

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

ANALIZA DE RISC SEISMIC PENTRU MUZEUL NAȚIONAL DE GEOLOGIE
Raportul de cercetare III

Conducător de doctorat
Prof.univ.dr.ing. VĂCĂREANU Radu Sorin

Student/a doctorand
Ing. SCUPIN Alexandra

Iunie, 2021

CUPRINS

CARACTERISTICI ALE FONDULUI CONSTRUIT DIN SECTORUL EDUCAȚIEI.....	7
STRUCTURA ANALIZATĂ.....	14
ANALIZA STATICĂ NELINIARĂ	16
MODURI DE CEDARE	19
DEPLASĂRI RELATIVE GLOBALE.....	21
DEPLASĂRI RELATIVE DE NIVEL	24
ANALIZA DE FRAGILITATE.....	30
BIBLIOGRAFIE.....	36

LISTĂ DE FIGURI

Fig. 1 Numărul de monumente istorice din sectorul educației	5
Fig. 2 Distribuția tipurilor de clădiri monument istoric din sectorul educației	6
Fig. 3 Distribuția clădirilor analizate, la nivel de județ	8
Fig. 4 Distribuția elevilor înscriși în unitățile de învățământ analizate, la nivel de județ	8
Fig. 5 Evoluția sistemelor structurale pentru clădirile din sectorul educației	10
Fig. 6 Distribuția sistemelor structurale pentru întregul eșantion de clădiri din sectorul educației	10
Fig. 7 Distribuția sistemelor structurale pentru clădirile monument istoric din sectorul educației	11
Fig. 8 Distribuția clădirilor din întregul eșantion în funcție de anul de construire	11
Fig. 9 Numărul de clădiri consolidate	12
Fig. 11 Costurile de investiție/mp în raport cu suprafețele consolidate pentru clădirile monument istoric	13
Fig. 12 Modelul 3D al școlii (3DMacro): fațada corpului principal (stânga) și corpurile secundare (dreapta)	14
Fig. 13 Modelarea elementelor de zidărie în programul 3DMacro [5]	16
Fig. 14 Măsurile de consolidare (plan demisol)	17
Fig. 15 Comparații curbe Pushover – direcția longitudinală (X)	17
Fig. 16 Comparații curbe Pushover – direcția transversală (Y)	18
Fig. 17 Comparații între cele trei modele: +X (stânga) și +Y (dreapta)	18
Fig. 18 Moduri de cedare ale elementelor structurale pentru: a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit	19
Fig. 19 Evoluția mecanismelor de cedare în funcție de deplasări laterale: direcția X (stânga) și Y (dreapta)	20
Fig. 20 Evoluția mecanismelor de cedare în funcție de PGA: direcția X (stânga) și Y (dreapta)	20
Fig. 21 Limite pentru criterii de performanță – model URM	22
Fig. 22 Limite pentru criterii de performanță – modelul INIȚIAL	22
Fig. 23 Evoluția avariilor pentru modelul inițial, analiza +X	23
Fig. 24 Curbe de Pushover pentru pereții cămășuiți (a, b) și necămășuiți (c, d)	25
Fig. 25 Localizare pereți	26
Fig. 26 Nivelul de avariere al pereților, la finalul analizei (direcția +X)	28
Fig. 27 Nivelul de avariere al pereților, la finalul analizei (direcția +Y)	28
Fig. 28 Curbe de capacitate biliniarizate pentru direcția X (stânga) și direcția Y (dreapta): a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit	31
Fig. 29 Curbe de fragilitate: direcția +X (stânga) și +Y (dreapta) pentru a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit	32
Fig. 30 Probabilitatea de a se afla într-o anumită stare de avariere, pentru direcția + X (stânga) și +Y (dreapta)	33
Fig. 31 Comparații între modelul URM (linie continuă) și clădirea E (linie întreruptă)	34
Fig. 32 Comparații între modelul inițial (linie continuă) și clădirea D (linie întreruptă)	34
Fig. 33 Comparații între modelul inițial (linie continuă) și tipologia „Placa” – regim mediu de înălțime	35

LISTĂ DE TABELE

Tab. 1 Limite de deplasări relative globale pentru zidăria portantă și confinată	21
Tab. 2 Deplasări țintă – metoda coeficienților	23
Tab. 3 Deplasări relative de nivel și criterii de performanță	27
Tab. 4 Legendă pentru simbolurile stărilor de avariere (3DMacro)	27
Tab. 5 Deplasări relative de nivel și nivelul de performanță structurală	29
Tab. 6 Parametrii de fragilitate	33
Tab. 7 Comparăție între limitele parametrilor de fragilitate	33

INTRODUCERE: ANALIZE DE FRAGILITATE PENTRU CLĂDIRI DE ZIDĂRIE DIN SECTORUL EDUCAȚIEI

Fondul construit de clădiri din sectorul educației (grădinițe, școli, licee, colegii, cămine sau cluburi ale copiilor) este format din clădiri de zidărie portantă sau confinată în proporție de aproximativ 60%, conform datelor colectate la nivel național în baza de date a Sistemului Informatic Integrat al Învățământului din România (SIIR). Doar aproximativ 20 % sunt clădiri de zidărie portantă, însă mai mult de jumătate au fost construite înainte de 1920. Structurile de zidărie cu stâlpișori și centuri de beton armat reprezintă sistemul structural cel mai des întâlnit și mai mult de două treimi dintre aceste clădiri au fost construite înainte de 1977.

Aceste statistici justifică preocuparea pentru o analiză tipologică a clădirilor de zidărie, considerând în același timp și particularitățile clădirilor clasate ca monumente istorice. Cele **aproximativ 550** de clădiri analizate în continuare sunt stabilite în baza Listei Monumentelor Istorice (2015), unde au fost marcate ca având funcțiuni de grădiniță, școală, liceu sau colegiu. Au fost excluse din prezenta analiză clădirile de învățământ universitar. Un comunicat al ICOMOS România din 2013 [1] menționa că există 605 clădiri aparținând patrimoniului educației, fiind incluse aici și facultăți, sedii ale universităților și biblioteci.

Harta din Fig. 1 ilustrează distribuția clădirilor clasate ca monumente istorice, utilizate în sectorul educației. Simbolurile reprezintă valorile normalizate la numărul maxim de clădiri din județul Bacău, astfel încât să fie posibile comparațiile între județe. Județele cu cele mai mult clădiri sunt amplasate preponderent în zona de sud (Teleorman, Dâmbovița), nord-est (Vaslui, Iași, Bacău, Neamț) și nord-vest (Maramureș, Cluj). Există 12 județe care depășesc pragul celei de-a treia cuartilă (cele mai mari 25% dintre date) și însumează peste jumătate din întreg setul de date analizat.

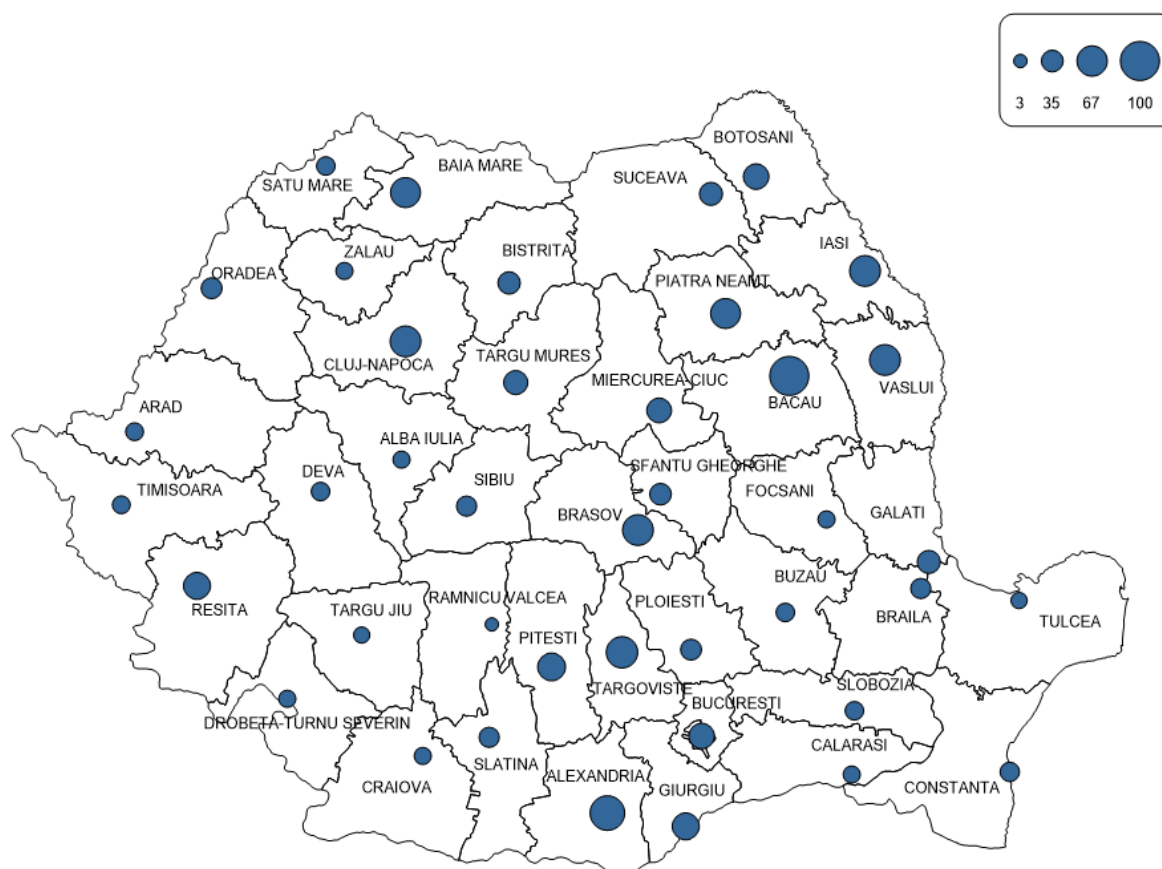


Fig. 1 Numărul de monumente istorice din sectorul educației

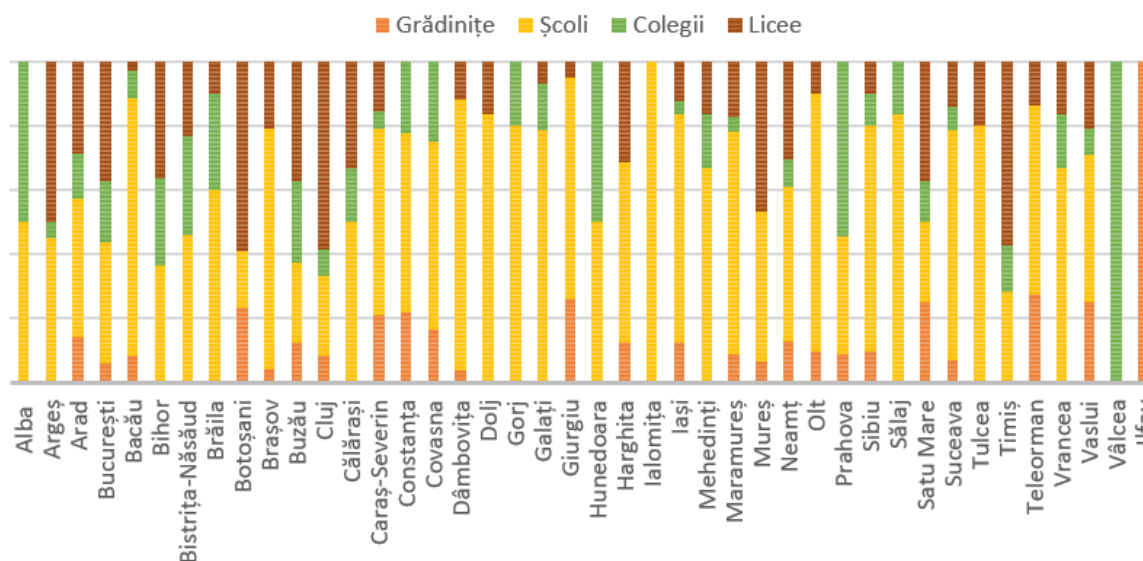


Fig. 2 Distribuția tipurilor de clădiri monument istoric din sectorul educației

Fig. 2 prezintă distribuția celor patru tipuri de clădiri analizate la nivel de județ. Se poate observa că cele mai multe clădiri sunt cele de școli, urmate de licee, cu un număr redus de colegii sau grădinițe. În ceea ce privește tipurile de școli, raportul ICOMOS prezintă tipologii arhitecturale reprezentative pentru patrimoniul construit din sectorul educației, menționând „școala Spiru Haret”. Acestea sunt clădiri construite la finalul secolului XIX – începutul secolului XX, predominant în zona de sud a țării și în Bacău, acolo unde sunt și cele mai multe clădiri din listă. Ținând cont de contextul istoric în care au fost construite colegiile naționale din orașe precum București, sau școlile primare menționate anterior, acestea constituie „repere constructive” prin „afirmarea identității și competențelor lumii moderne” [1].

Considerând valoarea clădirilor care fac parte din patrimoniul educației, dată fiind importanța lor istorică și arhitecturală, însă și vechimea lor, se impune analizarea riscului seismic asociat acestora. Abordarea recomandată presupune stabilirea unor tipologii structurale care să permită analiza inițială a unui număr mare de clădiri, prin intermediul unor criterii obiective de estimare a răspunsului structural așteptat.

Se vor analiza măsurile de reducere a riscului seismic pentru clădirile monument din sectorul educației prin intermediul unui studiu de caz al unei școli ale cărei transformări structurale constituie repere pentru intervențiile de consolidare asupra clădirilor de zidărie din România. Rezultatele vor fi comparate cu studii din literatura de specialitate și ulterior vor fi stabilite caracteristici de fragilitate pentru trei tipuri de clădiri de zidărie: zidărie portantă, zidărie confinată și zidărie consolidată (măsurile invazive).

CARACTERISTICI ALE FONDULUI CONSTRUIT DIN SECTORUL EDUCAȚIEI

Analizele de risc seismic pentru fondul construit necesită informații referitoare la expunere, sub forma unor inventare referitoare la clădiri și la persoane. Pentru învățământul public din sectorul educației preuniversitare a fost implementat un Sistem Informatic Integrat al Învățământului din România (SIIIR) care conține numeroase date relevante pentru analizarea fondului construit. Acestea au fost folosite în continuare pentru a evalua expunerea și vulnerabilitatea clădirilor.

Printre atributele de bază necesare analizei se numără: sistemul structural (inclusiv tipul de planșeu pentru clădirile de zidărie), anul în care a fost construită clădirea, locația, suprafața construită, regimul de înălțime, numărul de elevi înscriși și informații referitoare la existența unor lucrări de consolidare.

Eșantionul analizat pentru care au fost disponibile suficiente atribute este de **29,284** de clădiri din peste 15,900 de unități de învățământ, distribuite pe teritoriul întregii țări, conform hărții din Fig. 3. Dintre acestea, 2% reprezintă clădiri de pe lista monumentelor istorice (2015) [2] din 315 unități școlare care au putut fi corelate cu datele din lista inițială de 546 de monumente. Diferența este reprezentată de clădiri clasate ca monumente istorice din sectorul educațional, însă transformate ulterior în clădiri administrative, muzee sau locuințe (Școala comercială, Giurgiu – azi Institut de Proiectări, Școala normală de băieți, Vaslui – azi Spital TBC), școli care au fost desființate (Școala Obedeanu, Craiova) sau care nu au putut fi identificate în baza de date SIIIR (Grădinița Bulbucata, Giurgiu).

Amplasare punctelor din fiecare județ este aleatoare, însă harta din Fig. 3 permite comparațiile între valorile absolute de clădiri. Astfel, se poate observa că județele din zona de est a țării (Iași și Vaslui) cuprind cel mai mare număr de clădiri și cea mai mare densitate de clădiri raportată la suprafața județului, în afară de zona orașului București. Județele Ilfov, Prahova, Dâmbovița și Botoșani prezintă de asemenea zone cu o densitate mare de clădiri analizate. Printre județele aflate la polul opus se află Tulcea, Caraș-Severin, Arad și Hunedoara. Dacă în București sunt peste 4 clădiri/km², în aceste județe valoarea medie este sub 0.08 clădiri/km², față de media națională de 0,22 clădiri/ km². Â

În cele 15,929 unități de învățământ analizate sunt înscriși aproximativ 2,395,000 elevi, conform datelor din anul școlar 2018-2019. Repartizarea acestora la nivel de județ este prezentată în Fig. 4, unde fiecare punct corespunde unui număr de 1000 de elevi înscriși. Datele indică la fel ca și în cazul clădirilor, valorile maxime concentrate în zona capitalei, unde sunt peste 1000 de elevi înscriși pe km², față de media națională de 35 elevi/ km². Tulcea și Covasna sunt județele cu cei mai puțin elevi înregistrați în eșantionul analizat, spre deosebire de Iași și Suceava, ambele județe având peste 100,000 de elevi. Zona ce centru-sud a țării (București, Ilfov, Prahova, Dâmbovița) și zona de est (Iași) indică cele mai mari densități de elevi raportate la suprafața județelor. Comparând însă numărul de elevi înscriși în școlile analizate cu datele demografice de la Recensământul populației și locuințelor din 2011 [3], județele cu sub 10% elevi din totalul populației sunt Giurgiu și Sibiu, iar Bistrița-Năsăud, Harghita, Iași, Suceava și Satu-Mare au peste 15%.

