

Clădiri istorice suspuse unui risc cu consecințe uriașe și probabilități scăzute

VULNERABILITATEA SEISMICĂ A CLĂDIRILOR DE PATRIMONIU CU STRUCTURĂ DE ZIDĂRIE PORTANTĂ DIN ROMÂNIA REZUMAT

Conducător de doctorat:
Prof.univ.dr.ing.Radu Văcăreanu

Student doctorand:
Alexandra Scupin

București, 2022

REZUMAT

Admițând faptul că există consecințe uriașe pe care le for înfrunta clădirile istorice în cazul evenimentelor cu probabilitate redusă așa cum sunt cutremurele puternice, dezbaterele referitoare la protejarea fondului construit ar trebui să se refere la ce sunt de fapt dispuși să pierdem. Inginerii implicați în evaluarea construcțiilor existente și asigurarea unui anumit nivel de siguranță urmăresc de multe ori principii care contrazic teoriile de conservare și preservare. Pentru a atinge obiectivul principal al reducerii riscului seismic prin reducerea vulnerabilității structurale este nevoie să se ajungă la un consens cu privire la nivelul acceptabil de risc pentru clădirile istorice. Așadar, alegerea unor metode de consolidare optime și eficiente pentru clădirile existente trebuie să fie bazată pe înțelegerea vulnerabilităților asociate fiecărei tipologii structurale și fiecărei practici de construire.

Urmărind să contribuie la cercetarea din domeniul vulnerabilității clădirilor de zidărie din România, prezenta lucrare propune modele numerice pentru două clădiri istorice, realizate pentru diferite etape de consolidare și calibrate în funcție de avariile înregistrare post cutremur și tiparele de avariere observate. Comparațiile realizate pentru aceste diferite stadii ale sistemelor structurale permit stabilirea unor concluzii referitoare la eficiența măsurilor de consolidare aplicate gradual. Sunt propuse în continuare funcții de fragilitate pentru cinci tipuri de clădiri de zidărie: zidărie portantă cu planșee flexibile, zidărie portantă cu planșee rigide, zidărie confinată, zidărie portantă consolidată prin cămășuire și zidărie confinată consolidată prin cămășuire.

Folosind aceste două studii de caz, reprezentative pentru fondul construit din România, teza prezintă o metodologie aplicabilă la nivel de tipologie pentru analize de vulnerabilitate și de risc seismic pentru clădirile de zidărie. Testarea aplicabilității metodei propuse s-a realizat utilizând o bază de date extinsă a întregului portofoliu de școli preuniversitare din România, care a fost analizată pentru a estima potențialele pierderi asociate clădirilor de zidărie existente.

Analizând doar clădirile de zidărie din sectorul educației, dar ținând cont de faptul că acestea reprezintă aproape jumătate din fondul construit, teza dorește să evidențieze pierderile potențiale uriașe asociate acestui tip de structuri, în particular celor istorice. Pentru a avea o imagine clară în legătură cu proporția de clădiri de patrimoniu folosite în sectorul public de educație pre-universitară, s-a realizat o analiză amplă, combinând lista oficială a monumentelor istorice cu baza de date din sectorul educației din România.

Este necesar să se realizeze lucrări de consolidare, admițând faptul că patrimoniul construit se confruntă cu riscul de dispariție în urma avariilor post-cutremur și că pierderile pentru clădiri cu funcțiuni destinate publicului, așa cum sunt școlile, sunt de neacceptat. Pentru a sublinia importanța reducerii riscului seismic în sectorul educației, s-au propus criterii de prioritizare a investițiilor și s-au realizat analize de cost-beneficiu pentru întreg eșantionul de clădiri de zidărie. În final, rezultatele obținute sunt prezentate sub formă de grafice și hărți pentru a ilustra probabilități anuale de depășire a stadiilor de avariere extinsă, date de expunere și scenarii referitoare la optimizarea beneficiilor generate de investiții în lucrări de consolidare. Metodologia propusă în cadrul tezei de doctorat poate reprezenta un instrument valoros de fundamentare a politicilor publice axate pe reducerea riscului seismic asociat în particular clădirilor existente cu structură de zidărie.

ABSTRACT

Starting by admitting that historic constructions are expected to face huge consequences when exposed to such low probability events as earthquakes are, discussions related to the protection of the built heritage should focus on what are we willing to lose. The engineering community involved in assessing existing constructions and insuring they grant a certain level of safety often follow principles that are in conflict with the theories of conservation and preservation. The ultimate goal of reducing the seismic risk by reducing the seismic vulnerability of existing construction implies first of all reaching an agreement related to what is to be considered an acceptable risk in case of heritage buildings. Therefore, effective and optimal seismic retrofitting measures applied to existing constructions should arise from a strong understanding of the vulnerabilities associated with each structural typology and construction practice.

Aiming to contribute to the research done for the seismic vulnerability of masonry structures in Romania, numerical models of two heritage buildings are created for different stages of structural upgrades, calibrated based on post-damage assessments and local damage patterns. Comparisons done for these different structural stages allow to draw important conclusions related to the effectiveness of retrofitting measures applied gradually. Subsequently, fragility functions are proposed for five types of masonry structures: unreinforced masonry with flexible floors, unreinforced masonry with rigid floors, confined masonry, unreinforced masonry retrofitted by means of reinforced concrete jacketing and confined masonry retrofitted by means of reinforced concrete jacketing.

Using these two particular case studies which are representative for the building stock in Romania, the thesis introduces a methodology applicable for typological assessments of the structural vulnerability and the seismic risk of masonry structures. Testing the applicability of the proposed method was done using a comprehensive database of the entire portfolio of preuniversity schools buildings from Romania, which was analyzed in order to establish potential losses associated with the existing masonry structures in the sector.

Looking only at masonry constructions from the education sector, but keeping in mind that they cover almost half of the existing building stock, the thesis aims to highlight the huge potential losses associated to this type of structures, in particular the historical ones. In order to have a clear picture of how large the share of listed heritage structures is used in the public pre-university education sector, an extensive analysis was done, combining the official historical monuments list with the database of the Romanian education sector.

Understanding that architectural heritage might face the risk of disappearance after suffering severe post-earthquake damage and losses might not be acceptable in the case of spaces used for public services, such as in the case of school buildings, retrofitting interventions are to be done. For emphasizing the utmost importance of seismic risk reduction in the education sector, prioritization criteria were proposed and cost-benefit analysis were performed for the entire database of school masonry structures. Finally, visual results presented in the forms of graphs and maps are used to illustrate annual probabilities of exceeding extensive damage states, exposure data and benefits optimization scenarios for investments in retrofitting. The methodology proposed in the thesis can represent a valuable tool for substantiating public policies aiming at reducing the seismic risk, in particular for existing masonry structures.

CUPRINS

1. INTRODUCERE	1
1.1. Motivație	1
1.2. Obiective	3
2. STUDIU BIBLIOGRAFIC.....	5
2.1. Clădiri de zidărie: taxonomie	5
2.2. Metode de evaluare a fragilității structurale	7
2.2.1. Metode analitice	7
2.2.2. Metode empirice.....	8
2.2.3. Metode hibride	8
2.2.4. Vulnerabilitatea clădirilor istorice.....	9
2.3. Metode de evaluare a riscului seismic.....	10
2.3.1. Evaluarea intervențiilor de consolidare	10
3. METODOLOGIE PROPUȘĂ PENTRU EVALUAREA RISCULUI SEISMIC ASOCIAT CLĂDIRILOR DE ZIDĂRIE.....	15
3.1. Evaluarea capacității structurale prin metoda analitică	15
3.2. Modele de calcul și analize numerice	15
3.3. Taxonomie.....	16
3.4. Interpretarea rezultatelor: evaluarea nivelului de avariere	18
3.5. Funcții de fragilitate	18
3.6. Analiză de risc seismic.....	19
3.7. Analiza cost-beneficiu	19
4. STUDII DE CAZ: CLĂDIRI DE ZIDĂRIE ȘI MONUMENTE ISTORICE	21
4.1. Muzeul de Geologie: analize numerice, rezultate, fragilitate și risc seismic	21
4.1.1. Analiza static neliniară: model numeric.....	23
4.1.2. Analiza static neliniară: rezultate.....	23
4.1.3. Analiza static neliniară: deplasări globale, relative și stadii de avariere.....	24
4.1.4. Analiza static neliniară: funcții de fragilitate	25
4.1.5. Soluție alternativă de consolidare: funcții de fragilitate.....	28
4.2. Clădire Școală: analize numerice, rezultate, fragilitate și risc seismic.....	30
4.2.1. Scurt istoric: prezentarea clădirii	30
4.2.2. Analiza static neliniară: model numeric.....	30
4.2.3. Analiza static neliniară: rezultate.....	31
4.2.4. Analiza static neliniară: deplasări relative și globale	32

4.2.5.	Analiza static neliniară: funcții de fragilitate	35
5.	SECTORUL EDUCAȚIEI: ANALIZA DE RISC SEISMIC	37
5.1.	Introducere	37
5.2.	Situația actuală.....	37
5.2.1.	Descrierea eșantionului analizat	37
5.2.2.	Intervenții de consolidare	40
5.3.	Funcții de fragilitate	40
5.3.1.	Prezentarea taxonomiei.....	40
5.3.2.	Comparații ale funcțiilor de fragilitate propuse cu alte referințe din literatură.....	40
5.4.	Analiză de risc seismic.....	43
5.4.1.	Prezentare succintă a metodologiei de estimare a probabilităților anuale de cedare.....	43
5.4.2.	Reprezentarea probabilităților anuale de cedare.....	43
5.4.3.	Suprapunerea datelor cu expunere cu cele de risc seismic.....	45
5.5.	Analiză de cost beneficiu	47
5.5.1.	Metodologia de priorizare a investițiilor de consolidare a fondului construit din sectorul educației.....	47
5.5.2.	Analiza de cost-beneficiu pentru intervențiile de consolidare a fondului construit din sectorul educației.....	48
5.5.3.	Rezultatele analizei de cost-beneficiu	52
5.5.4.	Evaluarea proiectelor de consolidare a infrastructurii școlare prin intermediul analizei de cost-beneficiu.....	54
6.	CONCLUZII	56
6.1.	Concluzii	56
6.2.	Diseminarea rezultatelor	58
6.3.	Contribuții personale	59
6.4.	Perspective de continuare a cercetării	60

Lista de figuri

Fig. 2	Curbe de vulnerabilitate pentru clădiri de patrimoniu (Lagomarsino et al. 2003)	6
Fig. 16	Strategia de consolidare pentru cartierul Alfama, Lisabona (D. F. D'Ayala et al. 1997)	11
Fig. 17	Clădiri din Guadalupe, după cutremurul din 2007 Pisco, Peru (Earthquake Engineering Research Institute 2007).....	14
Fig. 18	Detalii de armare pentru structurile hibride din zidărie și beton armat din Chile (Moroni, Astroza, and Acevedo 2004)	14
Fig. 19	Tipuri de avarii observate post-cutremur în cazul structurilor de zidărie (S.T.A. DATA 2012) .	15
Fig. 21	Modelarea elementelor de zidărie în programul 3DMacro (Marques and Lourenço 2014)	16

Fig. 23 Intervențiile de consolidare realizate în 1982	22
Fig. 26 Modelul 3D al Muzeului Național Geologic (Tremuri).....	23
Fig. 31 Curbe Pushover pentru modelul inițial și pentru cel consolidat	24
Fig. 34 Stadii de avariere pereți: model inițial (a) și model consolidat (b)	25
Fig. 35 Funcții de fragilitate pentru modelul inițial: comparație direcția X și Y.....	26
Fig. 36 Funcții de fragilitate modelul consolidat: comparație direcția X și Y	27
Fig. 37 Funcții de fragilitate (direcția Y): comparație între modelul inițial și cel consolidat.....	27
Fig. 40 Curbele Pushover pentru modelul inițial, consolidat (cămășuiți) și FRP, direcția transversală	28
Fig. 46 Modelul 3D al școlii (3DMacro): fațada corpului principal (stânga) și corpurile secundare (dreapta)	30
Fig. 47 Măsurile de consolidare (plan demisol)	31
Fig. 51 Moduri de cedare ale elementelor structurale pentru: a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit	32
Fig. 54 Limite pentru criterii de performanță – model URM	33
Fig. 55 Limite pentru criterii de performanță – modelul INIȚIAL.....	34
Fig. 57 Curbe de Pushover pentru pereții cămășuiți (a, b) și necămășuiți (c, d)	35
Fig. 62 Funcții de fragilitate: direcția +X (stânga) și +Y (dreapta) pentru a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit	36
Fig. 72 Numărul de monumente istorice din sectorul educației	38
Fig. 90 Grade medii de avariere pentru tipologiile de clădiri de zidărie din România (SD)	41
Fig. 91 Grade medii de avariere obținute pentru tipologii corespondente din referințe bibliografice (SD).....	42
Fig. 92 Grade medii de avariere pentru tipologiile de clădiri de zidărie din România (SA)	42
Fig. 93 Legendă intervale pentru probabilități anuale de cedare.....	43
Fig. 95 Costurile/mp asociate investițiilor de reabilitare a infrastructurii școlare	48
Fig. 96 Pierderile așteptate în cazul celor două scenarii de cutremur și indicatorii economici ai analizei de cost-beneficiu.....	51
Fig. 97 Distribuția numărului de potențiale victime în cazul celor două scenarii de cutremur.....	52
Fig. 98 Indicatori economici ai analizei de cost-beneficiu: fără prioritizare (stânga) și cu prioritizare (dreapta)	53
Fig. 99 Evoluția cumulativă a pierderilor de vieți evitate prin consolidare clădirilor cu și fără prioritizarea investițiilor.....	54
Fig. 100 Pierderile așteptate în cazul celor două scenarii de cutremur: situația inițială vs consolidare	55

Lista de tabele

Tab. 3 Tipologii structurale pentru clădiri de patrimoniu RISK-UE (Lagomarsino et al. 2003)	6
Tab. 16 Modele numerice și tipologii considerate pentru analiza de fragilitate (adaptat după (Correia Lopes et al. 2019)).....	17
Tab. 24 Limite de deplasări relative pentru zidărie portantă	24
Tab. 34 Parametrii funcțiilor de fragilitate.....	26
Tab. 39 Limite de deplasări relative globale pentru zidăria portantă și confinată	33
Tab. 46 Parametrii funcțiilor de fragilitate per tipologie (deplasări spectrale)	41
Tab. 48 Hărți de risc seismic: probabilități anuale de cedare pentru tipologiile de clădiri cu structură de zidărie.....	44
Tab. 49 Hărți de risc seismic și expunere pentru clădirile cu structură de zidărie din învățământul preuniversitar.....	45
Tab. 50 Matrice de prioritizare pentru clădiri.....	47
Tab. 51 Rate de vătămare în funcție de tipologia structurală, conform HAZUS (Federal Emergency Management Agency 2015)	49
Tab. 53 Parametrii folosiți în analiza de cost-beneficiu și indicatorii economici rezultați	50

1. INTRODUCERE

1.1. Motivație

Cutremurul Vrancean de la 4 martie 1977 nu a cauzat prăbușiri totale ale clădirilor de zidărie portantă construite înainte de primul război mondial, cu toate că acestea au suferit avarii semnificative. Deficiențele structurale precum planșeele flexibile cu grinzi de lemn neancorate, lipsa legăturilor între pereți prin țeserea cărămizilor sau zonele cu legături insuficiente între elementele verticale (frontoane, atic) și cele orizontale au generat cea mai mare parte a avariilor (Agent 1998). Cu toate acestea, s-a remarcat o comportare îmbunătățită a clădirilor cu planșee de beton armat care au putut asigura efectul de șaibă rigidă și redistribuirea forțelor seismice. Clădirile publice masive realizate înainte de 1920 (școli, muzee, instituții) au suferit în special din cauza planșeelor flexibile, cu grinzi simplu rezemate. Deplasările și rotațiile remanente ale grinzilor au contribuit la flexibilizarea planșeelor, astfel încât una dintre metodele de consolidare aplicate post-cutremur a vizat în principal rigidizarea planșeelor prin adăugarea plăcilor de beton armat (Agent 1998). Tiranții metalici sunt mai puțin întâlniți, fiind folosiți în general în cazul planșeelor flexibile care nu pot fi înlocuite cu planșee de beton. Acolo unde a fost posibil, s-au adăugat centuri de beton armat odată cu noile planșee și buiandrugi de beton armat deasupra golurilor. Consolidarea pereților de zidărie prin cămășuirea cu plase armate pe una sau pe ambele fețe este una dintre cele mai des întâlnite metode de sporire a capacității de preluare a forței tăietoare, iar pentru eforturile de întindere, se recomandă adăugarea stâlpișorilor de beton armat și a centurilor, transformând structura de zidărie portantă în zidărie confinată.

