

# Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordata

Aspects regarding the use of the Tuned Mass Dampers

Zainulabdeen K. Abdulfattah Abdulfattah<sup>1</sup>, Vlad Stefan Niculae<sup>1</sup>,  
Daniel Stoica<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti  
B-dul Lacul Tei 122-124, Sector 2, Bucuresti, Romania  
E-mail: stoica@utcb.ro

**Rezumat.** *Una dintre alternativele de proiectare a clădirilor noi dar și de intervenții la clădirile existente este pe baza utilizării dispozitivelor de amortizare cu masa acordată. Având în vedere că acestea sunt eficiente numai la clădiri cu regim mare de înălțime, s-au realizat studii de caz pentru clădiri cu 10, 20, 30 și 40 de niveluri, având 3 tipuri de forme diferite în plan (circulare, pătrate și dreptunghiulare) și două tipuri de structuri de rezistență (cadre din beton armat și duale din beton armat). S-au realizat comparații între răspunsurile structurale obținute pentru modele de calcul corespunzătoare clădirilor cu și fără utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masă acordată.*

**Cuvinte cheie:** amortizor, masă, acordată, deformații

**Abstract.** *One of the alternatives of designing new buildings but also for interventions to existing buildings is based on the use of the Tuned Mass Dampers (TMD). Given that they are effective only in high rise buildings, case studies have been carried out for buildings with 10, 20, 30 and 40 levels, having 3 different types of shapes in plan (circular, square and rectangular) and two types of structures (reinforced concrete frames and reinforced concrete dual systems). Comparisons were made between the structural responses obtained for the calculation models corresponding to the buildings with and without using the TMD.*

**Key words:** damper, mass, tuned, deflections

## 1. Introducere

Sistemul de amortizare cu masa acordata TMD (Tuned Mass Damper) - un sistem foarte eficient in controlul vibratiilor unei structuri - este format (la nivel teoretic) dintr-o masa, un amortizor vascos si un resort atasat unei structuri pentru reducerea vibratiilor induse de vant si de sesim. Frecventa si amortizarea acestor

sisteme sunt acordate in asa fel incat, atunci cand structura intra in rezonanta la o anumita frecventa (perioada) TMD-ul oscileaza cu aceeasi perioada, dar defazat fata de structura, astfel energia se transmite la sistemul primar (structura) la cel secundar (TMD) si se disipa in amortizor.

## 2. Utilizarea sistemelor cu masa acordata pe plan international

Primul sistem cu masa acordata a fost propus de Fhram (1909) pentru reducerea vibratiilor produse de forte armonice monotone. El a observat ca daca un sistem secundar format dintr-o masa, un amortizor si un arc este atasat de un sistem primar, iar perioada lui este acordata cu perioada fundamentala a sistemului primar, se obtine o reducere considerabila a raspunsului dinamic.

Prima cladire echipata cu amortizor cu masa acordata este Centerpoint Tower in Sydney, Australia. Structura a fost finalizata in 1981 si masoara 309 m.



Fig. 1 Centerpoint Tower, Sydney Australia

In Canada, exista cateva cladiri echipate cu amortizori cu masa acordata printre care: CN Tower; One Wall Center.

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

CN Tower are 553m înălțime și a fost finalizat în 1976. La momentul finalizării a fost cea mai înaltă clădire.



Fig. 2 CN Tower, Toronto Canada

One Wall Center cunoscut și sub numele Sheraton Vancouver Wall Center Hotel are 48 etaje, și înălțimea de 158m. Pentru a contracara posibilele vibrații armonice cauzate de vântul puternic, turnul a fost echipat cu amortizor cu apă acordat. Acest sistem a fost amplasat la ultimul nivel și este format din 2 rezervoare cu capacitatea de 227 mii litri. Aceste rezervoare au fost proiectate astfel încât frecvența armonică a mișcării apei să echilibreze mișcarea armonică a turnului.



Fig. 3 One Wall Center, Vancouver, Canada

Taipei 101, cunoscut si sub numele Taipei World Finacial Center, a fost cea mai inalta constructie incepand cu 2004 pana la construirea lui Burj Khalifa. Are 101 etaje si o inaltime de 508m.



Fig. 4 Taipei 101, Taipei, Taiwan

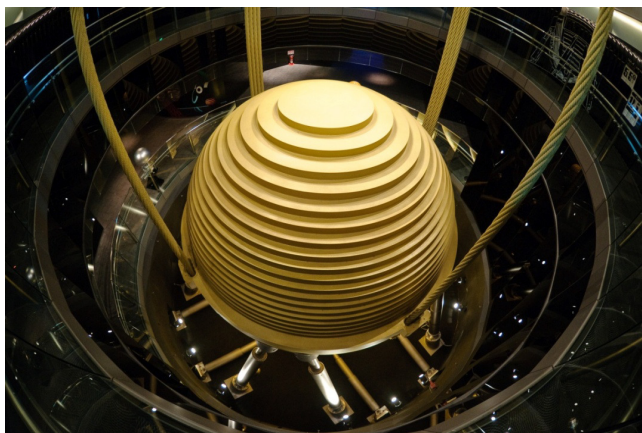


Fig. 5 Pendulul tunului Taipei 101

Inginerii lui Taipei 101, au proiectat un pendul din otel cu greutatea de 660 tone care sa actioneze ca un amortizor cu masa acordata. Suspendat intre etajele 92 si 87, pendulul se misca decalat fata de structura, pentru a contracara efectul dat de rafalele de vant. Pendulul cu diametru de 5.5m este format din 41 placi circulare din otel, cu inaltimea de 125mm.

Alte 2 amortizoare cu masa acordata, cu greutatea de 6 tone, sunt instalate la varful spirei si ajuta la prevenirea pagubelor cauzate de incarcările mari date de vant.

Amortizorul cu mase acordate s-a folosit si in lucrari ingineresti precum Podul Akashi Kaikyō. Cu o lungime totala de 3911m, podul are penduli proiectati sa opereze la frecventa de rezonata a podului, amortizand fortele date de incarcările din vant si seism.



Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată



Fig. 6 Podul Akashi Kaikyō

### 3. Principii si notiuni teoretice

Principiul de reducere a vibratiilor structurale prin introducerea TMD-ului intr-o structura este de a transfera energia de vibratie catre TMD pentru a fi disipata. Astfel frecventa TMD-ului este acordata cu o anumita frecventa a structurii. Cand aceasta frecventa este atinsa, TMD-ul va rezona, defazat fata de miscarea structurii.

Comparativ cu alte metode de disipare, utilizarea TMD-ului impune folosirea unei mase si a unor deplasari mari. Prinderea si calibrarea TMD-ului este o problema foarte importanta in proiectare sistemului. In mod usual masa sistemului de amortizare se incadreaza in valori cuprinse intre 0.25..1% din masa cladiri pe modul fundamental de vibratie. In anumite cazuri, restrictia de spatiu nu permite amplasarea unui sistem traditional cu masa acordata. Aceasta limitare a dus la crearea unor sisteme alternative cum ar fi pendulul multi-stadiu, pendulul inversat, rulmenti hidrostatici. Pentru acordarea sistemelor se folosesc de obicei arcurile cu spire sau arcurile pneumatice cu rigiditate variabila.

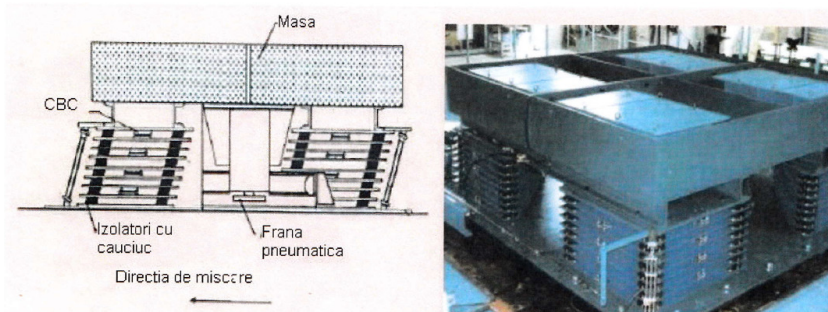


Fig. 7 Exemplu de sistem cu masa acordata

Problemele care apar cu spatiul pot fi rezolvate prin introducerea unui pendul:

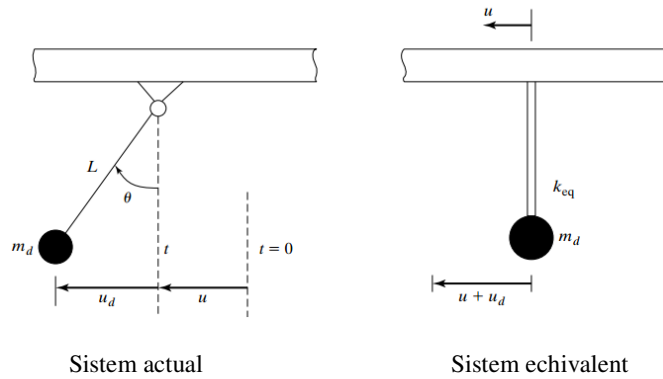


Fig. 8 Schema unui pendul TMD

Ecuatia de miscare pe orizontala este:  $T \sin \theta + \frac{W_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0$

unde  $T$  este tensiunea in cablu;  $u(t)$  – deplasarea structurii;  $u_d(t)$  – deplasarea masei pendulului;  $W_d$  – greutatea pendulului;  $m_d$  – masa pendulului

$$u_d = L \sin \theta \cong L \theta; \quad T \cong W_d$$

Deci:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u}$$

De unde se deduce ca rigiditatea echivalenta la forfecare este:

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L}$$

Pulsatia pendulului este:

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L}$$

De unde rezulta perioada:

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Singura limitare majora prin introducerea unui pendul este ca lungimea pendulului sa fie mai mare decat inaltimea unui nivel. Aceasta problema se poate rezolva utilizand schema de mai jos:

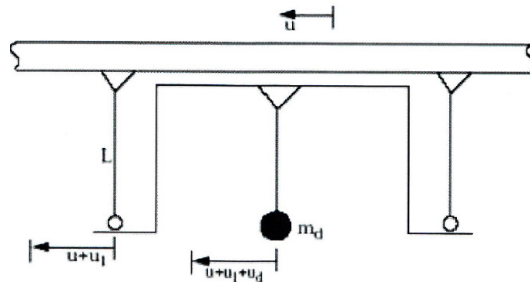


Fig. 9 Rezolvarea limitarii date de lungimea prea mare a unui pendul

Legatura interioara rigida, amplifica miscarea suportului pentru pendul rezultand urmatoarea ecuatie de echilibru:

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

$$m_d(\ddot{u} + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_d) + \frac{W_d}{L} u_d = 0$$

Legatura rigida se misca in faza cu amortizorul si are aceeasi amplitudine a deplasarii. Considerand  $u_1 = u_d$  avem:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{2L} u_d = -\frac{m_d}{2} \ddot{u}$$

Rigiditatea echivalenta este  $\frac{W_d}{2L}$  ceea ce arata ca lungimea efectiva este  $2L$ . Prin urmare fiecare legatura aditionala creste lungimea efectiva cu valoarea "L".

#### 4. Calculul sistemelor de tip TMD

Analiza principala a sistemelor TMD, implica precizarea raspunsului unui sistem cu doua grade de libertate, primul fiind gradul de libertate primar (structura), iar cel de-aldoilea fiind al TMD. Pentru aceasta se face apel la procedee matematice de calcul al raspunsului sistemului cu doua grade de libertate supus excitatiilor armonice in domeniul frecventelor. In continuare se vor ilustra aceste raspunsuri pentru diferite cazuri.

Prin urmare pentru a dimensiona un dispozitiv de tip "amortizor cu masa acordata" trebuie urmati cativa pasi de principiu:

- In prima faza se stabileste locatia (pozitia amortizorului) astfel incat aceasta sa coincide cu punctual de amplitudine maxima al formei modale ce se va controla.
- Masa sistemului primar va fi masa participante pe modul ce se vrea controlata prin intermediul amortizorului.
- Cu cat raportul maselor,  $\mu$ , este mai mare cu atat raspunsul va fi mai mic (amortizorul va fi mai putin sensibil la acordare). Prin urmare se alege cel mai mare raport posibil.
- Se determina raportul optim al frecventelor (perioadelor),  $f$ , din care se calculeaza rigiditatea amortizorului,  $k_d = m_d \omega_d^2$ .
- Se determina fractiunea optima din amortizarea critica  $\zeta_{d,opt}$  cu ajutorul careia se calculeaza amortizarea dispozitivului,  $c_{d,opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_d m_d$ .

Parametrul in functie de care se face optimizarea este "deplasarea" si este folosit pentru a asigura integritatea structurii si a elementelor nestructurale. Insa, se mai poate folosi ca parametru de optimizare si "acceleratia" pentru cazul echipamentelor grele/sensibile la acceleratii mari. Pentru aplicatiile seismice de larga utilizare, Villaverde (1985) sugereaza folosirea urmatoarelor ecuatii cu parametrii optimi, cu raportul maselor bazat pe masa modala si vectorul propriu normalizat in punctual de instalare a dispozitivului:

$$f_{opt} = 1$$
$$\zeta_{d,opt} = \zeta + \mu$$

Pentru aceleasi conditii, Fadek (1997) gaseste ecuatiile:

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \left[ 1 - \zeta \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}} \right]$$

$$\zeta_{d,opt} = \frac{\zeta}{1 + \zeta} + \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}}$$

Observatie:

Acest tip de dispozitive, sunt eficiente in aplicatiile seismice cu amortizare scazuta  $\zeta = 0.02$ . Pentru structuri cu amortizare  $\zeta = 0.05$ , nu sunt foarte eficiente deoarece raportul maselor devine prea mare. De asemenea nu sunt eficiente nici in cazul structurilor foarte rigide cu perioade de  $0.1s + 0.2s$ .