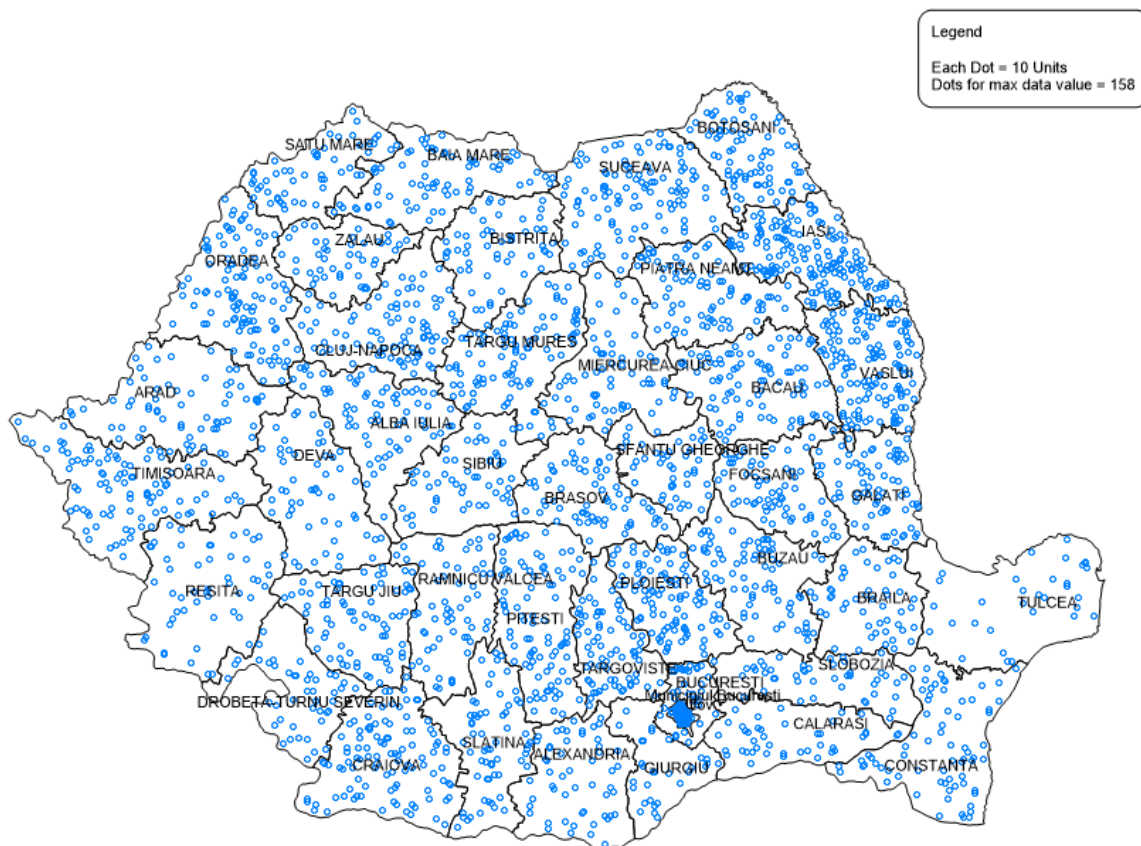


Fig. 3 Distribuția clădirilor analizate, la nivel de județ

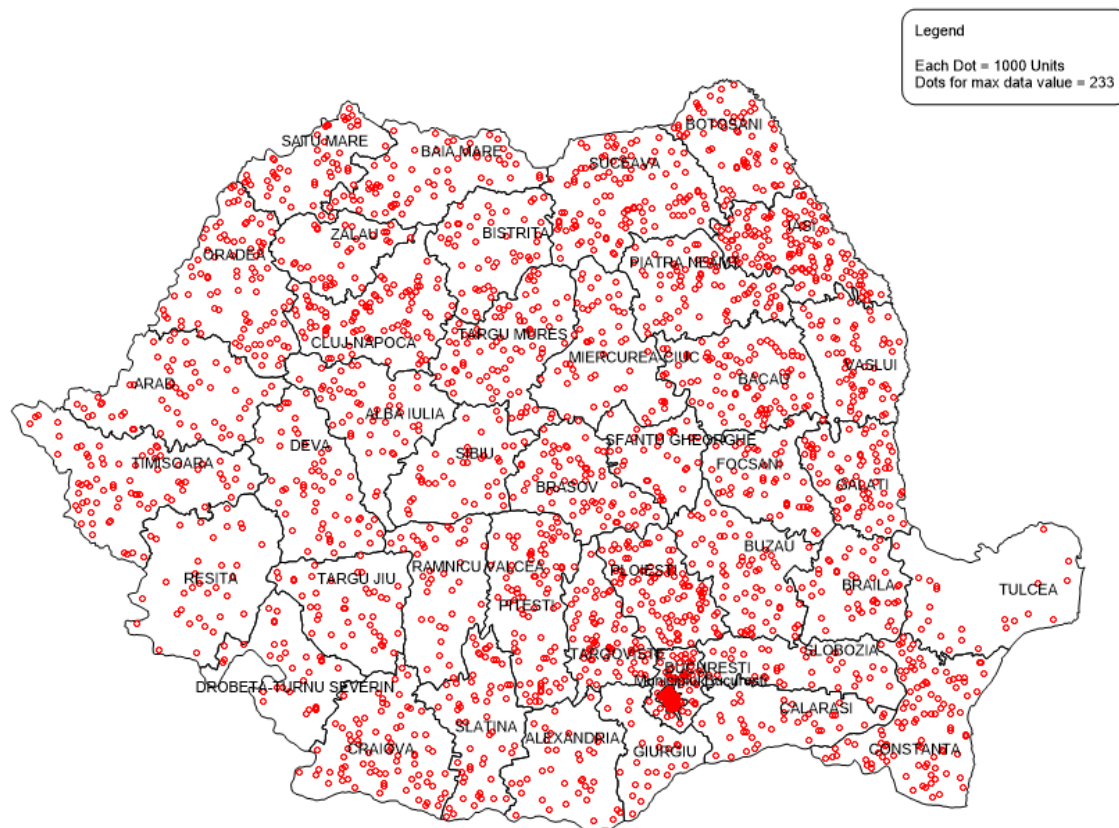


Fig. 4 Distribuția elevilor înscriși în unitățile de învățământ analizate, la nivel de județ

Pornind de la lista de sisteme structurale predefinite în SIIR, au fost considerate următoarele tipologii.

- Zidărie cu stâlpișori și centuri (CM – confined masonry)
- Zidărie portantă (URM – unreinforced masonry)
- Cadre beton (RC_F – reinforced concrete frames)
- Pereți beton (RC_W – reinforced concrete shear walls)
- Lemn (W – wood)
- Cadre de oțel (S – steel)
- Panouri mari prefabricate de beton (RC_LP – reinforced concrete large panels)

Pentru clădirile cu sistemul structural definit inițial în baza de data ca „Alt tip” și pentru clădirile cu niciunul sau mai multe sisteme structurale definite, au fost stabilite tipologii în funcție de anul construirii, conform schiței din Fig. 5. Deoarece baza de date conținea clădiri ale căror sisteme structurale erau în contradicție cu anul construirii și tehnicile de construire corespunzătoare perioadei, următoarele modificări au fost făcute:

- i. Pentru clădirile construite înainte de anul 1920 și definite cu sisteme structurale din beton armat (cadre, pereți sau panouri mari prefabricate), cel mai probabil sistem structural a fost considerat a fi cel de zidărie portantă.
- ii. Pentru clădirile construite înainte de anul 1960 și definite cu sistem structural de pereți din beton armat, cel mai probabil sistem structural a fost considerat a fi cel din cadre de beton armat.
- iii. Pentru clădirile construite înainte de anul 1940 și definite cu sistem structural de zidărie cu stâlpișori și centuri, cel mai probabil sistem structural a fost considerat a fi cel din zidărie portantă.
- iv. Pentru clădirile construite după anul 1940 și definite cu sistem structural de zidărie portantă, cel mai probabil sistem structural a fost considerat a fi cel din zidărie cu stâlpișori și centuri.
- v. Pentru clădirile construite înainte de anul 1920 și definite cu sistem structural din cadre de oțel, cel mai probabil sistem structural a fost considerat a fi cel din zidărie portantă, iar pentru cele construite între 1920 și 1960, sistemul structural considerat a fost cel de zidărie cu stâlpișori și centuri.

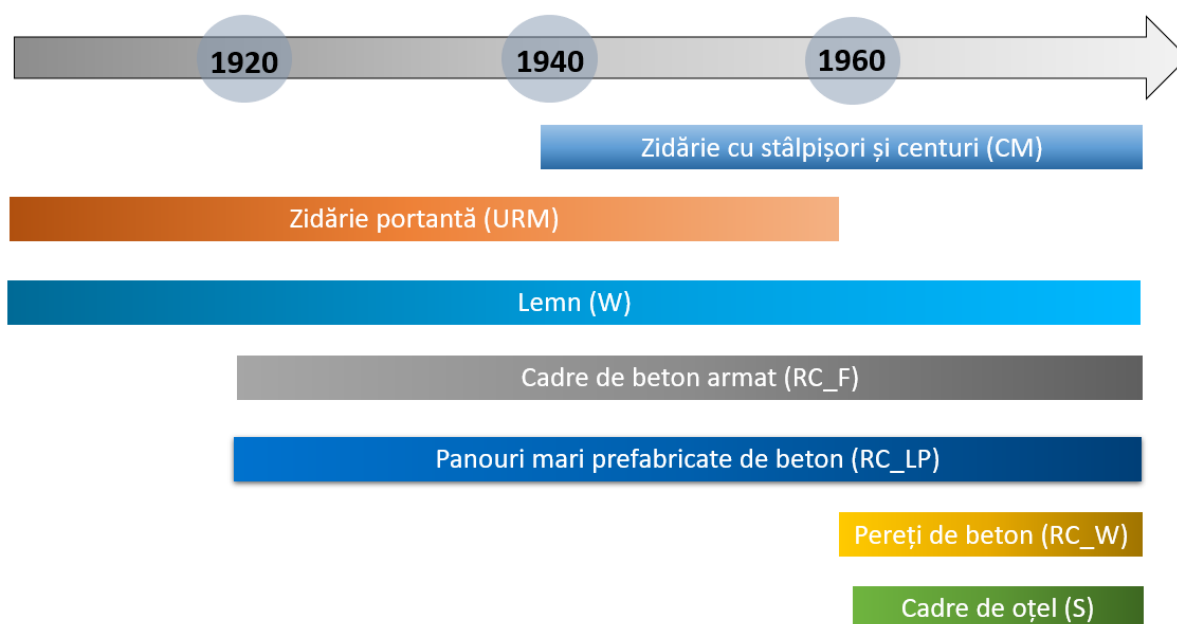


Fig. 5 Evoluția sistemelor structurale pentru clădirile din sectorul educației

În Fig. 6 sunt ilustrate procentele alocate fiecărui sistem structural după modificarea bazei de date SIIR conform ipotezelor prezentate anterior. Din eșantionul total de clădiri, peste 50% dintre ele au sisteme structurale din zidărie (portantă sau confinată) și aproximativ 40% din beton armat. Doar 4% din totalul de clădiri sunt realizate din pereți de beton armat sau din lemn și sub 2% sunt din cadre de oțel sau panouri mari prefabricate de beton. În ceea ce privește clădirile de școli încadrate pe lista monumentelor istorice, Fig. 7 prezintă distribuția sistemelor structurale pentru eșantionul de 445 de clădiri. Cu peste 40% construite înainte de 1920, majoritatea monumentelor au sistem structural de zidărie portantă.

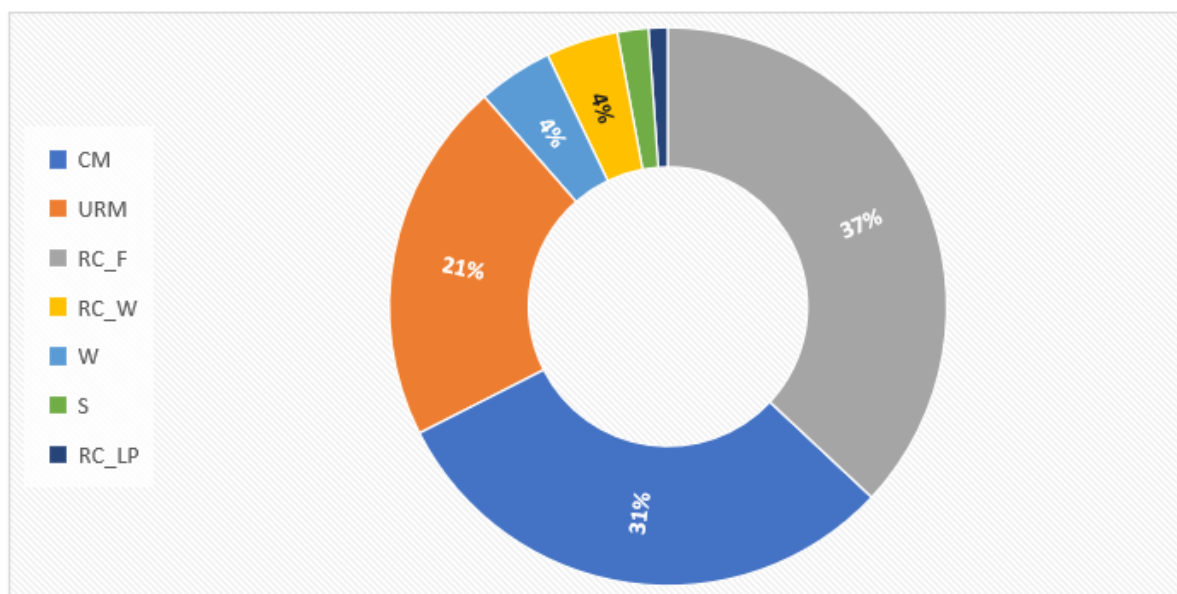


Fig. 6 Distribuția sistemelor structurale pentru întregul eșantion de clădiri din sectorul educației

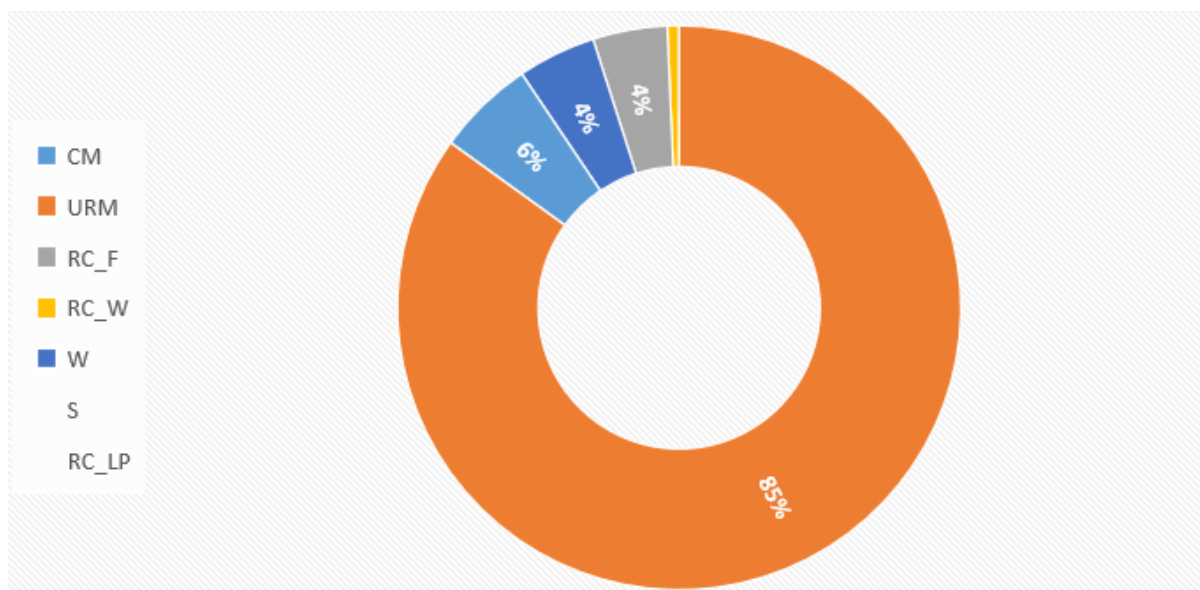


Fig. 7 Distribuția sistemelor structurale pentru clădirile monument istoric din sectorul educației

Întreg eșantionul de clădiri analizate a fost împărțit în funcție de nivelul codului de proiectare asociat perioadei de construire, astfel încât limitele din Fig. 8 corespund următoarelor:

- Pre-cod (PC: pre-code): clădiri construite înainte de 1963
- Cod inferior (LC: low-code): clădiri construite între 1964 și 1977
- Cod mediu (MC: medium-code): clădiri construite între 1978 și 1992
- Cod superior (HC: high-code): clădiri construite după 1992

Cea mai mare pondere o reprezintă clădirile construite astfel încât să reziste doar acțiunilor gravitaționale, înainte de apariția normativelor de calcul seismic (P13-63, P13-70). Doar pentru 30% din totalul clădirilor analizate nivelul acțiunii seismice a fost estimat folosind codurile de calcul elaborate după cutremurul din 1977 (P100-78, P100-81, P100-90, P100-92, P100-1/2006, P100-1/2013). Între 1964 și 1992 au fost construite aproximativ un sfert din totalul școlilor analizate, 85% fiind clădiri din cadre de beton armat, clădiri realizate conform unor planuri-tip.

