$R_d \geq 1.1\gamma_{ov}R_{fy} \quad (6.1)$$

unde:

R_d – rezistența îmbinării

R_{fy} – rezistența plastică a elementului îmbinat, determinată pe baza limitei de curgere de calcul

1.1 – un factor care ține cont de consolidarea (ecruisarea) zonei disipative

γ_{ov} – un factor de suprazistență care ține cont de o limită de curgere reală mai mare decât cea caracteristică a zonei disipative (valoarea normativă a suprazistenței, în lipsa unor încercări experimentale este egală cu 1.25)

Principiul de dimensionarea a îmbinărilor nedisipative care îmbină elemente structurale disipative este prezentată schematic în Figura 6.5. Se accentuează că îmbinările nedisipative se dimensionează pe baza efortului probabil din elementul disipativ adiacent, determinat conform relației (6.1). și nu pe baza eforturilor din îmbinare determinate din analiza structurală. Acest principiu de calcul are la bază proiectarea bazată pe capacitate, vezi capitolul 6.1.2.

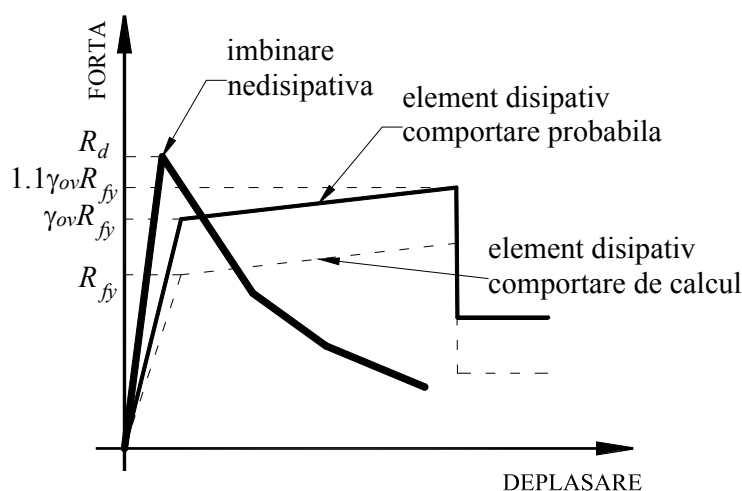


Figura 6.5. Principiul de dimensionarea a îmbinărilor nedisipative.

Cu toate că majoritatea normelor antiseismice moderne (Eurocode 8, 2003; AISC, 2005) acceptă folosirea unor îmbinări disipative la structurile metalice, normativul P100-1/2006 permite utilizarea doar a îmbinărilor nedisipative.

6.3.5. Ductilitatea structurii

Ductilitatea la nivel de structură este asigurată prin dimensionarea elementelor structurale astfel ca să fie asigurat un mecanism plastic global (vezi Figura 5.20a). Acest mecanism asigură un număr maxim de zone plastice și o disipare uniformă a energiei seismice în întreaga structură. Trebuie evitate mecanismele plastice de nivel (vezi Figura 5.20b), deoarece în acest caz energia seismică este disipată într-un număr redus de zone plastice. În plus, la aceiași deplasare globală a structurii δ , elementele structurale care participă la formarea unui mecanism plastic de nivel suferă deformații plastice mai mari decât cele care participă la formarea unui mecanism plastic global. În plus, promovarea unui mecanism plastic de tip global limitează deformațiile plastice în stâlpi, elemente importante pentru asigurarea stabilității globale ale structurii.

6.4. Cadre metalice necontravântuite

Cadrele metalice necontravântuite (vezi Tabelul 6.2) preiau încărcările laterale prin încovoierea grinzilor și a stâlpilor. La astfel de structuri nodurile riglă-stâlp trebuie să fie de tip rigid. Cadrele necontravântuite au o ductilitate excelentă (factorii de comportare ridicați din Tabelul 6.2), dar sunt relativ flexibile în comparație cu cadrele contravântuite centric sau excentric.