Sistem	Tipul excitatiei	Excitatie aplicata	Parametru optimizat	Raportul optim de frecvente $f_{opt}$	Amortizarea optima $\zeta_{d,opt}$	Raspunsul maxim optimizat al structurii $u_r$
Sistem amortizat, TMD amortizat	Armonica determinista	Masei primare si bazei	Deplasarea masei primare	-	-	$\frac{(p_0 + ma_0)/k}{\sqrt{2\zeta(1 - \zeta^2)}}$
Sistem neamortizat, TMD neamortizat		Masei primare	Deplasarea masei primare	-	-	-
Sistem neamortizat, TMD amortizat		Masei primare	Deplasarea masei primare	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$	$\frac{p_0}{k} \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}}$
Sistem neamortizat, TMD amortizat		Masei primare	Acceleratia masei primare	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu/2)}}$	$\frac{p_0}{k} \sqrt{\frac{2}{\mu(1 + \mu)}}$
Sistem neamortizat, TMD amortizat		Bazei	Deplasarea masei primare	$\frac{\sqrt{1 - \mu/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)(1 - \mu/2)}}$	$\frac{ma_0}{k} (1 + \mu) \sqrt{\frac{2}{\mu}}$
Sistem neamortizat, TMD amortizat		Alatoare	Bazei	Acceleratia masei primare	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$



Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

Sistem neamortizat, TMD amortizat		Masei primare	Deplasarea masei primare	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1+\frac{3\mu}{4})}{4(1+\mu)(1+\frac{\mu}{2})}}$	$\frac{p_0}{k} \sqrt{\frac{(1+\frac{3\mu}{4})}{\mu(1+\mu)}}$
Sistem neamortizat, TMD amortizat	Armonica determinista	Bazei	Deplasarea masei primare	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1-\frac{\mu}{4})}{4(1+\mu)(1-\frac{\mu}{2})}}$	$\frac{p_0}{k} \sqrt{\frac{(1+\frac{3\mu}{4})}{\mu(1+\mu)}}$
Sistem amortizat, TMD amortizat		Masei primare	Deplasarea masei primare	$\frac{1}{1+\mu} - (0.2$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8+(1+\mu)}} + ($	

## 5. Studii de caz I

Avand in vedere cele descrise anterior in mod teoretic, in cele ce urmeaza se considera studii de caz, pentru structuri din beton armat cu diferite forme in plan avand un regim de inaltime pentru suprastructura de P+39E (40 niveluri). Inaltimea de nivel a fost considerat 3m. Structurile se clasifica astfel:

Funcție de sistemul structural:

- sistem structural cu cadre din beton armat;
- sistem structural dual (cadre si pereti din beton armat);

Funcție de forma in plan:

- Circulara;
- Patrata;
- Dreptunghiulara.

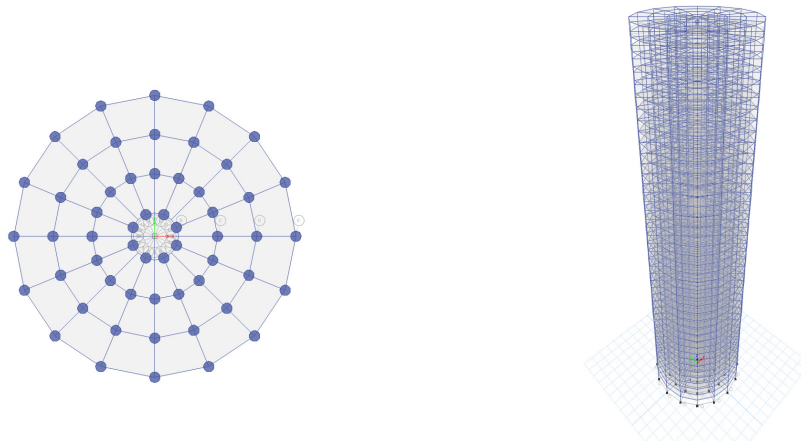


Fig. 10 Structura cu cadre din b.a. avand forma circulara - plan si elevatie

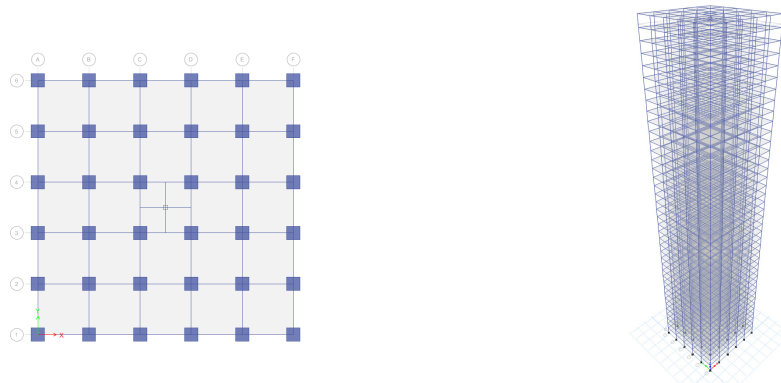


Fig. 11 Structura cu cadre din b.a. avand forma patrata - plan si elevatie

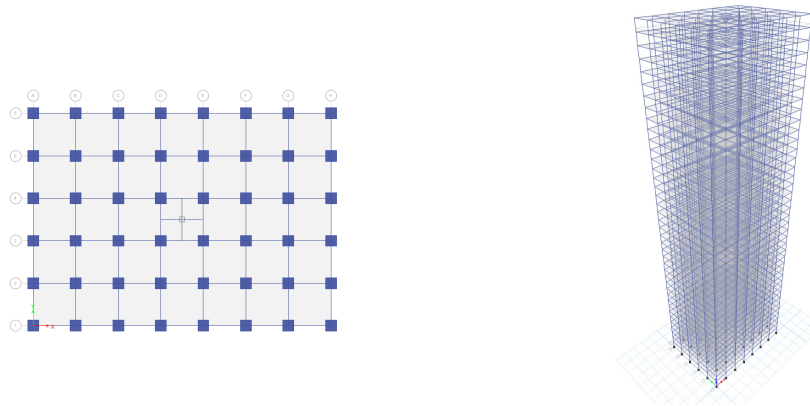


Fig. 12 Structura cu cadre din b.a. avand forma dreptunghiulara - plan si elevatie

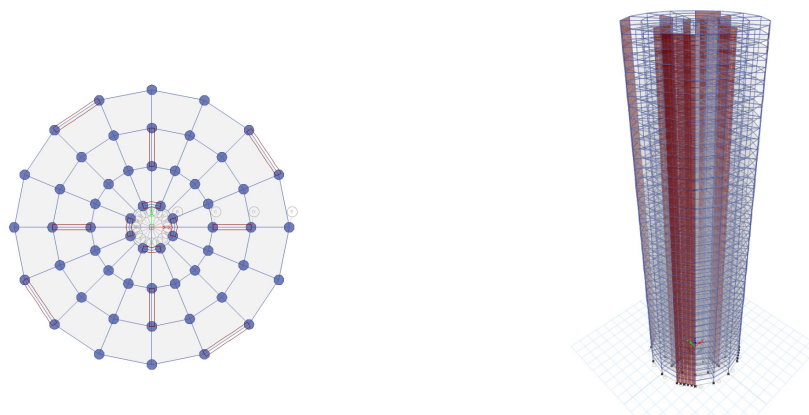


Fig. 13 Structura duala din b.a. avand forma circulara - plan si elevatie

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

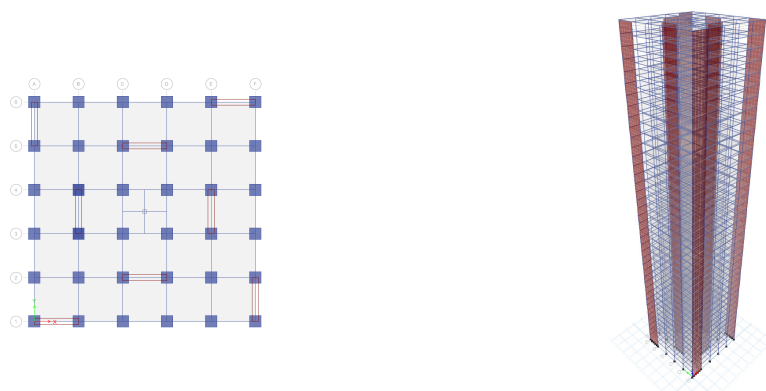


Fig. 14 Structura duala din b.a. avand forma patrata - plan si elevatie

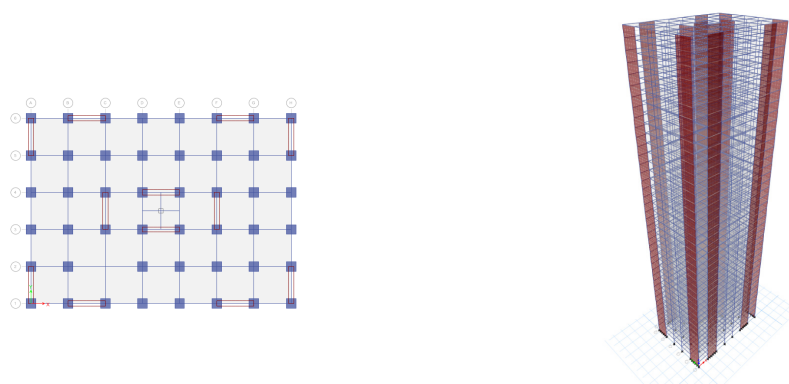


Fig. 15 Structura duala din b.a. avand forma dreptunghiulara - plan si elevatie

Pentru a minimiza numarul variabilelor si a evidentia mai bine folosirea TMD-urilor structurile au distantele intre axe 5m.

Pe langa incarcările provenite din greutatea proprie a structurii au fost considerate și următoarele incarcări:

Clasa betonului este C30/37 cu modulul de elasticitate  $E=33000 \text{ N/mm}^2$

Dimensiunile elementelor structurale considerate sunt următoarele:

Tip Structura	Forma in plan	Latura Stalpiler [cm]	Grinda Longitudinala [cm]	Grinda Transversala [cm]	Grinda Radiala [cm]	Grosimi Pereti [cm]
Structura in cadre	Circulara	130	-	-	35x80	-
	Patrata	130	35x80	35x75	-	-
	Dreptunghiulara	130	35x80	35x80	-	-
Structura duala	Circulara	130	-	-	35x80	70
	Patrata	130	35x80	35x80	-	70
	Dreptunghiulara	130	35x80	35x80	-	70

Pentru analiza cu spectre de raspuns s-a folosit urmatorul spectru de proiectare:

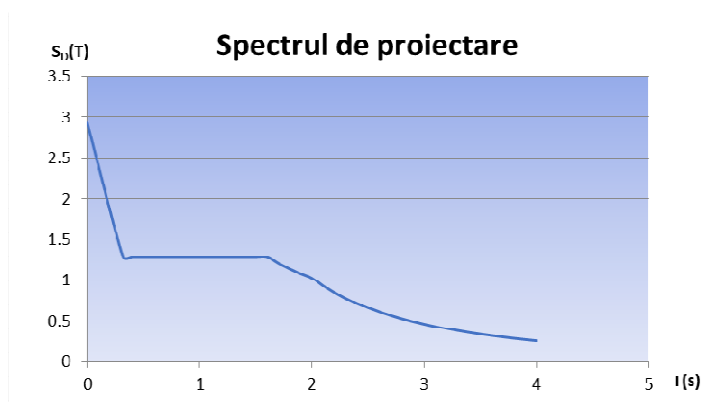


Fig. 16 Spectru de proiectare pentru  $a_g=0.30g$

Pentru dimensionarea sistemelor de amortizare cu mase acordate am tinut cont de urmatorii pasi:

- In prima faza se stabileste locatia (pozitia amortizorului) astfel incat aceasta sa coincida cu punctual de amplitudine maxima al formei modale ce se va controla.
- Masa sistemului primar va fi masa participant pe modul ce se vrea controlata prin intermediul amortizorului.
- Cu cat raportul maselor,  $\mu$ , este mai mare cu atat raspunsul va fi mai mic (amortizorul va fi mai putin sensibil la acordare). Prin urmare se alege cel mai mare raport posibil.
- Se determina raportul optim al frecventelor (perioadelor),  $f$ , din care se calculeaza rigiditatea amortizorului,  $k_d = m_d \omega_d^2$ .
- Se determina fractiunea optima din amortizarea critica  $\zeta_{d,opt}$  cu ajutorul careia se calculeaza amortizarea dispozitivului,  $c_{d,opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_d m_d$ .

#### Modelarea sistemului cu masa acordata:

Asa cum s-a descris anterior “amortizorul cu masa acordata” trebuie positionat in punctual de amplitudine maxima a modului ce se vrea controlat. In cazurile studiate acest punct poate fi orice punct de pe planseul ultimului nivel.

Sistemul TMD se modeleaza cu ajutorul unui izolator de tip “pendul de frecare” (friction pendulum) iar pentru a simula miscarea fizica a TMD-ului, iar pentru partea de amortizare s-a folosit un “link” de tip “amortizor vascos” (Damper). In program se introduc 2 legaturi (link) cu aceste denumiri si cu caracteristicile determinate prin calcul.

La modelare trebuie tinut cont de modul de desenare al legaturilor (de jos in sus) pentru a putea fi definita corect miscarea de amortizare. Pentru o comportare buna, punctul aflat pe planseul de la ultimul nivel va fi situat in centrul acestuia, iar cel liber pe aceeasi verticala situat la distanta egala cu lungimea pendulului.