Evaluările intervențiilor de consolidare reprezintă un subiect de interes, în special pentru țările europene cu un fond construit format din numeroase clădiri de patrimoniu, cum ar fi Italia, Portugalia, Marea Britanie, etc. În literatură este evidențiată nevoia de cercetare în domeniul evaluării și reducerii riscului seismic pentru clădiri existente, prin numeroasele studii care abordează această temă (Ravara et al. 2001), (Calvi et al. 2006), (Lourenço et al. 2013), (Ferreira, Maio, and Vicente 2017), (Anwar 2017), (Marques et al. 2018), (Gilani, Kit Miyamoto, and Nifuku 2018). Eficiența lucrărilor de consolidare realizate în ultimele decade este discutabilă, având în vedere că acestea au condus de multe ori la creșterea vulnerabilității, conform studiilor din cadrul proiectului PERPETUATE (Lagomarsino and Cattari 2015). În țările care au experimentat în secolul XX avarii la clădirile de zidărie, precum Italia și Portugalia, s-a recomandat folosirea elementelor de beton armat pentru intervențiile de consolidare. Studiile realizate în urma cutremurului din zona Molise, Italia au indicat că cele mai afectate clădiri au fost cele cu planșee de beton armat, unde legăturile nu au fost realizate în mod corespunzător (Decanini et al. 2004). Dificultatea de a interveni pentru a realiza lucrări de consolidare conform principiilor internaționale de restaurare pentru clădiri istorice amplasate în zone seismice reprezintă o provocare evidențiată de cercetătorii din domeniu (Penazzi et al. 2001). Creșterea greutății generată de tehnicile tradiționale de consolidare cu deformațiile incompatibile dintre zidărie și beton armat au fost considerate a fi responsabile pentru vulnerabilitatea crescută a clădirilor consolidate și avariate în urma cutremurului din 2009 din L'Aquila, Italia (Cimellaro et al. 2010).

Chiar dacă prevederile referitoare la hazardul seismic au fost considerabil îmbunătățite în ultimii ani, vulnerabilitatea la cutremure este în continuare ridicată pentru structurile existente, construite înainte de adoptarea unor standarde de proiectare adecvate. Evaluarea vulnerabilității clădirilor existente are ca scop efectuarea unor analize de risc seismic la scară largă, care conduc ulterior la decizii privind intervențiile de consolidare. Mai mult decât atât, comportarea structurilor mixte, rezultatele în urma consolidării clădirilor de zidărie cu elemente

de beton armat este departe de a fi pe deplin înțeleasă, fiind încă nevoie de studii complexe (Lagomarsino and Magenes 2009).

Funcțiile de fragilitate reprezintă un aspect principal al riscului și vulnerabilității seismice. Acestea creează legătura dintre hazardul seismic și efectele cutremurelor asupra clădirilor. Disponibilitatea unor funcții de fragilitate pentru clădirile de zidărie, care să fie adecvate specificului local reprezintă o provocare. Cu toate că există studii în domeniu, identificarea sau combinarea diferitelor funcții de fragilitate obținute anterior se poate dovedi a fi o sarcină dificilă, considerând particularitățile structurale regionale. Complexitatea funcțiilor de fragilitate pentru clădiri de zidărie o generează variabilitatea metodelor de construire și a numeroaselor tipuri de structuri. Obținerea unor funcții de fragilitate ponderate presupune combinarea unor funcții prezentate în literatură, cărora le pot fi atribuite diferite probabilități de relevanță, în urma unei analize subiective. Dezvoltarea unor funcții de fragilitate noi, adaptate unor situații particulare, implică existența unor date empirice (observații referitoare la stadii de avariere a clădirilor în urma unui cutremur) sau a unor modele analitice. Singurele informații disponibile pentru fondul construit din România format din clădiri de zidărie sunt cele colectate prin investigațiile post-cutremur, efectuate pentru aproximativ 15.000 de clădiri după cutremurul de la 4 martie 1977. Rezultatele inspecțiilor din teren sunt prezentate sub forma unor diagrame de grade medii de avariere agregate la nivel de tipologie, exprimate în funcție de intensități macroseismice (Sandi 1986). În lipsa altor informații, metodele analitice validate prin intermediul releveelor de avarii reprezintă o alternativă pentru calibrarea analizelor de fragilitate.

În urma unei serii de cutremure care au distrus importante centre istorice Europene precum Napoli, Atena, Palermo sau Lisabona, cercetătorii au semnalat nevoia de a proteja patrimoniul construit amplasat în zone cu risc seismic ridicat (Ayala et al. 1997). Importanța estimării pierderilor pentru astfel de scenarii este în strânsă legătură cu strategiile de consolidare necesare pentru a îndeplini criteriile de performanță structurală. Mai mult decât atât, a fost evidențiată nevoia de a considera tehnici de estimare a potențialelor pierderi pe baza evaluării avariilor existente, dată fiind variabilitatea tehnicilor de construcție, a materialelor și a vechimii fondului construit. Ținând cont de interesul crescut pentru această temă, nevoia de a adapta metodele de evaluare și de analiză a vulnerabilității clădirilor istorice la particularitățile fondului construit din România reprezintă un argument pentru cercetarea aprofundată a subiectului.

Prezenta lucrare își propune să analizeze în particular comportarea clădirilor istorice, masive, cu pereți portanți de zidărie, folosite în principiu pentru funcțiuni publice (muzee sau școli). Studiile de caz alese se înscriu în această categorie a clădirilor monument construite la început de secol XX, caracteristice lor și intervențiile de consolidare la care au fost supuse de-a lungul timpului putând fi considerate reprezentative pentru fondul construit de clădiri istorice de zidărie din România.

Creșterea rezilienței la dezastre prin acțiuni menite să reducă riscul seismic din zonele predispușe unor astfel de evenimente extreme reprezintă un subiect de interes pe plan internațional. Institutul Național pentru Științele Construcțiilor (National Institute of Building Sciences 2020) a realizat un raport referitor la beneficiile investițiilor în reducerea riscurilor la dezastre naturale. În ceea ce privește cutremurele, raportul beneficii-costuri este de 13:1 pentru investiții în consolidarea fondului construit din sectorul privat și de 6:1 pentru investiții din sectorul public. Pentru a aplica pe plan local metodele și pentru a folosi uneltele destinate reducerii riscului seismic, primul pas este evaluarea la nivel național a fondului construit. Ținând cont de lipsa de informații referitoare la vulnerabilitatea clădirilor de zidărie din România, în contrast cu procentul pe care acestea îl reprezintă din întreg fondul construit și

importanța lor crescută în contextul clădirilor cu valoare istorică, teza își propune să contribuie la progresul studiilor de reducere a riscului seismic.

1.2. Obiective

Analizele structurale ale monumentelor cu structură de zidărie prezentate în literatura de specialitate, precum și studiile de vulnerabilitate seismică menționate anterior reprezintă o bază pentru realizarea studiilor de fragilitate destinate unei tipologii reprezentative pentru România. Pornind de la tipologiile adoptate în programele anterioare ce vizează reducerea riscului seismic la nivel european sau internațional (Pitilakis et al. 2014), (Ayala et al. 2014), se pot stabili caracteristici comune, în raport cu fondul construit analizat. Comparând modelele de fragilitate validate deja prin cercetări anterioare cu analize numerice ale unor clădiri monument din zidărie din România, se dorește propunerea unor funcții de fragilitate reprezentative pentru acest tip de structuri.

Pentru a evidenția importanța unor astfel de analize, prezenta lucrare își propune să analizeze pierderile așteptate în cazul unui cutremur, precum și beneficiile unui program de consolidare, folosind baza de date a clădirilor din sistemul de învățământ din România, unde peste 60% dintre clădiri au structură de zidărie portantă sau confinată. Analizarea portofoliului de unități de învățământ preuniversitar împreună cu lista monumentelor istorice a permis identificarea clădirilor de patrimoniu din sectorul educației.

Structura tezei cuprinde 6 capitole și 3 anexe.

Primul capitol prezintă o scurtă introducere a subiectului referitor la importanța analizelor de fragilitate și de risc seismic pentru clădirile istorice de zidărie, precum și obiectivele principale ale tezei.

Cel de-al doilea capitol cuprinde stadiul actual al cercetării din domeniu, prezentând propunerile existente în literatura de specialitate pe plan național și internațional pentru taxonomia clădirilor de zidărie, metode de evaluare a fragilității structurale și a riscului seismic.

Pornind de la metodele prezentate în capitolul anterior, al treilea capitol vizează descrierea metodologiei propuse pentru analizele de risc seismic ale fondului construit din România, format din clădiri istorice de zidărie.

Al patrulea capitol este împărțit în două secțiuni, fiecare dintre ele analizând în detaliu câte o clădire de patrimoniu, reprezentativă pentru tipologiile considerate. Folosind datele disponibile referitoare la conformația inițială a clădirilor, comportarea lor în timp și modificările structurale realizate sau propuse până în prezent, au fost validate modelele numerice pentru analizele static neliniare. Sunt discutate rezultatele și funcțiile de fragilitate rezultate din analizele efectuate, precum și probabilitățile anuale de cedare asociate fiecărui model în parte.

Cel de-al șaselea capitol propune extrapolarea rezultatelor analizei de fragilitate din capitolul anterior pentru un set de tipologii structurale stabilite în funcție de fondul construit din sectorul învățământului preuniversitar din România. Prima parte face referire la fondul construit de clădiri din sectorul educației din toată lumea, în particular zonele expuse acțiunii seismice și inițiative de reducere a riscului seismic. În continuare este prezentat eșantionul de clădiri incluse în analiză, precum și funcțiile de fragilitate propuse pentru taxonomia stabilită. Analiza de risc seismic a clădirilor de zidărie din portofoliu permite estimarea pierderilor în funcție de gradele de avariere așteptate și probabilitățile anuale de cedare, agregate la nivel de județ. Ultima parte a capitolului cuprinde analiza de cost-beneficiu pentru două scenarii: cu sau fără un proces de prioritizare a investițiilor în lucrări de consolidare. De asemenea, eficiența proiectelor de reabilitare a infrastructurii școlare realizate până în prezent este evaluată prin

intermediul unei analize de cost beneficiu aplicată pe un eșantion redus de clădiri de zidărie consolidate.

Ultimul capitol este cel destinat concluziilor și perspectivelor de continuare a cercetării în domeniu, fiind evidențiate contribuțiile personale pentru fiecare dintre aspectele incluse în teză.

În ansamblu, prezenta lucrare își propune să abordeze problematica reducerii riscului seismic asociat clădirilor de zidărie, în particular cele de patrimoniu. Pornind de la analizele de fragilitate ale unor clădiri istorice analizate sub formă de studiu de caz și comparând rezultatele cu studii din literatura de specialitate, a fost posibilă extrapolarea lor la nivel de tipologie. Combinând datele obținute referitor la vulnerabilitatea structurală cu cele de hazard seismic, a fost efectuată o analiză de risc seismic pentru fondul construit de clădiri de zidărie din sectorul educației, pe întreg teritoriul țării. Un astfel de instrument poate fi folosit pentru a estima pierderile așteptate la nivel național în cazul unui cutremur și pentru a acționa în vederea reducerii riscului seismic.

2. STUDIU BIBLIOGRAFIC

2.1. Clădiri de zidărie: taxonomie

Pentru a stabili similitudini între tipologiile propuse în literatură pentru clădirile de zidărie și fondul construit din România este necesară o prezentare a acestuia, realizată în cadrul monografiei cutremurului din Vrancea 1977 (Bălan et al. 1982). După cutremurul din 4 martie 1977, s-a analizat comportarea structurilor avariate în urma evenimentului, iar tipologiile au fost definite în funcție de alcătuirea constructivă, astfel:

- Clădiri foarte vechi cu structura portantă (pereții) din zidărie de cărămidă, având planșee de lemn, cu parter și subsol sau etaj parțial
- Clădiri cu structura de zidărie portantă, cu regim de înălțime redus: locuințe unifamiliale de tip vilă (P+1, P+2) sau locuințe colective (până la P+5)
- Clădiri cu structuri combinate (P+3...6): zidărie portantă, perimetrală cu stâlpi în interior și grinzi din beton armat, având în general planșee de beton armat

Concluzia prezentată în monografia cutremurului din 1977 referitor la principala deficiență structurală a clădirilor vechi de zidărie portantă, a fost lipsa unor legături transversale. Autorii au evidențiat influența benefică a elementelor de beton armat (centuri, planșee) în detrimentul planșeelelor flexibile, insuficient legate de zidurile perimetrale. Pe de altă parte, planșeele realizate din bolțișoare de cărămidă, fiind mult mai rigide, se apropie de comportarea plăcilor de beton armat (Bălan et al. 1982). În ceea ce privește clădirile vechi de zidărie portantă masive, de tip vilă, acestea s-au comportat mai bine, datorită calității execuției și a rigidității. Printre acestea, s-au remarcat cele cu planșee de beton armat, unde legătura creată între ziduri a ajutat la preluarea forțelor laterale în mod unitar.

Pentru clădirile noi din zidărie portantă (construite după anul 1950) au fost impuse începând cu anul 1962 măsuri constructive pentru îmbunătățirea comportării la acțiuni seismice. Acestea presupuneau introducerea unor sâmburi de beton armat, amplasați la colțuri și la intersecțiile pereților de zidărie, utilizarea centurilor de beton armat la partea superioară a pereților de zidărie, obținerea efectului de șaibă orizontală în cazul planșeelelor, armarea rosturilor și folosirea unor materiale cu rezistențe superioare.

Fondul construit din America Latină poate fi considerat similar celui din România, dat fiind faptul că sistemele structurale cu pereți de zidărie portantă au fost treptat înlocuite de zidăria confinată, în urma avariilor observate în timpul cutremurelor din prima parte a secolului XX. Clădirile de zidărie confinată cu regim de înălțime redus sau mediu, cu conformare regulată, cu pereți deși și care respectă prevederile constructive s-au comportat favorabil atunci când au fost supuse acțiunii seismice (Brzev 2007). După cutremurele din El Salvador din 2001, peste 90% din clădirile de zidărie confinată nu au fost avariate deloc, cele mai semnificative probleme fiind întâlnite atunci la clădirile de zidărie portantă, realizate din materiale locale. În Peru, Mexic (Brzev 2007) și Chile (Moroni, Astroza, and Acevedo 2004) s-a observat că avarierea extinsă a clădirilor de zidărie confinată poate fi corelată cu condițiile proaste ale terenului de fundare.

Pe plan internațional, în cadrul proiectului european SYNER-G (Pitilakis et al. 2014) a fost propusă o metodologie uniformă pentru clasificarea fondului construit. Taxonomia folosită grupează clădiri cu caracteristici similare din punct de vedere al rezistenței la acțiuni seismice. Pentru a defini tipologii pentru clădirile de zidărie, trebuie făcută inițial o distincție între clădirile tradiționale, construite doar după principii empirice și clădirile ingineresti, proiectate pentru a rezista acțiunii seismice (zidărie confinată, prezența centurilor și a planșeelelor de beton armat)..

Pentru a utiliza în mod direct taxonomia propusă, sunt necesare numeroase informații legate de structura analizată, ceea ce nu este posibil în cazul unei analize de vulnerabilitate la nivel teritorial. Odată stabilite un număr limitat de clase tipologice ce țin cont de informațiile disponibile, se pot aplica metode analitice static neliniare pentru a obține modele de calcul și ulterior funcții de fragilitate asociate fiecărei tipologii.