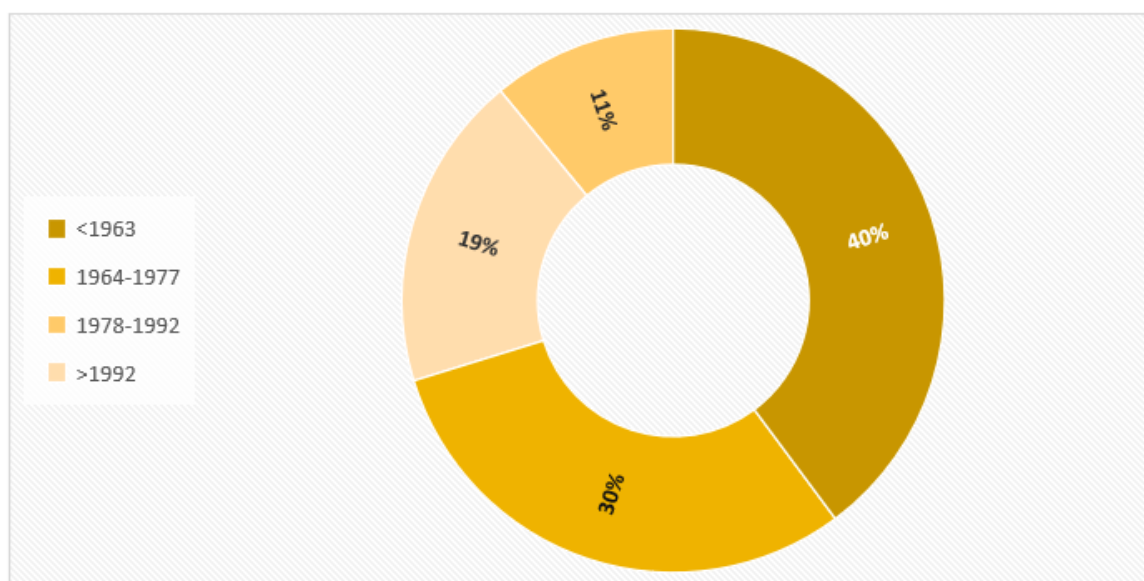


Fig. 8 Distribuția clădirilor din întregul eșantion în funcție de anul de construire

Lista lucrărilor de consolidări realizate în cadrul proiectului P.R.I.S¹ au fost considerate împreună cu eșantionul analizat din baza de date SIIIR pentru a evalua date referitoare la intervenții de consolidare la nivel național. Din datele disponibile pentru 1253 de unități incluse în proiect (93%), lucrări de consolidare au fost realizate pentru aproximativ 35% dintre ele. Fig. 9 prezintă distribuția celor 427 de unități de învățământ la nivel național, singura excepție fiind municipiul București, care nu a fost inclus în proiect. Aproape 90% dintre unități sunt școli primare sau gimnaziale și restul de 10% sunt licee sau colegii, fără să fie incluse în proiectul analizat grădinițe.

Brăila, Constanța și Timiș au cele mai multe școli consolidate, la polul opus fiind Brașov, Hunedoara și Ilfov. Estimările de costuri raportate la suprafața clădirilor sunt între 35 €/mp și 1500 €/mp, media fiind de aproximativ 300 €/mp. Sub 25% din școli au înregistrat investiții sub 200 €/mp sau peste 400 €/mp.

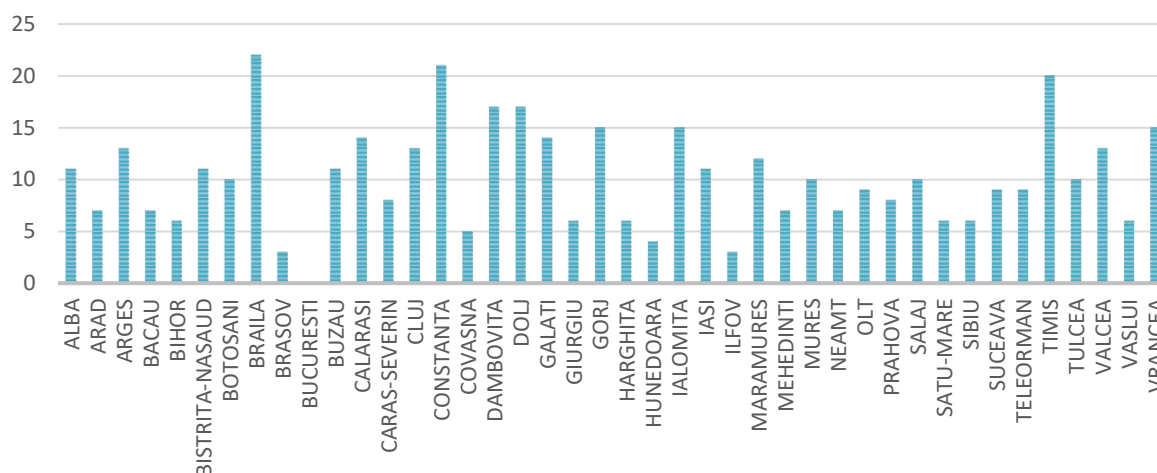


Fig. 9 Numărul de clădiri consolidate

Doar 4% dintre școlile consolidate au clădiri înscrise pe lista monumentelor, adică 17 unități, dintre care 9 sunt licee sau colegii și 8 sunt școli generale. Valorile de costuri pe m² evaluate pentru clădirile monument sunt între 70 €/mp și 530 €/mp, cu o medie de 240 €/mp, sub valoarea estimată pentru consolidările întregului eșantion de investiții prin P.R.I.S. Pentru școlile generale cu suprafețe de 1000 mp în medie, costurile pe m² sunt aproape duble (310 €/mp) față de licee sau colegii cu suprafețe de 2500 mp (170 €/mp). Fig. 10 ilustrează situația suprafețelor și costurile de investiție pentru cele 17 clădiri cu statut de monument istoric, consolidate în cadrul proiectului de reabilitare a infrastructurii școlare. Sunt notate cu indicativul „L” liceele incluse în lista, cu „CN” colegiile naționale și cu „SG” școlile generale. Liniile orizontale de pe grafic ilustrează suprafețele medii, respectiv costurile medii pe mp pentru cele două categorii considerate: licee/colegii și școli generale.

¹ Proiectul de reabilitare a infrastructurii școlare (2007-2019): reabilitarea, modernizarea și mobilarea a 1329 de școli din învățământul preuniversitar și 16 cămine studențești pentru restabilirea siguranței în exploatare a clădirilor școlare și a condițiilor igienico-sanitare și de confort.

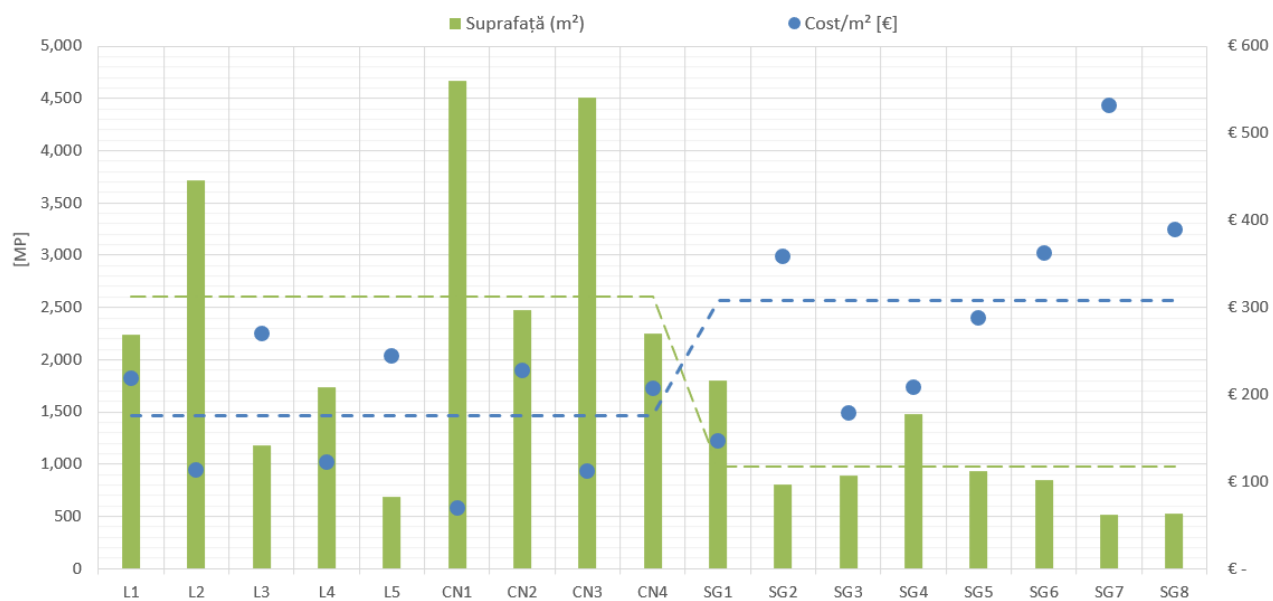


Fig. 10 Costurile de investiție/mp în raport cu suprafețele consolidate pentru clădirile monument istoric

STRUCTURA ANALIZATĂ

Clădirea școlii analizate poate fi considerată reprezentativă pentru tipologia clădirilor monument, cu structură de zidărie portantă, construite la finalul secolului XIX – începutul secolului XX. Acestea au suferit avarii după cutremure, fiind nevoie de diverse intervenții de consolidare de-a lungul timpului.

Conform datelor din expertiza tehnică, școala a fost construită în 1884, având în prezent un corp principal (școala veche) legat de corpul secundar printr-un corp de legătură care adăpostește casa scării și grupuri sanitare. Proiectul de consolidare propus în expertiză presupune intervenții de consolidare doar pentru corpul principal și cel de legătură, întrucât corpurile anexe urmează să fie reconstruite.

Școala veche are o suprastructură din zidărie portantă cu planșee de beton armat (12 cm), turnate în anii 40. După cutremurul în 1977, a fost adăugat un număr redus de cadre de beton armat (grinzi și stâlpișori – amplasați conform schiței din Fig. 13.). Pereții de zidărie au grosimi reduse progresiv pe înălțime (25%-30% reduceri ale ariilor de pereți, de la un etaj la altul), dar nu există discontinuități majore în ceea ce privește amplasarea lor. Clădirea are subsol, demisol, parter și etaj, cu o șarpantă din lemn. În Fig. 11 este ilustrat modelul tridimensional al clădirii, realizat în 3DMacro, unde subsolul nu a fost însă modelat.

Școala funcționează în două schimburi, cu aproximativ 250 de elevi de clasele I-VIII.

Intervențiile de consolidare propuse în expertiza tehnică vizează reparații locale și cămășuirea pereților marcați în Fig. 13 cu un strat de tencuială torcretată de 10 cm grosime, armată cu plase de $\varnothing 10/15 \times 15 \text{ cm}$ (OB37) pe ambele direcții și mortar M50T, aplicat pe una sau pe ambele fețe.

Calculule aproximative făcute pentru estimarea capacității de preluarea a forțelor seismice indică un raport de 0,32 între forța capabilă a clădirii de zidărie portantă și forța tăietoare de bază. Greutatea suplimentară generată de cămășuiri este aproximativ 10% din greutatea inițială. Aportul cămășuirilor cu mortar torcretat (M 50T) asigură o creștere de aproximativ 30% a rezistenței la compresiune a zidăriei, considerând intervențiile în pereții de la nivelul demisolului.

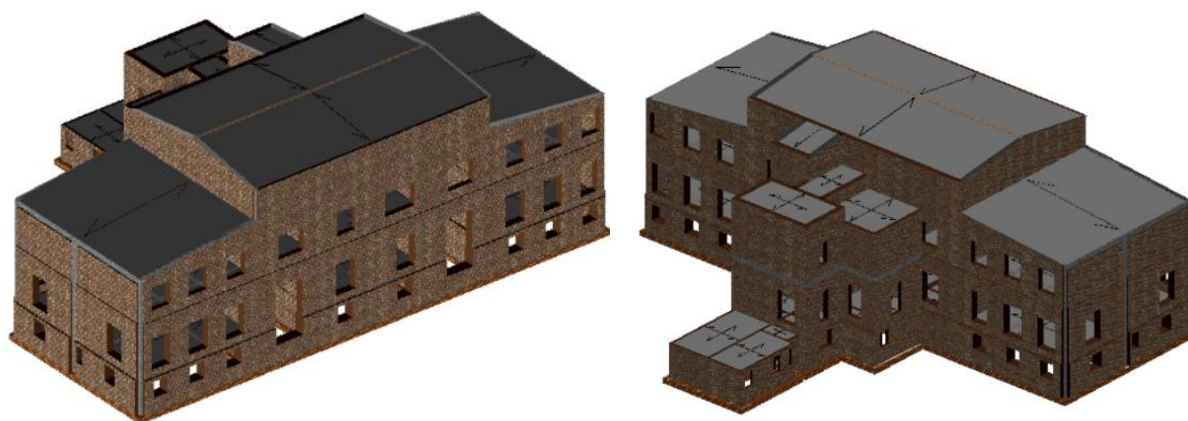


Fig. 11 Modelul 3D al școlii (3DMacro): fațada corpului principal (stânga) și corpurile secundare (dreapta)

Reducerea vulnerabilității structurale pentru clădirile de zidărie care funcționează ca școli reprezintă un subiect abordat în literatura de specialitate, spre exemplu în cazul școlilor din Italia. Studiul de caz ilustrat de Formisano [4] prezintă clădirea unei clădiri din Italia, inițial construită în secolul XIX pentru a fi un conac și reabilitată în anii 1970 pentru a fi transformată în școală. Aceasta este încadrată ca monument protejat, însă în urma cutremurului din 2012 din zona Emilia-Romagna, clădirea a suferit avarii. Decizia referitoare la necesitatea intervențiilor a fost stabilită evaluând cerința de deplasare și capacitatea de deformare a clădirii. Prin analizele statice neliniare (program Tremuri și 3DMacro), validate cu ajutorul tiparului de avariere înregistrat post-cutremur, a fost evaluată eficiența câtorva propuneri de consolidare prin cămășuirea cu fâșii FRP aplicate pe pereții de zidărie sau fâșii de oțel. Optimizarea soluției finale a presupus variații ale configurației și dimensiunilor fâșiilor de oțel, cu ajutorul cărora a fost posibilă obținerea unor creșteri de rezistență și ductilitate, superioare celor dobândite prin cămășuirea cu FRP, dar cu costuri reduse.

ANALIZA STATICĂ NELINIARĂ

Programul 3DMacro folosește resorturi la interfața dintre panouri de zidărie (șpaleți și montați), atribuindu-le acestora caracteristici mecanice care permit comportarea la compresiune-întindere sau la forfecare [4]. Elementele de zidărie sunt de asemenea modelate prin intermediul unor resorturi diagonale care descriu comportarea la întindere și la compresiune, așa cum se poate observa în schema din Fig. 12. Spre deosebire de 3Muri unde întinderea este neglijată, 3DMacro determină limitele pentru deplasările ultime în funcție de legea elasto-plastică a resorturilor.

Clădirile de zidărie confinată pot fi considerate un tip particular de clădiri de zidărie, cu toate că prezintă și caracteristici similare cadrelor de beton armat. Transferul forțelor între cadrele de beton armat formate din stâlpișori și grinzi și pereții de zidărie implică definirea unei interacțiuni între cele două materiale [5]. Stâlpișorii de beton armat sunt modelați în 3DMacro ca elemente finite de tip bară, cu plasticitate concentrată și cu legi constitutive tridimensionale $N-M_x-M_y$.

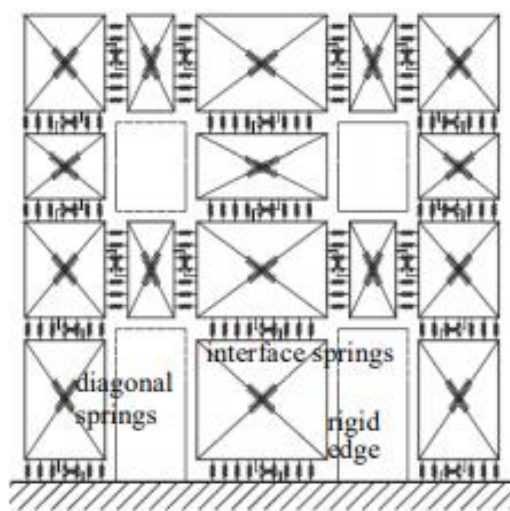


Fig. 12 Modelarea elementelor de zidărie în programul 3DMacro [5]

Pornind de la datele referitoare la structura analizată, au fost realizate patru modele numerice ale școlii, folosind programul 3DMacro pentru analizele statice neliniare. Modelul de zidărie portantă nearmată, denumit în continuare **URM**, prezintă o conformație structurală apropiată de forma clădirii, așa cum a fost construită în 1884. Aceasta păstrează pereții de zidărie portantă fără stâlpișori, însă conține și plăcile de beton armat care au fost de fapt turnate în anul 1947, peste planșeele inițiale din grinzi de lemn și umplutură.

Modelul **inițial**, reprezentativ pentru tipologia clădirilor de zidărie confinată, reprezintă stadiul în care se afla clădirea după consolidările realizate în urma cutremurului din 1977. Lucrările de consolidare au cuprins adăugarea unui număr redus de stâlpișori și grinzi de beton armat, care constituie astfel un sistem de cadre de beton armat, menit să preia încărcările laterale.