De asemenea trebuie tinut cont ca punctului liber trebuie sa i se atribuie mase pe directiile principale, mase determinate prin calculul TMD.

$\mu$  - Raportul maselor;

$\zeta$  – Fractiune din amortizarea critica;

$m_{mod,1}$  - masa antrenata pe modul 1 de vibratie;

$m_{mod,2}$  - masa antrenata pe modul 2 de vibratie;

$$m_d = \mu \times m_{mod,1}$$

$$f_{out} = \frac{1}{1 + \mu} - (0.241 + 1.7\mu - 2.6\mu^2)\zeta - (1.0 - 1.9\mu + \mu^2)$$

$$\zeta_{d,out} = \sqrt{\frac{3\mu}{8 + (1 + \mu)} + (0.13 + 0.12\mu + 0.4\mu^2)\zeta - (0.01 + 0.9\mu + 3\mu^2)\zeta^2}$$

$$f_d = f_{mod,1} \times f_{out}$$

$$T_d = \frac{1}{f_d}$$

$$\omega^2 = 2\pi f_d$$

$$k_d = m_d \omega_d^2$$

$$c_{d,out} = 2\zeta_{d,out} \omega_d m_d$$

$$L_{pendul} = \frac{T_d^2 \times g}{4\pi^2}$$

Pentru structurile analizate caracteristicile TMD-urilor sunt urmatoarele:

Tipul structurii	Forma in plan	Lungimea pendulului [m]	Rigiditatea $k_d$ [kN/m]	Amortizarea dispozitivului $c_d$ [kN/s]	Masa pe modul 1 [kN]	Masa pe modul 2 [kN]
Structura in cadre	Circulara	2.35	22153	4143	5275	5275
	Patrata	2.3	15451	2881	3657	3657
	Dreptunghiulara	2.2	22325	4030	5019	4953
Structura duala	Circulara	1.9	28238	4740	5418	5418
	Patrata	1.65	21450	3383	3634	3634
	Dreptunghiulara	1.7	31128	4934	5325	5390

## 6. Studii de caz II

In continuare pentru aplicarea notiunilor descrise in capitolele anterioare vom considera 1 structură în cadre din beton armat cu diferite niveluri de înălțime: P+40E, P+30E, P+20E, P+10E. Inaltimea de nivel a fost considerat 3m. Forma in plan a structurii este dreptunghiulara.

Pentru a minimiza numarul variabilelor si a evidenția mai bine folosirea TMD-urilor structurile au distanța dintre axe 5m.

Pe langă încărcările provenite din greutatea proprie a structurii au fost considerate si urmatoarele incarcari:

La nivelul etajelor curente:

- Pardoseala si instalatii –  $2\text{kN/m}^2$
- Pereti despartitori –  $0.5\text{ kN/m}^2$
- Incarcarea utila –  $2\text{ kN/m}^2$

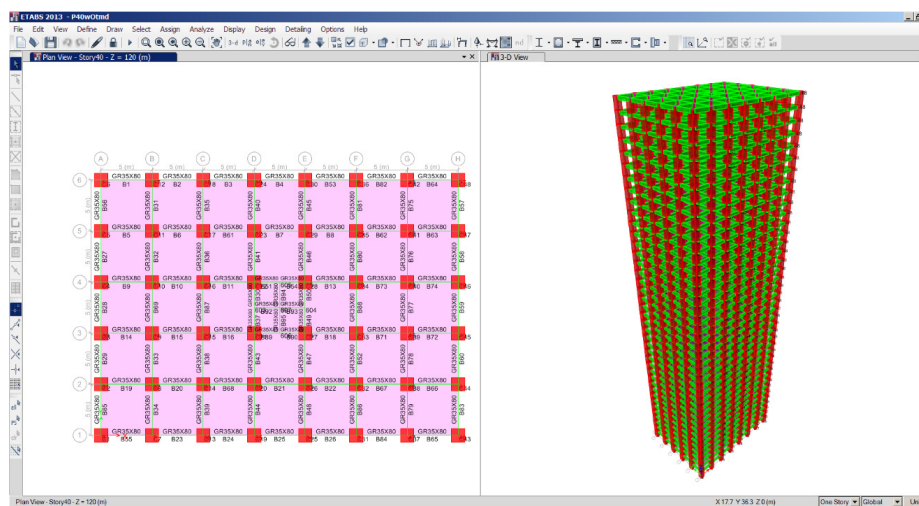


Fig. 25 Structura in cadre cu forma dreptunghiulara P+40E- plan si elevatie

La nivelul ultimului etaj:

- Incarcarea utila  $2\text{ kN/m}^2$
- Incarcarea din zapada  $2\text{ kN/m}^2$
- Termoizolatiea  $3\text{ kN/m}^2$
- Instalatii  $0.5\text{ kN/m}^2$
- Atic  $5\text{ kN/ml}$  – pe grinzile de contur

Clasa betonului este C20/25 cu modulul de elasticitate  $E=33000\text{ N/mm}^2$

Dimensiunile elementelor sunt urmatoarele:

Tip Structura	Regim înaltime	Latura Stalpului [cm]	Grinda Longitudinala [cm]	Grinda Transversala [cm]
Structura in cadre	P+40E	130	35x80	35x80
	P+30E	130	35x80	35x80
	P+20E	100	35x65	35x65
	P+10E	80	30x60	30x60

Pentru dimensionarea sistemelor de amortizare cu mase acordate am tinut cont de uratorii pasi:

- In prima faza se stabileste locatia (pozitia amortizorului) astfel incat aceasta sa coincida cu punctul de amplitudine maxima al formei modale ce se va controla.



Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

- Masa sistemului primar va fi masa participant pe modul ce se vrea controlata prin intermediul amortizorului.
- Cu cat raportul maselor,  $\mu$ , este mai mare cu atat raspunsul va fi mai mic (amortizorul va fi mai putin sensibil la acordare). Prin urmare se alege cel mai mare raport posibil.
- Se determina raportul optim al frecventelor (perioadelor),  $f$ , din care se calculeaza rigiditatea amortizorului,  $k_d = m_d \omega_d^2$ .
- Se determina fractiunea optima din amortizarea critica  $\zeta_{d,opt}$  cu ajutorul careia se calculeaza amortizarea dispozitivului,  $c_{d,opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_d m_d$ .

Modelarea sistemului cu masa acordata:

Asa cum s-a stabilit "amortizorul cu masa acordata" trebuie pozitionat in punctual de amplitudine maxima a modului ce se vrea controlat. In cazurile studiate acest punct poate fi orice punct de pe planseul ultimului nivel.

Sistemul TMD se modeleaza cu ajutorul unui izolator de tip "pendul de frecare" (friction pendulum) iar pentru a simula miscarea fizica a TMD-ului, iar pentru partea de amortizare s-a folosit un "link" de tip "amortizor viscos" (Damper). In program se introduc 2 legaturi (link) cu aceste denumiri si cu caracteristicile determinate prin calcul.

La modelare trebuie tinut cont de modul de desenare al legaturilor (de jos in sus) pentru a putea fi definita corect miscarea de amortizare. Pentru o comportare buna, punctul aflat pe planseul de la ultimul nivel va fi situat in centrul acestuia, iar cel liber pe aceeasi verticala situat la distanta egala cu lungimea pendulului.

De asemenea trebuie tinut cont ca punctului liber trebuie sa i se atribuie mase pe directiile principale, mase determinate prin calculul TMD.

$\mu$  - Raportul maselor;

$\zeta$  - Fractiune din amortizarea critica;

$m_{mod.1}$  - masa antrenata pe modul 1 de vibratie;

$m_{mod.2}$  - masa antrenata pe modul 2 de vibratie;

$$m_d = \mu \times m_{mod.1}$$

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} - (0.241 + 1.7\mu - 2.6\mu^2)\zeta - (1.0 - 1.9\mu + \mu^2)$$

$$\zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8 + (1 + \mu)}} + (0.13 + 0.12\mu + 0.4\mu^2)\zeta - (0.01 + 0.9\mu + 3\mu^2)\zeta^2$$

$$f_d = f_{mod.1} \times f_{opt}$$

$$T_d = \frac{1}{f_d}$$

$$\omega^2 = 2\pi f_d$$

$$k_d = m_d \omega_d^2$$

$$c_{d,opt} = 2\zeta_{d,opt} \omega_d m_d$$

$$L_{pendul} = \frac{T_d^2 \times g}{4\pi^2}$$

Pentru structurile analizate caracteristicile TMD-urilor sunt urmatoarele:

Tipul structurii	Regim înaltime	Lungimea pendulului [m]	Rigiditatea $k_d$ [kN/m]	Amortizarea dispozitivului $c_d$ [kN/s]	Masa pe modul 1 [kN]	Masa pe modul 2 [kN]
Structura in cadre	P+40E	2.4	21248	4032	5209	5275
	P+30E	1.1	33252	4265	3276	3757
	P+20E	0.7	28376	2872	1979	1987
	P+10E	0.15	49765	2540	883	885
	P+5E	1.7	31128	4934	5325	5390

In continuare se va prezenta in paralel comportarea structurilor cu si fara sistemul de amortizare cu masa acordata.

### 6.1. Structura in cadre P+40E

In urma analizei modala cu spectru de raspuns s-au obtinut urmatoarele perioade proprii pentru primele 4 moduri de vibratie:

Mod	Structura Fara TMD				Structura Cu TMD			
	Perioada	Ux	Uy	Rz	Perioada	Ux	Uy	Rz
1	2.769	0	0.8001	0	3.398	0	0.4197	0
2	2.62	0.8102	0	0	3.312	0.3573	0	0
3	2.333	0	0	0.8274	2.457	0	0.3916	0
4	0.895	0	0.1167	0	2.384	0.4633	0	0

Se observa ca dupa introducerea TMD-ului perioadele s-au marit si repartitia maselor s-a modificat fundamental. Astfel:

- In primul caz (fara TMD) pe modurile 1 si 2 factorul de participare al maselor era 80 %, rezultand forte seismice mari.
- Dupa amplasarea TMD-ului acesti factori de participare ai maselor practic se impart in doua si se distribuie pe cate 2 moduri pe fiecare directive principala. Fenomenul de torsiune generala “coboara” dincolo de modul 4.

Daca analizam din punct de vedere al deplasarilor, se pot observa reduceri ale drift-urilor, in medie cu 20% pe directiile X si Y atat la SLS cat si la SLU, asa cum se evidentiaza in figurile de mai jos:

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

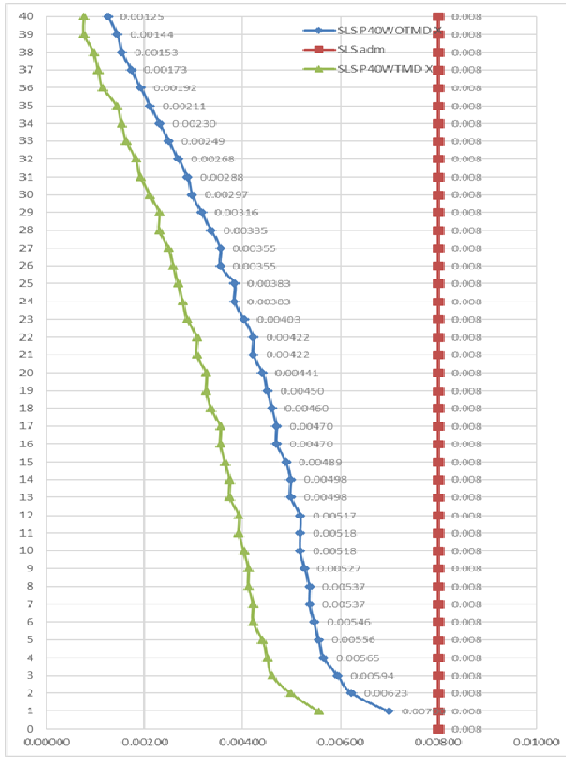


Fig. 26 Deplasari relative pe directia X la SLS

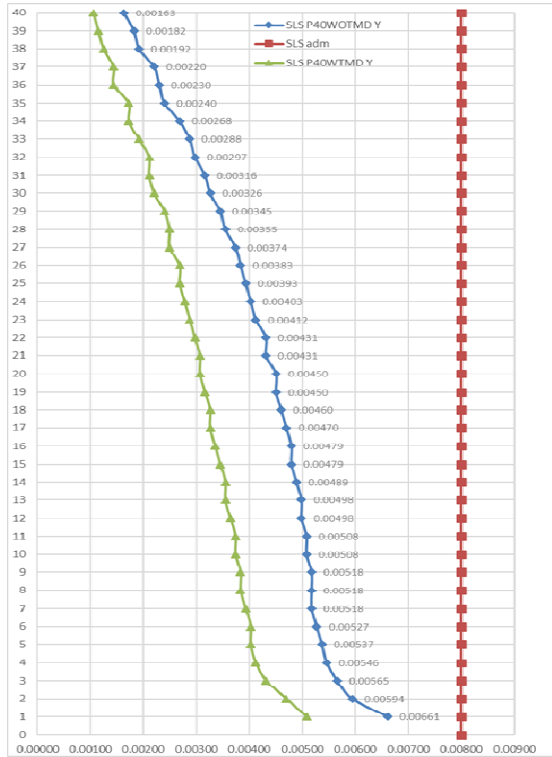


Fig. 27 Deplasari relative pe directia Y la SLS

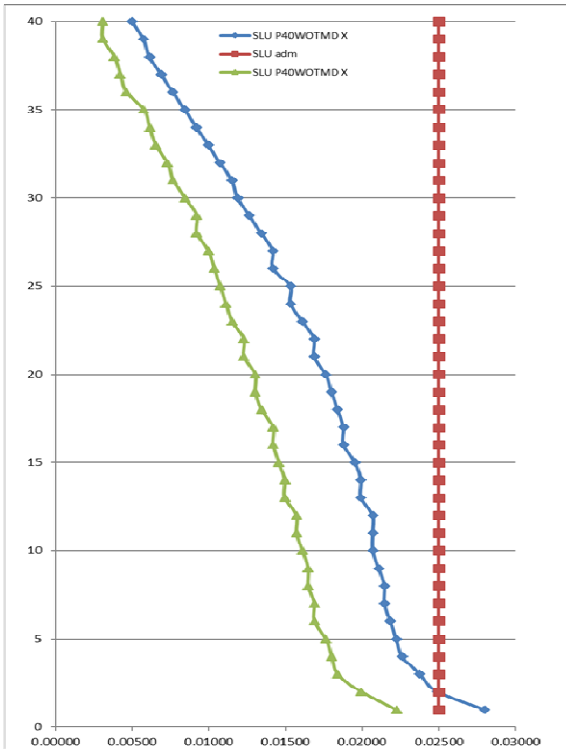


Fig. 28 Deplasari relative pe directia X la SLU

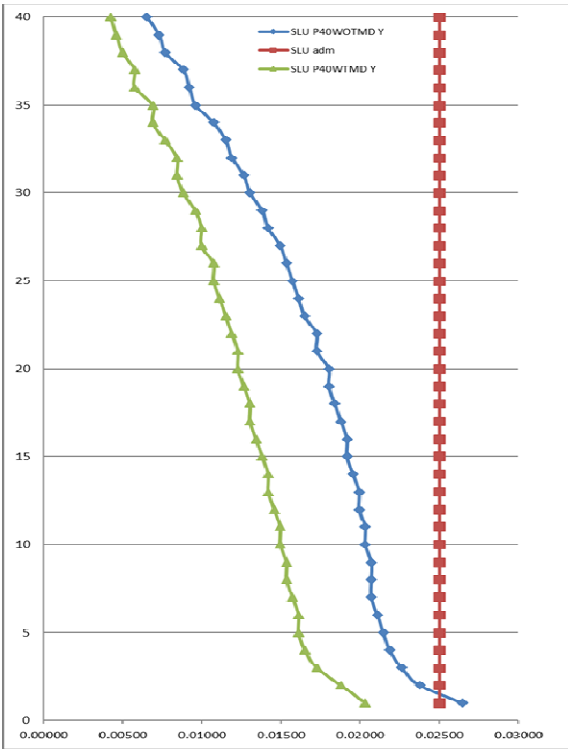


Fig. 29 Deplasari relative pe directia Y la SLU

Pentru a evidenta comportarea TMD-ului in reducerea eforturilor in elemente au fost selectate:

- Un stalp marginal – denumit C19;
- Un stalp interior – denumit C15;
- O grinda – denumita B20;

Se observa o reducere a eforturilor in elementele structurii;

- In stalpul marginal C19 forta axiala a fost redusa in medie cu 5% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 25%.
- In stalpul interior C15 forta axiala a fost redusa in medie cu 8% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 25%.
- In reazemul din stanga al grinzii B20 momentele incovoietoare au fost reduse in medie cu 25%, iar in reazemul din dreapta o reducere in medie cu 30%.

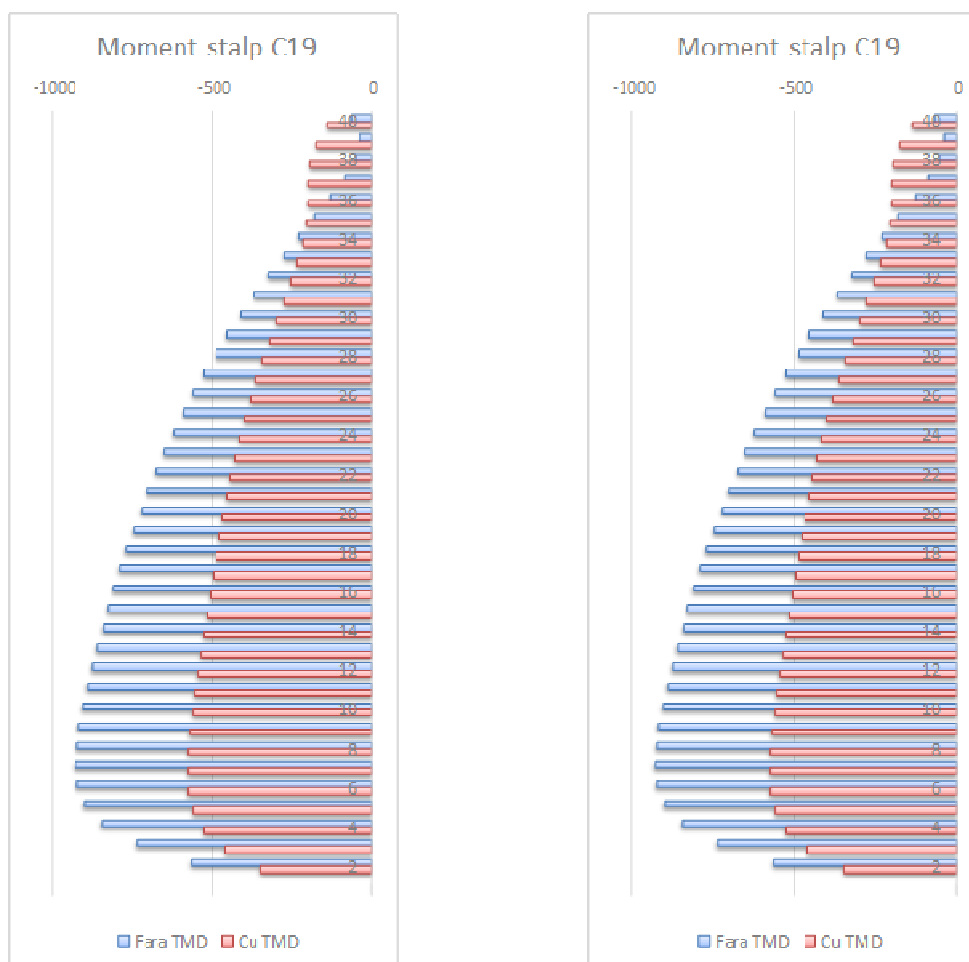


Fig. 30 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul marginal C19

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

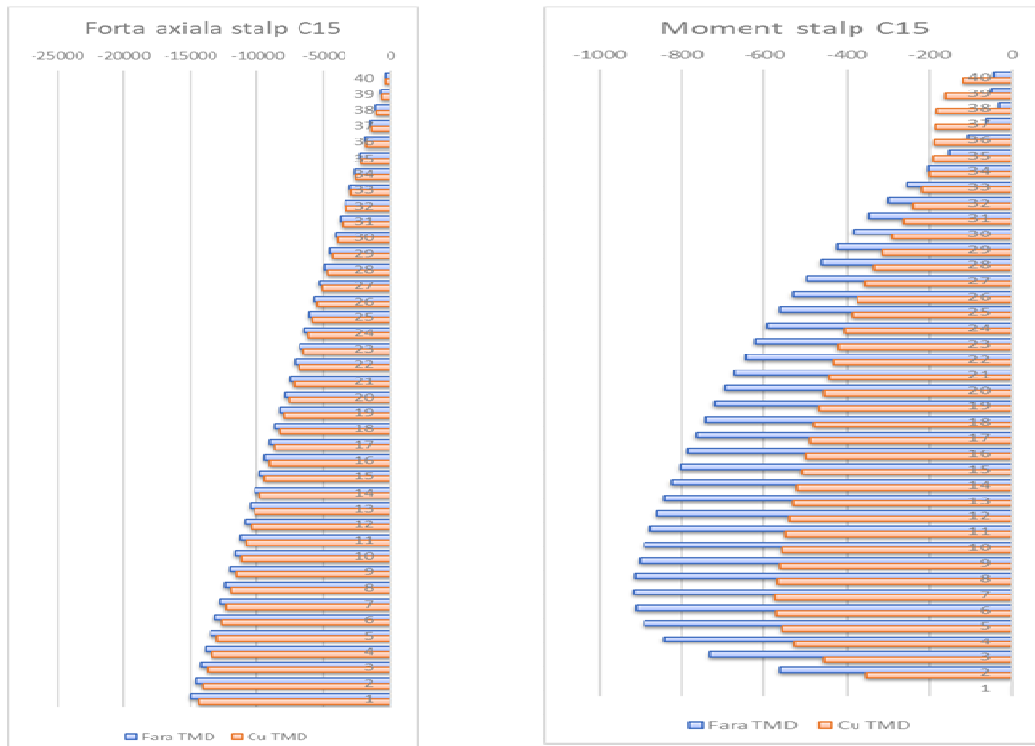


Fig. 31 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul interior C15

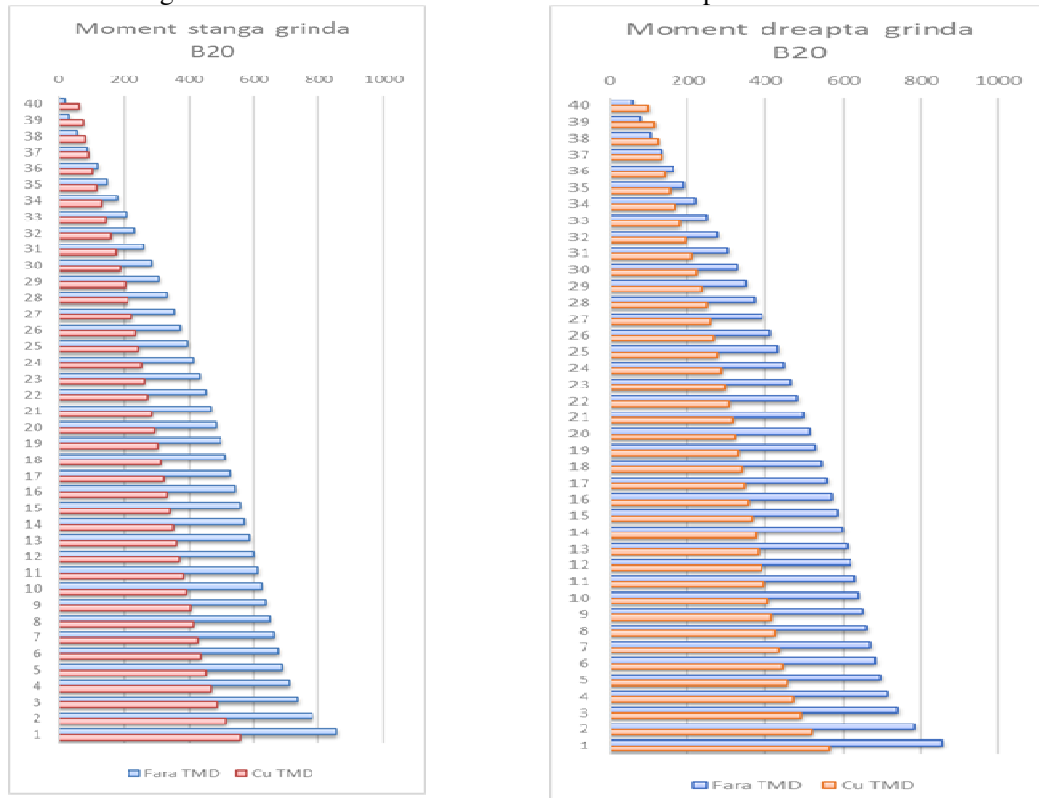


Fig. 32 Momentele din reazemele grinzii B20

## 6.2. Structura in cadre P+30E

In urma analizei modala cu spectru de raspuns s-au obtinut urmatoarele perioade proprii pentru primele 4 moduri de vibratie:

Mod	Structura Fara TMD				Structura Cu TMD			
	Perioada	Ux	Uy	Rz	Perioada	Ux	Uy	Rz
1	1.872	0	0.7629	0	2.589	0	0.4573	0
2	1.793	0.7693	0	0	2.531	0.4279	0	0
3	1.623	0	0	0.7789	1.623	0	0	0.7789
4	0.597	0	0.1077	0	1.58	0	0.3334	0

Se observa ca dupa introducerea TMD-ului perioadele s-au marit si repartitia maselor s-a modificat fundamental. Astfel:

- In primul caz (fara TMD) pe modul 1 factorul de participare al maselor era 76.29%, iar pe modul 2 factorul de participare al maselor era 76.93%.
- Dupa amplasarea TMD-ului acesti factori de participare ai maselor practic se impart in doua si se distribuie pe cate 2 moduri pe fiecare directie principala. Fenomenul de torsiune generala “coboara” dincolo de modul 4.