Pornind de la metoda macroseismică care face referire la clasele de vulnerabilitate, în cadrul proiectului RISK-UE a fost creată o taxonomie adaptată monumentelor, unde clădirile de patrimoniu au fost separate în funcție de caracteristici structurale comune. Astfel, au fost stabilite 13 tipuri de clădiri istorice indicate Tab. 1 împreună cu valorile medii ale indicilor de vulnerabilitate (V_i^*) și factorul β . Curbele de vulnerabilitate exprimate în funcție de intensitatea macroseismică obținute pentru toate tipologiile de monumente sunt ilustrate în Fig. 1.

Tab. 1 Tipologii structurale pentru clădiri de patrimoniu RISK-UE (Lagomarsino et al. 2003)

Tipologie	V_i^*	β
Palate/clădiri	0.616	2.3
Mănăstiri	0.736	2.3
Castele	0.456	2.3
Biserici	0.89	3
Capele	0.77	3
Moschei	0.73	2.65
Teatre	0.736	2.65
Turnuri/clopotnițe	0.776	2.3
Poduri	0.296	2.3
Ziduri de apărare	0.496	2.3
Arce de triumf	0.456	2.3
Obeliscuri	0.456	1.95
Statui/fântâni monumentale	0.296	1.95

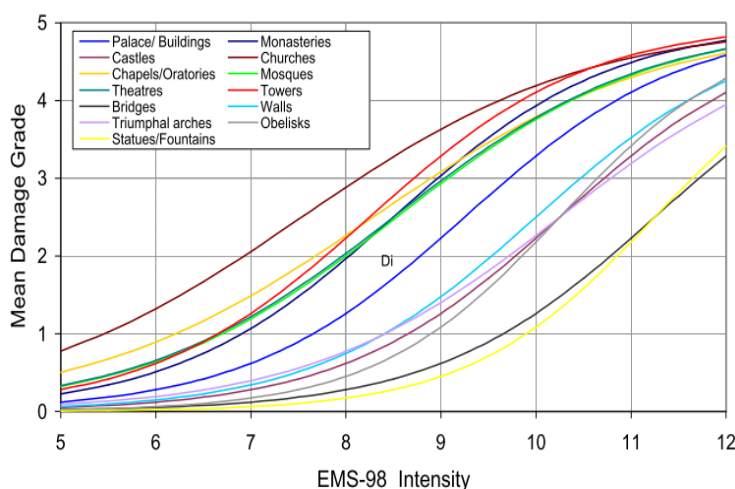


Fig. 1 Curbe de vulnerabilitate pentru clădiri de patrimoniu (Lagomarsino et al. 2003)

2.2. Metode de evaluare a fragilității structurale

Analizele de fragilitate sunt efectuate pentru a obține probabilitatea de a atinge un anumit nivel de avariere, generat de un anumit scenariu seismic. Astfel, vulnerabilitatea seismică a unei clădiri se poate defini sub forma unei legi cauză-efect (cutremur-avarii) (Sandi 1986).

Pentru a estima vulnerabilitatea fondului construit existent, se pot folosi fie metode statistice, bazate pe observații ale avariilor din investigații post-cutremur, fie metode mecanice, pentru care avariile sunt bazate pe modele analitice de estimare a răspunsului seismic. Pentru analize de vulnerabilitate la nivel teritorial, abordarea statistică are avantajul de a oferi rezultate rapide, pentru care sunt necesare mai puține informații decât pentru calcule analitice. Un prim pas pentru realizarea analizei de vulnerabilitate la scară largă îl reprezintă stabilirea tipologiilor structurale în funcție de caracteristicile fondului construit analizat. Următorul pas vizează parametrul mișcării seismice, ales pentru a defini nivelul de avariere. De asemenea, este necesară stabilirea limitelor pentru trecerea de la o stare de avariere la alta, în raport cu parametrul ales. În final, se obține răspunsul la acțiunea seismică și se stabilesc funcții de fragilitate pentru fiecare dintre tipologiile analizate.

2.2.1. Metode analitice

Fragilitatea structurală poate fi exprimată pe baza curbelor de capacitate, reprezentând răspunsul exprimat sub formă de deplasări ale unui sistem echivalent cu un sigur grad de libertate, supus acțiunii seismice. Curbele de capacitate pot fi obținute prin bilinearizarea curbelor de Pushover rezultate din analize static neliniare pentru modele structurale cu mai multe grade de libertate, sau prin modele analitice simplificate. Pentru a estima capacitatea de deplasare există diverse metode de reducere a cerinței seismice în răspunsul nelinier al structurii, obținând în final punctul de performanță situat la intersecția dintre curba de capacitate și cerința redusă corespunzător (Pitilakis et al. 2014).

Curbele de vulnerabilitate sau fragilitate pot fi obținute prin procesarea datelor statistice din rezultatele unor analize mecanice neliniare realizate ținând cont de caracteristicile fondului construit analizat și de seismicitatea locală. Se pot folosi simulări Monte Carlo pentru a genera clădiri virtuale, construite pe baza unor parametrii mecanici extrași în mod aleatoriu. Pentru a asigura rezultate de încredere pentru fondul construit existent, sunt necesare calibrări, cu scopul de a reproduce combinații coerente de parametrii structurali. În studiul menționat a fost folosită baza de date cu investigații din teren pentru a estima repartițiile diferitelor variabile aleatoare implicate în generarea modelelor virtuale și pentru a determina probabilitățile comune pentru diferite combinații de caracteristici. Pentru a ține cont de neregularități în plan, se pot introduce artificial coeficienți de amplificare, întrucât procedura propusă nu modelează decât fațade și pereți dispuși ortogonal, nu întreaga clădire (Giulio Zuccaro 2015).

O altă metodă de estimare a fragilității clădirilor de zidărie este prezentată în literatură (Lumantarna et al. 2006) pornind de la campanii experimentale prin care s-a determinat comportarea histeretică a pereților supuși încărcărilor ciclice cvasi-statice. Pentru analizele time-history s-au folosit sisteme echivalente cu un sigur grad de libertate, supuse acțiunii seismice prin intermediul unui set de accelerograme, folosite pentru a determina cerința maximă de deplasare. Stările limită considerate sunt: avarii minore asociate primei fisuri (deplasarea la jumătate din înălțimea peretelui = 5 mm), avarii moderate (deplasarea limită egală cu jumătate din grosimea peretelui, adică 55 mm) și colaps.

Analize neliniare statice și dinamice au fost derulate în programul Tremuri, pentru derivarea funcțiilor de fragilitate și pentru un studiu de caz al unei clădiri prototip din sudul Italiei (Rota, Penna, and Magenes 2008). Toate caracteristicile mecanice ale structurii au fost determinate

folosind simulări Monte Carlo, iar apoi au fost realizate analize static neliniare (Pushover) pentru modelul numeric.

2.2.2. Metode empirice

Metodele empirice de generare a funcțiilor de fragilitate presupun potrivirea unei expresii matematice cu observații post-cutremur sau experimente realizate în laborator. Pentru a identifica mai ușor factorii care pot influența răspunsul seismic al clădirilor au fost propuse în literatură diverse metode de calibrare a indicilor de vulnerabilitate, bazate pe mai multe informații despre tipologia analizată. Procedura SAVE de analiză a vulnerabilității folosește clasificările tipologice definite în EMS'98 (Grunthal 1998), modificate pe baza investigațiilor post-dezastru realizate începând cu 1980, pentru care au fost evaluate aproximativ 170 000 de clădiri din Italia (G Zuccaro and Cacace 2015). Pentru fiecare tipologie considerată, se calculează un parametrul mediu de avariere (SPD) pentru a putea compara categoriile tipologice în termeni de vulnerabilitate.

Alte metode de reducere a incertitudinii referitor la clasele de vulnerabilitate, bazate pe atribuirea unor ponderi rezultate din păreri ale experților, sunt dificil de aplicat dacă nu sunt disponibili toți parametrii necesari evaluării. Metodologia SAVE poate fi folosită pentru orice nivel de cunoaștere disponibil la nivel de clădire. Pe de altă parte, dezavantajul acesteia îl reprezintă considerarea intensității macroseismice, ca parametrul pentru mișcarea seismică.

O altă metodă de utilizare a datelor empirice în vederea obținerii curbelor de vulnerabilitate pentru clădiri de zidărie a fost propusă de Lagomarsino și Giovinazzi (Lagomarsino and Giovinazzi 2006), folosind clasele de vulnerabilitate definite în cadrul Scării de Intensități Macro-seismice (Grunthal 1998). În acest caz, vulnerabilitatea este exprimată prin intermediul unor curbe de vulnerabilitate care furnizează gradul mediu de avariere ($0 \leq \mu_D \leq 5$) calculat în funcție de intensitatea macroseismică conform formulei:

$$\mu_D = 2.5 + 3 \tanh\left(\frac{I + 6.25V - 12.7}{Q}\right)$$

Parametrii V (indice de vulnerabilitate) și Q (indice de ductilitate = 3) definesc comportarea tipologiilor luate în calcul pentru analiza de vulnerabilitate. Valorile limită pentru indicele de vulnerabilitate V au fost stabilite pentru fiecare clasă de vulnerabilitate, folosind teoria mulțimilor vagi. Funcțiile de fragilitate exprimate în funcție de intensități macroseismice sunt obținute ulterior folosind repartiția binomială. Pentru a transforma intensitățile în valori de vârf ale accelerației terenului, autorii (Pitilakis et al. 2014) propun următoare formulă de calcul, unii dintre parametrii folosiți fiind cei propuși de Murphy și O'Brien (Murphy and O'Brien 1977):

$$I = a_1 + a_2 \log(PGA), \text{ unde } a_1 = 7 \text{ și } a_2 = 4$$

Pentru a aplica metoda macroseismică împreună cu o bază de date empirice de date de avariere post-cutremur, se folosesc valorile medii de avariere asociate diferitelor intensități înregistrate. Acestea sunt apoi folosite pentru a determina valorile indicelui de vulnerabilitate asociat tipologiei.

2.2.3. Metode hibride

Metodologiile hibride presupun folosirea analizelor mecanice împreună cu datele obținute din investigații post-seismic din zona analizată sau din evaluări subiective realizate de experți în domeniu. Pentru analizele de risc seismic din Italia a fost propusă o asemenea abordare pentru determinarea a curbelor de vulnerabilitate prin generarea unui set de modele create

aleator, pe baza unor proprietăți geometrice și mecanice extrase din bazele de date de observații post-cutremur (G Zuccaro and Cacace 2015).

Această metodă de analiză structurală poate fi ulterior transpusă în nivele de vulnerabilitate seismică, însă este greu de stabilit o legătură concretă între avariile estimate în acest fel și matricele de avarii construite pe baza investigațiilor post-cutremur. Totodată, se evaluează nivelul de avariere corespunzător declanșării mecanismul de cedare sub o anumită intensitate seismică, însă este dificil de estimat amplificarea acestor avarii sub alt nivel de seismicitate.

2.2.4. Vulnerabilitatea clădirilor istorice

Pentru evaluarea vulnerabilității clădirilor de patrimoniu la nivel teritorial a fost propusă în literatură (Romeu et al. 2014) o metodă hibridă, bazată pe inspecții vizuale rapide sau date despre avariere, colectate post-seism. Urmărind procesul de evaluare de nivel II folosit în Italia (GNDT II), se caracterizează structura analizată prin 14 parametri cheie necesari calculării unui indice global de vulnerabilitate.

O analiză de vulnerabilitate aplicată construcțiilor de patrimoniu a fost propusă și în cadrul proiectului European RISK-UE (Lagomarsino et al. 2003), pornind de la metodologia de nivel I pentru evaluarea vulnerabilității fondului construit pe tipologii structurale. În cazul clădirilor de patrimoniu, se poate considera o extensie a tipologiei structurale definită în EMS-98 ca piatră masivă (massive stone), ținând cont de calitatea materialelor și a tehnicii de construire. Metodologia de nivel I este bazată pe estimarea vulnerabilității în funcție de intensitatea seismică și evaluarea calitativă a unor parametri structurali. Metodologia de nivel II implică utilizarea unor metode mecanice pentru evaluarea vulnerabilității, determinând curbele de capacitate prin analize neliniare.

În cazul metodologiei de nivel I se folosesc anumiți parametri pentru a modifica indicele de vulnerabilitate în funcție de starea de conservare, nivelul de avariere existent, modificări arhitecturale sau intervenții existente, calitatea zidăriei sau neregularități geometrice.

Pentru fondul construit compus din clădiri de zidărie portantă din România, au fost propuse funcții de fragilitate obținute din date empirice, colectate în formulare de investigații completate în Iași după cutremurul din 1977 (Văcăreanu, Lungu, and Arion 2012). Autorii studiului au propus o formulă adaptată de calcul a gradului de avariere normalizat, stabilită în funcție de intensitatea macro seismică și indicele de vulnerabilitate I_v . Rezultatele prezentate atât sub forma unor matrice de avariere și a funcțiilor de fragilitate obținute folosind repartiția Beta pentru stadiile de avariere reprezintă o alternativă la metoda folosită anterior, respectiv estimarea gradelor de avariere prin repartiții binomiale (Sandi 1986). Metode empirice sunt greu de utilizat în analizele de fragilitate pentru fondul construit din România, dată fiind baza de date restrânsă, care cuprinde doar gradele de avariere exprimate în intensități macroseismice, din București și Iași, în urma cutremurului din 1977 (Bălan et al. 1982).

2.3. Metode de evaluare a riscului seismic

Hărțile de risc seismic reprezintă un instrument necesar în procesul de optimizare a alocărilor de resurse pentru reducerea impactului cutremurelor, atât în perioada post-dezastru, cât și pentru prevenție. Astfel de hărți pot fi obținute într-o manieră analitică, determinând cantitatea de pierderi așteptate pentru elementele expuse la risc, pentru un anumit nivel de hazard într-un anumit amplasament (Gociman et al. 2016).

În literatura de specialitate, riscul este definit ca fiind convoluția dintre trei funcții de probabilitate: hazardul, expunerea și fragilitatea (Douglas et al. 2013). Hazardul este reprezentat de probabilitatea ca într-un anumit amplasament, un eveniment de o anumită intensitate are loc într-o perioadă de timp definită. Expunerea descrie elementele afectate de evenimentul considerat, din aria analizată (oameni, clădiri, infrastructură, etc.). Fragilitatea este definită ca fiind probabilitatea de a atinge sau de a depăși un anumit grad de avariere, pentru o anumită intensitate a evenimentului considerat. Dacă fragilitatea reprezintă probabilitatea de avariere a unei structuri în cazul unui cutremur cu anumite caracteristici, vulnerabilitatea structurală se referă la potențialele pierderi asociate unui parametru al mișcării seismice (Porter 2015). În cazul prezent, fragilitatea seismică a unei clădiri reprezintă probabilitatea ca sistemul structural sau părți componente ale acestuia să fie avariate în cazul unui cutremur de o anumită intensitate.

Pentru realizarea unor analize la nivel teritorial sau național, de cele mai multe ori nu există o bază de date completă a fondului construit pentru a putea obține estimări realiste referitoare la riscul seismic. Metodologia propusă de Zuccaro (Giulio Zuccaro 2015) vizează o adaptare la situația în care informațiile disponibile se regăsesc parțial în datele din recensământul populației. Datele din recensământ care sunt de interes pentru analiza vulnerabilității vizează numărul de clădiri grupate în funcție de sistemul structural vertical (zidărie sau beton armat) și numărul de etaje (1-2, 3-5, etc.). Aceste informații au fost dublate de o bază de date colectată în mai mult de 20 de ani, prin investigații în teren sau evaluări post-cutremur, analizând peste 250 000 clădiri. Parametrii considerați pentru analizele teritoriale de vulnerabilitate sunt: poziția clădirii (izolată/marginală/de mijloc), materialul structurii verticale (zidărie/beton armat/beton armat cu parter flexibil/altele), perioada de construcție (<1919, 1919-1945, 1946-1961, 1962-1971, 1972-1981, 1982-1991, >1991) și numărul de etaje supraterane (1-2, 3-4, 5-6, 7-8). Alți doi parametri erau disponibili din recensământ (înălțimea și numărul de locuitori ai municipalității) care pot influența indirect vulnerabilitatea, oferind indicații referitoare la tipologiile structurale și la calitatea construcțiilor.