Modelul **consolidat** surprinde varianta actuală a școlii, în urma lucrărilor de cămășuire cu tencuială torcretată de 10 cm și armată pe ambele direcții cu plase de OB 37 ($\phi 10/150 \times 150$ mm), aplicate pe unii dintre pereții de zidărie pe ambele părți sau pe o singură față, în cazul fațadelor. Au fost de asemenea adăugați și stâlpișori suplimentari (30x30 cm) față de configurația precedentă, respectând astfel prevederile în vigoare referitoare la amplasarea

stâlpișorilor de beton armat în cazul clădirilor de zidărie confinată. Fig. 13 ilustrează zonele în care au fost aplicate măsurile de consolidare menționate anterior.

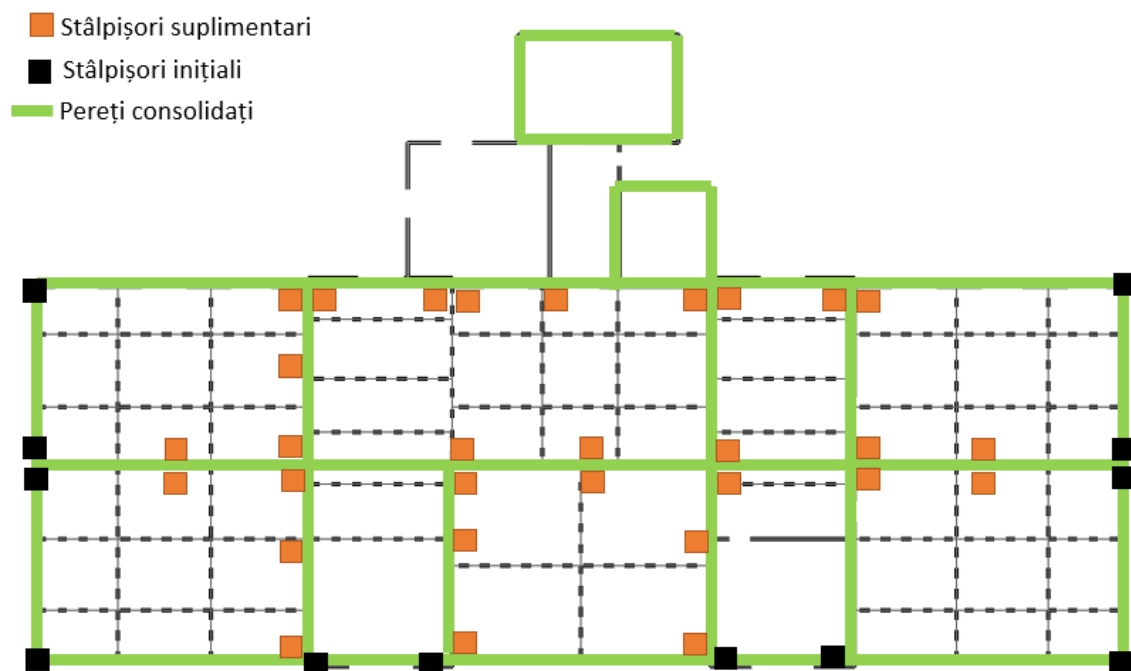


Fig. 13 Măsuri de consolidare (plan demisol)

Cele trei modele vor fi în continuare analizate pentru a surprinde diferențele dintre cele trei tipologii: clădire de zidărie portantă, clădire de zidărie confinată și clădire de zidărie consolidată.

Fig. 14 și Fig. 15 prezintă rezultatele analizelor statice neliniare pentru ambele sensuri și ambele direcții de aplicare a forței seismice. Curbele de Pushover din graficele de mai jos prezintă relația dintre deplasarea laterală și forța tăietoare de bază (V_b), normalizată la greutatea clădirii (W).

Starea limită ultimă considerată în programul 3DMacro pentru a opri analiza este stabilită pentru următoarele cazuri: atingerea pragului ultim de rotire într-una din grinzi, scădere a forței tăietoare de bază cu până la 80%, atingerea limitei de rotire sau de forfecare pentru toți montanții unei perete, la nivelul lui etaj.

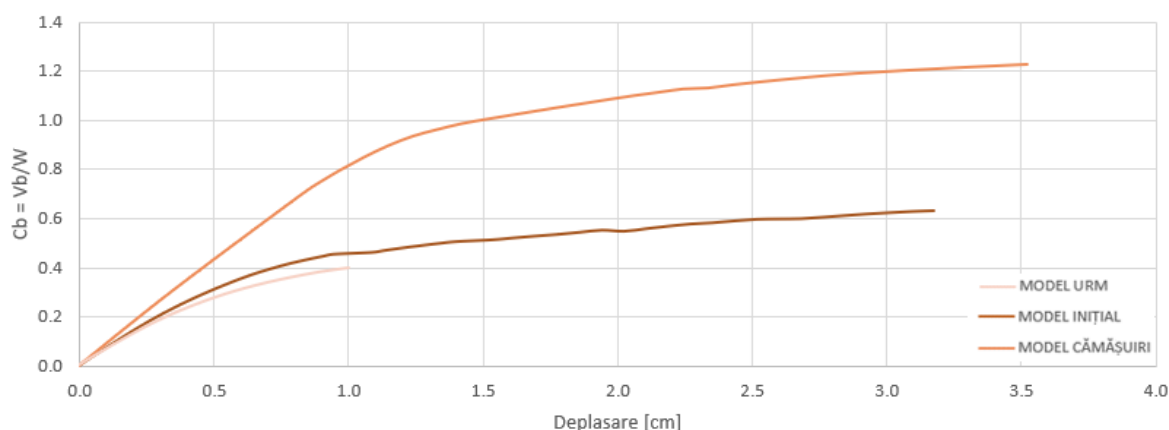


Fig. 14 Comparatii curbe Pushover – direcția longitudinală (X)

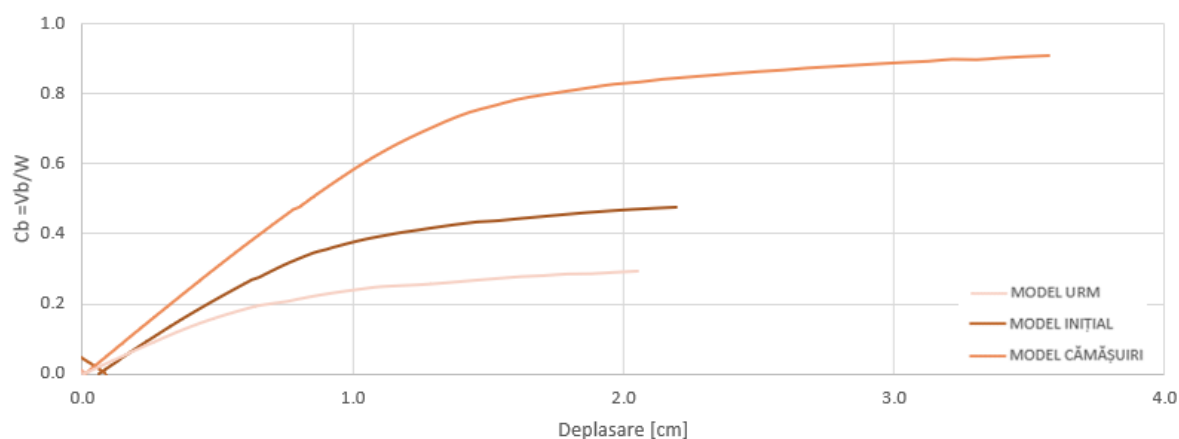


Fig. 15 Comparații curbe Pushover – direcția transversală (Y)

Graficele din Fig. 16 ilustrează valorile maxime înregistrate pe curbele de Pushover pentru cele trei analize, doar pentru analizele de sens pozitiv. Se pot observa creșterile graduale ale capacității portante și ale capacității de deplasare, pornind de la valorile minime ale modelului URM, până la cele ale modelului cămășuit. Cedarea prematură a modelului de zidărie portantă generează și diferențe semnificative în graficul de deplasări maxime de pe direcția longitudinală, prin comparația cu valoarea înregistrată în modelul inițial. Capacitatea de rezistență crește cu 50-60% în modelul inițial, iar cu până la 200% în cazul modelului cămășuit, cu creșteri mai evidente pentru direcția X, unde sunt amplasați mai mulți pereți consolidați și mai mulți stâlpișori de beton armat. Coeficientul supraunitar $C_{b,max}$ din analiza statică neliniară poate fi considerat un indicator la consolidării excesive. Considerând că modelul inițial (cu planșee de beton armat și un număr redus de elemente de cadre de beton armat) asigură creșteri ale capacității portante, măsuri mai puțin invazive sau intervenții locale ar putea conduce la rezultate eficiente, dar optimizate.

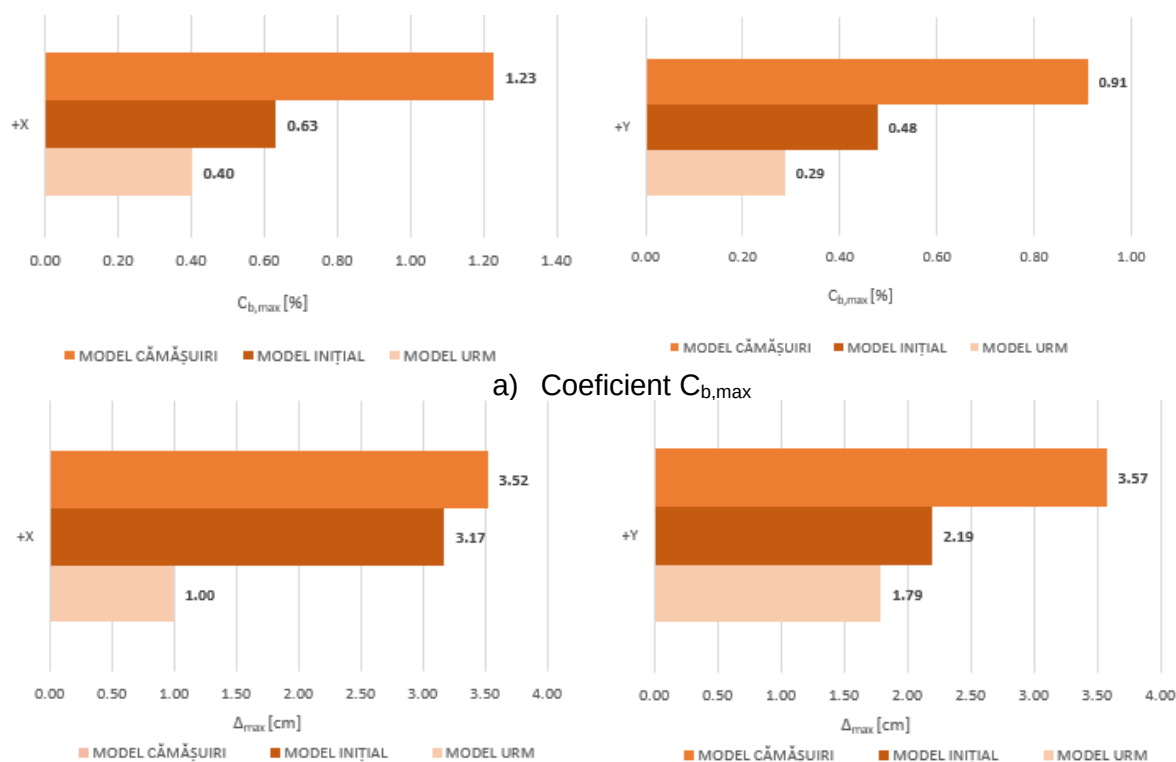


Fig. 16 Comparații între cele trei modele: +X (stânga) și +Y (dreapta)

MODURI DE CEDARE

Modurile de cedare predominante sunt reprezentate de fisuri înclinate în panourile de zidărie, apărute în cazul analizei +X încă din primii pași, la o deplasare relativă de 0.007%. Ulterior, pentru o deplasare relativă de 0.08% și PGA de 0.204 g, apare prima cedare din forță tăietoare, în peretele nr.2 al fațadei. După cum se poate observa în Fig. 17, panourile de zidărie suferă avarii extinse, dar controlate în cazul modelului cămășuit, unde deplasarea ultimă atinge valori superioare celor din modelul URM. Conformarea structurală din modelul inițial, unde sunt prezenți stâlpișori de beton armat, contribuie la redistribuirea eforturilor între elemente și previne astfel colapsul local, specific clădirii de zidărie portantă. Prezența elementelor de confinare generează mecanisme de cedare prin fisuri diagonale în pereți, ulterior contribuind la formarea articulațiilor plastice din elementele de beton armat. Analize similare din literatură indică comportări similare ale clădirilor de zidărie confinată, unde pentru deplasări de 1 cm zidăria confinată prezintă avarii extinse, dar controlate [5].

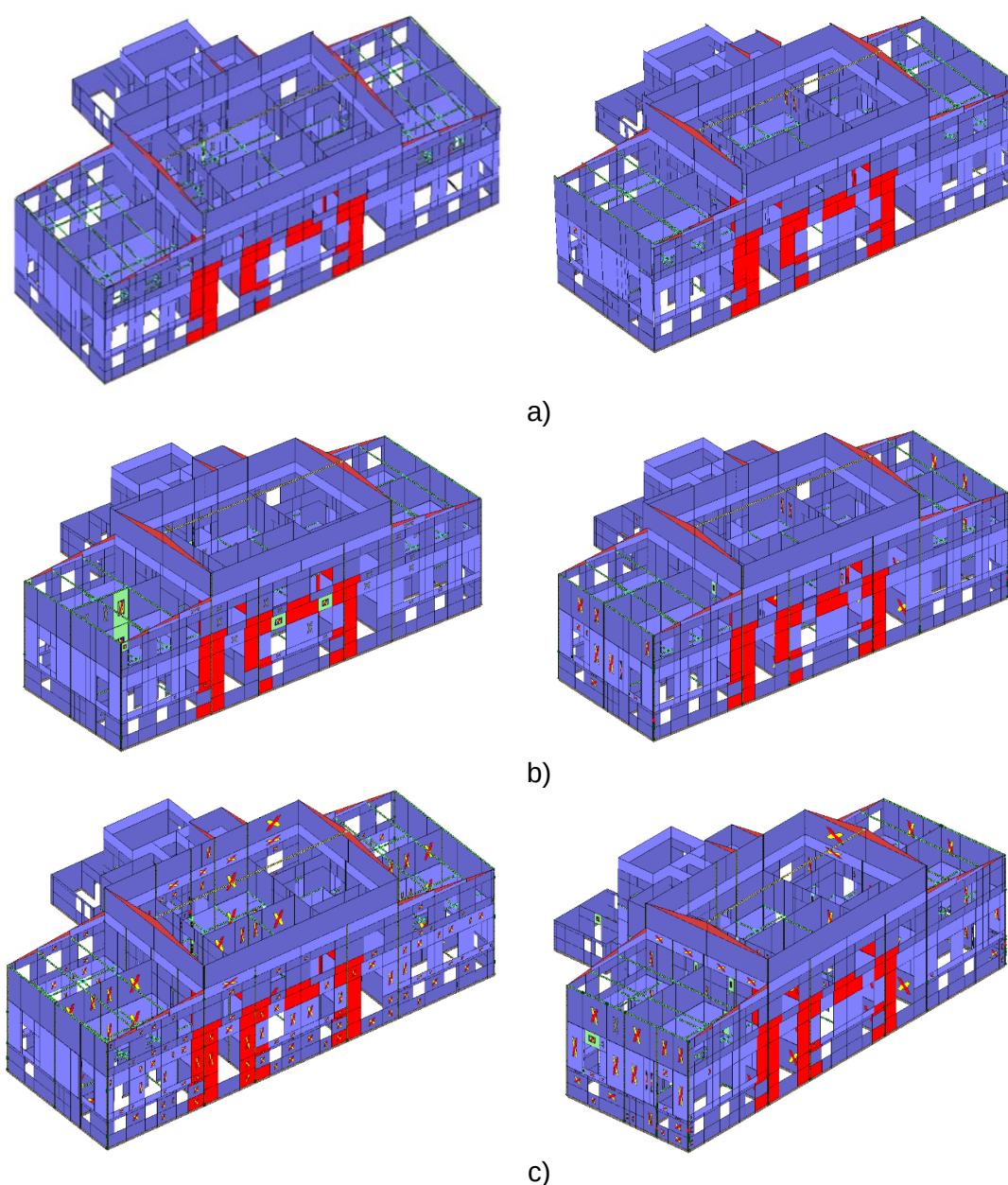


Fig. 17 Moduri de cedare ale elementelor structurale pentru: a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit

Ambele seturi de grafice ilustrează însă diferențele majore dintre răspunsurile obținute pentru cele două direcții. Pentru direcția transversală, primele fisuri și primele cedări apar la valori cu 50% mai mici decât cele de pe direcția longitudinală, dată fiind conformarea asimetrică a clădirii. Intervențiile de cămășuire și de îndesire a stâlpișorilor sunt concentrate pe direcția longitudinală a clădirii, pe direcția pe care sunt amplasate și majoritatea pereților de zidărie. Astfel, eficiența intervențiilor este mai bine evidențiată prin rezultatele comparative din Fig. 18, direcția X.

Diferențele dintre modelul URM și cel inițial sunt mai evidente în cazul pragurilor pentru primele cedări din Fig. 19, unde apar dublări ale valorilor PGA. Analizând deplasările relative asociate primelor cedări ale elementelor de zidărie, se poate observa că în cazul modelului URM și al celui inițial, pentru ambele direcții valorile sunt de 0,04% – 0,06%, valoare ce corespunde și limitei pentru starea de ocupare imediată a clădirilor de zidărie portantă, așa cum va fi observat în continuare. Se poate concluziona astfel că deplasările asociate unui drift de 0.06% care cauzează primele cedări ale elementelor marchează și inițierea stării de control a avariilor.