Daca analizam din punct de vedere al deplasarilor, se pot observa reduceri ale drift-urilor, in medie cu 20% pe directiile X si Y atat la SLS cat si la SLU, asa cum se evidentiaza in figurile de mai jos:

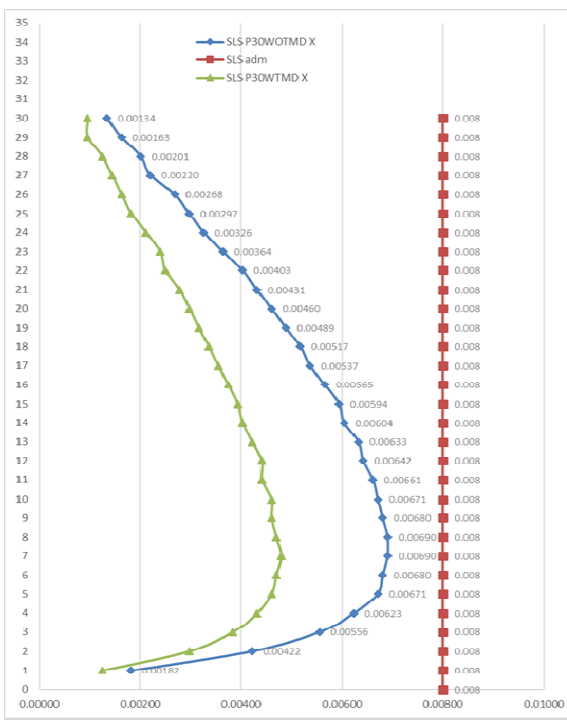


Fig. 33 Deplasari relative pe directia “X” la SLS

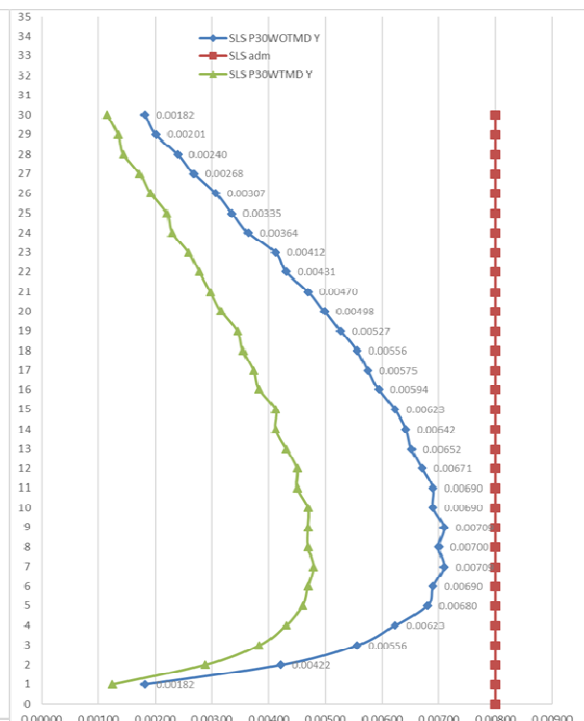


Fig. 34 Deplasari relative pe directia “Y” la SLS



## Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

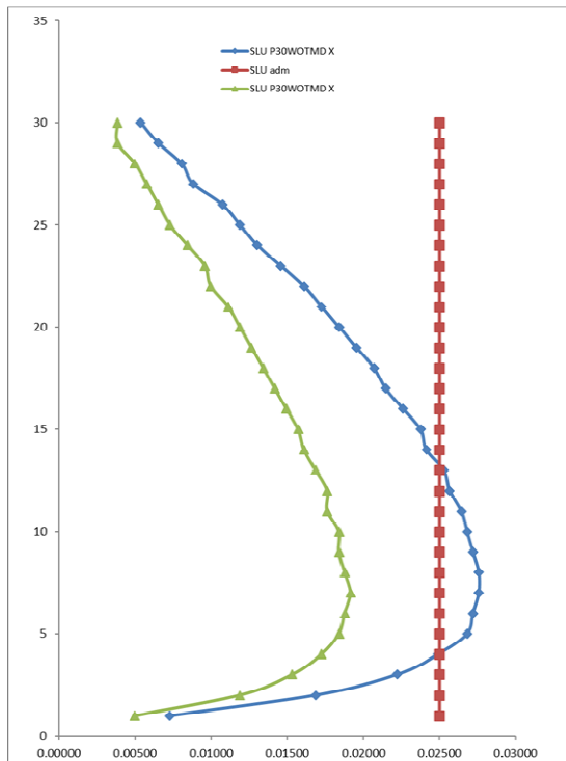


Fig. 35 Deplasari relative pe directia "X" la SLU

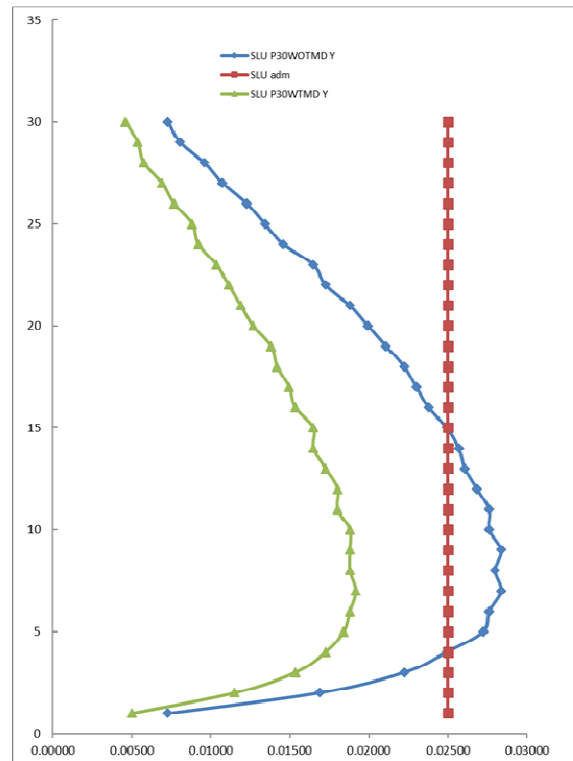


Fig. 6 Deplasari relative pe directia "Y" la SLU

Pentru a evidenta comportarea TMD-ului in reducerea eforturilor in elemente au fost selectate:

- Un stalp de colt – denumit C32;
- Un stalp marginal – denumit C19;
- Un stalp interior – denumit C15;
- O grinda – denumita B20;

Se observa o reducere a eforturilor in elementele structurii;

- In stalpul de colt C32 forta axiala a fost redusa in medie cu 8% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 20%.
- In stalpul marginal C19 forta axiala a fost redusa in medie cu 5% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 25%.
- In stalpul interior C15 forta axiala a fost redusa in medie cu 5% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 18%.
- In reazemele grinzii B20 momentele incovoietoare au fost reduse in medie cu 25%.