Zonele disipative la cadrele necontravântuite sunt amplasate la capetele grinzilor. Elementele nedisipative sunt stâlpii. Se permite formarea articulațiilor plastice și în stâlpi în următoarele situații: la baza structurii, la partea superioară a stâlpilor de la ultimul nivel al structurilor multietajate și la structurile parter cu forțe axiale mici în stâlpi. Aceste cerințe reflectă practic condiția de formare a

unui mecanism plastic de tip global. Conform normei antiseismice românești P100-1/2006, îmbinările riglă-stâlp constituie zone nedisipative. Cu toate acestea, alte norme antiseismice moderne (Eurocode 8, 2003; AISC, 2005) acceptă folosirea îmbinărilor ca și zone disipative, cu condiția validării experimentale a capacității de deformare în domeniul inelastic al îmbinărilor.

Ductilitatea de ansamblu excelentă a cadrelor necontravântuite se datorează faptului că deformațiile plastice de încovoiere, formate la capetele grinzilor, reprezintă un mod de cedare forte ductil. Totuși, ductilitatea și momentul capabil al grinzilor pot fi reduse dacă pe lângă încovoiere, elementul structural este supus unor eforturi de compresiune și/sau forfecare importante. Pentru a limita aceste fenomene, P100-1/2006 folosește următoarele relații pentru verificarea grinzilor care conțin zone disipative (în care se pot forma articulații plastice):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (6.2)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 0.15 \quad (6.3)$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0.5 \quad V_{Ed} = V_{Ed,G} + V_{Ed,M} \quad (6.4)$$

unde:

M_{Ed} și N_{Ed} - momentul încovoiator și forța axială de proiectare din combinația seismică de încărcări
 $M_{pl,Rd}$, $V_{pl,Rd}$ și $N_{pl,Rd}$ - momentul încovoiator forța tăietoare și forța axială capabile ale secțiunii

Relația (6.2) asigură capacitatea portantă a grinzii la moment încovoiator, în timp ce relațiile (6.3) și (6.4) limitează efectele forței axiale, respectiv a forței tăietoare asupra momentului capabil și a ductilității zonei disipative. Forța tăietoare de calcul V_{ed} prezentă într-o grindă cu articulații plastice formate la capete poate fi substanțial mai mare decât cea estimată din calculul static al structurii în combinația seismică. De aceea, valoarea forței tăietoare de calcul se estimează prin însumarea contribuției încărcării gravitaționale ($V_{ed,G}$) și a celei corespunzătoare formării articulațiilor plastice la cele două capete ale grinzii ($V_{ed,G} = M_{pl,Rd,A} + M_{pl,Rd,B}/L$), vezi Figura 6.6.

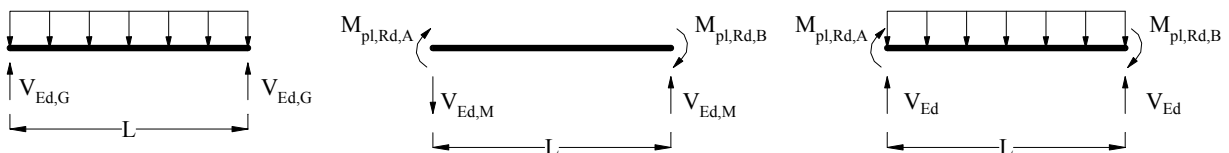


Figura 6.6. Evaluarea forței tăietoare de calcul probabile într-o grindă cu articulații plastice.

Stâlpii sunt elemente nedisipative, dimensionarea acestora având la bază cerința de evitare a formării articulațiilor plastice. Eforturile de calcul din stâlpi obținute din combinația seismică de încărcări vor fi depășite în timpul unui cutremur, deoarece forțele seismice de calcul sunt reduse față de cele corespunzătoare unui răspuns elastic al structurii cu valoarea factorului de comportare q . Eforturile folosite la dimensionarea stâlpilor trebuie să corespundă formării articulațiilor plastice în grinzi, când structura formează un mecanism plastic. Pentru aceasta ar fi necesar un calcul plastic, care însă nu se justifică în practic de proiectare curentă. De aceea, normele de proiectare antiseismică oferă metode aproximative de estimare a eforturilor din stâlpi care să le asigure o suprazistență față de grinzi. P100-1/2006 folosește următoarele relații pentru determinarea eforturilor de calcul în stâlpi:

$$N_{Ed} = N_{Ed,G} + 1.1\gamma_{ov}\Omega^M N_{Ed,E} \quad (6.5)$$

$$M_{Ed} = M_{Ed,G} + 1.1\gamma_{ov}\Omega^M M_{Ed,E} \quad (6.6)$$

$$V_{Ed} = V_{Ed,G} + 1.1\gamma_{ov}\Omega^M V_{Ed,E} \quad (6.7)$$

unde:

$N_{Ed,G}$, $M_{Ed,G}$, $V_{Ed,G}$ – efortul axial, momentul încovoiator și forța tăietoare în stâlp din acțiunile seismice conținute în gruparea de încărcări care include acțiunea seismică

$N_{Ed,E}$, $M_{Ed,E}$, $V_{Ed,E}$ – efortul axial, momentul încovoiător și forța tăietoare în stâlp din acțiunile seismice de proiectare.