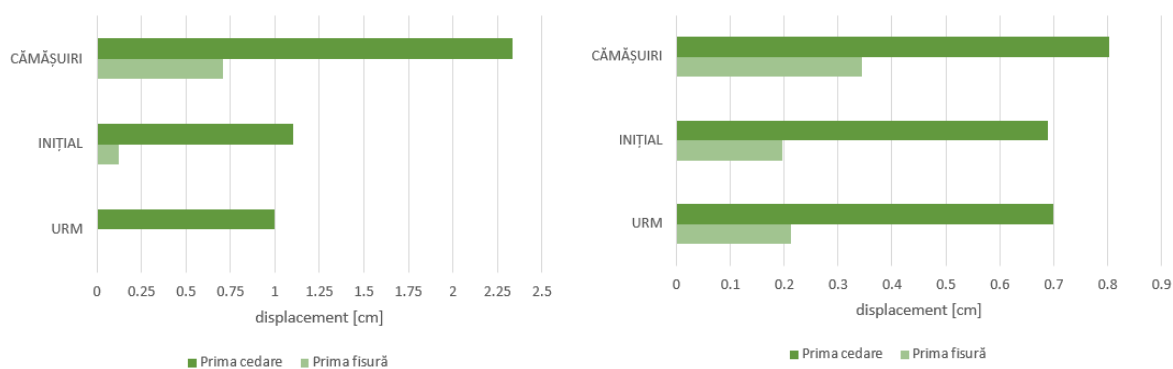


Fig. 18 Evoluția mecanismelor de cedare în funcție de deplasări laterale: direcția X (stânga) și Y (dreapta)

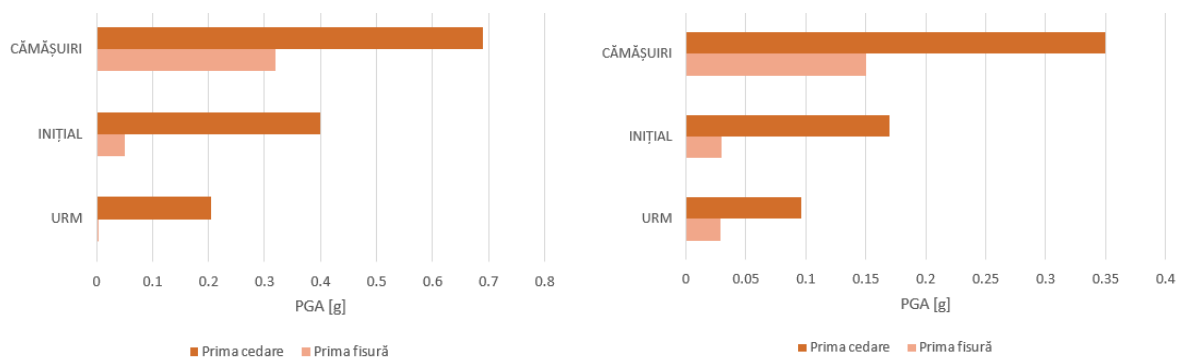


Fig. 19 Evoluția mecanismelor de cedare în funcție de PGA: direcția X (stânga) și Y (dreapta)

DEPLASĂRI RELATIVE GLOBALE

Folosind limitele de deplasări relative globale prezentate în literatură, codul de culori indicat în Tab. 1 a fost suprapus curbilor Pushover ale modelului URM, pentru a indica pragurile corespunzătoare fiecărui criteriu de performanță (D0 – D3). Deplasările ultime înregistrate indică depășirea limitei de siguranță a vieții (D2) pentru toate cazurile, cu excepția analizei pe direcția longitudinală, sens pozitiv, pentru care se atinge stadiul de control al avariilor (D1).

Majoritatea structurilor de zidărie din România, în special cele din zidărie confinată și cele cu planșee rigide de beton armat, sunt alcătuite din pereți de cărămidă țesuți la intersecții. Din acest motiv, s-au folosit rezultatele prezentate în studiul realizat de Vatteri și D'Ayala [6] cu privire la limite ale deplasărilor relative globale pentru clădirile de zidărie confinată care cedează în plan. Autorii prezintă o colecție de studii din domeniu și în final intervale de valori ale deplasărilor relative globale stabilite în baza acestora. Cele trei stări limită considerate corespund apariției primei fisuri (criteriul de performanță: ocupare imediată), avariere semnificativă și detașări ale pereților de zidărie de elementele de confinare (criteriul de performanță: siguranța vieții) și pre-colaps (criteriul de performanță: prevenirea prăbușirii). Intervalele medii propuse sunt notate în Tab. 1 pentru categoria clădirilor de zidărie confinată.

Pentru a putea evalua performanța clădirii la nivel global, în funcție de cerința de deplasare, au fost calculate deplasările țintă (target displacement), conform metodei coeficienților prezentată în FEMA 356 [7] și FEMA 440 [8]. Deplasarea țintă reprezintă un concept echivalent punctului de performanță, indicând deplasarea laterală maximă la care este posibil să ajungă clădirea supusă acțiunii seismice. Astfel au fost obținute valorile sintetizate în Tab. 2 și apoi transformate în valori de deplasări relative, pentru a fi comparate cu limitele prezentate anterior. Pentru clădirea din modelul de zidărie portantă, valorile deplasărilor țintă corespund celor propuse în literatură, mai puțin limita de ocupare imediată calculată pentru direcția Y, care ajunge la 0,15% drift.

Atât modelul inițial, cât și cel consolidat ating deplasări ultime care depășesc pragul de prevenire a colapsului, având astfel o capacitate mai mare decât cerința de deplasare asociată stării de prevenire a colapsului. Modelul de zidărie portantă în schimb, ajunge la valori mai mici chiar și decât cerința pentru ocupare imediată, ceea ce indică necesitatea unor măsuri de consolidare.

Tab. 1 Limite de deplasări relative globale pentru zidăria portantă și confinată

		Zidărie portantă ([9], [10])	Zidărie confinată [6]
D0	Immediate Occupancy (IO)	0% - 0,06%	0% – 0,125%
D1	Damage Control (DC)	0,06% - 0,1%	0,125% – 0,4%
D2	Life safety (LS)	0,1% - 0,2%	0,3% – 1,39%
D3	Collapse Prevention (CP)	≥ 0,2 %	1,54% – 4%

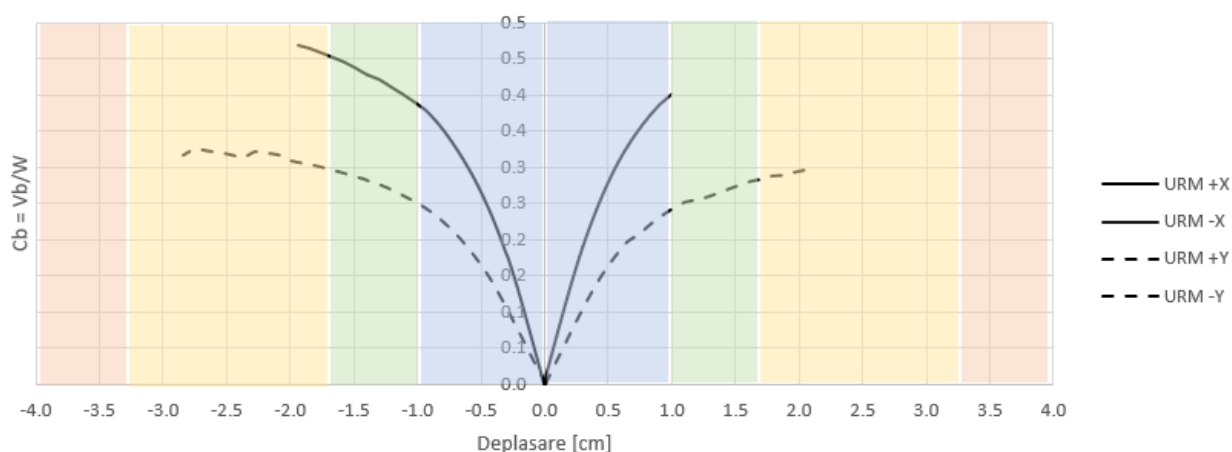


Fig. 20 Limite pentru criterii de performanță – model URM

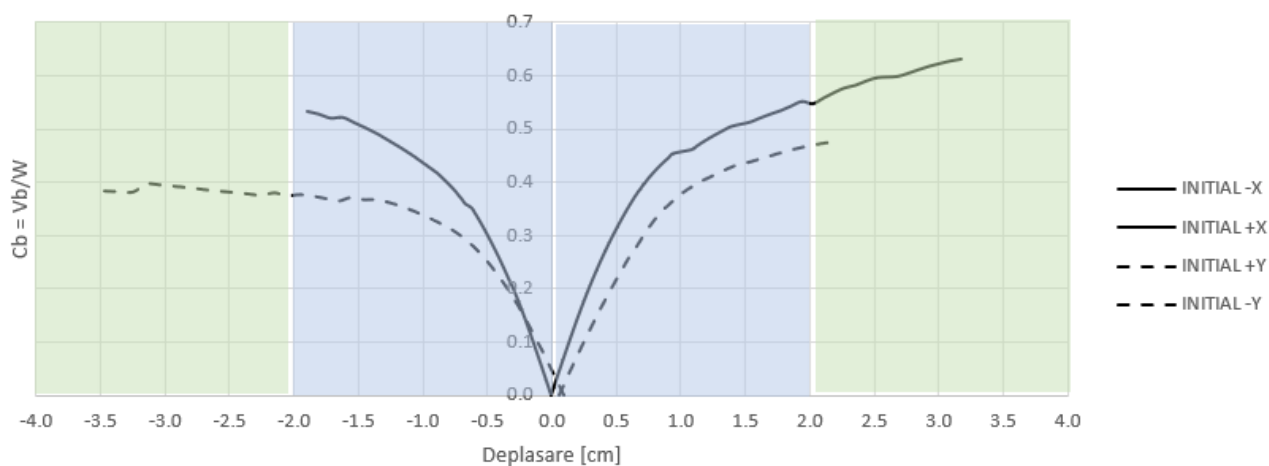


Fig. 21 Limite pentru criterii de performanță – modelul INIȚIAL

Stările limită calculate pentru curbele de Pushover bilinearizate automat în 3DMacro sunt stabilite în conformitate cu normele din Italia [11], după următoarele criterii:

- SLD (IO) – avarii care nu pun în pericol siguranța vieții și nici nu produc modificări semnificative ale rezistenței și rigidității structurale, permițând utilizarea imediată a clădirii supuse acțiunii seismice.
Limita este reprezentată de atingerea limitei elastice pe curba de capacitate echivalentă bilinearizată.
- SLV (LS) – avarii ale elementelor nestructurale și structurale, care nu pun însă în pericol integritatea clădirii.
Criteriul este depășit pentru deplasări mai mari de $\frac{3}{4}$ din deplasarea înregistrată pentru SLC.
- SLC (CP) – avarii majore care pot cauza prăbușiri parțiale sau totale.
Pragul pentru depășirea SLC a elementelor de zidărie este stabilit la 1% pentru deformația unghiulară din încovoiere și 0,5% în cazul forfecării, cu mențiunea că această verificare poate fi omisă dacă structura are planșee infinit rigide.

Tab. 2 Deplasări țintă – metoda coeficienților

					IO	LS	CP			IO	LS	CP	du – deplasare ultimă
		T _e [s]	C ₀	C ₁	C ₂			C ₃	S _{a(BUC)} [m/s ²]	δt – deplasare țintă [cm]			
Model URM	+X	0,216	1,20	1,46	1	1,28	1,48	1	5,702	1,18	1,52	1,75	1,00
	+Y	0,289	1,20	1,44	1	1,27	1,46	1	6,806	2,48	3,17	3,63	2,05
Model inițial	+X	0,177	1,20	1,47	1	1,28	1,48	1	5,426	0,76	0,98	1,13	3,17
	+Y	0,241	1,20	1,45	1	1,28	1,47	1	6,254	1,60	2,06	2,36	2,52
Model cămășuiri	+X	0,180	1,20	1,47	1	1,28	1,48	1	5,426	0,79	1,02	1,17	3,52
	+Y	0,124	1,20	1,49	1	1,30	1,50	1	4,874	0,34	0,44	0,51	3,57

Pentru modelul inițial, direcția +X de încărcare, limitele stărilor limită sunt marcate în Fig. 22, unde se pot observa în partea de jos și evenimentele înregistrate pe parcursul analizei. Panourile de zidărie care cedează sunt marcate cu roșu, iar cele care sunt doar fisurate, cu galben. Culoarea roșie este folosită și pentru elementele de beton armat care cedează, în timp ce pentru rotații care depășesc limita de curgere, apare culoare verde. Deplasările care corespund celor trei stări limită sunt de 0,35 cm = 0,02% drift (SLD), 2,43 cm = 0,14% drift (SLV) și 3,18 cm = 0,19% drift (SLC). Chiar dacă valorile de deplasări țintă calculate anterior indică praguri mult mai scăzute pentru stările limită, criteriile pre-stabilite în program conduc la o comportare structurală diferită de cea estimată prin metoda coeficienților.

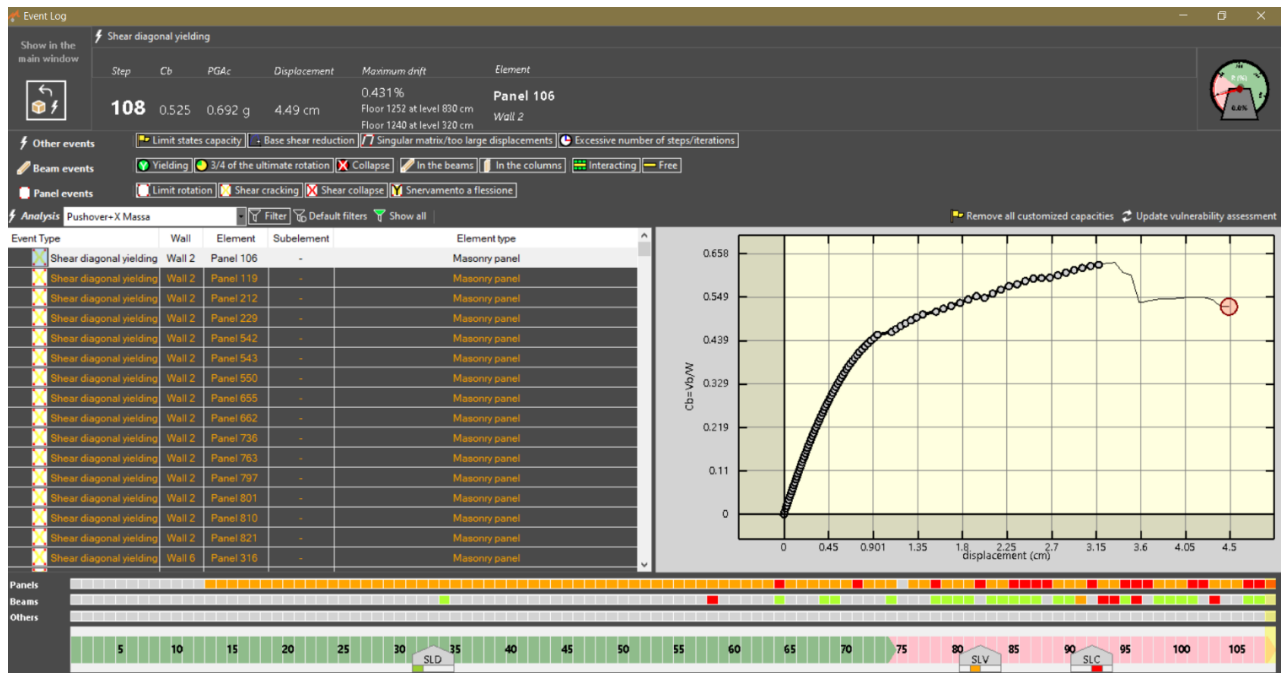


Fig. 22 Evoluția avariilor pentru modelul inițial, analiza +X

DEPLASĂRI RELATIVE DE NIVEL

Modurile de cedare locale nu pot fi surprinse doar analizând deplasările ultime înregistrate pe curbele de Pushover prezentate anterior. Astfel, pentru a putea analiza mai bine modurile de cedare și etapele de avariere, se vor compara în continuare rezultatele obținute la nivel de perete. Din analizele efectuate pentru cele trei modele în 3DMacro, au fost obținute curbe de Pushover la nivel de perete, unde forța tăietoare de bază este normalizată la greutatea totală a clădirii și deplasarea laterală este înregistrată pentru un punct de control de la ultimul nivel.