2.3.1. Evaluarea intervențiilor de consolidare

Studii comparative referitoare la eficiența intervențiilor de consolidare pentru clădiri de zidărie portantă au fost realizate în Europa (Spencer et al. 1998) și Noua Zeelandă (Ingham and Griffith 2011). În Europa, majoritatea construcțiilor din centrele istorice fac parte din patrimoniul arhitectural, fiind astfel nevoie să fie protejate, în special în zone cu o activitate seismică. Preocuparea pentru îmbunătățirea comportării acestor clădiri în timpul cutremurelor a existat încă de acum 150 de ani în zone expuse frecvent cutremurelor distructive (Spencer et al. 1998). Una dintre măsurile adoptate era introducerea unor tiranți metalici sau a unor grinzi de lemn perimetrale, cu scopul de a lega pereții exteriori. Ulterior, această tehnică a fost înlocuită cu introducerea planșeelor rigide de beton armat în locul celor flexibile de lemn, împreună cu intervenții de cămășuire a pereților portanți pentru a spori rezistența acestora sau de adăugare de centuri de beton armat.

Ultima parte a analizei de risc realizate pentru Lisabona (D. F. D'Ayala et al. 1997) a vizat o strategie de intervenții pentru cartierul Alfama, ținând cont de rezultatele analizelor de vulnerabilitate prezentate anterior. Astfel, a fost realizat planul pentru intervențiile de

consolidare și repartiția capacităților la tăietoare asociate noii situații, ambele ilustrate în Fig. 2. Considerând influența benefică evaluată pentru clădirile care aveau montați tiranți metalici, precum și costurile reduse asociate acestui tip de intervenție (aproximativ 50\$/m²), s-a decis utilizarea acestei tehnici pentru a reduce vulnerabilitatea fondului construit din Alfama.

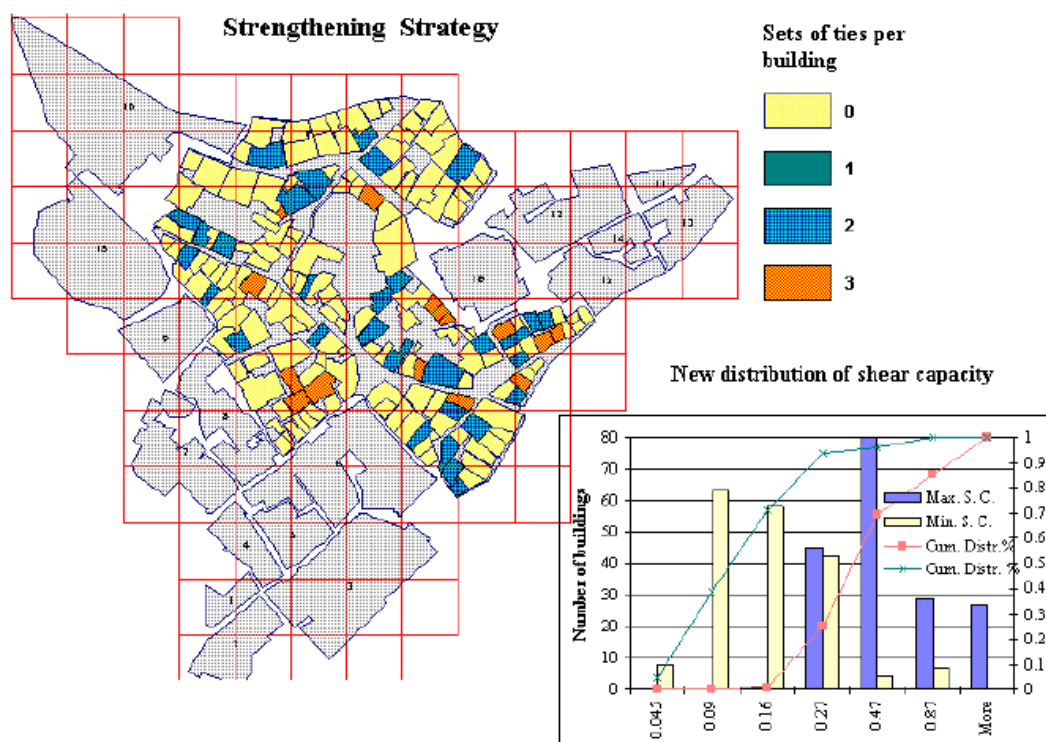


Fig. 2 Strategia de consolidare pentru cartierul Alfama, Lisabona (D. F. D'Ayala et al. 1997)

Ca urmare a cutremurului din 1997 Umbria, în Italia au fost realizate numeroase investigații cu scopul de a înțelege mai bine comportarea clădirilor istorice din zidărie, în special a celor consolidate (Penazzi et al. 2001). Concluziile rezultate din avariile înregistrate după cutremurul din 1997 (Umbria, Italia) au indicat o cunoaștere insuficientă a materialelor și a comportării de ansamblu a clădirilor de zidărie, astfel încât intervențiile de consolidare au fost fie alese greșit, fie implementate neadecvat (Penazzi et al. 2001). Printre cele mai des întâlnite metode moderne de consolidare se numără:

- Injecțiile cu mortar aplicate pentru a suplini golurile și fisurile din zidărie, crescând capacitatea portantă a elementelor. Pentru a aplica această tehnică este nevoie să se cunoască compoziția internă a peretelui, pentru a analiza compatibilitatea dintre materiale și eficiența acestei intervenții.
- Cămășuirea elementelor verticale constă în aplicare unei plase de armătură pe ambele fețe cu ajutorul unui start de mortar pe bază de ciment, cu scopul de a crește rezistența la întindere și ductilitatea (Penazzi et al. 2001). Dificultatea de executare a unei astfel de intervenții, precum și non-omogenitatea pereților au dus la numeroase efecte negative cum ar fi: lipsa de legături între plasele de armătură ale pereților ortogonali sau în conectarea cu planșeele, absența conectorilor transversali care a dus la separarea straturilor de armare, acoperire insuficientă care a generat coroziunea oțelului, lipsa unor reparații uniforme la nivel de structură care au indus un eforturi de torsiune din cauza unei rigidități neuniforme.
- Adăugarea unor centuri de beton armat și înlocuirea planșeele și a acoperișurilor de lemn cu scopul de a îmbunătăți legătura dintre elementele verticale și cele orizontale,

creând comportarea de tip "cutie rigidă" la acțiuni orizontale. Problemele cele mai des întâlnite au fost cauzate de lipsa conexiunilor dintre centuri și pereți sau din cauza unor încărcări excentrice parțiale pentru pereți.

Majoritatea problemelor cauzate de astfel de intervenții sunt generate de particularitățile zidăriei din piatră cu secțiune neomogenă, formată din mai multe straturi, care are o comportare complet diferită de cea a zidăriei de cărămidă regulată.

În urma cutremurului din Insulele Azore din 9 Iulie 1998 cu o intensitate maximă de 7.9, a fost analizată comportarea clădirilor consolidate în urma seismelor precedente din 1926 și 1973 (Spencer et al. 1998). Din punct de vedere tipologic, cele mai afectate clădiri au fost cele realizate din zidărie de piatră neregulată de 1-2 etaje, situate în apropierea epicentrului (5-10 km), în opoziție cu avariile moderate înregistrate la clădirile vechi de zidărie de 3-4 etaje. După cutremurul din 1926 au fost folosiți tiranți metalici pentru acest tip de clădiri de înălțime medie, dar după evenimentul din 1973 s-a optat pentru centuri care nu au fost însă amplasate decât pentru pereții avariați, fără să creeze conexiuni continue. Pereții sunt realizați din tuf vulcanic de slabă calitate, având grosimi de aproximativ 66 cm, uniformi pe toată înălțimea clădirii, iar planșeele de lemn sunt simplu rezemate pe pereți. Avariile constatate după 1998 nu au dus la prăbușiri complete în zona orașului Horta, însă au fost necesare reparații considerabile pentru câteva clădiri care au suferit cedări în afara planului sau avarii moderate cauzate de fisuri din forfecare.

Cutremurul din Irpinia din 1980 a fost urmat de o evaluare la scară largă efectuată în 1986 pentru estimarea vulnerabilității seismice a clădirilor din centrul istoric al orașului Napoli, Italia. Au fost considerate 11 tipologii pentru structurile verticale și 8 pentru cele orizontale, ținând cont de intervențiile de consolidare existente, majoritatea fiind tiranți metalici. Proiectul TOSQUA finanțat de Uniunea Europeană a avut ca obiectiv estimarea gradelor medii de avariere pentru toate clădirile analizate și investigarea eficienței tiranților, în raport cu reducerea gradului de avariere.

Procedura FaMIVE (D. D'Ayala and Speranza 2003) a fost aplicată pentru a evalua eficiența intervențiilor de consolidare în patru orașe din zona Marche, Italia. Pentru clădirile consolidate înainte de 1983 prin adăugarea planșeelor de beton armat fără centuri nu s-a observat modificarea mecanismului de cedare și doar o creștere cu 10% a capacității tăietoare echivalente, ceea ce nu conduce la schimbarea clasei de vulnerabilitate. Pentru cazurile în care există o încărcare verticală adițională și nici o legătură eficientă între elementele portante verticale și planșee, astfel de modificări structurale pot genera mecanisme de colaps pentru valori foarte mici ale capacității tăietoare echivalente. După adăugarea unor elemente de legătură (tiranți sau centuri), mecanismele de colaps în afara planului sunt evitate, valorile capacității tăietoare echivalente fiind aproximativ egale cu coeficientul de frecare (0.4) pentru mecanismele de cedare în plan. Rezultatele studiului au arătat că astfel de intervenții sunt utile în special pentru clădirile zvelte, care sunt în general destul de vulnerabile. Această metodă poate să ofere prin factorii de încărcare o cuantificare a performanței structurale, în corelație cu parametrii care definesc acțiunea seismică.

Fondul construit din sectorul rezidențial din Portugalia prezintă caracteristici similare clădirilor de zidărie din România, în particular clădirilor mixte, cu pereți de zidărie portantă și elemente de beton armat. Un studiu realizat pentru cartierul Alvalade din Lisabona analizează schimbările generate de noile principii de construire din anii 30, care vizau în principal introducerea elementelor de beton armat, în particular a centurilor de beton armat și a planșeelor, elemente menite să lege pereții de zidărie (Lamego et al. 2016) și a cadrelor de beton armat, pentru clădirile înalte. Sunt incluse în studiu cinci tipologii, dintre care majoritatea

sunt structuri mixte, denumite „Placa” și restul din zidărie portantă sau beton armat. Autorii folosesc analize numerice ale unor clădiri reprezentative pentru fiecare tip de structură și regim de înălțime, pentru ca apoi să determine nivelul de avariere și pierderile așteptate într-o analiză de risc seismic tipologică.

Evaluarea intervențiilor realizate pe clădirile existente cu pereți de zidărie reprezintă un subiect de interes și pentru cercetătorii din Portugalia. Autorii unei lucrări care analizează provocările asociate intervențiilor cu beton armat pentru clădirile de zidărie afirmă că astfel de lucrări s-au dovedit a fi extrem de vulnerabile în fața acțiunilor seismice și subiectul necesită o analiză mai amănunțită pentru a stabili caracteristicile acestor clădiri mixte, amplasate în zone seismice (Correia Lopes et al. 2019). Printre dezavantajele acestui tip de intervenții se numără variațiile de rigiditate și creșterea cerinței de capacitate portantă, conducând la distribuții ale forțelor greu de gestionat. Simpla adăugare a planșeelor de beton armat și lipsa unor elemente verticale care să ajute în preluarea forțelor laterale a fost evidențiată ca una dintre cele mai importante deficiențe de conformare structurală a clădirilor „Placa”. Stâlpișorii de beton armat erau adăugați inițial doar în colțurile de la fațadele din spatele clădirilor, fiind armați cel mai frecvent cu 4 Φ 12/40 cm (Monteiro and Bento 2012). Influența planșeelor de beton armat depinde foarte mult de procedeele de execuție, de multe ori neexistând legături suficiente între plăcile de beton armat și pereții de zidărie (Pomba 2007). Metodele alternative de consolidare propuse pentru clădirile mixte din Lisabona presupun înlocuirea elementelor de beton armat cu fie cu cadre metalice sau cu materiale compozite realizate din fibre, care sunt considerate mai compatibile cu structura inițială (Ravara et al. 2001).

Studiile realizate după cutremurul din L'Aquila 2009 indică numeroase clădiri prăbușite parțial sau chiar complet din cauza unor intervenții nepotrivite sau realizate deficitar (Cimellaro et al. 2010). Autorii prezintă situații în care alegerea metodelor de consolidare nu a fost realizată ținând cont de structura inițială, diferențele majore de rigiditate dintre elemente și legăturile insuficiente generând avarii semnificative. Concluziile studiului fac referire la importanța alegerii unor măsuri adecvate specificului local al materialelor și al metodele constructive.

Cu toate că metodele tradiționale de consolidare a clădirilor de zidărie portantă, respectiv adăugarea elementelor de beton armat, sunt recunoscute ca fiind costisitoare și invazive, pentru fondul construit din America Latină, acestea reprezintă în continuare o opțiune preferată. Transformarea clădirilor cu pereți portanți de zidărie în structuri de zidărie cămășuită a fost propusă ca soluție alternativă, mai ușor de aplicat, dovedind prin teste în laborator că poate asigura un nivel crescut de disipare a energiei din timpul acțiunii seismice (Casabonne 2000). Concluzii similare au fost prezentate și în urma studiilor realizate în România pentru pereți de zidărie portantă, zidărie confinată și zidărie consolidată prin cămășuire cu materiale compozite de polimeri armați cu fibre (Lozincă et al. 2016).

Pe de altă parte, în America de Sud, avariile cauzate de cutremurul puternic din Pisco, Peru (2007) au demonstrat eficiența intervențiilor de consolidare a clădirilor existente. Imaginea din Fig. 3 ilustrează locuințele de cărămidă consolidate prin cămășuire cu plase armate în zonele de intersecție dintre pereți și la nivelul terasei, care nu au suferit avarii, spre deosebire de clădirea de lângă neconsolidată și prăbușită la cutremur (Earthquake Engineering Research Institute 2007). Mare parte din fondul construit rezidențial din Peru este compus din clădiri de zidărie confinată, care au prezentat avarii doar în cazul structurilor cu deficiențe structurale importante, precum neregularități pronunțate sau probleme constructive.

Autorii studiului realizat pentru clădirile rezidențiale din Chile (Moroni, Astroza, and Acevedo 2004) prezintă sistemele structurale hibride, caracterizate prin combinarea zidăriei cu betonul

armat: pereții de la etajele inferioare sunt din beton armat, ceilalți sunt parțial confinați, cu detalii constructive precum cele ilustrate în Fig. 4, care de cele mai multe ori nu respectă prevederile minime din conduri. Acest tip de clădiri s-a dovedit a fi extrem de vulnerabil în timpul cutremurelor, în special pentru clădirile cu peste 3 etaje. După cutremurul din Chile din 1939 s-a observat că doar 16% din clădirile de zidărie confinată au fost complet sau parțial prăbușite, în timp ce peste 50% dintre ele nu au fost avariate deloc (Moroni, Astroza, and Acevedo 2004), dar 60% dintre cele de zidărie portantă au ajuns la colaps. Din acest motiv, metodele de consolidate presupun confinarea panourilor de zidărie cu elemente de beton armat (stâlpi și centuri) și cămășuirea lor cu plase armate, torcretate și ancorate în pereți.