Ω^M reprezintă rezerva de rezistență a grinzilor față de momentul încovoiător de calcul din gruparea seismică și, conform P100-1/2006 reprezintă valoarea maximă a raportului $\Omega_i^M = M_{pl,Rd,i} / M_{Ed,i}$ calculat pentru fiecare grindă.

Relațiile (6.5) - (6.7) încearcă să estimeze eforturile din stâlpi corespunzătoare formării unui mecanism plastic în structură, atunci când în elementele disipative (grinzi) se formează articulații plastice. Natura acestor relații poate fi explicată folosind Figura 5.5. Forțele seismice de calcul sunt reduse față de cele corespunzătoare unui răspuns elastic al structurii. Nivelul eforturilor din stâlpi din forțele seismice de calcul corespunde unei forțe tăietoare la bază egală cu V_d (vezi Figura 5.5). Datorită suparezistenței de proiectare (q_{sd}) și a redundanței (q_R) la formarea mecanismului plastic forțele seismice vor corespunde unei forțe tăietoare la bază egală cu V_y , mai mare decât cele de proiectare. Valoarea V_y poate fi estimată amplificând forța tăietoare de bază de proiectare V_d cu suparezistența totală q_s (care este evaluată de normă prin factorul $1.1\gamma_{ov}\Omega^M$). Încărcările gravitaționale aferente combinației seismice de încărcări sunt constante pe durata acțiunii seismice. De aceea, eforturile din stâlpi la formarea mecanismului plastic pot fi estimate ca și suma contribuției încărcărilor gravitaționale ($N_{Ed,G}$, $M_{Ed,G}$, $V_{Ed,G}$) și a încărcărilor seismice de calcul ($N_{Ed,E}$, $M_{Ed,E}$, $V_{Ed,E}$) amplificate cu factorul $1.1\gamma_{ov}\Omega^M$. Pentru un calcul simplificat, P100-1/2006 oferă valori prescrise ale factorului $1.1\gamma_{ov}\Omega^M$, funcție de tipul structural. În cazul cadrelor metalice necontravântuite, valoarea acestui factor este $1.1\gamma_{ov}\Omega^M = 3$.

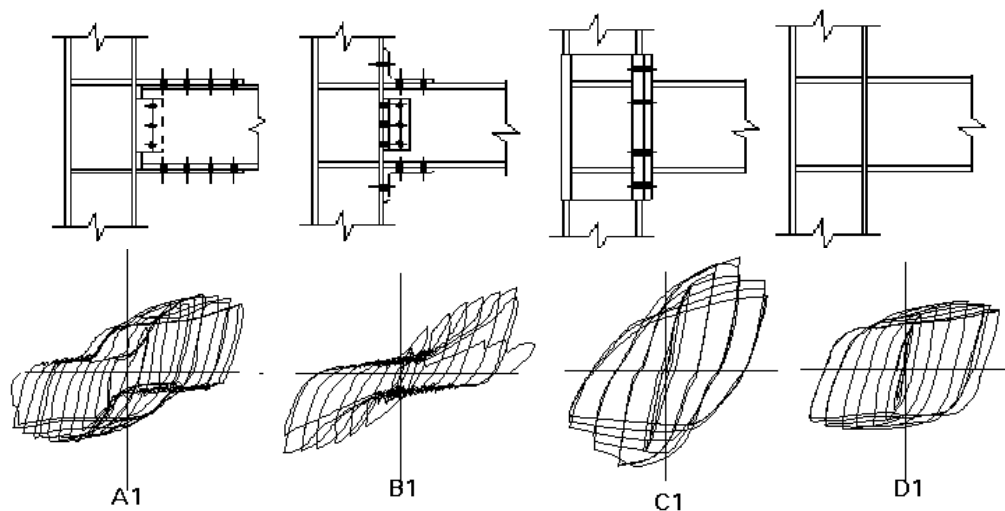


Figura 6.7. Răspunsul ciclic moment-rotire pentru diferite tipuri de noduri (Ballio și Mazzolani).