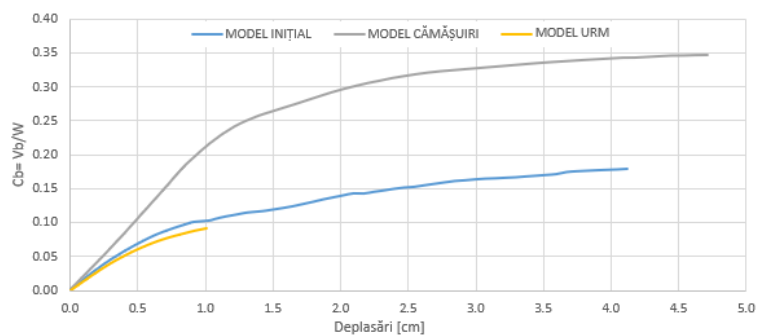
Pentru a putea estima eficiența lucrărilor de consolidare parțială (modelul inițial) și finală (modelul cămășuit), au fost aleși patru pereți pentru o analiză mai detaliată. S-a urmărit nivelul de avariere al pereților, direcția pe care sunt dispuși și compararea unor pereți cămășuiți cu unii necămășuiți. Cei doi pereți cămășuiți considerați în continuare sunt: P2 (fațada vest, direcție longitudinală) și P24 (fațada nord, direcție transversală), iar cei necămășuiți sunt: P27 (perete interior, direcție longitudinală) și P12 (perete al corpului de legătură, direcție transversală).

Fig. 23 prezintă rezultatele pentru cei patru pereți, împreună cu imagini care surprind localizarea lor în planul clădirii. Pereții transversali ajung la mai puțin de jumătate din capacitatea celor longitudinali, însă înregistrează deplasări ultime de până la 1,5 ori mai mari. Diferențele dintre modelul URM și cel inițial sunt mai evidente în cazul pereților de pe direcția X, cu creșteri de 70% ale forței capabile și de 400% pentru deplasările laterale.

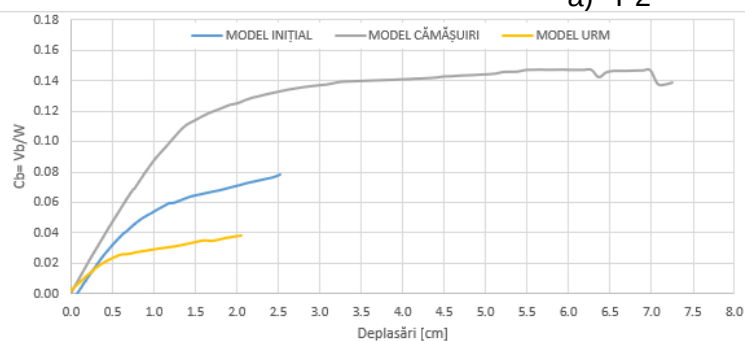
Se poate observa că peretele cel mai solicitat este P2, așa cum indica și evoluția avariilor prezentată anterior, ținând cont în același timp și de volumul mare de elemente de zidărie capabile să preia încărcarea seismică. Peretele 27 este amplasat doar la nivelul demisol, ceea ce face ca și forța capabilă a acestuia, raportată la greutatea totală a clădirii, să fie cu mult mai mică față de alți pereți. Peretele transversal 12 este în schimb continuu de-a lungul înălțimii corpului de legătură, însă fiind de dimensiuni reduse, aportului acestuia în preluarea forțelor laterale este la fel de redus.

Comparând rezultatele obținute pentru pereții cămășuiți cu cei care nu au fost consolidați, se pot observa diferențe majore. Peretele 27 și peretele 12 nu prezintă creșteri ale capacității de preluare a forțelor laterale. Mai mult decât atât, în cazul modelului cămășuit, P27 prezintă cedările locale marcate pe curba de Pushover prin scăderi bruște, care apar pentru deplasări mai mici decât în cazul modelului inițial. Pereții aleși pentru a fi consolidați, precum P2 și P24, contribuie semnificativ la îmbunătățirea capacității structurale, însă trebuie subliniat de faptul că majoritatea pereților au beneficiat de astfel de intervenții de consolidare, așa cum este ilustrat în Fig. 13.

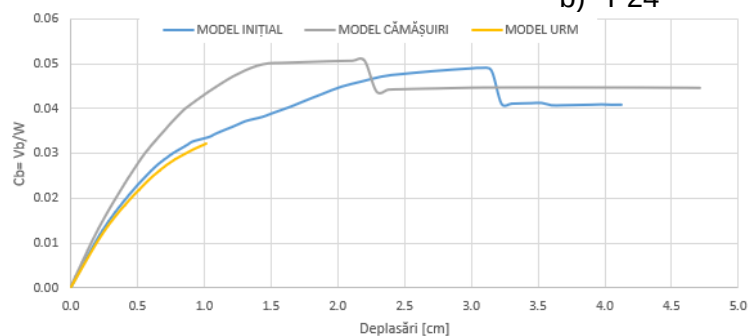
Deplasările ultime înregistrate pe curbele de Pushoveruri individuale sunt egale pentru toți pereții amplasați pe una dintre direcții, reprezentând deplasarea înregistrată în punctul de control, ales la cota 17.3 m.



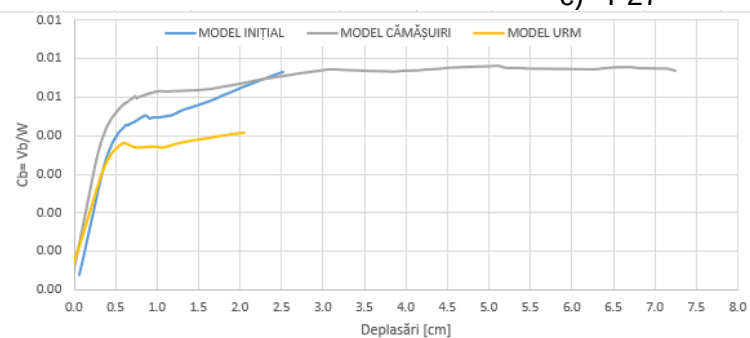
a) P2



b) P24

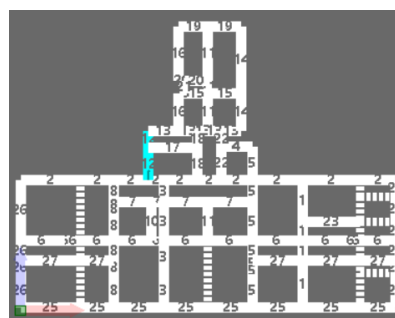
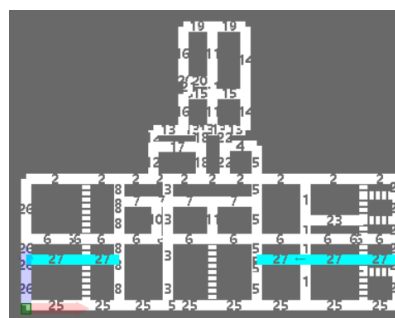
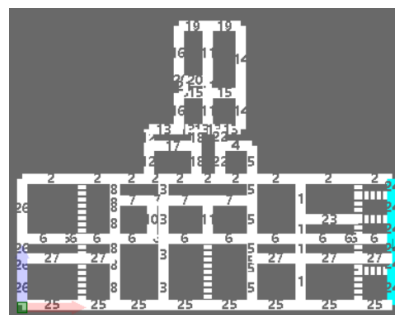
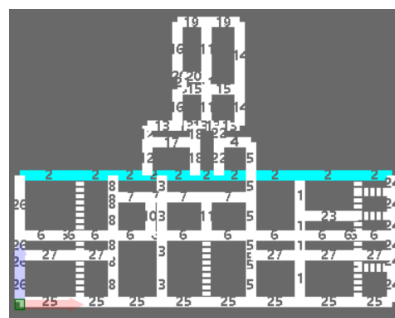


c) P27



d) P12

Fig. 23 Curbe de Pushover pentru pereții cămășuiți (a, b) și necămășuiți (c, d)



Valorile de deplasări relative prezentate în FEMA 356 [7] ilustrează răspunsul structural specific diverselor tipuri de elemente structurale verticale, prin corelarea cu nivelurile de performanță și avariile asociate lor, fără să fie însă limite impuse de cod sau să înlocuiască limitele de deformabilitate pentru elementele individuale. Valorile prezentate în codul american trebuie să fie folosite doar cu scopul de a realiza comparații și nu pentru a evalua comportarea seismică a clădirilor.

Pentru a compara nivelurile de performanță ale celor trei modele, în funcție de valorile propuse în FEMA 356, este necesară folosirea deplasărilor relative de nivel. Pentru modelul URM se vor folosi limitele pentru clădiri de zidărie portantă, iar pentru cel inițial, limitele pentru clădiri de zidărie armată. Un perete de zidărie armată este definit în standardul american ca având un procent minim de armătură verticală și orizontală, legată corespunzător de elementele orizontale precum planșee sau acoperiș. Pentru că nu există o altă categorie mai potrivită sistemului structural cu zidărie portantă și stâlpișori și centuri și pentru că limitele zidăriei armate presupun valori mai ridicate decât cele pentru zidăria nearmată, se propune folosirea acestora. Ținând cont de faptul că în cazul modelului cămășuit, majoritatea pereților care prezintă continuitate pe înălțime, au fost consolidați prin cămășuire, pe una sau ambele fețe și au fost de asemenea adăugați numeroși stâlpișori de beton armat, se propune folosirea limitelor propuse în FEMA 356 pentru pereți de beton armat. Pentru pereții de zidărie consolidați prin torcretare, FEMA 356 specifică faptul că pentru secțiunile compuse se pot aplica criteriile de performanță (rigiditate, rezistență, deformabilitate) definite pentru elemente noi ce beton armat.

Astfel, Tab. 3 sintetizează limitele propuse pentru estimarea performanței, pentru fiecare model în parte. Clădirea supusă unei acțiuni laterale cu o creștere graduală până la depășirea deplasării țintă generează avarii în elementele structurale. Deplasările de nivel obținute prin intermediul analizelor neliniare ale celor trei modele sunt corelate cu grade de avariere ale elementelor structurale, avarii estimate în funcție de criteriile de cedare implementate în programul folosit. Pentru a verifica valorile de deplasări relative propuse în FEMA 356, se va evalua nivelul de avariere din pereții clădirii, pentru a permite încadrarea într-unul dintre criteriile de performanță descrise pentru fiecare tip de element vertical (perete de zidărie portantă, perete de zidărie armată și perete de beton armat). Apoi, în funcție de performanța estimată, se va compara deplasarea relativă de nivel probabilă indicată în cod cu deplasarea relativă de nivel obținută în analiza numerică. Vor fi aleși pereții cu avariile cele mai semnificative de pe ambele direcții, respectiv P2, P6 și P25 (direcția X) și P1, P3 și P26 (direcția Y), amplasați conform schiței din Fig. 24. Pentru a interpreta stadiul avariilor din panourile de zidărie, vor fi folosite simbolurile din 3DMacro, ilustrate în Tab. 4.

Peretele longitudinal nr.2 a fost ales pentru că prezintă unele dintre cele mai extinse nivele de avariere și chiar cedări care au condus la oprirea analizei neliniare. Acesta constituie fațada de legătură dintre corpul principal, zona de scară și corpul secundar, având continuitate de-al lungul întregii înălțimi, cu goluri amplasate regulat. Peretele nr. 26 este un perete de fațadă laterală, amplasat pe direcția transversală a clădirii. Nu există goluri de ferestre decât la nivelul demisolului, ceea ce generează o diferență semnificativă de rigiditate față de etajele superioare. Atât peretele nr.2, cât și peretele nr. 25 și 26 au fost cămășuiți, însă doar pe partea interioară, fiind vorba despre pereți de fațadă. Pereții interiori însă (1, 3 și 6) au fost cămășuiți pe ambele fețe.

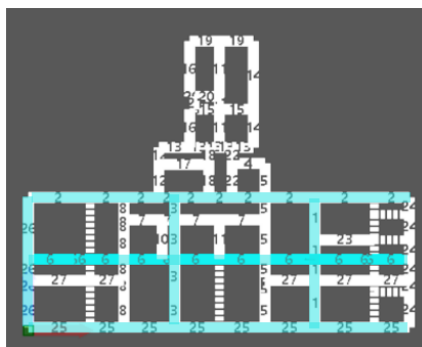


Fig. 24 Localizare pereți

		Zidărie portantă (model URM) Limite pentru deplasări relative la nivel de perete [7]	Zidărie confinată (model inițial) Limite pentru deplasări relative la nivel de perete [7]	Pereți de beton armat (model cămășuiri) Limite pentru deplasări relative la nivel de perete [7]
D0	Immediate Occupancy (IO)	0 - 0,3%	0 - 0,2%	0 - 0,5%
D1	Damage Control (DC)	0,3% - 0,6%	0,2% - 0,6%	0,5% - 1%
D2	Life safety (LS)	0,6% - 1%	0,6% - 1,5%	1% - 2%
D3	Collapse Prevention (CP)	$\geq 1\%$	$\geq 1,5\%$	$\geq 2\%$

Tab. 3 Deplasări relative de nivel și criterii de performanță

Simbol	Stare de avariere
	Fisurare din forfecare
	Fisură închisă
	Cedare din forfecare
	Strivire
	Fisurare

Tab. 4 Legendă pentru simbolurile stărilor de avariere (3DMacro)

Comparând tiparele de avarii din cele trei modele prezentate în Fig. 25, se poate observa că nu apar avarii din strivire sau fisurare, cauzate de cedări ale resorturilor de la interfața dintre panouri, ci doar fisuri sau cedări din eforturi de forfecare. De asemenea, avariile mai extinse în modelul inițial decât în cel de zidărie portantă, și chiar și mai extinse în cazul modelului cămășuit. Dacă pentru modelul inițial se pot remarca desprinderi ale panourilor, modelul cămășuit lucrează unitar în preluarea forțelor laterale, motiv pentru care și fisurile sunt răspândite aproape pe întreaga suprafață a pereților, chiar dacă unele panouri au fisurile închise. Unii dintre stâlpișorii din modelul consolidat prezintă articulații plastice la capete, marcate prin cercuri verzi.

Panourile care ajung la stadiul de cedare din forfecare sunt colorate în verde, putându-se evidenția astfel cel mai mare număr mai mare de cedări în peretele 2. În cazul peretelui 6, mecanismele de cedare apărute la panourile de la etajul 1 și parter sunt prevenite în versiunea consolidată a clădirii, unde elementele noi de confinare sunt dispuse în dreptul golurilor centrale.

La fel ca și în cazul pereților de pe direcția longitudinală, în cazul pereților de pe direcția transversală din modelul URM, există un singur panou de zidărie care cedează din eforturi de forfecare. Toate observațiile făcute anterior pentru direcția longitudinală rămân valabile și în cazul pereților de pe direcția Y. Spre deosebire de pereții analizați anterior, cei transversali au mult mai puține goluri pentru ferestre și uși, ceea ce asigură o comportare mai unitară a panourilor de zidărie.

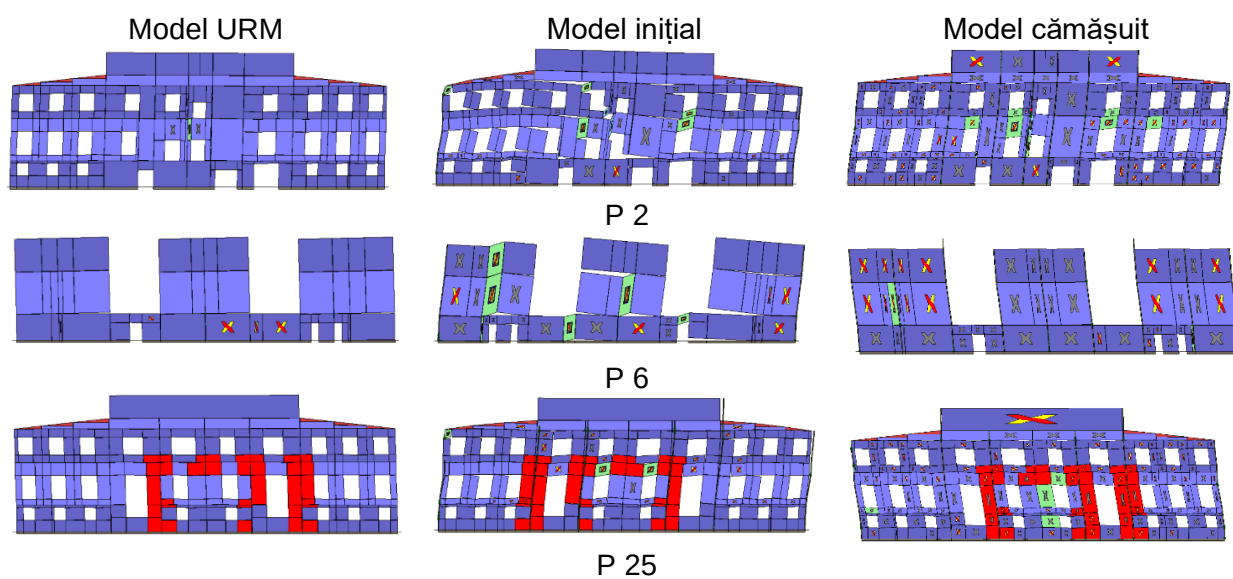


Fig. 25 Nivelul de avariere al pereților, la finalul analizei (direcția +X)