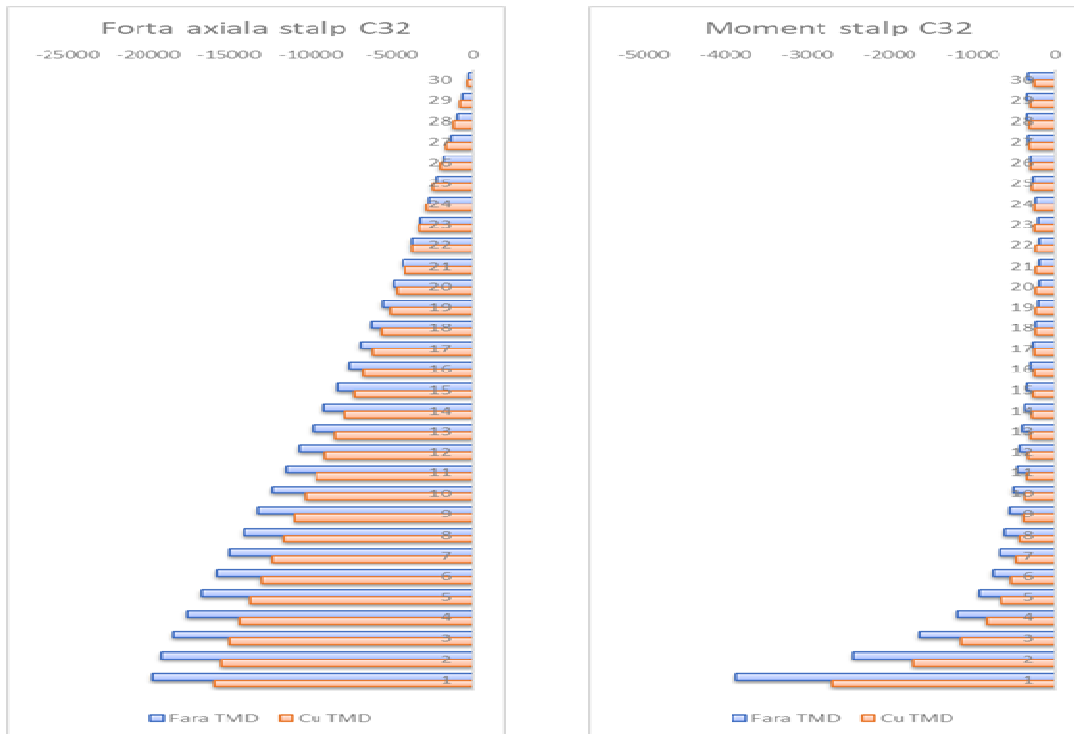


Fig. 37 Forța axială și momentul încovoietor în stalpul de colț C32

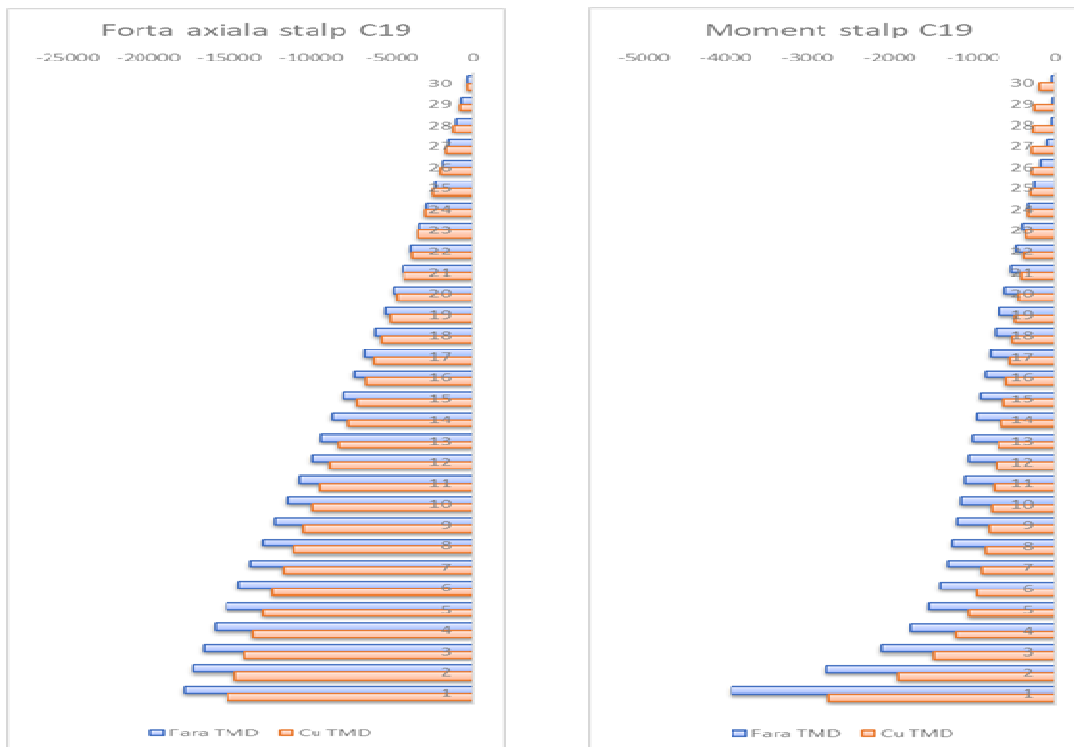


Fig. 38 Forța axială și momentul încovoietor în stalpul marginal C19

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

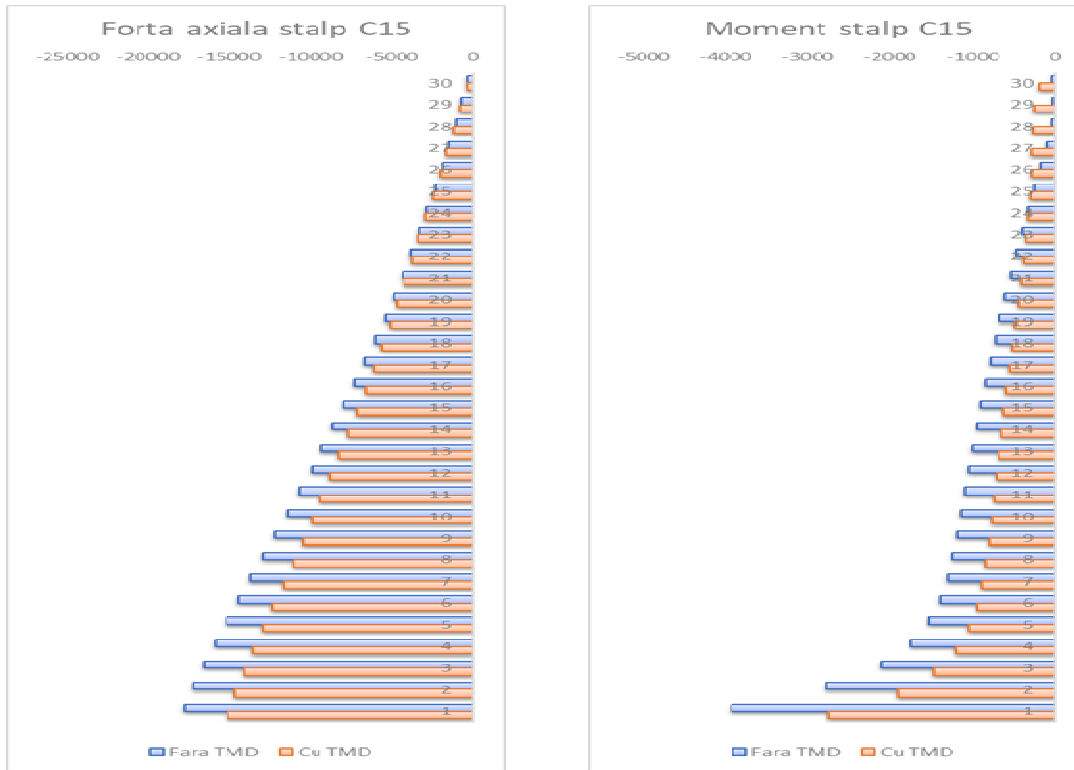


Fig. 39 Forța axială și momentul încovoietor în stalpul interior C15

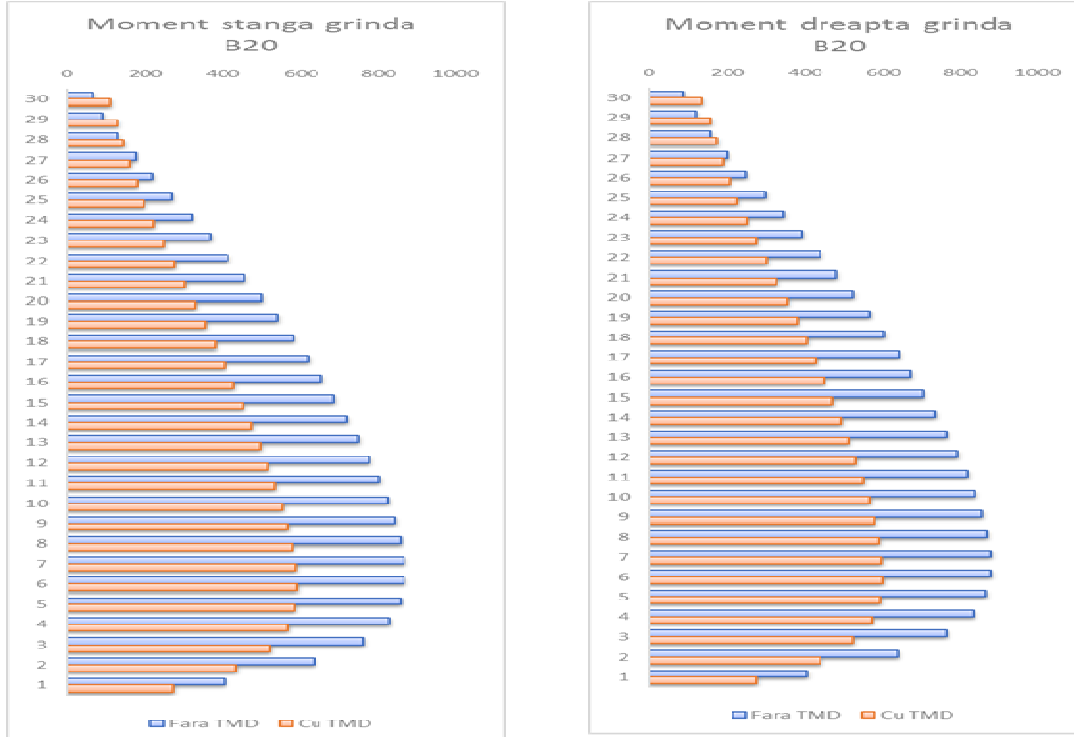


Fig. 40 Momentele din reazemele grinzii B20

### 6.3. Structura in cadre P+20E

In urma analizei modala cu spectru de raspuns s-au obtinut urmatoarele perioade proprii pentru primele 4 moduri de vibratie:

Mod	Structura Fara TMD				Structura Cu TMD			
	Perioada	Ux	Uy	Rz	Perioada	Ux	Uy	Rz
1	1.477	0	0.7694	0	2.05	0	0.4768	0
2	1.434	0.7726	0	0	2.018	0.457	0	0
3	1.323	0	0	0.7761	1.323	0	0	0.7761
4	0.469	0	0.1009	0	1.237	0	0.3217	0

Se observa ca dupa introducerea TMD-ului perioadele s-au marit si repartitia maselor s-a modificat fundamental. Astfel:

- In primul caz (fara TMD) pe modurile 1 si 2 factorii de participare ai maselor erau 76.94% si 77.26%, rezultand forte seismice mari.
- Dupa amplasarea TMD-ului acesti factori de participare ai maselor practic se impart in doua si se distribuie pe cate 2 moduri pe fiecare directive principala. Fenomenul de torsiune generala "coboara" dincolo de modul 4.

Daca analizam din punct de vedere al deplasarilor, se pot observa reduceri ale drift-urilor, in medie cu 25% pe directiile X si Y atat la SLS cat si la SLU, asa cum se evidentiaza in figurile de mai jos:

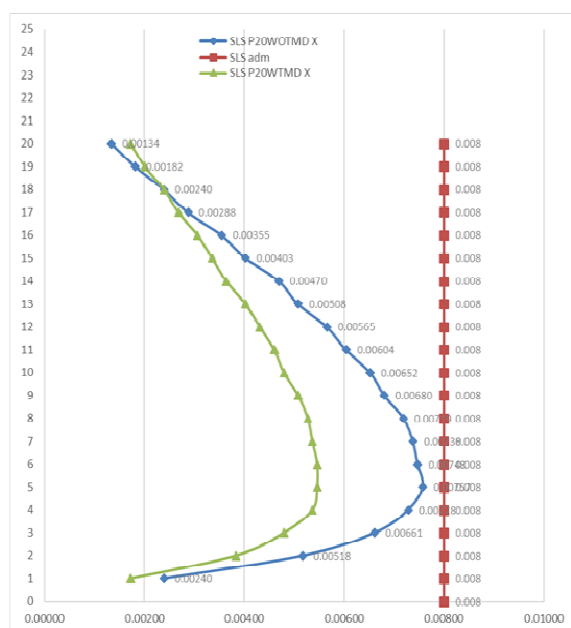


Fig. 41 Deplasari relative pe directia "X" la SLS

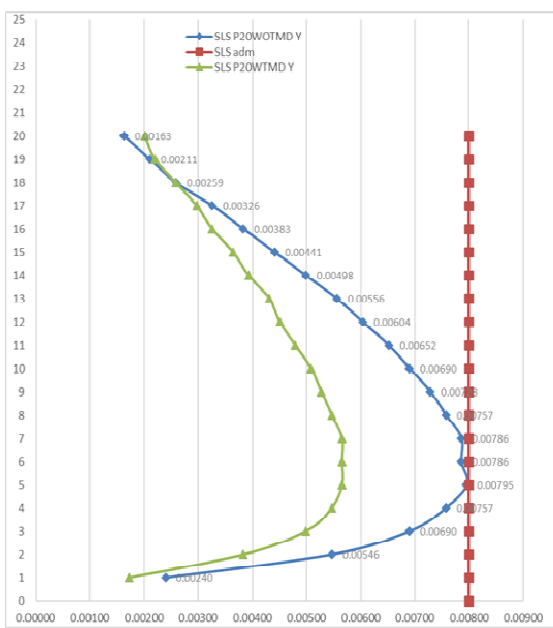


Fig. 42 Deplasari relative pe directia "Y" la SLS

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

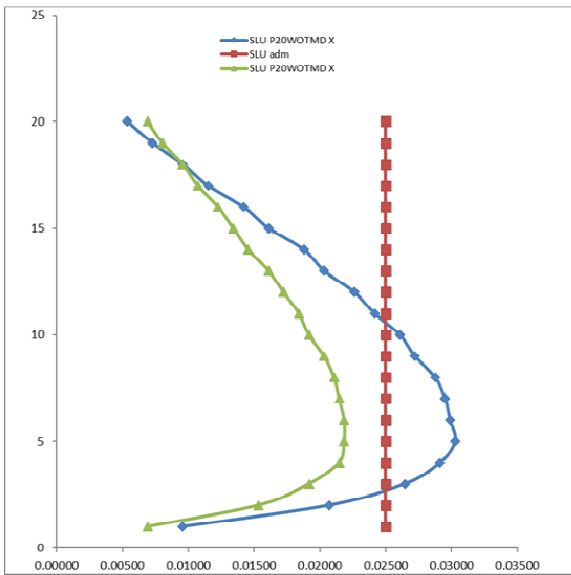


Fig. 43 Deplasari relative pe directia "X" la SLU

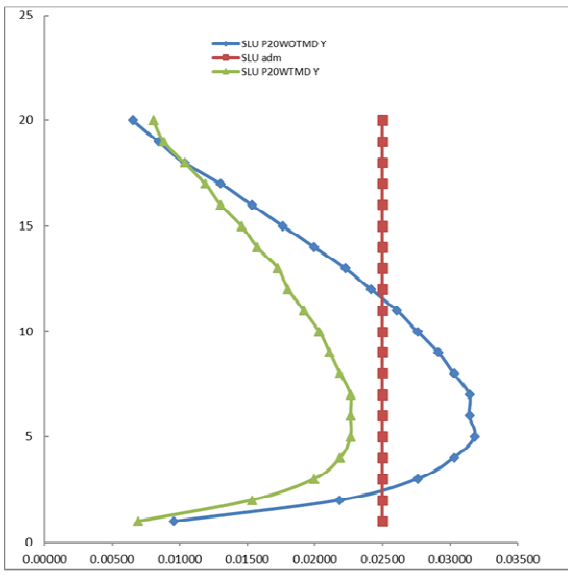


Fig. 44 Deplasari relative pe directia "Y" la SLU

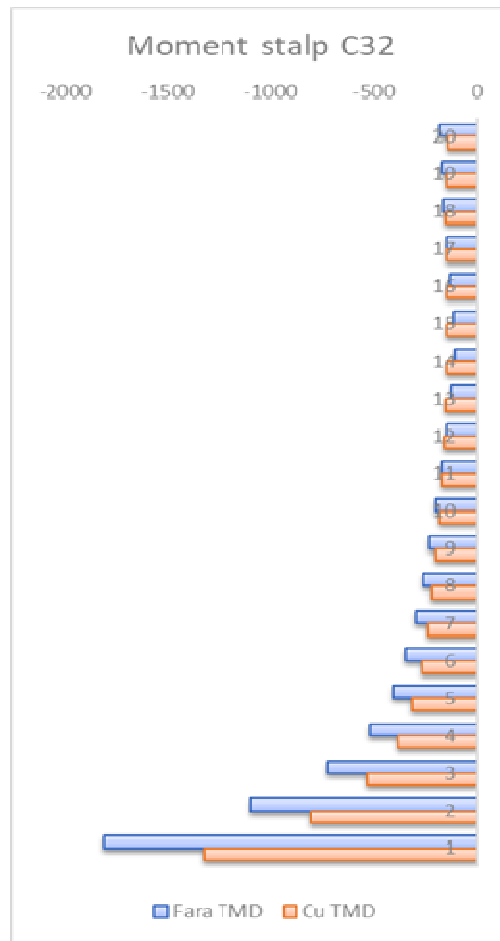
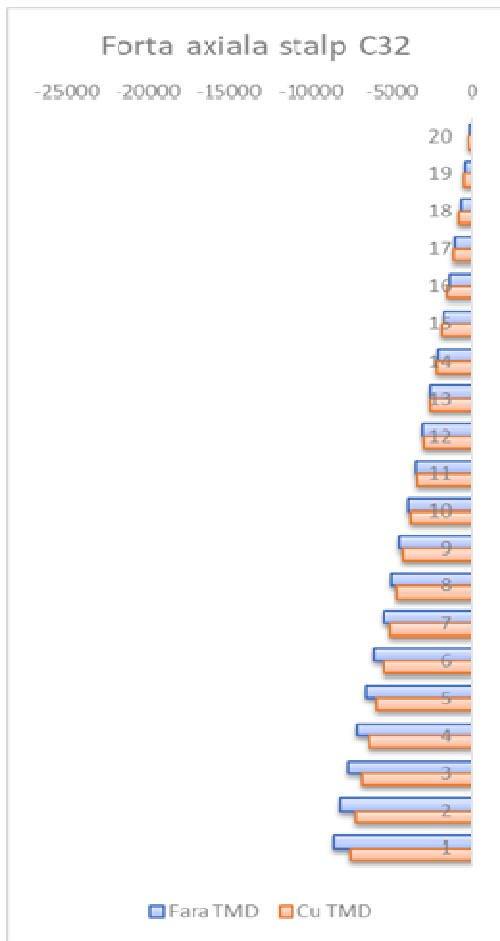