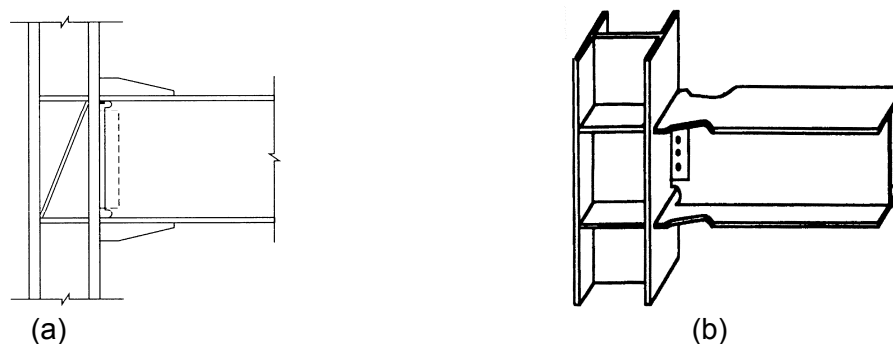


Figura 6.8. Noduri riglă stâlp întărite (a) și slăbite (b), FEMA350, 2000.

Îmbinările dintre elementele structurale sunt foarte importante pentru un răspuns seismic adecvat al întregii structuri, în special în cazul cadrelor necontravântuite. Aceasta se datorează faptului că zonele disipative se află la capetele grinzilor, în imediata vecinătate a îmbinărilor riglă-stâlp. După

cum s-a menționat în capitolul 6.3.4, norma seismică românească nu acceptă utilizarea îmbinărilor disipative. În consecință, îmbinările riglă-stâlp trebuie să posede o suprarezistență față de grinzi. Eforturile de calcul în îmbinări se determină conform principiului proiectării bazate pe capacitate (vezi capitolul 6.3.4 și relația (6.1)). Pe lângă o rigiditate și rezistență adecvate, îmbinările riglă-stâlp (care includ și zona de riglă în care se formează articulațiile plastice) trebuie să posede o ductilitate adecvată. În acest sens, P100-1/2006 impune asigurarea unei capacități de rotire plastică $\theta_p=0.035$ rad pentru clasa de ductilitate H și $\theta_p=0.025$ rad pentru clasa de ductilitate M. În timp ce capacitatea portantă și rigiditatea îmbinărilor riglă-stâlp pot fi determinate prin calcul (de ex. SR-EN1993-1.8), determinarea capacității de rotire (ductilității) necesită încercări experimentale. În Figura 6.7 sunt prezentate câte tipuri de îmbinări tipice riglă-stâlp și relația moment-rotire determinată experimental pentru o încărcare ciclică.

Dimensionarea îmbinărilor din Figura 6.7 conform relației (6.1), astfel ca acestea să demonstreze o suprarezistență față de grindă este dificilă. În cazul îmbinărilor riglă stâlp sudate direct (tipul D1 din Figura 6.7) deformațiile plastice sunt în imediata apropiere a îmbinării sudate (la fața stâlpului), ceea ce a condus frecvent la un comportament seismic nesatisfăcător al acestor îmbinări. O îmbunătățire a răspunsului ciclic al îmbinărilor riglă-stâlp poate fi obținută prin îndepărtarea articulației plastice de la fața stâlpului. În acest scop se pot adopta două abordări. Prima constă în întărirea îmbinării folosind rigidizări (vezi Figura 6.8a). Cea de-a doua folosește o strategie opusă – slăbirea secțiunii grinzii (vezi Figura 6.8b), astfel încât articulația plastică se formează în secțiunea slăbită și nu la fața stâlpului. În ambele cazuri se obține însă o suprarezistență a îmbinării față de grindă.