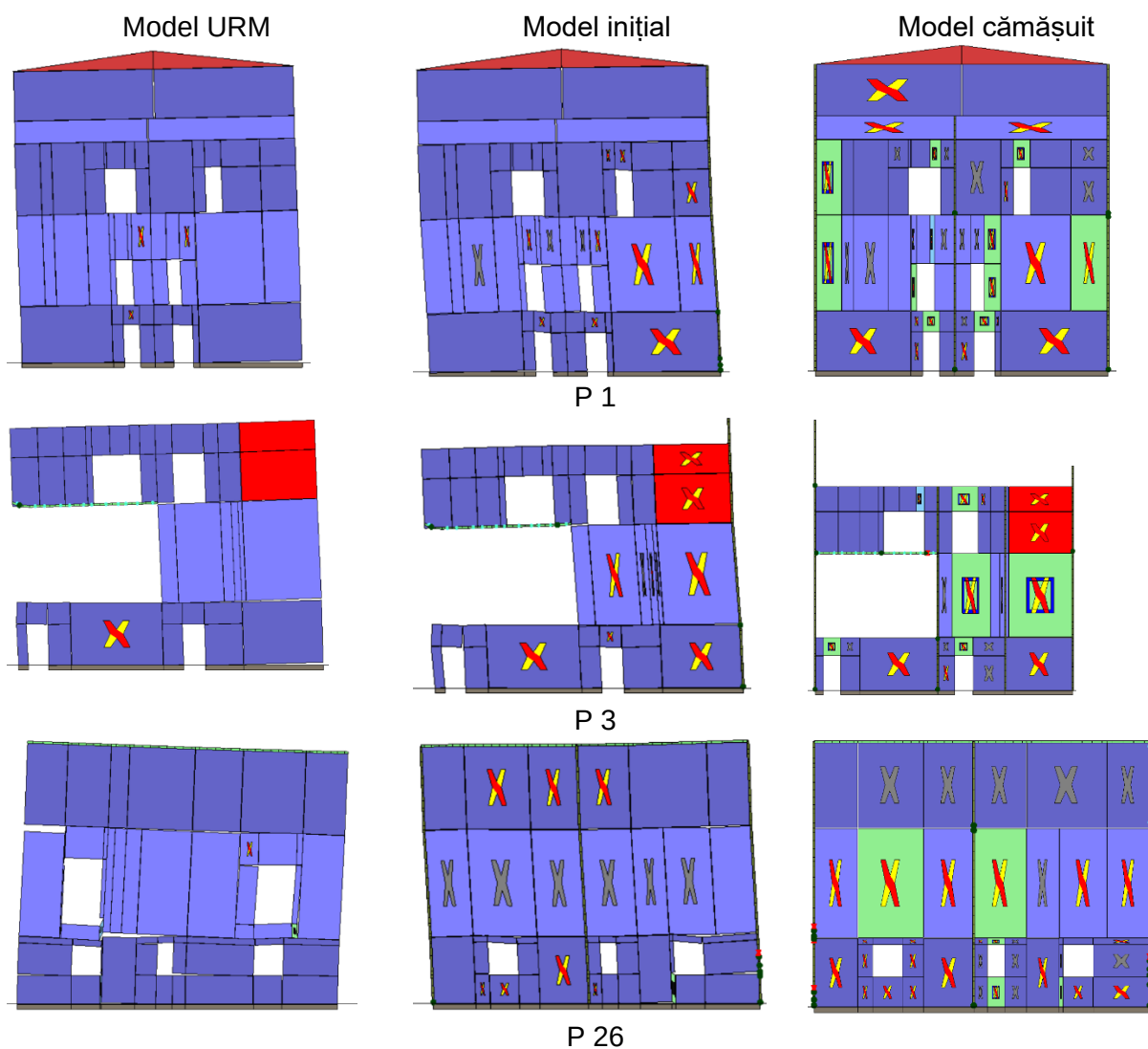


Fig. 26 Nivelul de avariere al pereților, la finalul analizei (direcția +Y)

Criteriile de performanță și avariile asociate lor țin cont și de comportarea pereților de zidărie în afara planului. Analizele numerice realizate în 3DMacro nu surprind aceste aspecte, însă se poate considera că planșeele de beton armat asigură comportarea de cutie rigidă, care previne cedările în afara planului. Având în vedere că pentru cei mai avariați pereți ai clădirii din modelul de zidărie portantă nu prezintă avarii extinse, ci doar câteva panouri fisurate, se poate considera că în urma acțiunii seismice clădirea atinge doar un nivel avariere caracteristic criteriului de ocupare imediată. În FEMA 356, pragul de 0,3% delimitează criteriul de ocupare imediată de cel de control al avariilor, așa cum se poate observa în Tab. 3. Comparând această valoare cu deplasările relative maxime de nivel ale modelului URM, prezentate în Tab. 5, se remarcă drifturi de peste 0,3% pentru direcția +Y, la etajele superioare.

Comparând avariile din pereții modelului inițial cu cele descrise pentru nivelurile de performanță ale zidăriei armate din FEMA 356, se remarcă o depășire evidentă a limitei de ocupare imediată (fisuri minore) și o posibilă încadrare la cerința de siguranță a vieții (fisuri extinse, distribuite de-a lungul pereților și unele cedări izolate în elementele principale). Cerința de prevenire a colapsului ar presupune fisurări extinse și avarii considerabile în jurul golurilor și la colțurile clădirii, cu părți de zidărie prăbușite. Amploarea fisurilor și cedările locale, limitate, nu indică depășirea criteriului de siguranță a vieții, ipoteză confirmată și de verificarea deplasărilor relative de nivel, care au valori sub 1,5%, driftul indicat în cod pentru prevenirea colapsului.

Pentru toți pereții analizați au fost implementare măsuri de consolidare prin cămășuire, astfel încât deplasările relative de nivel vor fi comparate cu limitele propuse pentru pereți de beton armat. Avariile descrise însă în FEMA 356 fac referire și la degradarea armăturilor din flambaj sau la avarierea severă a grinzilor de cuplare, ceea ce nu poate fi corelat cu tiparele de avariere ale elementelor de tip panou de zidărie din program. Depășirea limitei de prevenire a colapsului presupune fisuri importante din forfecare și întindere, strivirea și flambarea armăturii și grinzi de cuplare distruse. Avarii extinse sunt însă notate și pentru siguranța vieții, betonul rămânând însă pe poziție. Fisurile din panourile de zidărie din model sunt extinse, elementele care cedează sunt mai numeroase decât în cazul precedent, însă intervențiile de torcretare ar presupune evitarea cedărilor în afara planului și evitarea prăbușirilor locale. Din aceste motive, se consideră că deplasarea relativă obținută în modelul de calcul (1,24%) este corespunzătoare, fiind sub driftul de 2% asociat criteriului de prevenire a colapsului.

În concluzie, deplasările relative de nivel maxime din modele corespund valorilor propuse ca referință în FEMA 356 pentru cele trei tipuri de elemente structurale verticale, ținând cont de amploarea avariilor în panourile de zidărie. La fel ca și în cazul estimărilor de deplasare ținută, modelul de zidărie portantă cedează prematur, înainte de criteriul de performanță pentru ocuparea imediată.

Cotă [m]	+X, mass [%]			+Y, mass [%]		
	URM	INIȚIAL	CĂMĂȘUIRI	URM	INIȚIAL	CĂMĂȘUIRI
3.2	0.04	0.16	0.28	0.10	0.15	0.26
8.3	0.11	0.54	0.63	0.22	0.34	0.58
12.3	0.23	0.98	1.08	0.42	0.56	0.98
17.3	0.26	1.08	1.24	0.54	0.66	1.16

Tab. 5 Deplasări relative de nivel și nivelul de performanță structurală

ANALIZA DE FRAGILITATE

Funcțiile de fragilitate stabilesc relații între intensitatea acțiunii seismice și nivelul de avariere, prin intermediul probabilităților condiționate. Folosind stadiile de avariere din cadrul metodologiei HAZUS [12] au fost obținute probabilități de depășire asociate unei avarieri minore (1=slight), moderate (2=moderate), extinse (3=extensive) și complete (4=complete), în funcție de niveluri ale accelerațiilor spectrale sau ale deplasărilor spectrale. Curbele de fragilitate au fost definite folosind valorile mediane ale accelerațiilor/deplasărilor spectrale și abateri standard, ținând cont astfel de incertitudini asociate fiecărei stări de avariere. Astfel, a fost folosită repartiția lognormală, conform formulei de mai jos:

$$P[ds|SD] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{SD}{\overline{SD}_{ds}} \right) \right]$$

Unde: $\overline{SD}_{ds}$ reprezintă valoare mediană a deplasării spectrale, pentru care structura atinge pragul stării de avariere ds , β_{ds} este abaterea standard a logaritmului natural al deplasării spectrale pentru care structura atinge pragul stării de avariere ds și Φ este funcția de repartiție normală standard.

Pentru calcularea abaterilor standard și valorile mediane de deplasări spectrale s-a folosit metodologia propusă în cadrul proiectului RISK-UE [13]. Ductilitatea ultimă (μ_u) reprezintă raportul dintre deplasarea ultimă și deplasarea corespunzătoare punctului de inflexiune de pe curbele de capacitate biliniarizate. Acest parametru intră în componența formulelor de mai jos, propuse pentru estimarea abaterilor standard corespunzătoare fiecărei stări de avariere [14]:

$$\begin{aligned}\beta_{d1} &= 0,25 + 0,07 \ln(\mu_u) \\ \beta_{d2} &= 0,20 + 0,18 \ln(\mu_u) \\ \beta_{d3} &= 0,10 + 0,40 \ln(\mu_u) \\ \beta_{d4} &= 0,15 + 0,50 \ln(\mu_u)\end{aligned}$$

Formulele de calcul folosite pentru stabilirea pragurilor de trecere de la o stare de avariere la alta, în funcție de valorile de deplasări relative, caracteristice fiecărei structuri. Trecerea bruscă de la zona de comportare elastică la cea plastică marchează starea de avariere moderată, în timp ce pragul pentru avariarea minoră este stabilit la 0.7 din deplasarea de curgere, S_{dy} . Pentru atingerea stării de avariere extinse se folosește o pondere între valoarea deplasării de curgere și cea ultimă [15], iar starea de avariere completă corespunde deplasării ultime.

$$\begin{aligned}\overline{SD}_{d1} &= 0,7 S_{dy} \\ \overline{SD}_{d2} &= S_{dy} \\ \overline{SD}_{d3} &= S_{dy} + 0,25 \cdot (S_{du} - S_{dy}) \\ \overline{SD}_{d4} &= S_{du}\end{aligned}$$

Variantele biliniarizate ale curbelor Pushover sunt ilustrate în Fig. 27 pentru toate cele patru modele structurale și pentru ambele direcții de aplicare a forței seismice, în sens pozitiv. Liniile punctate marchează pragurile pentru stările de avariere (D1, D3 și D4), împreună cu punctul de curgere care marchează starea de avariere D2. Date fiind creșterile semnificative ale rezistenței pentru modele consolidate, în special cel cămășuit, sunt atinse valori ale

acceleațiilor spectrale de peste 1g, valori comparabile celor obținute pentru clădiri de beton armat [15].

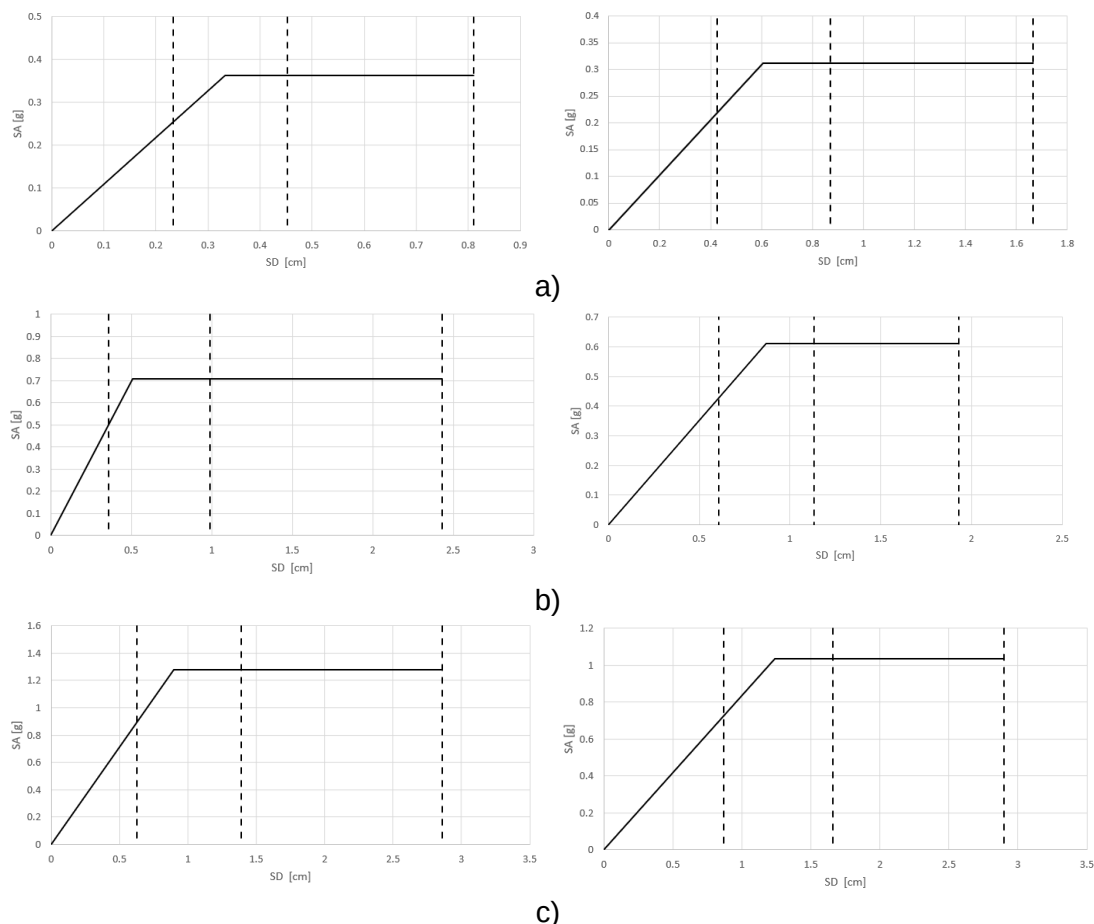


Fig. 27 Curbe de capacitate biliniarizate pentru direcția X (stânga) și direcția Y (dreapta): a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit

Curbele de fragilitate exprimate în deplasări spectrale pentru cele patru modele analizate sunt ilustrate în imaginile de mai jos, pentru direcția X și Y, sens pozitiv. Pentru modelul ipotetic URM și cel inițial se remarcă diferențe semnificative între cele două direcții, în timp ce pentru modelul consolidat, rezultatele obținute pentru X și Y sunt mai apropiate.

Pentru același nivel de deplasare spectrală, graficele din Fig. 28 ilustrează influența consolidărilor graduale, pornind de la valori ridicate pentru probabilitatea de avarii extinse/complete a clădirii de zidărie portantă (URM) și ajungând la valori sub 10% pentru modelul consolidat prin cămășuire. Cele mai semnificative reduceri sunt înregistrate pentru valori mai mari de deplasări spectrale și pentru direcția X. În aceste cazuri apar reduceri de peste 50% ale probabilității de a fi în starea de avariere completă. Se pot observa de asemenea modificări între modelul URM și cel inițial, evidențiind astfel aportul adus de stâlpișorii de zidărie, chiar dacă nu sunt amplasați la fel de dens ca cei din modelul final, consolidat.