Fig. 3 Clădiri din Guadalupe, după cutremurul din 2007 Pisco, Peru (Earthquake Engineering Research Institute 2007)

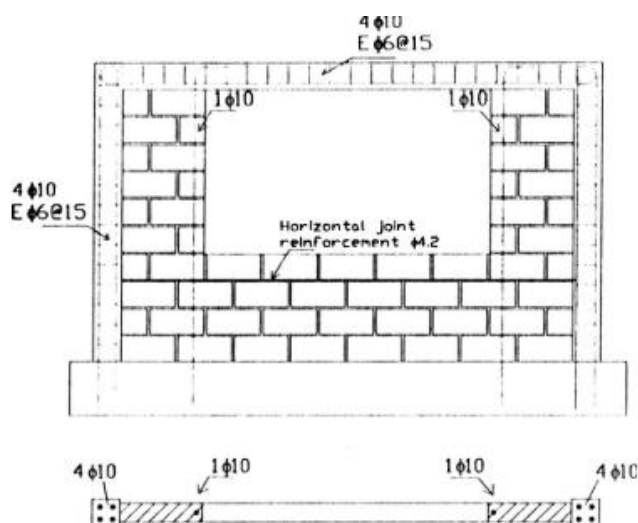


Fig. 4 Detalii de armare pentru structurile hibride din zidărie și beton armat din Chile (Moroni, Astroza, and Acevedo 2004)

3. METODOLOGIE PROPUȘĂ PENTRU EVALUAREA RISCULUI SEISMIC ASOCIAT CLĂDIRILOR DE ZIDĂRIE

3.1. Evaluarea capacității structurale prin metoda analitică

Ținând cont de faptul că nu există informații disponibile referitoare la investigații post-seismice pentru clădirile din România, folosirea unei metode bazată pe date empirice nu este posibilă în cazul fondului construit din România. În urma cutremurului din 1977, peste 18.000 de clădiri din București și aproximativ 2.000 din Iași au fost inspectate (Bălan et al. 1982). Peste 70% dintre cele din București și 90% dintre cele din Iași au fost clădiri de zidărie. Raportul realizat de un grup de lucru al EAEE (Sandi 1986) referitor la analiza investigațiilor post-cutremur prezintă diagramele gradelor de avariere (între 0 și 5), stabilite în funcție de intensitatea macroseismică. Tipologiile de clădiri de zidărie considerate în analiza referitoare la București sunt: A2 (clădiri de zidărie cu planșee flexibile, construite înainte de 1940), A3 (clădiri de zidărie cu planșee flexibile, construite după 1940), A4 (clădiri de zidărie cu planșee rigide, construite înainte de 1940) și A5 (clădiri de zidărie cu planșee rigide, construite după 1940). Deoarece datele prezentate cuprind doar informațiile agregate la nivel de tipologie, fără să fie disponibile fișele individuale de inspecție și pentru că reprezintă datele colectate în urma unui singur eveniment seismic, metodele hibride sau pur empirice nu pot fi aplicate pentru o analiză de fragilitate aplicată fondului construit de clădiri de zidărie.

3.2. Modele de calcul și analize numerice

Programele de calcul utilizate în cadrul tezei pentru analize statice neliniare ale clădirilor de zidărie sunt Tremuri (Lagomarsino et al. 2013) și 3DMacro. Pentru analizarea clădirilor cu pereți de zidărie portantă a fost folosit programul Tremuri care permite modelarea pereților de zidărie sub formă simplificată de cadre echivalente, împărțite în elemente de tip montant și spalet, conectate între ele prin intermediul unor noduri rigide.

Modurile de cedare considerate în cadrul analizelor realizate cu programul Tremuri sunt bazate pe două tipuri de mecanisme de cedare observate la clădirile de zidărie avariate de cutremure (Alexandra Scupin, Vacareanu, and Pavel 2021). Primul se referă la cedarea provocată prin forță tăietoare, manifestată prin fisuri diagonale în formă de „X” apărute cu preponderență în zona centrală a spaletilor de zidărie, așa cum se poate observa în imaginea din stânga din Fig. 5. Al doilea tip de cedare este cauzat de compresiune și încovoiere, ilustrat în imaginea din dreapta din Fig. 5. Pornind de la aceste moduri de cedare, specifice clădirilor de zidărie, programul Tremuri folosește micro-elemente ale căror zonă centrală permite preluarea forțelor tăietoare, în timp ce efectul combinat de încovoiere și compresiune este preluat de zonele perimetrale.

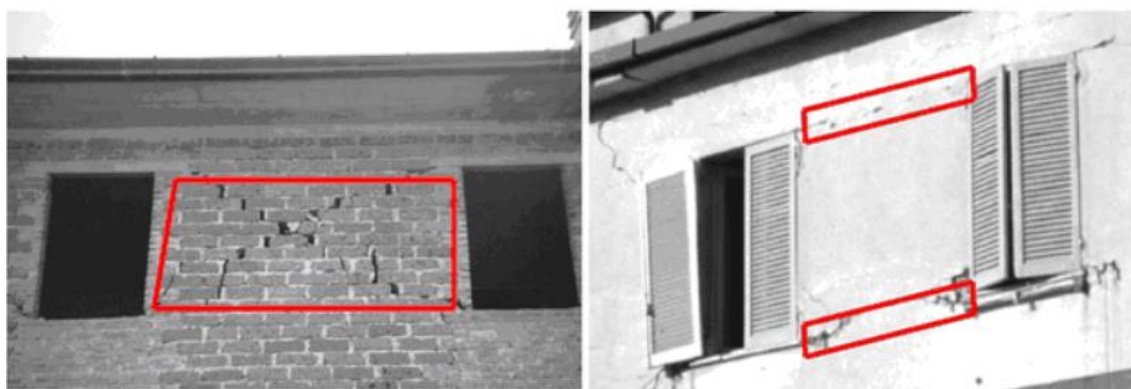


Fig. 5 Tipuri de avarii observate post-cutremur în cazul structurilor de zidărie (S.T.A. DATA 2012)

Spre deosebire de Tremuri, cel de-al doilea program folosit, 3DMacro, folosește elemente bidimensionale discretizate conform schemei ilustrate în Fig. 6. Acesta folosește resorturi la interfața dintre panouri de zidărie (spaleți și montați), atribuindu-le acestora caracteristici mecanice care permit comportarea la compresiune-întindere sau la forfecare (Formisano 2014). Elementele de zidărie sunt de asemenea modelate prin intermediul unor resorturi diagonale care descriu comportarea la întindere și la compresiune. Comparând rezultatele campaniei experimentale cu cele obținute din modelele numerice s-a concluzionat că ambele programe conferă un nivel de încredere mulțumitor în ceea ce privește evaluarea capacității structurale prin analize globale statice neliniare (Marques and Lourenço 2014).

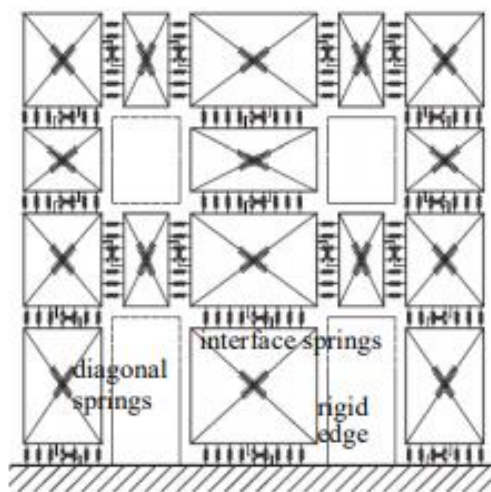


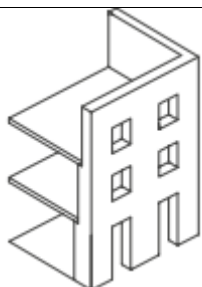
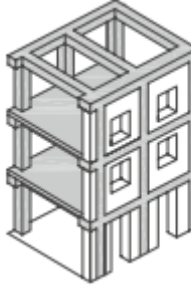
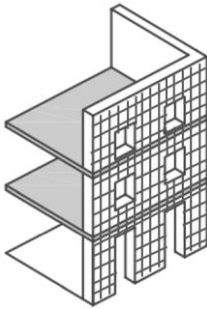
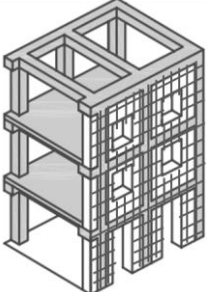
Fig. 6 Modelarea elementelor de zidărie în programul 3DMacro (Marques and Lourenço 2014)

3.3. Taxonomie

Pentru a realiza o analiză de fragilitate reprezentativă pentru tipologiile structurale cel mai des întâlnite în portofoliul clădirilor de învățământ preuniversitar, au fost propuse cinci modele numerice, pornind de la structura unei școli din București. Clădirea analizată poate fi considerată reprezentativă pentru tipologia clădirilor monument istoric, cu structură de zidărie portantă, construite la finalul secolului XIX – începutul secolului XX. Având în vedere vechimea fondului construit de clădiri de zidărie din sectorul educației, cu un sfert din eșantionul de clădiri de zidărie (15 106 clădiri de școli) construite înainte de 1920, caracteristicile unei astfel de clădiri monument pot fi considerate specifice clădirilor istorice de zidărie în general.

Structurile cu asemenea vechime, amplasate în zone cu seismicitate mare au fost avariate în urma cutremurelor și astfel a fost nevoie de-a lungul timpului de diverse intervenții locale de consolidare. Etapele de modificări structurale prin care a trecut clădirea au considerat baza pentru analizele numerice merite să reproducă modele reprezentative pentru tipologiile de clădiri de zidărie. Pornind de la o clasificare a structurilor mixte de zidărie și beton armat specifice fondului construit din Portugalia (Correia Lopes et al. 2019), Tab. 2 prezintă cele cinci modele numerice, începând cu situația inițială a clădirilor construite la final de secol XIX și finalizând cu configurația structurală a clădirii consolidate în prezent, în baza expertizei tehnice.

Tab. 2 Modele numerice și tipologii considerate pentru analiza de fragilitate (adaptat după (Correia Lopes et al. 2019))

Tipologie	Schiță	Structură de rezistență	Tip de planșeu	Software folosit
URM_FF		Zidărie portantă	Flexibil	Tremuri
URM_RF		Zidărie portantă	Rigid	Tremuri
CM		Zidărie confinată (centuri de beton armat și stâlpișori)	Rigid	3DMacro
RM		Zidărie portantă cămășuită	Rigid	Tremuri
CM-RM		Zidărie confinată cămășuită	Rigid	3DMacro

3.4. Interpretarea rezultatelor: evaluarea nivelului de avariere

Stările de avariere considerate sunt cele descrise în manualul HAZUS (Federal Emergency Management Agency 2015): avariere ușoară, avariere moderată, avariere extinsă și avariere completă. În cazul avarierii complete, doar o porțiune din clădire se presupune că se poate prăbuși, în funcție de tipologia structurală.

Nivelul de avariere rezultat în urma analizelor static neliniare sunt comparate cu degradările apărute în urma cutremurelor, acolo unde există astfel de informații. Deplasările globale înregistrate din curbele de Pushover sunt folosite în continuare pentru stabilirea pragurilor depășire de avariere, însă deplasările relative maxime sunt analize pentru a studia cedările locale, specifice clădirilor de zidărie cu conformații neregulate. Reglementările propuse în ghidul ASCE (ASCE 2014) folosesc deplasările relative de nivel, și nu pe cele globale, pentru a stabili nivelul de performanță structurală. Verificarea presupune compararea deplasărilor relative de nivel din modelul numeric cu valorile probabile indicate în literatura de specialitate (Derakhshan and Griffith 2018) pentru un nivel de performanță asociat stadiului de avarie al elementelor.

3.5. Funcții de fragilitate

Avariile structurale se pot estima în funcție de intensitatea mișcării seismice și pot fi exprimate prin intermediul matricelor de probabilități de avariere sau prin funcții de fragilitate (G. M. Calvi et al. 2006). Exprimarea fragilității structurale prin intermediul modelului de repartiție lognormală presupune folosirea a doar doi parametri: valoarea mediană a unui parametru definitoriu pentru comportarea structurală (precum deplasări spectrale sau accelerații spectrale) și abaterea standard a logaritmului, care reprezintă incertitudinea asociată capacității structurale și cerinței seismice. Astfel, se poate exprima probabilitatea de depășire sau de atingere a unei anumite stări de avariere, 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.

Metodologia folosită în continuare în analiza de fragilitate a urmărit principiile procedurii de nivel II propusă în cadrul proiectului RISK-UE (Kappos et al. 2006a). Aceasta presupune generarea funcțiilor de fragilitate exprimate în funcție de deplasări spectrale folosind rezultatele analizelor statice neliniare ale modelelor numerice realizate pentru clădirile incluse în studiile de caz. 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 (Z V Milutinovic and Trendafiloski 2003):

$$\beta_{d1} = 0,25 + 0,07 \ln (\mu_u)$$

$$\beta_{d2} = 0,20 + 0,18 \ln (\mu_u)$$

$$\beta_{d3} = 0,10 + 0,40 \ln (\mu_u)$$

$$\beta_{d4} = 0,15 + 0,50 \ln (\mu_u)$$

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 sunt prezentate mai jos (Lamego et al. 2016)..

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

Funcțiile de fragilitate obținute dintr-un număr redus de modele numerice analizate nu poate fi considerat reprezentativ pentru o întreagă tipologie. Astfel, pentru a valida funcțiile de fragilitate propuse pentru cele cinci tipologii incluse în analiză, studii similare din literatura de specialitate vor fi comparate cu rezultate obținute în teză. Totodată, analizele detaliate ale nivelului de avariere înregistrat în analizele numerice este comparat cu observațiile din expertizele tehnice referitoare la comportare structurilor în timpul cutremurelor. În acest fel se poate valida gradul de avariere asociat unei anumite amplitudini ale mișcării seismice.

3.6. Analiză de risc seismic

Cele mai recente rezultate ale analizelor probabilistice de hazard pentru teritoriul României sunt incluse în analiza de risc seismic (Pavel et al. 2016), cuprinzând ratele medii anuale pentru care se depășește o anumită valoare a unui parametru al mișcării seismice (Pavel and Vacareanu 2017).

Analiza de risc seismic presupune combinarea noțiunii de fragilitate și hazard pentru a estima pierderi așteptate sau probabilități de cedare. Aplicare acestora pentru un număr mare de clădiri este utilă în procesul de gestionare a intervențiilor post-dezastru sau a planificării acțiunilor de reducere a riscului seismic.

Metoda folosită pentru determinarea probabilităților anuale de cedare, înțeleasă ca depășirea unui anumit nivel de avariere structurală, este calculată conform abordării integralei de convoluție propusă de Kennedy (Kennedy 2011):

$$P_F = \int_0^{+\infty} H_A(a) \cdot \frac{dP_{F|a}}{da} da$$

unde $P_{F|a}$ reprezintă fragilitatea în sensul de probabilitate de cedare asociată unei anumite acțiuni seismice și $H_A(a)$ reprezintă cubra de hazard seismic, exprimată prin rata anuală asociată unei mișcări a terenului de amplitudine a . Estimări referitoare la probabilitățile anuale de depășirea unor anumite stadii de avariere au fost realizate în mod similar și pentru clădiri rezidențiale din România, cu structură de zidărie portantă sau confinată și regim mic de înălțime (Alexandra Scupin, Văcăreanu, and Pavel 2020).

Calculul probabilităților anuale de cedare poate fi aplicat atât celor două clădiri analizate în studiile de caz, cât și tipologiilor de clădiri de zidărie definite pentru întregul eșantion de clădiri din sectorul educației, agregate la nivel de UAT.

3.7. Analiza cost-beneficiu

Analizele de cost-beneficiu reprezintă instrumente care contribuie la luarea unor decizii informate referitoare la proiecte de investiții și politici publice. Cuantificarea beneficiilor presupune stabilirea unor valori pe care oamenii sunt dispuși să le plătească pentru a reduce anumite riscuri, în mod particular, reducerea riscului seismic în cazul analizei referitoare la consolidarea clădirilor de zidărie din sectorul educației. Astfel, investiția poate fi considerată

rentabilă dacă beneficiile estimate în urma investiției sunt mai mari decât costurile asociate intervențiilor.

Pentru programele de reabilitare a infrastructurii școlare, analiza de cost-beneficiu a fost folosită pentru a evalua eficiența intervențiilor, cuantificând pierderile evitate prin consolidarea clădirilor incluse în proiect.