6.5. Cadre metalice contravântuite centric

Elementele cadrelor contravântuite centric sunt solicate preponderent la forțe axiale. Aceste sisteme de preluare a forțelor laterale reprezintă în esență grinzi cu zăbrele verticale. Elementele disipative ale cadrelor contravântuite centric sunt contravântuirile întinse. Celelalte elemente (grinzile și stâlpii) sunt elemente nedisipative. Există câteva sisteme tipice de contravântuire:

- Contravântuiri diagonale (vezi Figura 6.9a), la care forțele laterale se consideră preluate doar de contravântuirile întinse. Din cauza flambajului, contravântuirile comprimate sunt neglijate la stabilirea rigidității și rezistenței la forțe laterale.
- Contravântuiri în V (vezi Figura 6.9b), la care forțele laterale se consideră preluate atât de contravântuirile întinse, cât și de cele comprimate. Aceste contravântuiri se intersectează pe un element structural orizontal (grindă).
- Contravântuiri în K (vezi Figura 6.9c), la care contravântuirile se intersectează pe un stâlp nu sunt permise a fi utilizate ca și sisteme disipative în zone seismice. Aceste contravântuiri conduc la eforturi concentrate pe stâlpi, care pot duce la cedarea prematură a acestora și, ulterior, al întregii structuri.

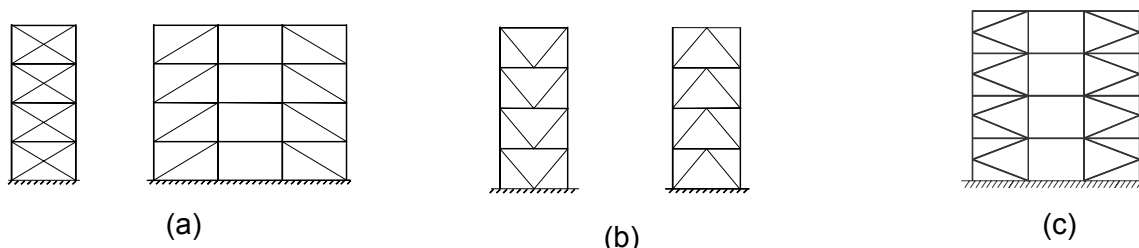


Figura 6.9. Tipuri de cadre contravântuite centric: contravântuiri diagonale (a), contravântuiri în V (b) și contravântuiri în K (c - nepermise).

Din cauza flambajului, răspunsul inelastic al contravântuirilor are un aspect nesimetric important (vezi Figura 6.10a). Rezistența la compresiune este mult mai mică decât cea la întindere. După prima incurșiune în domeniul inelastic, rezistența la compresiune este și mai mică, datorită deformațiilor de încovoierie remanente. Pentru limitarea asimetriei dintre comportarea unei contravântuiri la întindere și la compresiune, normele de proiectare antiseismică impun limitări ale zvelteții maxime. Dar reducerea zvelteții nu elimină complet asimetria răspunsului inelastic al

contravântuirilor. Totuși, un ansamblu format din două contravânturi dispuse alternativ (una ascendentă și alta descendentă) va avea un răspuns total simetric (vezi Figura 6.10b), deoarece pentru orice sens al acțiunii, una dintre contravânturi va fi întinsă, asigurând rigiditatea, rezistența și ductilitatea necesară pentru ansamblu.

La calculul cadrelor cu contravânturi diagonale, aportul contravântuirilor comprimate este neglijat. Structura pe ansamblu trebuie însă să posede o rezistență și rigiditate similare pentru ambele sensuri ale acțiunii seismice. De aceea, structurile cu contravânturi diagonale trebuie să aibă un număr apropiat de contravânturi ascendente și descendente, pentru a asigura un răspuns cât mai simetric al structurii pe ansamblu. Structurile din Figura 6.9a reprezintă un exemplu de dispunere corectă a contravântuirilor.