Fig. 45 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul de colt C32

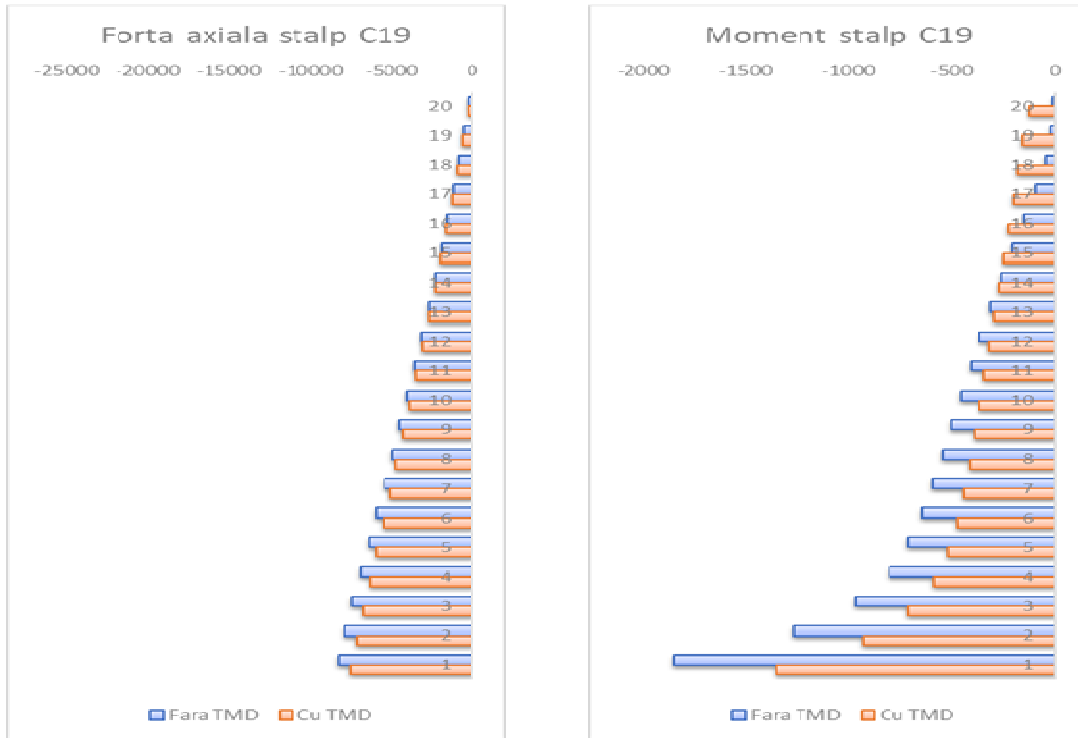


Fig. 46 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul marginal C19

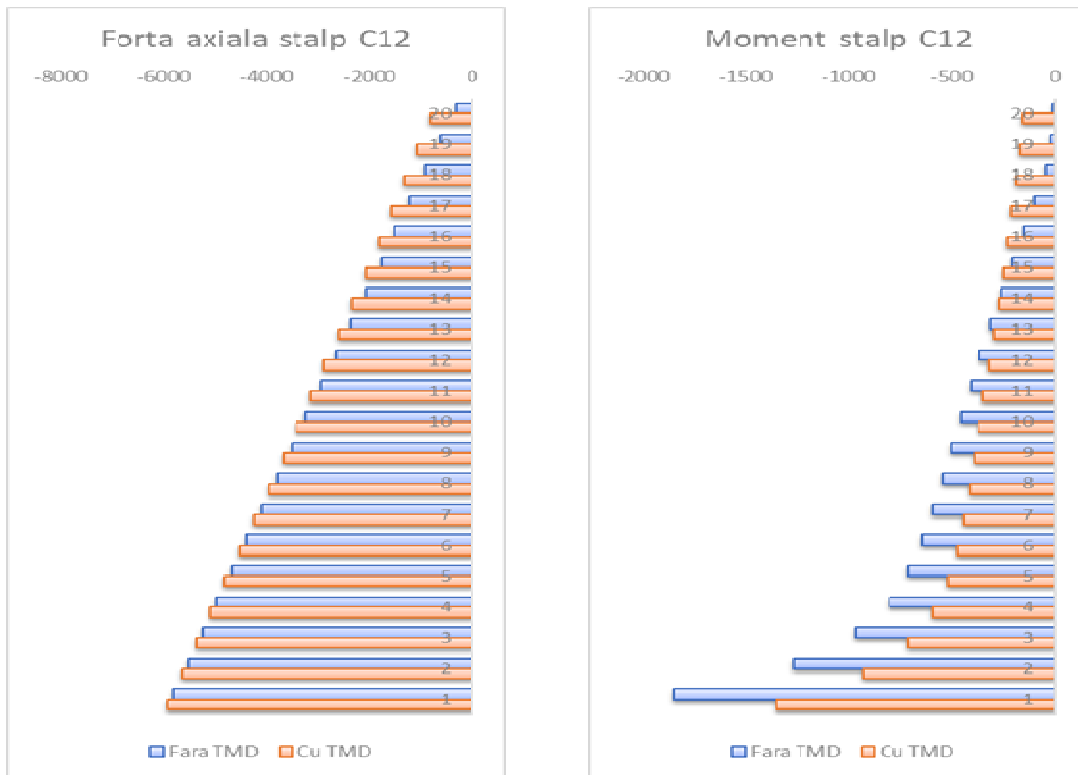


Fig. 47 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul interior C12



### Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

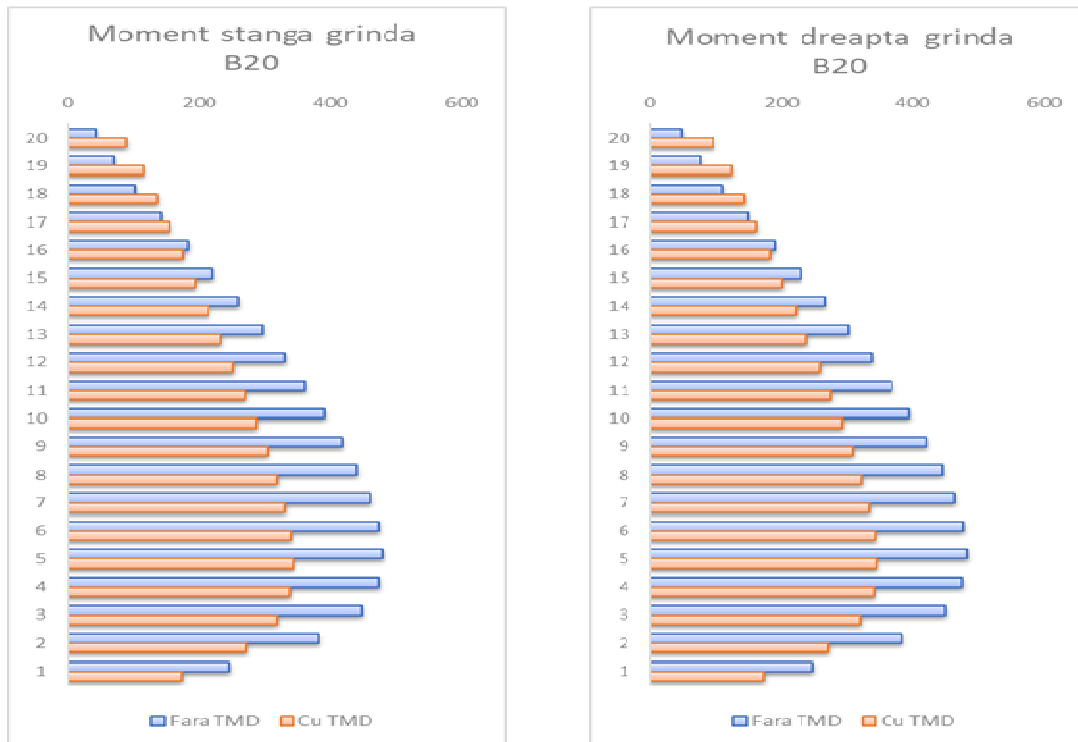


Fig. 48 Momentele din reazemele grinzii B20

Pentru a evidenta comportarea TMD-ului in reducerea eforturilor in elemente au fost selectate:

- Un stalp de colt – denumit C32;
- Un stalp marginal – denumit C19;
- Un stalp interior – denumit C12;
- O grinda – denumita B20;

Se observa o reducere a eforturilor in elementele structurii;

- In stalpul de colt C32 forta axiala a fost redusa in medie cu 7% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 10%.
- In stalpul marginal C19 forta axiala a fost redusa in medie cu 6% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 20%.
- In stalpul interior C12 forta axiala a fost redusa in medie cu 4% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 15%.
- In reazemele grinzii B20 momentele incovoietoare au fost reduse in medie cu 10%.

### 6.4. Structura in cadre P+10E

In urma analizei modala cu spectru de raspuns s-au obtinut urmatoarele perioade proprii pentru primele 4 moduri de vibratie:

Mod	Structura Fara TMD				Structura Cu TMD			
	Perioada	Ux	Uy	Rz	Perioada	Ux	Uy	Rz
1	0.745	0	0.7748	0	1.033	0	0.5006	0
2	0.728	0.7769	0	0	1.021	0.4859	0	0
3	0.678	0	0	71.0368	0.678	0	0	0
4	0.23	0	0.1036	0	0.615	0	0.3046	0

Se observa ca dupa introducerea TMD-ului perioadele s-au marit si repartitia maselor s-a modificat fundamental. Astfel:

- In primul caz (fara TMD) pe modurile 1 si 2 factorul de participare al maselor era 77.48%, respectiv 77.69% rezultand forte seismice mari.
- Dupa amplasarea TMD-ului acesti factori de participare ai maselor practic se impart in doua si se distribuie pe cate 2 moduri pe fiecare directive principala. Fenomenul de torsiune generala “coboara” dincolo de modul 4.

Daca analizam din punct de vedere al deplasarilor, se pot observa reduceri ale drift-urilor, in medie cu 2% pe directiile X si Y la SLS si 1.5% la SLU, asa cum se evidentiaza in figurile de mai jos.

Din punct de vedere al reducerii deplasarilor pentru structura analizata P+10 E nu se justifica utilizarea TMD considerind ca este o solutie nefezabila.

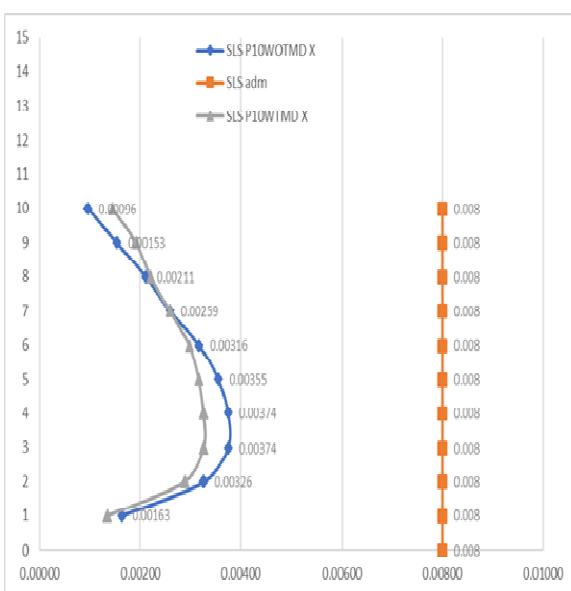


Fig. 49 Deplasari relative pe directia “X” la SLS

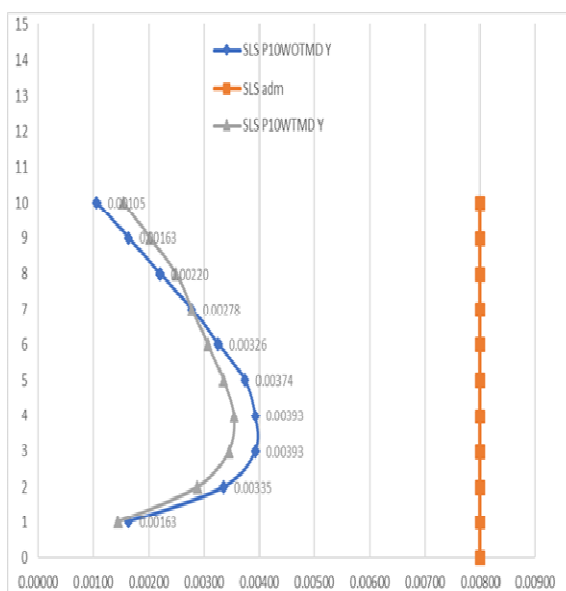


Fig. 50 Deplasari relative pe directia “Y” la SLS

Aspecte privind utilizarea dispozitivelor de amortizare cu masa acordată

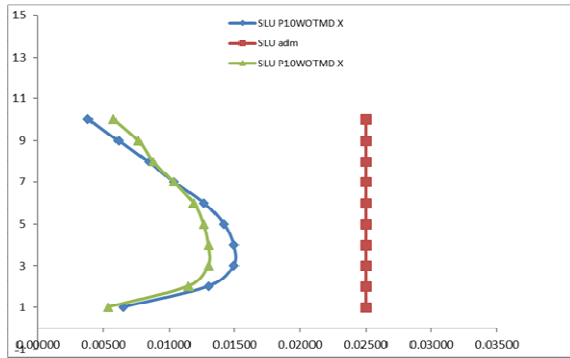


Fig. 51 Deplasari relative pe directia "X" la SLU

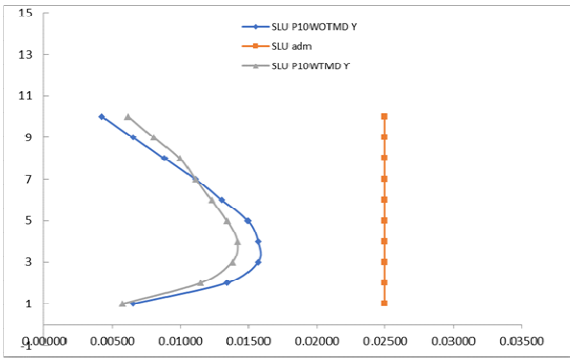


Fig. 52 Deplasari relative pe directia "Y" la SLU

Pentru a evidenta comportarea TMD-ului in reducerea eforturilor in elemente au fost selectate:

- Un stalp de colt – denumit C32;
- Un stalp marginal – denumit C19;
- Un stalp interior – denumit C12;
- O grinda – denumita B20;

Se observa o reducere a eforturilor in elementele structurii;

- In stalpul de colt C32 forta axiala a fost redusa in medie cu 1% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 2%.
- In stalpul marginal C19 forta axiala a fost redusa in medie cu 1% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 2%.
- In stalpul interior C12 forta axiala a fost redusa in medie cu 2% si o reducere a momentului incovoietor in medie cu 4%.
- In reazemele grinzii B20 momentele incovoietoare au fost reduse in medie cu 10%.