4. STUDII DE CAZ: CLĂDIRI DE ZIDĂRIE ȘI MONUMENTE ISTORICE

4.1. Muzeul de Geologie: analize numerice, rezultate, fragilitate și risc seismic

Clădirea Muzeului Național de Geologie este analizată sub forma unui studiu de caz, fiind reprezentativă pentru tipologia clădirilor de patrimoniu tip palat, cu structură de zidărie. Imobilul a fost construit între anii 1904 și 1906, găzduind inițial sediul Institutului Național de Geologie și ulterior Muzeul Național de Geologie, începând cu anul 1975. Acesta se află de lista de monumente istorice, fiind încadrat la grupa B: monumente istorice reprezentative pentru patrimoniul cultural local. Clădirea a fost proiectată de arhitectul Ion Ștefănescu, care a studiat la Școala Națională de Arhitectură și la École de Beau Art în Paris.

Clădirea este compusă din două corpuri, cu înălțimi și forme diferite în plan, fără să fie separate prin rosturi de dilatare. Corpul principal are un demisol de 4,4 m, parter de 6,8 m și planșee intermediare ale mezaninului de 3 m înălțime, etaj de 5,6 m. Fațada din spate aparține corpului secundar, unde au fost amplasați contraforți la scurt timp după finalizarea construcției, pentru a consolida corpul afectat de tasări. Este posibil ca aceste elemente să fie fondate pe teren neadecvat (umplutură) sau ca zonele de legătură cu pereții existenți să nu fi fost realizate prin țesere. Așadar, nu există informații suficiente referitoare la modalitate de realizare a acestor contraforți, astfel încât să se justifice considerarea lor ca îmbunătățind comportarea structurii.

Planșeul de peste demisol din zona corpului secundar este înălțat cu 1,60 m față de corpul principal, prin prezența scării de onoare. Sub zona de scară, se află un subsol de 7,85 m, iar deasupra se află sala de expunere cu o înălțime de peste 10 m. Fiind diferențe mari de rigiditate între cele două corpuri de clădire insuficient legate unul de altul, comportarea acestora este diferită.

Din punct de vedere al regularității, se remarcă trasee verticale continue de transmitere a solicitărilor, însă și discontinuități la nivelul golurilor de ferestre, în special cele aparținând fațadei principale. Una dintre zonele de discontinuitate se află la nivelul foișorului fațadei principale, unde stâlpi de piatră și arcele de deasupra lor sprijină peretele aticului. Totodată, înălțimile mari de nivel favorizează crearea unor elemente orizontale de cuplare puternice care compensează lipsa unor montanți de zidărie continui până la nivelul infrastructurii. În ceea ce privește grosimea pereților de zidărie, nivelurile supraterane prezintă dimensiuni reduse semnificativ, în comparație cu cele de la nivelul demisolului. Reducerile de grosimi ale pereților pornesc de la 25% și sunt accentuate odată cu înălțimea, ajungând până la aproximativ 55%.

Conform informațiilor referitoare la materiale prezentate în expertiza tehnică, zidăria de cărămidă plină presată (C75/C100 cu dimensiuni de 14x29x6,5 cm) cu mortar de var și adaos de ciment (M4/M10) este de bună calitate, iar betonul armat are o marcă echivalentă cu B100-170.

Conform raportului de expertiză tehnică cele mai importante deficiențe structurale sunt următoarele:

- Înălțimile mari de nivel și reducerea grosimii pereților
- Lipsa rosturilor între corpurile de clădire cu caracteristici diferite
- Dimensiunea golurilor de pe fațade
- Pereți de compartimentare insuficient ancorați pe direcția transversală la nivelul aticului

Intervențiile de consolidare efectuate la începutul anilor 1980 au contribuit la cumularea relativ redusă a avariilor structurale, ținând cont de cei peste 100 de ani de utilizare. Materialele sensibile acțiunilor climate (lemnul șarpantei sau mortarul din pereții de zidărie de la nivelul podului) prezintă degradări importante, amplificate și de acțiunile mecanice cauzate de cutremure (1940 și 1977) și bombardamente (1944).

Ca urmare a acestor avarii, intervențiile finalizate în 1984 au cuprins următoarele lucrări, evidențiate în schema măsurilor de consolidare din Fig. 7:

- Planșeu de beton armat monolit turnat peste planșeul de lemn de la nivelul podului;
- Planșeu de beton armat monolit peste parter și mezanin, unde au fost păstrate doar grinzele metalice, nu și cele de lemn;
- Injectarea fisurilor din pereți cu pastă de ciment și umplerea cu mortar a crăpăturilor;
- Refacerea intersecțiilor prin ancorarea cu armături în găuri perforate și cămășuieli cu plase sudate;
- Adăugarea unor tiranți metalici în zonele de ancorare a porticului și a pereților avariați și dislocați;
- Rezidirea unor zone cu zidărie expulzată și strivită;
- Placarea unor pereți cu: strat de beton armat cu plasă de oțel de 10 cm grosime, turnat în cofraj sau strat de mortar torcretat, armat cu plase sudate;
- Placarea pereților transversali din corpul principal (unde au fost adăugate goluri pentru vizitatorii muzeului) cu strat de beton armat cu plasă de armătură și element de bordaj în lungul golului (armat longitudinal și transversal);
- Acoperirea scării cu tavan din tencuială de ciment armat cu plasă metalică subțire și plasă de rabiț, ancorată cu armături (OB 37 $\Phi 12$) de grinzi metalice (profile I 135mm înălțime) rezemate pe pereții longitudinali ai aticului.

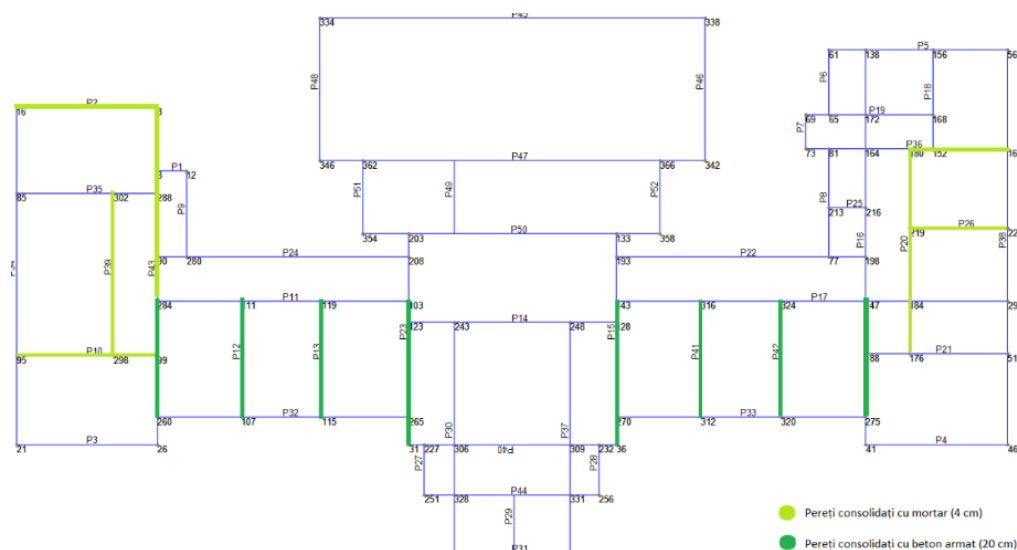


Fig. 7 Intervențiile de consolidare realizate în 1982

Cutremurele din anii 1986 și 1990 nu au generat degradări în zonele consolidate sau refăcute, demonstrând astfel eficacitatea lucrărilor realizate în 1984, în special „angajarea solidară a structurii verticale din zidărie simplă” ca urmare a rigidizării planșeelelor. Din punct de vedere al comportării în timp a structurii, nu s-au observat tasări diferențiale.

4.1.1. Analiza static neliniară: model numeric

Programul de calcul utilizat pentru analizele static neliniare este Tremuri (Lagomarsino et al. 2013). Pentru realizarea modelului de calcul ilustrat în Fig. 8 în programul Tremuri au fost făcute o serie de simplificări la nivel de geometrie, date fiind limitările programului și timpul alocat modelării și ulterior rulării analizelor. Contraforții prezenți în zona sălii de expoziție s-a decis să nu fie modelați, ținând cont de imposibilitatea creării unui efect de cutie rigidă, dată fiind poziția acestora. De asemenea, concluziile referitoare la modalitatea de construire a acestor contraforți justifică alegerea făcută.

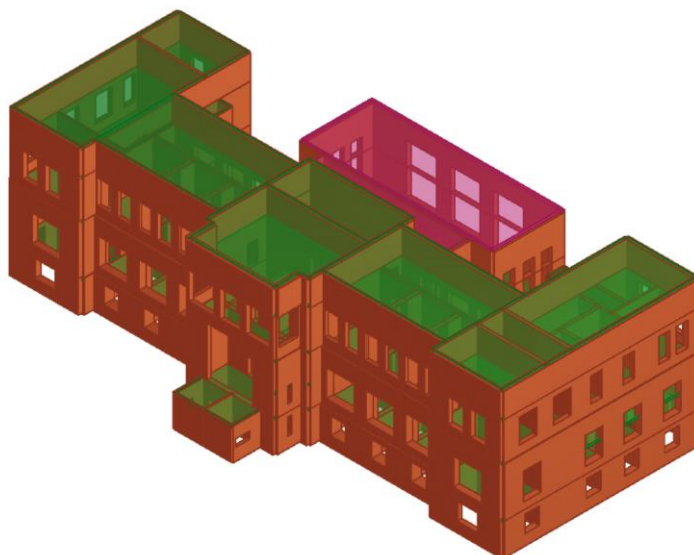


Fig. 8 Modelul 3D al Muzeului Național Geologic (Tremuri)

4.1.2. Analiza static neliniară: rezultate

Pentru cele două modele structurale (clădirea inițială, respectiv clădirea consolidată în anii 80') au fost realizate analize separate, cu scopul de a evidenția contribuția intervențiilor de consolidare în comportarea structurală a clădirii. Analizele Pushover presupun aplicarea statică și monotonă a forțelor, folosind un model de comportare neliniară pentru rezistența materialelor, astfel încât în final sunt obținute curbe de capacitate. Acestea reprezintă anvelopa ciclurilor histeretice produse în urma încărcării seismice și sunt folosite ca un indicator al comportării post-elastice a structurii (S.T.A. DATA 2012).

Pentru a realiza analiza comparativă a celor două variante ale clădirii Muzeul Geologic au fost realizate câte 4 analize Pushover pentru fiecare model din Fig. 9, considerând doar sensul pozitiv de acțiune pentru încărcarea seismică (direcția X și Y) și forța aplicată proporțional cu înălțimea (Pushover Static) sau uniform distribuită (Pushover Uniform). Pentru o analiză mai detaliată a rezultatelor obținute, se va considera doar cazul de încărcare "Pushover static".

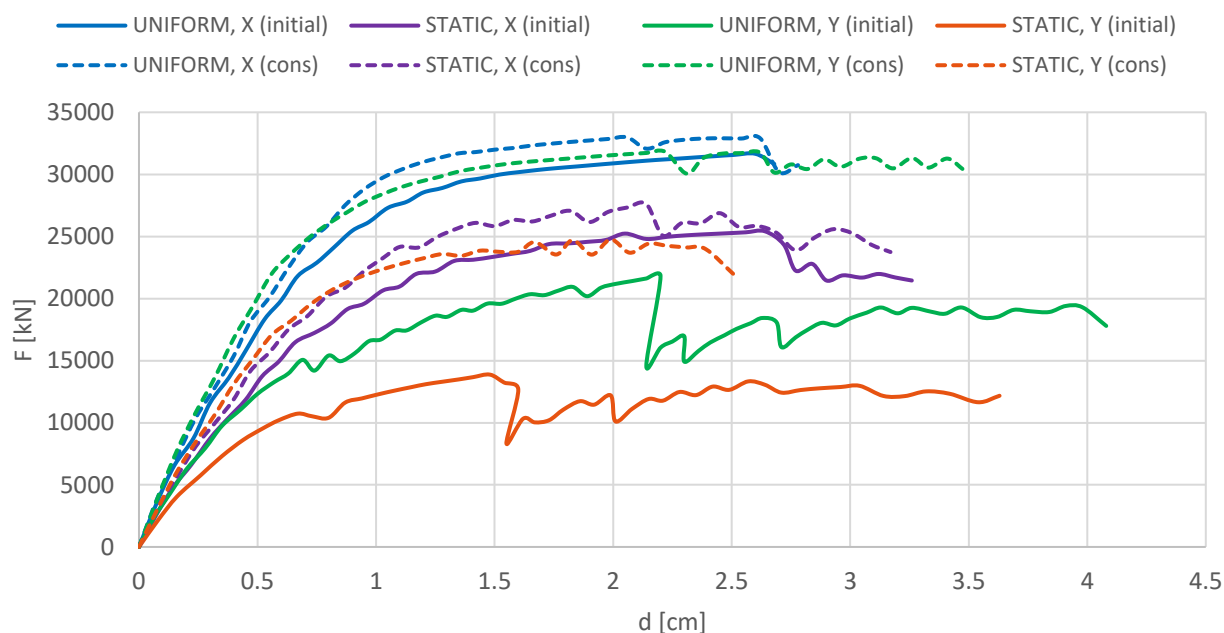


Fig. 9 Curbe Pushover pentru modelul inițial și pentru cel consolidat

4.1.3. Analiza static neliniară: deplasări globale, relative și stadii de avariere

Nivelul de avariere al elementelor structurale supuse acțiunilor seismice se poate stabili în corespondență cu deplasările laterale relative, completând astfel analizele de fragilitate folosite pentru analizele de risc seismic.

Toate valorile de deplasări relative globale care corespund deplasărilor din dreptul limitei elastice de pe curbele de Pushover biliniarizate se situează sub limita stadiului D0 (ocupare imediată) de 0,06%. Pentru valorile ultime de deplasări înregistrate prin curbele de Pushover se atinge starea intermediară de control al avariilor, notată D2 cu valori între 0,1% și 0,2%. Singura analiză care a condus la o valoare de deplasare relativă mai mare decât 0,2 este Pushover-ul uniform (Y) pentru modelul inițial, atingând în acest caz stadiul de prevenirea a colapsului (D3). În studiile realizate pentru clădiri din Noua Zeelandă ((Derakhshan and Griffith 2018), (Cattari et al. 2015)) a fost propusă și valoarea 0,14% ca limită între D2 și D3, spre deosebire de 0,2%, rezultatul fiind bazat pe avariile înregistrate pe clădirile analizate. Folosind această valoare redusă, ar rezulta stadii de pre-colaps pentru toate analizele Pushover ale modelului inițial al Muzeului Geologic.

Tab. 3 Limite de deplasări relative pentru zidărie portantă

		Limite pentru deplasări relative la nivel de perete (ASCE 2014)(ASCE 2000)	Limite pentru deplasări relative globale ((Derakhshan and Griffith 2018), (Cattari et al. 2015))
D0	Immediate Occupancy (IO)	0 - 0,3%	0 - 0,06%
D1	Damage Control (DC)	0,3% - 0,6%	0,06% - 0,1%
D2	Life safety (LS)	0,6% - 1%	0,1% - 0,2%
D3	Collapse Prevention (CP)	$\geq 1\%$	$\geq 0,2\%$

În cazul Muzeului Geologic, avariile raportate în urma cutremurului din 1977 au indicat zone de concentrare a avariilor în special pentru situațiile în care existau decalaje de amplasare a pereților structurali, spre exemplu cei din zona foișorului de la fațada principală. Diminuarea progresivă a grosimii pereților structurali care contribuie la diferențe semnificative de rigiditate de la un etaj la altul pot de asemenea favoriza deplasări de nivel concentrate care să nu poată fi surprinse de analizele globale de deplasări relative. Pentru a analiza aceste aspecte se prezintă valorile de deplasări relative ale pereților, înregistrate doar pentru analiza de Pushover static, atât în cazul modelului inițial, cât și în cazul celui consolidat (A Scupin, Vacareanu, and Pavel 2021).