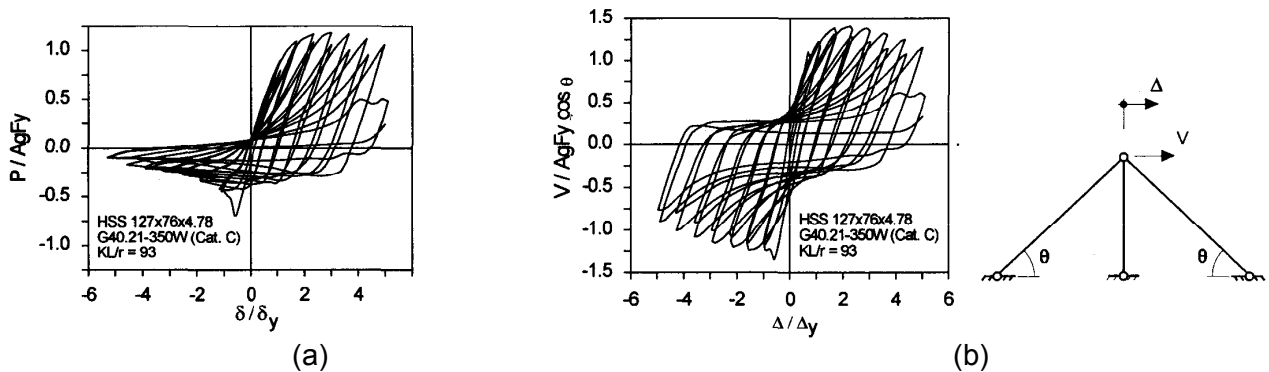


Figura 6.10. Răspunsul ciclic al unei contravântuiri izolate (a) și a unui ansamblu format din două contravântuiri dispuse (b), Tremblay, 2003.

O structură disipativă proiectată pe baza unui factor de comportare supraunitar va suferi inevitabil deformații în domeniul inelastic din acțiunea seismică de calcul. Elementele structurale care vor avea de suferit sunt în primul rând cele disipative, cele predestinate disipării energiei seismice prin incursiuni în domeniul post-elastic. La cadrele contravântuiri elementele disipative sunt contravântuirile, care vor avea o rezistență a compresiune neglijabilă în urma unor incursiuni în domeniul inelastic. Astfel, contravântuirile pot fi scoase complet din uz în urma acțiunii seismice. De aceea, structura trebuie verificată să poată prelua forțele gravitaționale prezente în gruparea seismică, considerând contravântuirile lipsă.

Grinzile și stâlpii fiind elemente nedisipative, trebuie dimensionate pentru a avea o suprazistență față de elementele disipative. Principiul de evaluare al eforturilor de calcul din elementele nedisipative este același celui descris pentru cadrele necontravântuite. Astfel, eforturile de calcul din grinzi și stâlpi se evaluează conform unor relații similare cu (6.5)-(6.6), doar că Ω^M este înlocuit cu Ω^N și reprezintă rezerva de rezistență a contravântuirilor față de forța axială de calcul din gruparea seismică și, conform P100-1/2006 reprezintă valoarea maximă a raportului $\Omega_i^N = N_{pl,Rd,i} / N_{Ed,i}$ calculat pentru fiecare contravântuire.

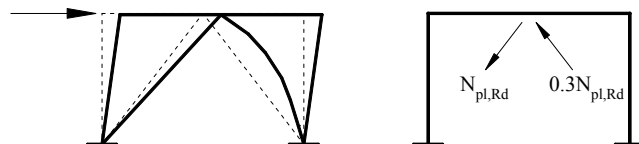


Figura 6.11. Modelarea efectului flambajului contravântuiri comprimate asupra grinzilor la cadrele contravântuite în V.

La cadrele contravântuite în V se consideră în calcul atât contravântuirile întinse, cât și cele comprimate, deoarece aceste structuri se proiectează pe baza unor factori de comportare mici, ceea ce implică deformații inelastice reduse. Ductilitatea redusă a acestui tip structural se datorează solicitărilor puternice impuse grinzilor după flambajul contravântuiri comprimate, care pot duce la cedarea grinzilor și la pierderea rezistenței și rigidității globale a structurii. Pentru a limita acest fenomen, grinzi pe care se intersectează contravântuirile trebuie dimensionate astfel

ca să poată prelua efortul dezechilibrat cauzat de flambajul contravânturii comprimate. În calcul, aceste grinzi se consideră încărcate cu eforturile din contravânturii corespunzătoare curgerii contravânturii întinse ($N_{pl,Rd}$) și a flambajului celei comprimate (estimată conform PO100-1/2006 la $0.3N_{pl,Rd}$), vezi Figura 6.11.