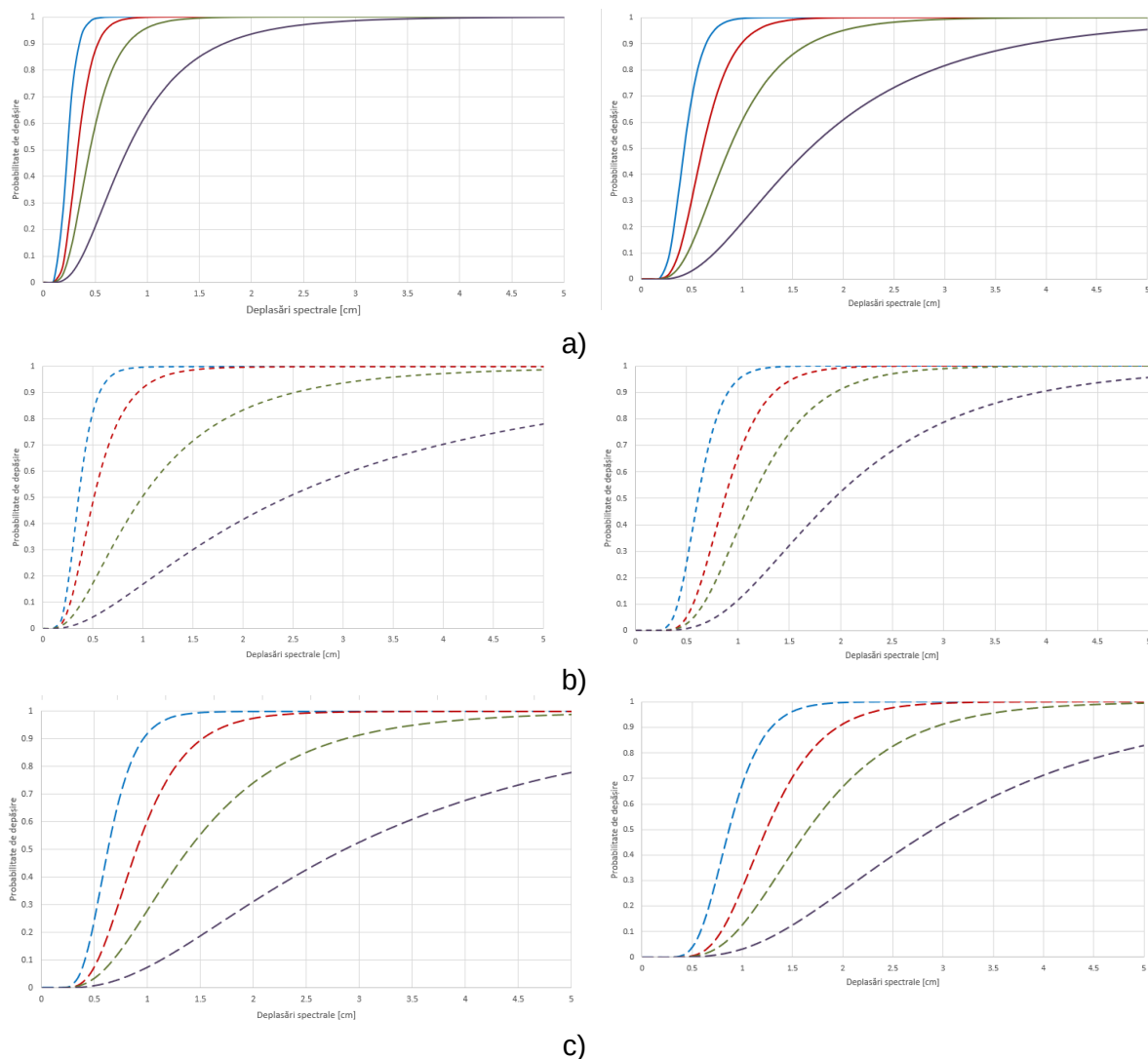
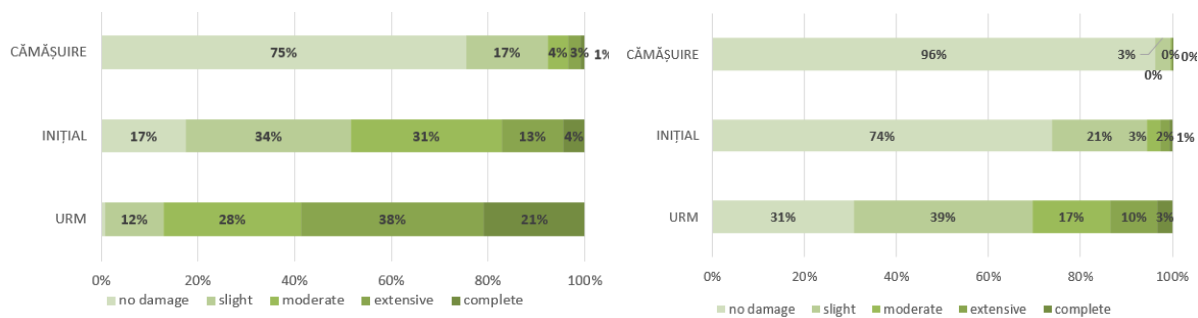
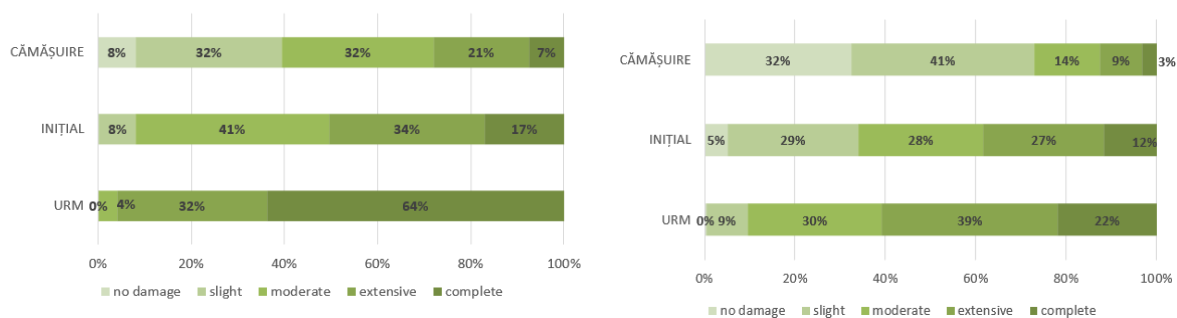


Fig. 28 Curbe de fragilitate: direcția +X (stânga) și +Y (dreapta) pentru a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit



a) $S_d = 0,5 \text{ cm}$



b) $S_d = 1,0$ cm

Fig. 29 Probabilitatea de a se afla într-o anumită stare de avariere, pentru direcția + X (stânga) și +Y (dreapta)

DEPLASĂRI SPECTRALE [CM]									
		avariere minoră		avariere moderată		avariere extinsă		avariere completă	
		Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β
URM	+X	0.23	0.31	0.33	0.36	0.45	0.46	0.81	0.60
	+Y	0.43	0.32	0.61	0.38	0.87	0.50	1.66	0.65
ÎNȚĂL	+X	0.36	0.36	0.51	0.48	0.99	0.72	2.43	0.93
	+Y	0.61	0.31	0.87	0.34	1.13	0.42	1.93	0.55
CĂMĂȘUIRI	+X	0.63	0.33	0.90	0.41	1.39	0.56	2.86	0.73
	+Y	0.87	0.31	1.24	0.35	1.66	0.44	2.90	0.57

Tab. 6 Parametrii de fragilitate

Comparând parametrii de fragilitate din literatură ([15], [16]) cu cei obținuți pentru cele patru modele, limitele minime și maxime sunt foarte apropiate, așa cum se poate observa în Tab. 7. Pentru o comparație mai detaliată, se vor analiza în continuare modele din studiul [15] care prezintă caracteristici similare structurilor din prezenta analiză, și anume: Clădirea E – modelul „URM” și Clădirea D – modelul „înițial”. Acestea corespundente au fost alese ținând cont de următoarele aspecte:

- Clădirea E este singura clădire mixtă de zidărie și beton armat care nu are stâlpi, ci doar grinzi și buiandrugi, corespunzând astfel structurii modelului URM;
- Ambele clădiri (D și E) au planșee de beton armat, la fel ca și modelul URM și cel cu stâlpi, cu toate că sunt prezente și planșee casetate în cazul clădirii E;
- Pereții de zidărie ai clădirii D sunt realizați din material similar celui din clădirea din București, cărămidă plină din argilă arsă, chiar dacă grosimile maxime sunt de doar 40 cm exterior și 25 cm interior;

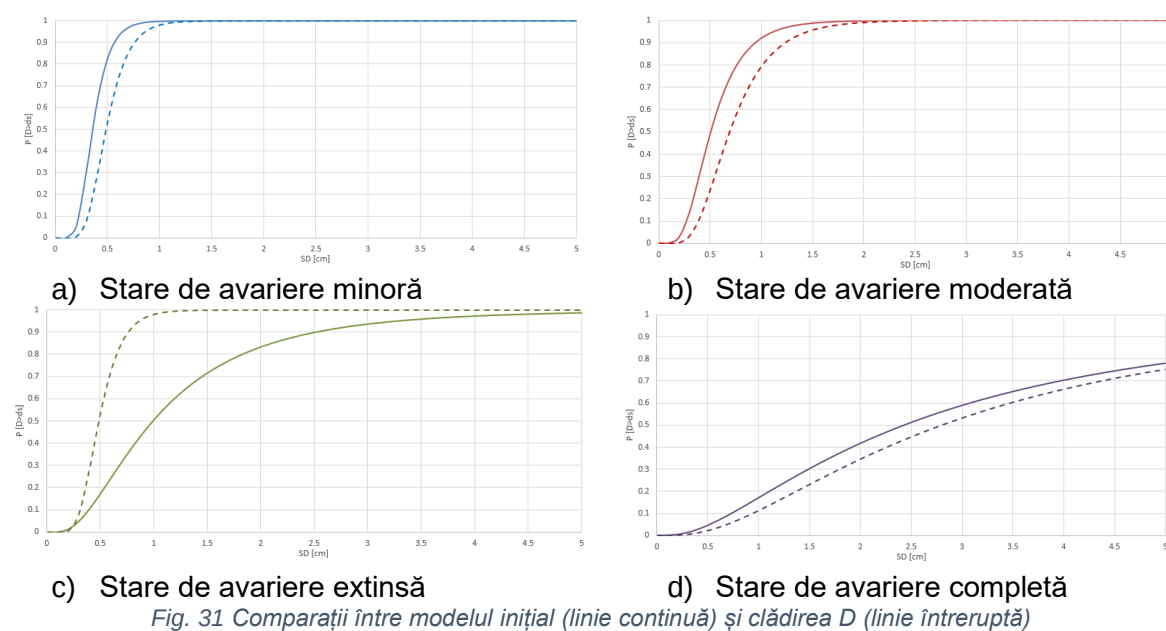
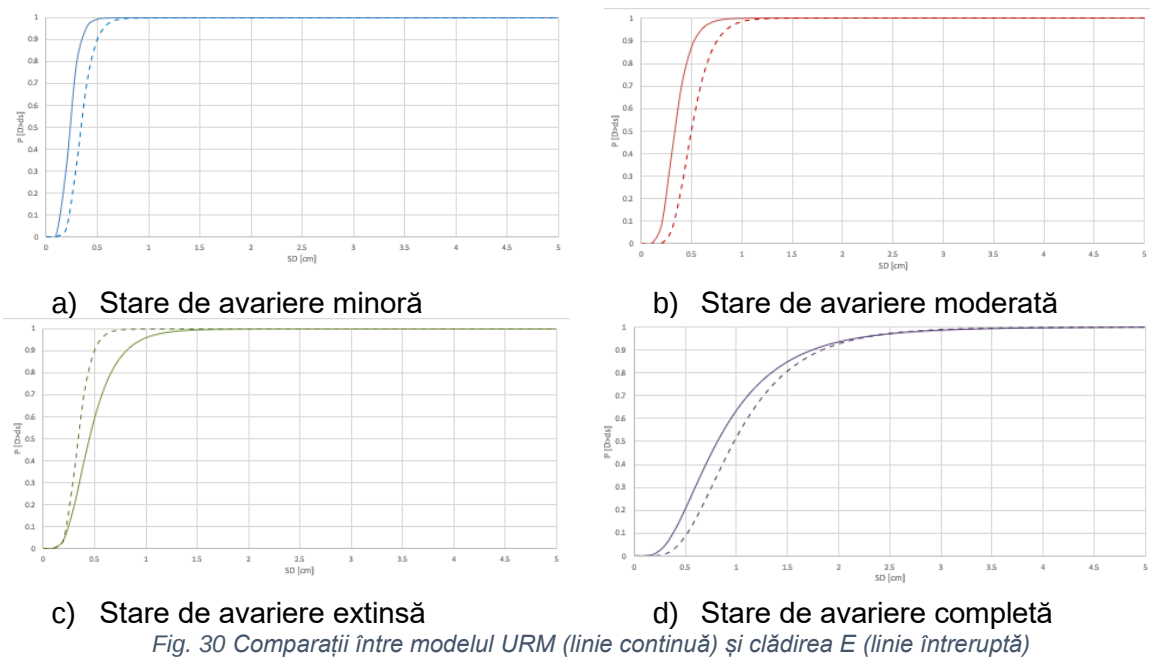
Parametrii de fragilitate	de	Barcelona: URM – înălțime medie [16]	Lisabona: clădiri mixte de zidărie și beton armat „Placa” [15]	București: prezenta analiză
Deplasări spectrale [cm]		0,4 – 2,9	0,1 – 3,1	0,23 -2,90
Abatere standard β		0,4 – 0,7	0,3 – 1,45	0,31 – 0,93

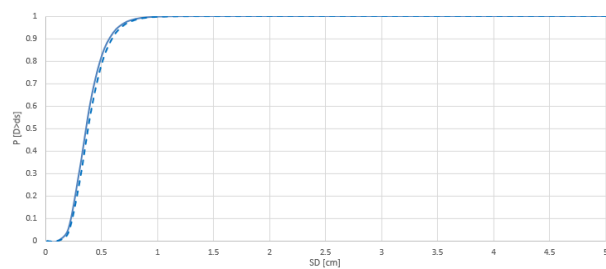
Tab. 7 Comparație între limitele parametrilor de fragilitate

Folosind parametrii de fragilitate prezentați în lucrarea Lamego et al., 2016 și cei obținuți pentru modele școlii analizate, au fost suprapuse curbele de fragilitate de pe direcțiile critice (X) pentru a observa care sunt diferențele dintre structurile alese pentru a fi comparate. Primul set de curbe de fragilitate din Fig. 30 indică potriviri pentru toate stările de avariere. Curbele

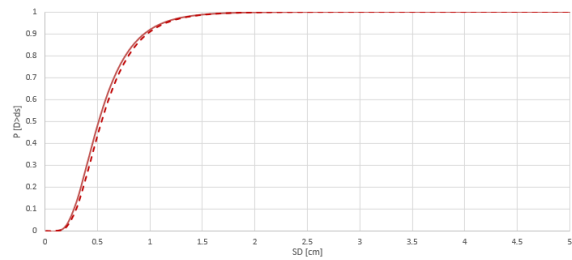
cu linie continuă ale modelului URM sugerează o fragilitate mai mare decât cele ale clădirii E (linie întreruptă) pentru toate stările de avariere, mai puțin pentru cea de avariere extinsă.

Fig. 31 ilustrează comparațiile pentru modelul inițial și clădirea D, unde însă există diferențe semnificative pentru curbele de fragilitate obținute pentru starea de avariere extinsă. Comparații între modelul clădirii de zidărie confinată și studiul realizat pentru clădirile din Portugalia [15] sunt prezentate și în Fig. 32, unde apar însă valorile medii ale parametrilor de fragilitate folosiți pentru definirea întregii tipologii structurale pentru clădirile „Placa” cu regim mediu de înălțime. Curbe astfel rezultate sunt aproape identice cu cele obținute în modulul școlii, direcția X, excepție făcând starea de avariere extinsă.

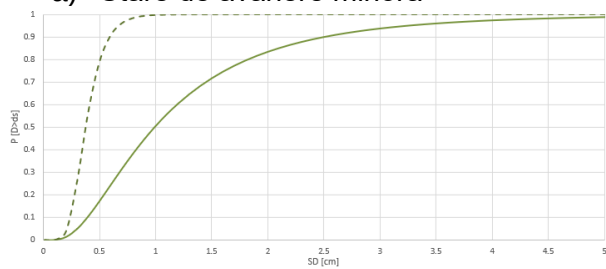




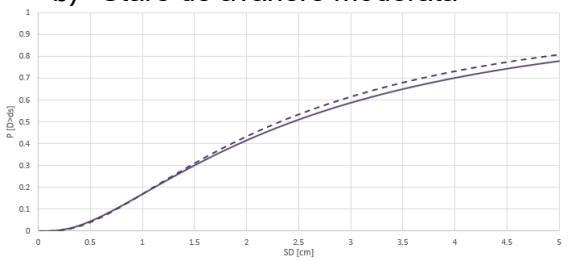
a) Stare de avariere minoră



b) Stare de avariere moderată



c) Stare de avariere extinsă



d) Stare de avariere completă

Fig. 32 Comparații între modelul inițial (linie continuă) și tipologia „Placa” – regim mediu de înălțime

BIBLIOGRAFIE

- [1] S. Nistor, "18 Aprilie: Ziua Mondială a Monumentelor. Patrimoniul educației," *ICOMOS*, 2013. <http://www.icomos.ro/nou/ZMM-2013.htm>.
- [2] Institutul Național al Patrimoniului, "Lista Monumentelor Istorice," 2015. <https://patrimoniu.ro/monumente-istorice/lista-monumentelor-istorice>.
- [3] Institutul Național de Statistică, "Recensământul populației și locuințelor," 2011. <http://www.recensamantromania.ro/rezultate-2/>.
- [4] A. Formisano, "Seismic behaviour and retrofitting of a school masonry building subject to the 2012 Emilia-Romagna Earthquake," *Civil-Comp Proc.*, vol. 106, no. September, 2014, doi: 10.4203/ccp.106.83.
- [5] R. Marques and P. B. Lourenço, "Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions : Validation of macro-element models and cost analysis," *Eng. Struct.*, vol. 64, pp. 52–67, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.014.
- [6] A. Parammal and V. Dina, *Classification and seismic fragility assessment of confined masonry school buildings*, no. 0123456789. Springer Netherlands, 2021.
- [7] NEHRP, *Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*, no. October. 2000.
- [8] NEHRP, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440)*, no. June. 2005.
- [9] H. Derakhshan and M. Griffith, "Final report on Pushover analysis of classes of URM buildings to characterise drift ratios for different damage levels," 2018.
- [10] S. Cattari, I. Giongo, S. Marino, and Y. Lin, "Numerical simulation of the seismic response of an earthquake damaged URM building," no. April, 2015.
- [11] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Aggiornamento delle 'Norme tecniche per le costruzioni' (in Italian)," pp. 1–198, 2018.
- [12] Federal Emergency Management Agency, "Hazard-MH 2.1Earthquake Model Technical Manual," p. 718, 2015, doi: <https://www.fema.gov/hazus-mh-user-technical-manuals>.
- [13] P. Mouroux and B. Brun, "Presentation of RISK-UE project," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 4, pp. 323–339, Nov. 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9020-3.
- [14] Z. V. Milutinovic and G. S. Trendafiloski, "WP4: Vulnerability of Current Buildings (RISK-UE)," *RISK-UE Proj. Handb.*, p. 111, 2003.
- [15] P. Lamego, P. B. Lourenco, M. L. Sousa, and R. Marques, "Seismic vulnerability and risk analysis of the old building stock at urban scale : application to a neighbourhood in Lisbon," 2016, doi: 10.1007/s10518-016-0072-8.
- [16] A. H. Barbat, L. G. Pujades, and N. Lantada, "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 28, no. 10–11, pp. 851–865, 2008, doi: 10.1016/j.soildyn.2007.10.006.