Lucrările de consolidare din 1982 s-au concentrat pe cămășuirea pereților transversali ai corpului principal. Comparând stadiile de avariere asociate pereților încărcăți în planului lor pe direcția Y din modelul inițial cu cele din modelul consolidat se poate observa schimbări semnificative în preluarea forțelor laterale și distribuția eforturilor în pereți (A. Scupin, Văcăreanu, and Pavel 2021). Pentru direcția transversală, pereții care prezintă cele mai mari deplasări relative (marcați în Fig. 10a cu roșu și galben) în analiza modelului inițial sunt chiar pereții care au fost consolidați în 1982. Pentru direcția longitudinală zonele cu cele mai mari deplasări relative se regăsesc la nivelul foișorului și al fațadei principale la parter, cu diferențe nesemnificative față de restul pereților de la același etaj. Modificările înregistrate pentru modelul consolidat sunt minore în ceea ce privește deplasările relative ale pereților longitudinali.

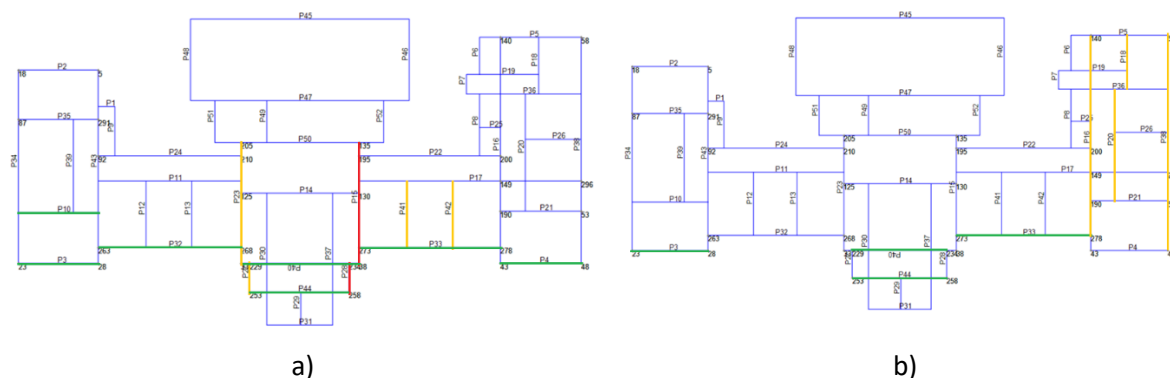


Fig. 10 Stadii de avariere pereți: model inițial (a) și model consolidat (b)

4.1.4. Analiza static neliniară: funcții de fragilitate

Pentru a evalua intervențiile de consolidare din 1980 au fost determinate funcții de fragilitate pentru ambele variante ale clădirii Muzeului Geologic, pornind de la curbele de capacitate biliniarizate. Odată obținute spectrele SA-SD, s-a urmărit procedura prezentată în capitolul 3 pentru a stabili limitele stărilor limită de avariere:

Rezultatele centralizate pentru parametrii funcțiilor de fragilitate sunt prezentate în Tab. 4 , fiind obținute pe baza curbelor de capacitate rezultate din analizele de Pushover static, pe ambele direcții. Comparând cele două direcții X și Y pentru modelul inițial, se poate observa că probabilitățile de depășire a stadiilor de avariere ușoară și moderată sunt mai mari pentru direcția Y, în timp ce apar probabilități mai mari de depășire ale stadiilor de avariere extinsă și completă pentru direcția X. Pentru deplasări spectrale sub 1,5 cm însă, probabilitățile de depășire a tuturor stadiilor de avariere sunt mai mari pentru analiza pe direcția Y. În cazul modelul consolidat, probabilitățile de cedare asociate tuturor celor patru stări de avariere sunt mai mari pentru direcția Y.

Tab. 4 Parametrii funcțiilor de fragilitate

		Deplasări spectrale [cm]							
		avariere minoră		avariere moderată		avariere extinsă		avariere completă	
		Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β
Model inițial	X	0,40	0,36	0,57	0,50	1,16	0,76	2,94	0,97
	Y	0,30	0,40	0,42	0,58	1,19	0,94	3,48	1,20
Model consolidat	X	0,38	0,36	0,55	0,49	1,11	0,75	2,81	0,97
	Y	0,34	0,35	0,49	0,47	0,90	0,69	2,13	0,90

Pentru a evalua influența consolidărilor realizate în 1982, în Fig. 13 sunt ilustrate în paralel funcțiile de fragilitate pentru modelul inițial versus cel consolidat. Având în vedere că intervențiile au fost concentrate pe cămășuirea pereților de pe direcția transversală, în continuare este prezentată doar comparația pentru direcția Y, unde modificările sunt semnificative. Pentru primele două stadii de avariere, nu există modificări notabile între cele două modele structurale, însă pentru starea de avariere extinsă și completă, modelul consolidat prezintă probabilități de depășire mult mai mari decât în cazul modelului inițial. Clădirea consolidată prin betonarea planșeelor flexibile și cămășuirea cu beton armat a pereților conduce la o comportare mult mai rigidă a structurii, ajungând la o rigiditate cu 45% mai ridicată. Soluția de consolidare a crescut capacitatea de rezistență și rigiditatea, limitând deformabilitatea structurii. Din acest motiv, fragilitatea seismică trebuie judecată atât în termeni de forță, cât și de deplasare.

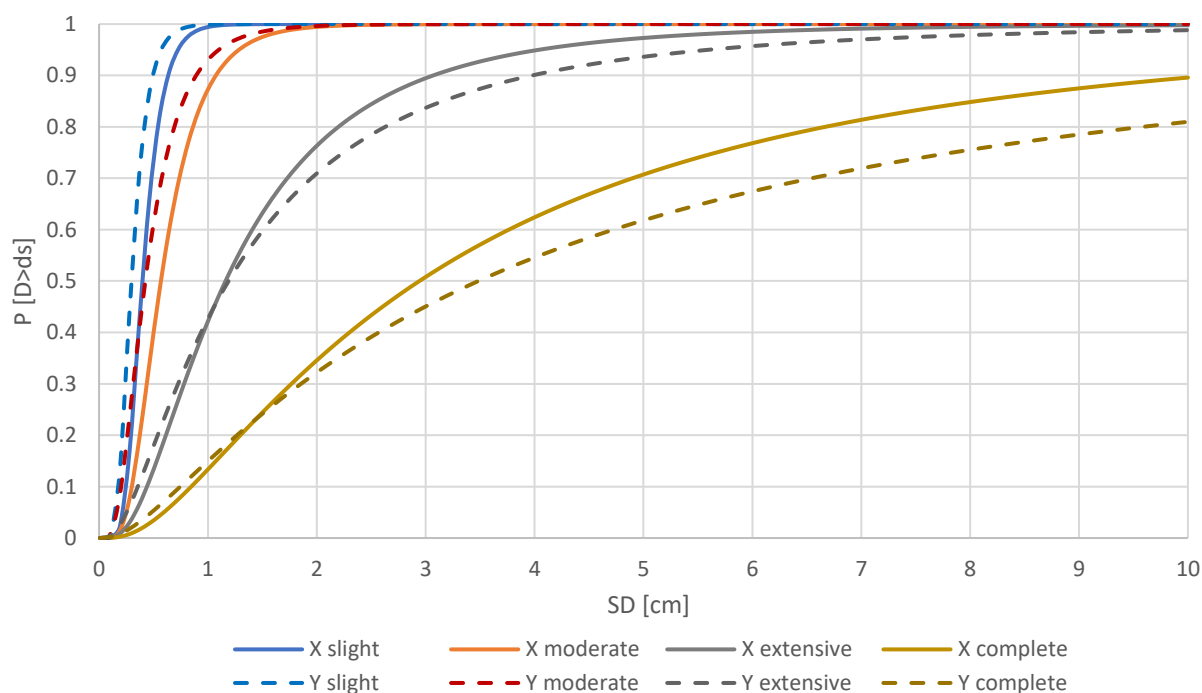


Fig. 11 Funcții de fragilitate pentru modelul inițial: comparație direcția X și Y

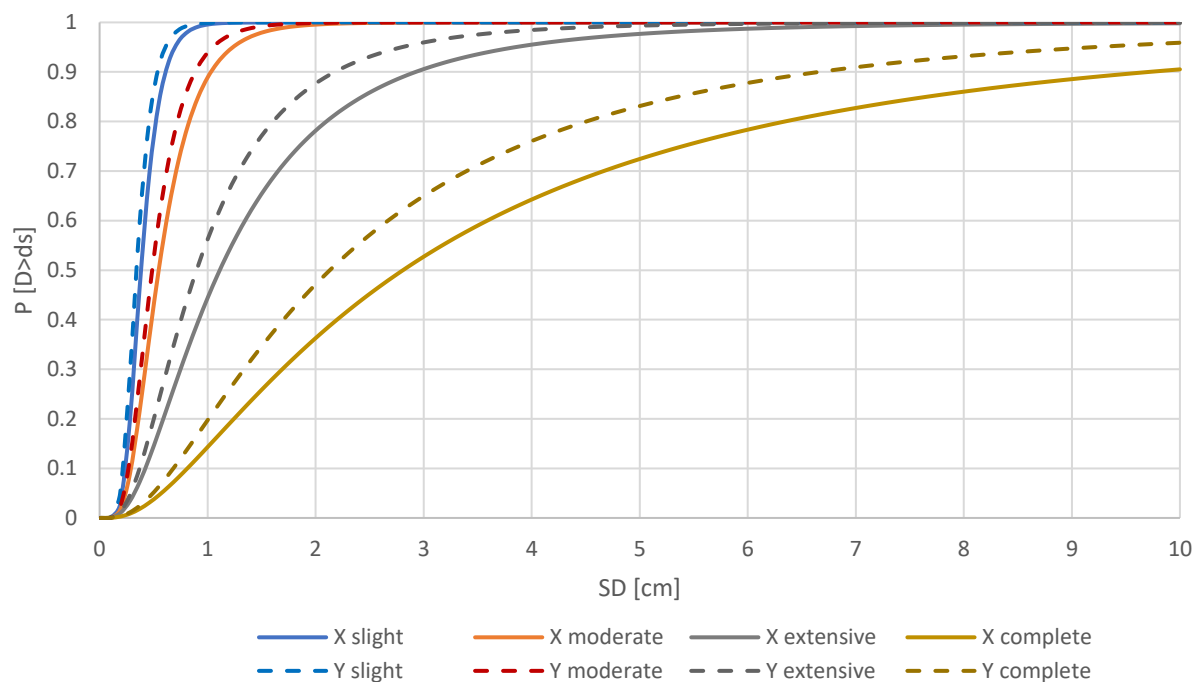


Fig. 12 Funcții de fragilitate modelul consolidat: comparație direcția X și Y

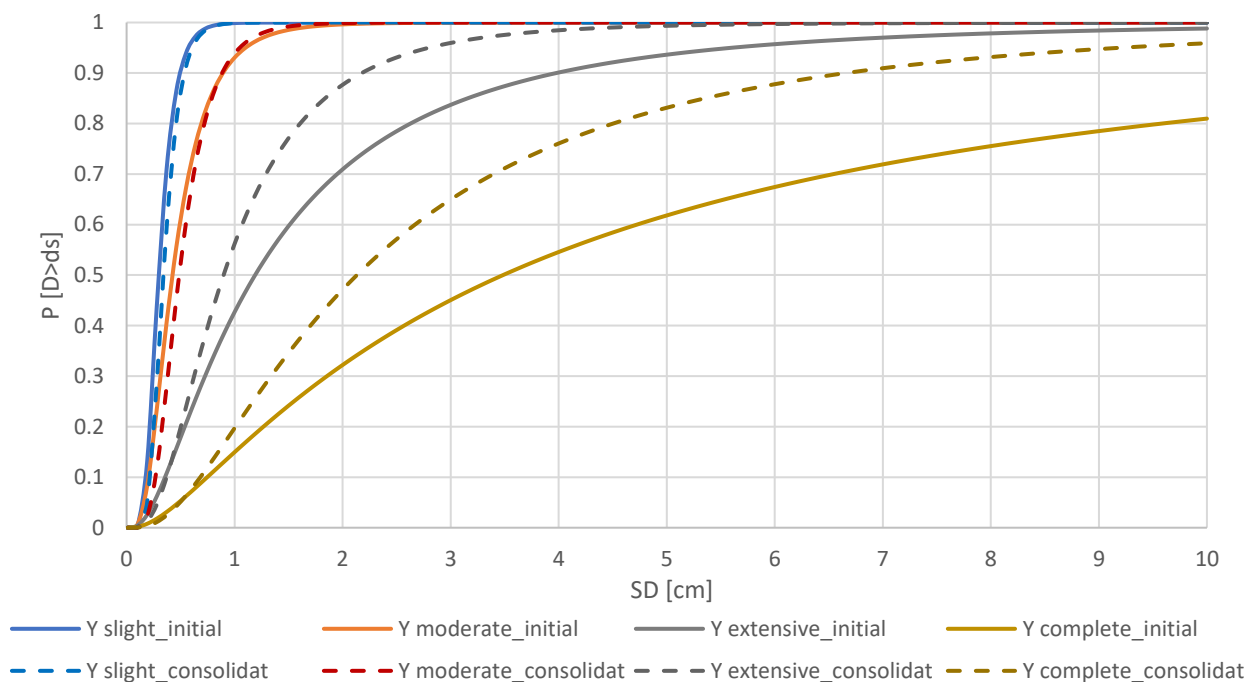


Fig. 13 Funcții de fragilitate (direcția Y): comparație între modelul inițial și cel consolidat

Consolidarea prin cămășuire implică creșteri substanțiale ale rezistenței, dat fiind faptul că un nou element structural este format pe suprafața peretelui de zidărie, însă nu asigură o creștere a capacității de deplasare. Această metodă este aproape la fel de eficientă ca un nou perete de beton armat ((VTT) 2011). Astfel de metode tradiționale de consolidare nu apar foarte des în lucrări de cercetare, având în vedere interesul crescut pentru metode inovative și mai puțin invazive de intervenții pe clădiri existente, în special pentru monumente. Pentru o clădire istorică de zidărie portantă amplasată în Istanbul, propunerea de consolidare a vizat cămășuirea cu beton armat a pereților portanți principali și aplicarea fâșiilor FRP din fibre de

carbon pentru pereții secundari (Ufuk Hancilar, Eser Durukal 2009). Pentru evaluarea soluției propuse, verificările au presupus evaluarea raportului dintre cerință și capacitate portantă la nivel de perete.

4.1.5. Soluție alternativă de consolidare: funcții de fragilitate

Eficiența intervențiilor de consolidare realizate în anul 1982 nu a putut fi surprinsă prin intermediul funcțiilor de fragilitate. Pentru a prezenta o variantă alternativă de consolidare care ar putea conduce la creșterea rezistenței și în același timp și la creșterea capacității de deplasare, a fost realizat un nou model al Muzeului de Geologie unde au fost înlocuite cămășuirile cu beton armat cu consolidarea cu fâșii de fibre de carbon FRP.

Testele efectuate în laborator pentru pereți de zidărie consolidați cu fibre de carbon au indicat creșteri ale capacității de disipare a energiei de peste două ori mai mare față de pereții de zidărie portantă (Lozincă et al. 2016). Pentru caracteristicile de material ale fibrelor de carbon introduse în modelul din Tremuri au fost folosite datele din fișa tehnică pentru SIKa 230C, material folosit și în cadrul campaniei experimentale desfășurate în cadrul Universității Tehnice de Construcții din București (Lozincă et al. 2016).

Rezultatele analizei statice neliniare sunt prezentate în Fig. 14 doar pentru analiza statică în direcția Y, prin comparație cu modelul inițial al Muzeul Geologic și cel consolidat prin cămășuire. Se poate observa că nivelul de forță capabilă atins de modelul cu FRP ajunge la un nivel aproximativ egal cu maximul atins și de consolidare prin cămășuire, însă fără schimbarea de rigiditate față de modelul inițial și cu o creștere a deplasării ultime. În ceea ce privește capacitate de disipare a energiei, creșterea estimată pentru aria de sub graficul modelului FRP este de 2,65 ori mai mare față de modelul inițial.