6.6. Cadre metalice contravântuite excentric

Cadrele contravântuite excentric (vezi Figura 6.12) sunt caracterizate de o prindere excentrică a contravânturilor, astfel încât forța axială din contravântuire se transmite la altă contravântuire sau la stâlp prin forfecarea și încovoiere unei porțiuni a grinzii. Acest segment de grindă se numește link sau bară disipativă. Uneori linkul poate fi un element independent, care nu face parte din grindă (vezi Figura 6.12d). Cadrele contravântuite excentric prezintă avantajul că sunt foarte ductile (similar cadrelor necontravântuite) și în același timp sunt relativ rigide (similar cadrelor contravântuite centric). La cadrele contravântuite excentric elementele disipative sunt linkurile, iar elementele nedisipative sunt grinzi (porțiunile din afara linkului), stâlpii și contravântuirile.

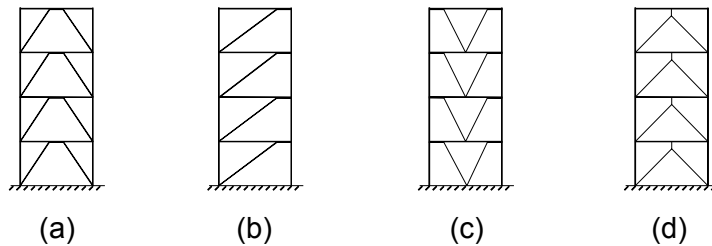


Figura 6.12. Cadre contravântuite excentric.

Funcție de lungimea lor, barele disipative se împart în trei categorii:

- Bare disipative scurte, care disipează energia seismică prin deformații inelastice de forfecare
- Bare disipative lungi, care disipează energia seismică prin deformații inelastice de încovoiere
- Bare disipative intermediare, care formează un mecanism plastic caracterizat de interacțiunea dintre moment și forță tăietoare

Inima barelor disipative scurte poate voala atunci când acestea sunt supuse unor deformații în domeniul inelastic. Această voalare reduce capacitatea barelor disipative scurte de disipare a energiei seismice, (vezi Figura 6.13a). Pentru a limita acest fenomen, inima barelor disipative scurte trebuie rigidizată, obținând un răspuns ciclic inelastic stabil (vezi Figura 6.13b). Un alt fenomen care poate reduce performanțele barelor disipative scurte este forța axială. În acest sens, forța axială trebuie în general limitată la 15% din forța axială plastică a secțiunii.

Pentru a limita apariția unor deformații inelastice în elementele nedisipative (grinzi, stâlpi și contravânturii), acestea se dimensionează pe baza unor eforturi corespunzătoare unor bare disipative plastificate și consolidate. Eforturile de calcul din elementele nedisipative se evaluează conform unor relații similare cu (6.5)-(6.7), doar că Ω^M este înlocuit cu Ω și reprezintă rezerva de rezistență a barelor disipative față de efortul de calcul (forță tăietoare pentru barele disipative scurte sau momentul încovoietor pentru barele disipative lungi) din gruparea seismică.

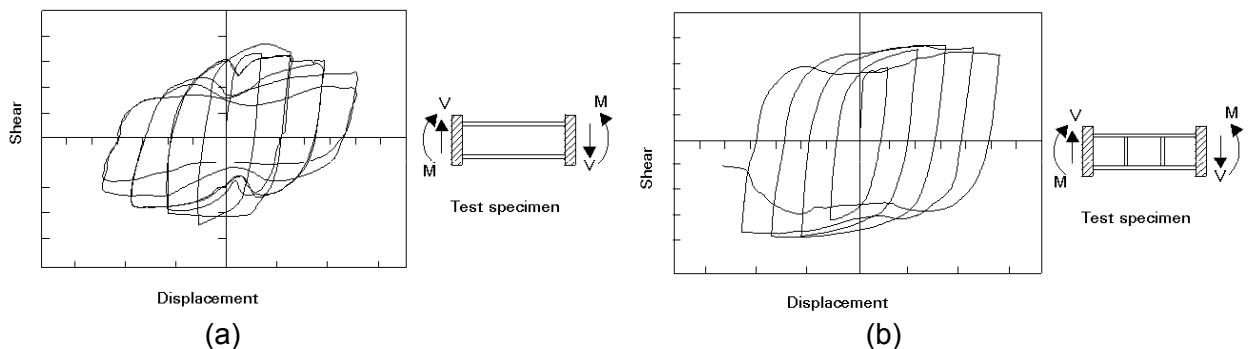


Figura 6.13. Răspunsul ciclic al unui link nerigidizat (a) și a unui link rigidizat (b), ESDEP.