Fig. 53 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul de colt C32

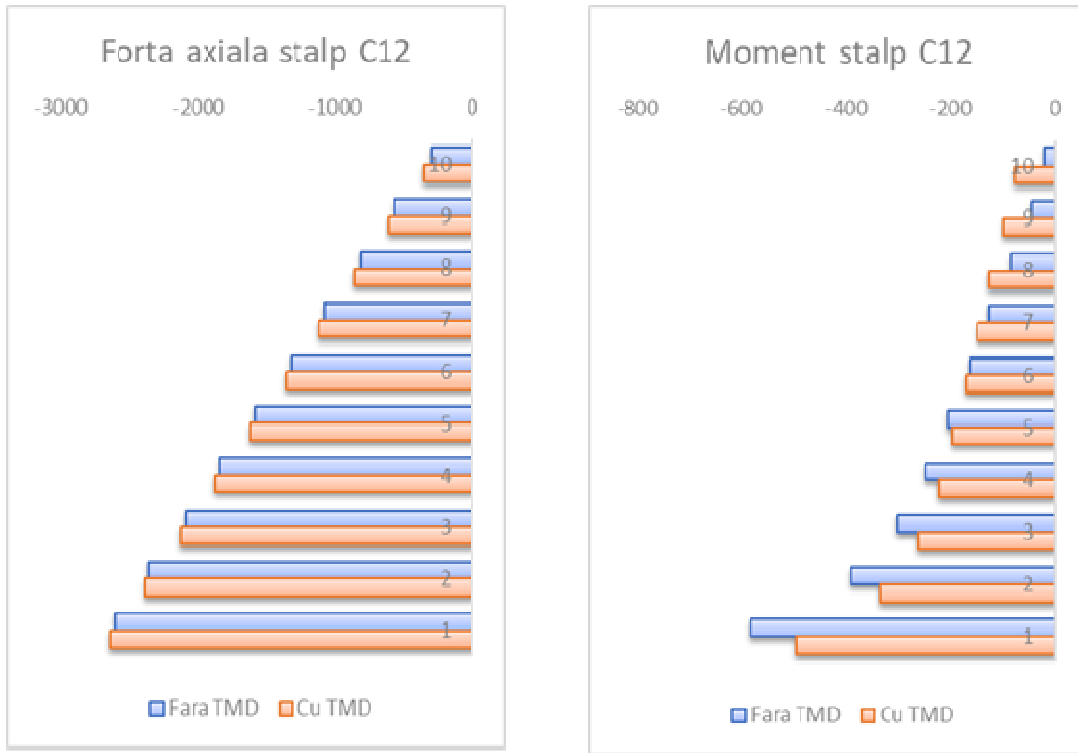


Fig. 54 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul interior C12

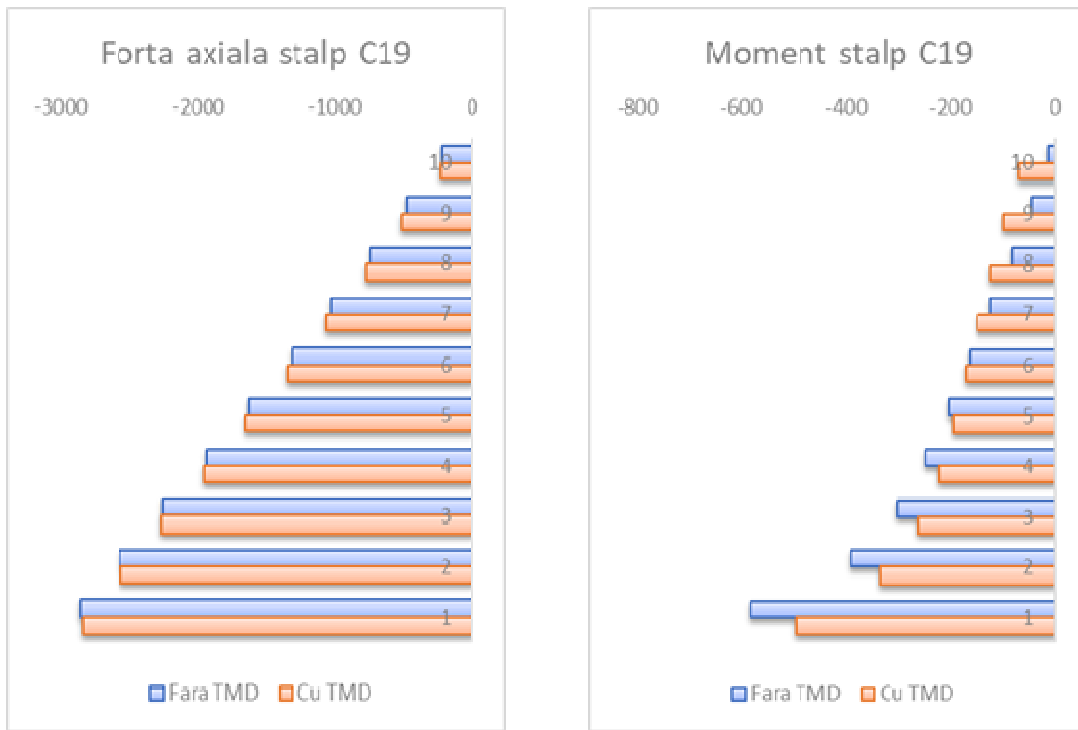


Fig. 55 Forta axiala si momentul incovoietor in stalpul marginal C19

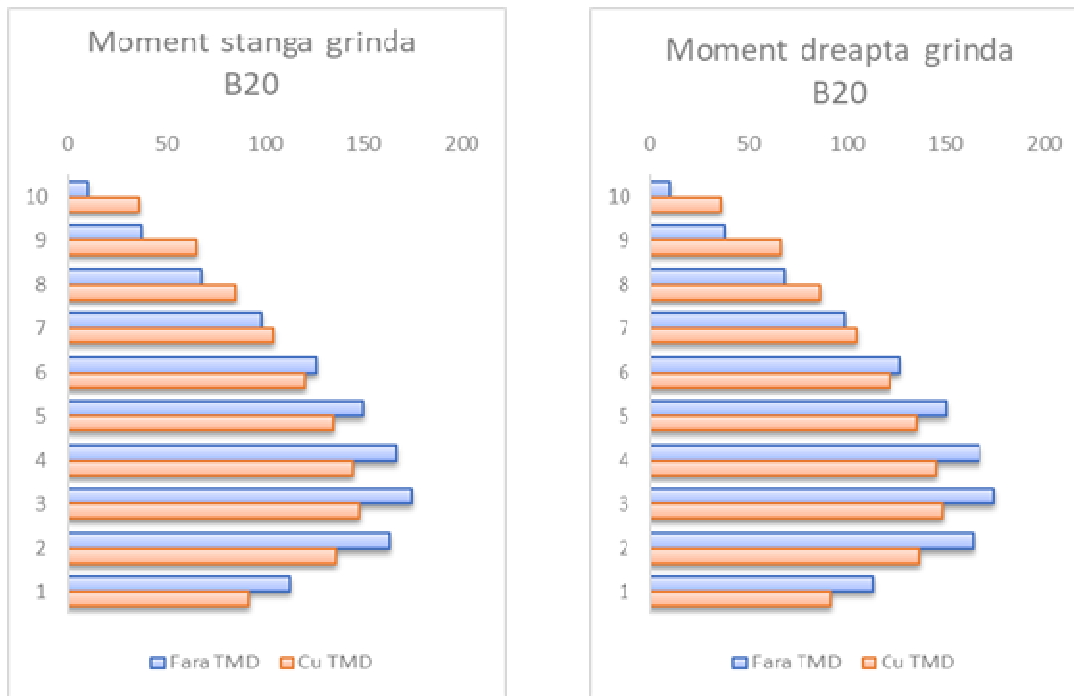


Fig. 56 Momentele din reazemele grinzii B20

## 7. Concluzii

Se constata ca la adaugarea TMD-urilor factorii de participare initiali de circa 75%, pentru translata pe x (mod 1), translata pe y (mod 2) si torsiune (mod 3) se modifica simtitor, in sensul ca atat modul 1 cat si modul 3 devin translatii pe x cu factorii de participare masica 37.5%, modurile 2 si 4 translatii pe y cu factorii de participare masica 37.5% respectiv (toate sunt translatii pure, fara torsiune) iar modurile 5 si 6 devin moduri de torsiune cu factorii de participare masica 37.5%.

De asemenea, pentru modurile fundamentale de vibratie se constata o marire a perioadelor de vibratie de 1.4 ori.

In urma analizei dinamice liniare cu spectru de raspuns a tuturor structurilor in cele doua situatii se pot formula urmatoarele concluzii cu caracter de generalitate, expuse sub forma de avantaje si dezavantaje:

### Avantaje:

- Mecanism relative simplu si usor de realizat;
- Fiabilitate crescuta data desimplitatea mecanismului;
- Reducerile deplasarilor relative de nivel in medie cu circa 25%;
- Reduceri ale fortelor axiale in stalpi si/sau peretii structurali din b.a. cu circa 5%;
- Reduceri ale momentelor incovoietoare din stalpi cu circa 20%;
- Reducerea momentelor incovoietoare la nivelul peretilor structurali din b.a. cu circa 10%;

- Reduceri ale momentelor incovoietoare din reazemele grinzilor cu circa 25%;
- Cresterea amortizarii oscilatiilor sistemului structural
- Simplitatea calculului caracteristicilor sistemului de amortizare cu masa acordata (TMD);
- Sunt in general eficiente la cladiri cu regim mediu si mare de inaltime.

**Dezavantaje:**

- Incarca local elementele structurii cu forte gravitationale importante;
- Sistemul de prindere de structura trebuie gandit astfel incat sa distribuie incarcarea la cat mai multe elemente structurale, pentru a nu exista efecte locale, concentrate, importante;
- Apar problem atunci cand lungimea pendulului este mai mare decat inaltimea de nivel, si cand trebuie prevazut un gol suficient de mare pentru ca acesta sa oscileze;
- Nu sunt eficiente la cladiri cu regim mic de inaltime.

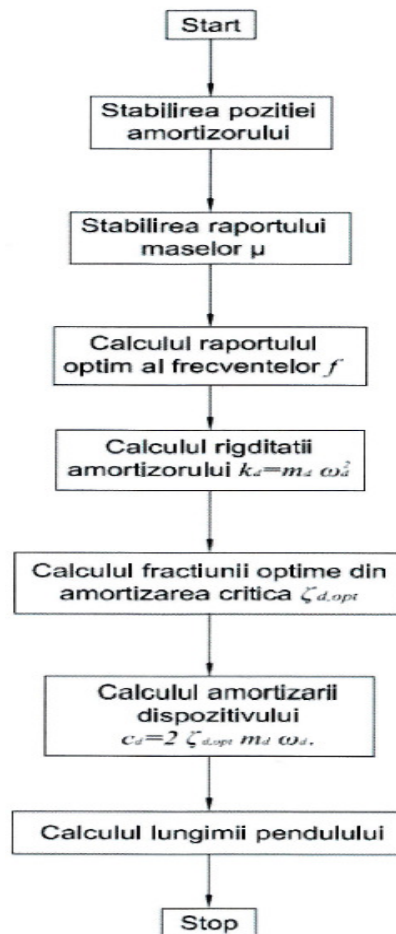


Fig. 57 Schema logica pentru calculul unui amortizor cu masa acordata



## Referințe

- [1] Chopra, A.K. (2007). Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson, Prentice Hall, NJ.
- [2] P100-1/2006 - Cod de Proiectare Seismica - Partea I - Prevederi de proiectare pentru cladiri, Bucuresti, 2006
- [3] Anil K. Chopra - Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering, New Jersey, 1995
- [4] "Dinamic of structures" – R.W.Clough, J. Prezien (1993)
- [5] "Application of tuned mass damper for vibration control of frame structures under seismic excitation" – Rasmi Mishra (2011)
- [6] "The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures" – Hsiang-Chuan Tsai (1993)
- [7] "Optimal design theories and applications of tuned mass dampers" - Chien-Liang Leea, Yung-Tsang Chen (2006)
- [8] D. Cretu; E. Tulei; C. Ghindea; R. Cruciat - Eficienta dispozitivelor pasive de control la reabilitarea seismica a unei cladiri din Bucuresti
- [9] "Studii privind utilizarea dispozitivelor disipatoare cu masa acordata (TMD) la reducerea vulnerabilitatilor seismice ale cladirilor existente cu structura din b.a." – Adrian Ivan – Disertatie 2013
- [10] Tulei E., Cretu D., Ghindea C. (2008), Seismic rehabilitation of a reinforced concrete framed structure by the use of tuned mass dampers and viscous dampers, Proceedings of the International Conference Constructions 2008, 9-10 may 2008, Cluj-Napoca, Romania, Vol.1, p.283-290
- [11] Tulei E., Cretu D., Lungu D. (2009), Study on seismic upgrade of 5 storey reinforced concrete building by Tuned Mass Damper, Proceedings of the International Conference on Protection of Historical Buildings, Prohitech 09, Rome, Italy, 21-24 june 2009, Vol.1, p.563-568
- [12] STUDIUL UNOR METODE DE ATENUARE A ACTIUNII SEISMICE ASUPRA CONSTRUCTIILOR - C. Ghindea – Teza de doctorat – UTCB 2008
- [13] P100-3:2008 Cod de evaluare și proiectare a lucrărilor de consolidare la clădiri existente, vulnerabile seismic
- [14] P100-1:2013 Prevederi de proiectare pentru clădiri
- [15] SR EN 1993-1-1 Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oțel. Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri
- [16] CR0-2005. (2005). Cod de proiectare. Bazele proiectării structurilor in construcți.
- [17] CSI. (fără an). ETABS Nonlinear V 9.7.4-User manual.
- [18] P100-1/2013 COD DE PROIECTARE SEISMICA PARTEA I - PREVEDERI DE PROIECTARE PENTRU CLĂDIRI.