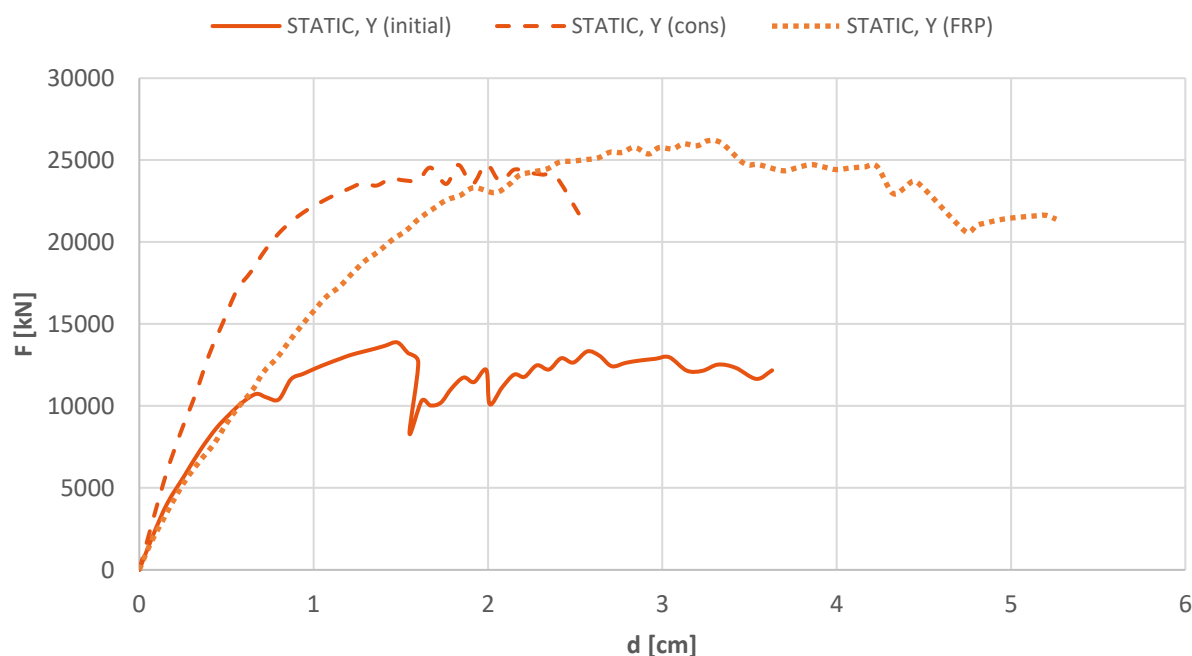


Fig. 14 Curbele Pushover pentru modelul inițial, consolidat (cămășuiri) și FRP, direcția transversală

Concluziile studiului de caz arată că pentru a evidenția eficiența unor intervenții de consolidare realizate local și neuniform la nivel de clădire, analizele globale static neliniare nu pot oferi rezultate relevante, în special în cazul structurilor neregulate. Cămășuirile cu beton armat și

rigidizarea planșeelor au fost considerate eficiente, dată fiind comportarea structurii consolidate supusă cutremurelor, deși analizele de fragilitate indică contrariul. Pentru a compensa rigiditatea generată de consolidarea prin cămășuire, o metodă alternativă o poate reprezenta folosirea fâșiilor de polimeri de fibre de carbon, care asigură atât creșterea rezistenței, cât și a capacității de deformabilitate. Analize mai detaliate ar trebui realizate pentru a optimiza utilizarea celor două metode, în funcție de constrângerile generate de caracterul de monument al clădirii, precum și de criteriile de performanță structurală. În procesul de evaluare al comportării unei clădiri de zidărie portantă supusă acțiunii seismice, instrumentele de calcul simplificat care presupun modelarea pereților cu macro-elemente pot surprinde zonele cu potențial mare de avariere, ținând cont de ipoteze referitoare la modurile de cedare asociate fiecărui tip de macro-element. Pentru a extrapola concluziile acestui studiu de caz la nivel de tipologie sunt necesare mai multe analize individuale pentru clădiri similare ale căror modele de calcul să poată fi validate într-o manieră similară celei propuse în prezenta lucrare.

4.2. Clădire Școală: analize numerice, rezultate, fragilitate și risc seismic

4.2.1. Scurt istoric: prezentarea clădirii

Școala din București considerată studiu de caz a fost construită în 1884, conform datelor din expertiza tehnică. Aceasta a fost clasată ca monument istoric, fiind reprezentativă pentru tipologia clădirilor de patrimoniu din sectorul educației, construite la finalul secolului XIX – începutul secolului XX.

Suprastructura în varianta inițială a fost din zidărie portantă cu planșee de lemn, transformate în anii 40 în planșee rigide, din beton armat, cu grosime de 12 cm. După cutremurul în 1977, a fost adăugat un număr redus de cadre de beton armat (grinzi și stâlpișori). 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. 13 este ilustrat modelul tridimensional al clădirii, realizat în 3DMacro, unde subsolul nu a fost însă modelat.

În prezent, școala are 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. Intervențiile de consolidare propuse în expertiza tehnică vizează reparații locale și cămășuirea unor pereți 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.

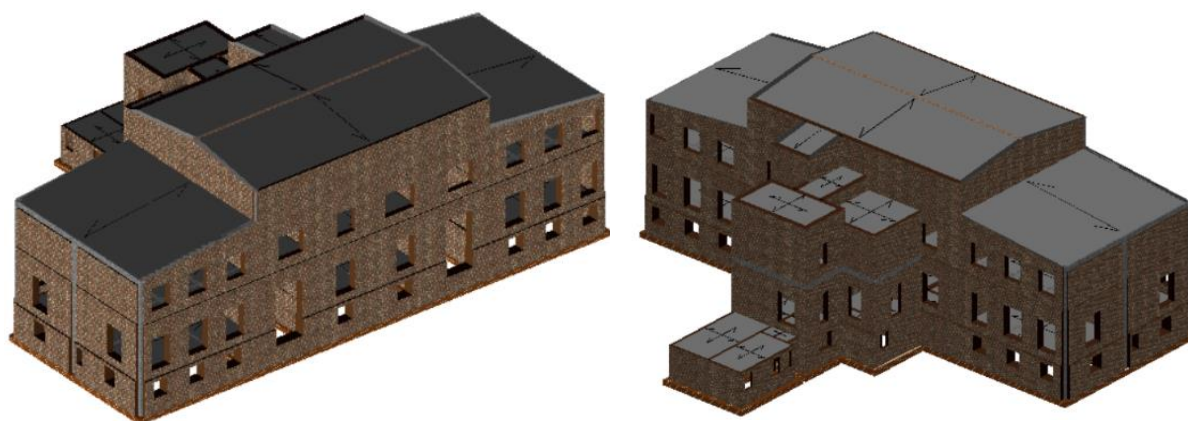


Fig. 15 Modelul 3D al școlii (3DMacro): fațada corpului principal (stânga) și corpurile secundare (dreapta)

4.2.2. Analiza static neliniară: model numeric

Modelele numerice propuse pentru clădirea de școală au fost realizate în programul Tremuri, conform procedurii prezentate în detaliu în secțiunea 4.1.1 și în programul 3DMacro. Acesta din urmă a fost ales deoarece, spre deosebire de Tremuri, permite modelarea structurilor mixte, cu structură de pereți de zidărie și elemente de confinare realizate din beton armat (centuri și stâlpișori). 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 (Marques and Lourenço 2014).

Pornind de la datele referitoare la structura analizată, au fost realizate patru modele numerice ale școlii, folosind programul 3DMacro pentru unele dintre analizele statice neliniare. Modelul de zidărie portantă, 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. Fig. 16 ilustrează zonele în care au fost aplicate măsurile de consolidare menționate anterior.

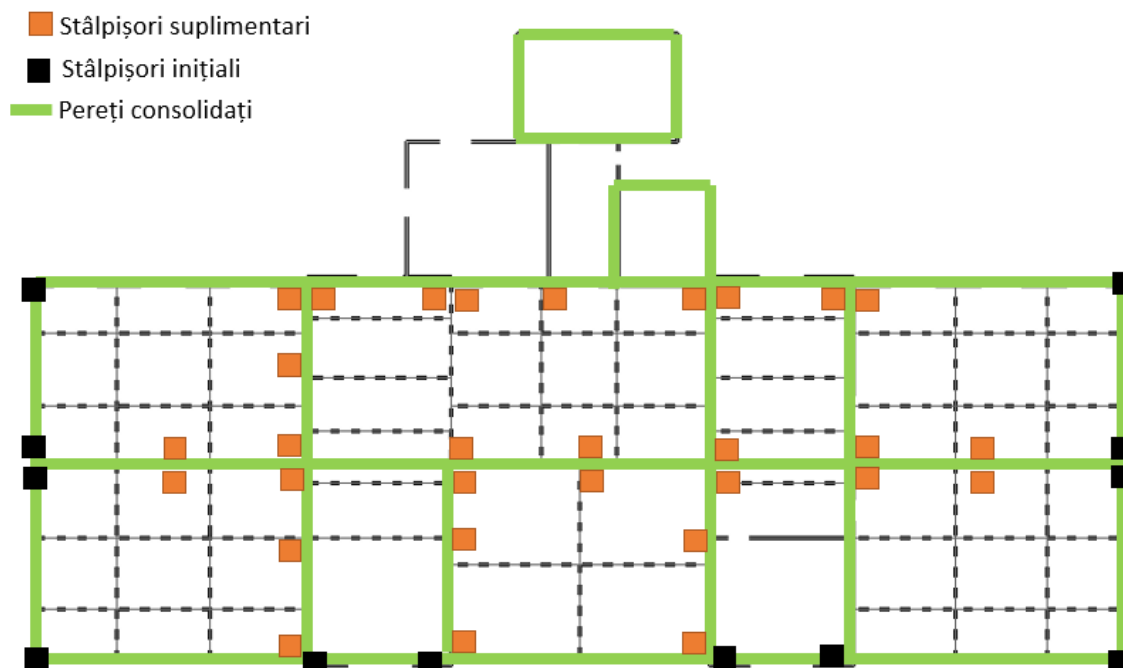


Fig. 16 Măsuri de consolidare (plan demisol)

4.2.3. Analiza static neliniară: rezultate

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 (Marques and Lourenço 2014).

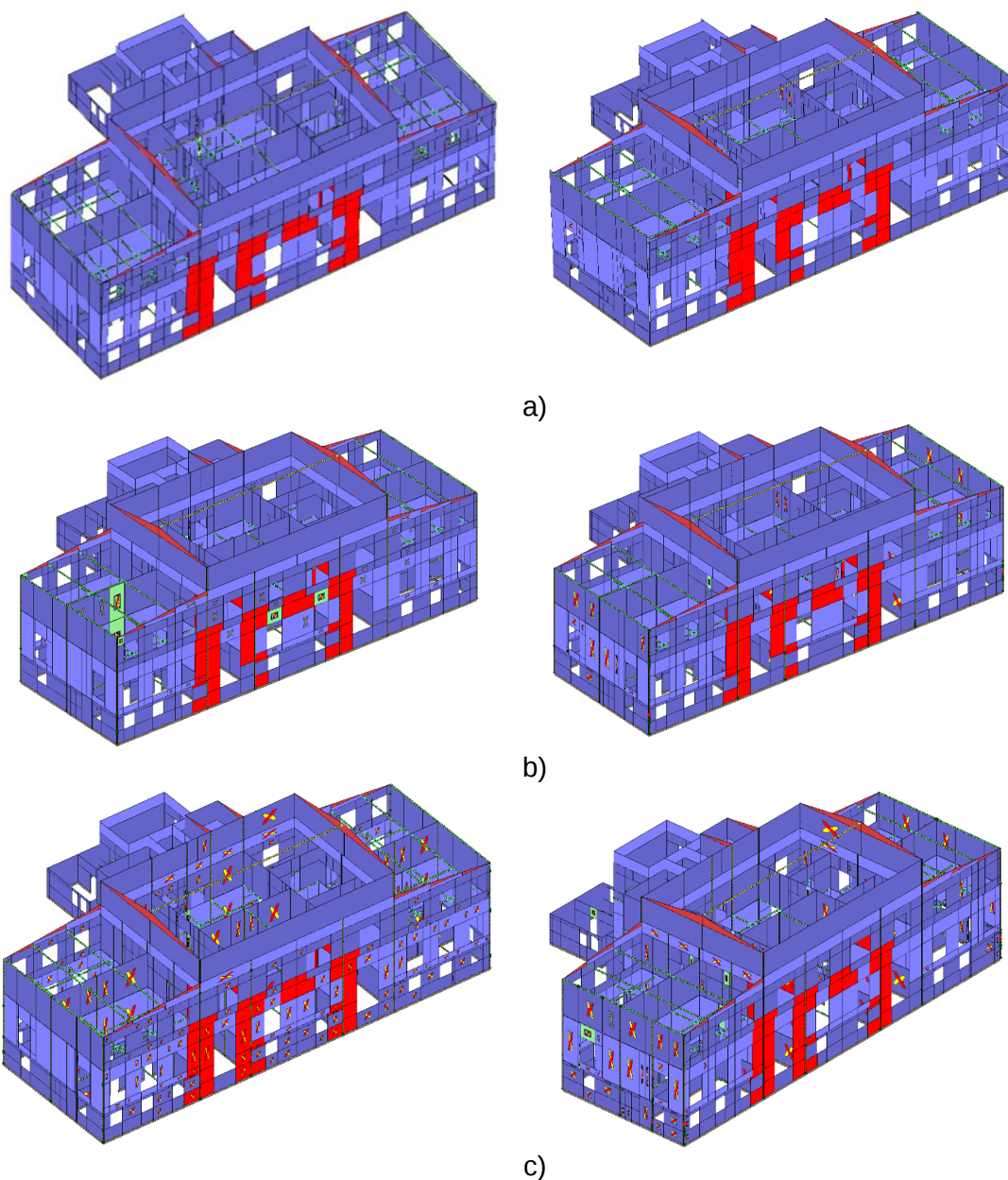


Fig. 17 Moduri de cedare ale elementelor structurale pentru: a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit

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 de pe direcția X.

4.2.4. Analiza static neliniară: deplasări relative și globale

Folosind limitele de deplasări relative globale prezentate în literatură, codul de culori indicat în Tab. 5 a fost suprapus curbelor 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 (Parammal and Dina 2021) 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. 5 pentru categoria clădirilor de zidărie confinată.

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. 5 Limite de deplasări relative globale pentru zidăria portantă și confinată

		Zidărie portantă ((Derakhshan and Griffith 2018), (Cattari et al. 2015))	Zidărie confinată (Parammal and Dina 2021)
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%

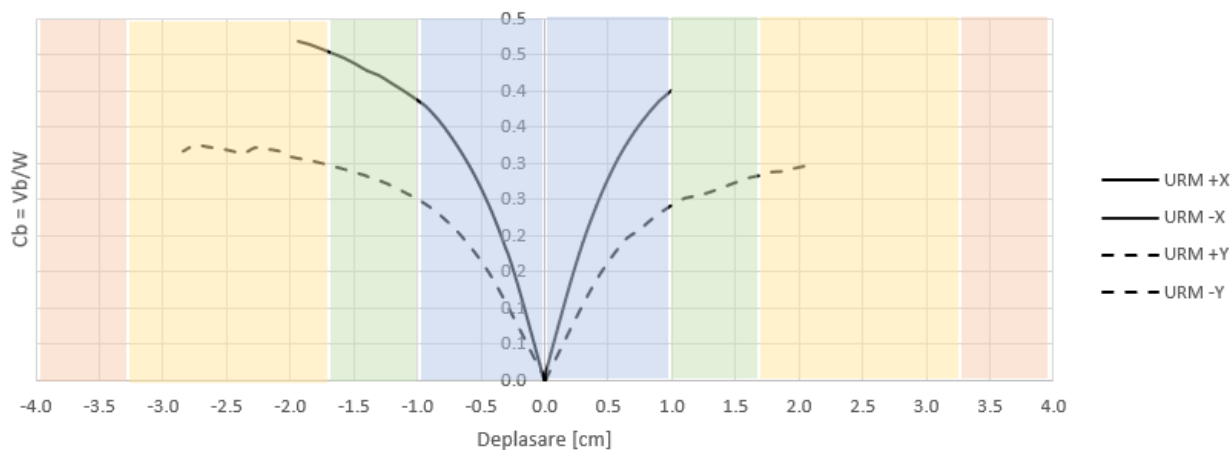


Fig. 18 Limite pentru criterii de performanță – model URM

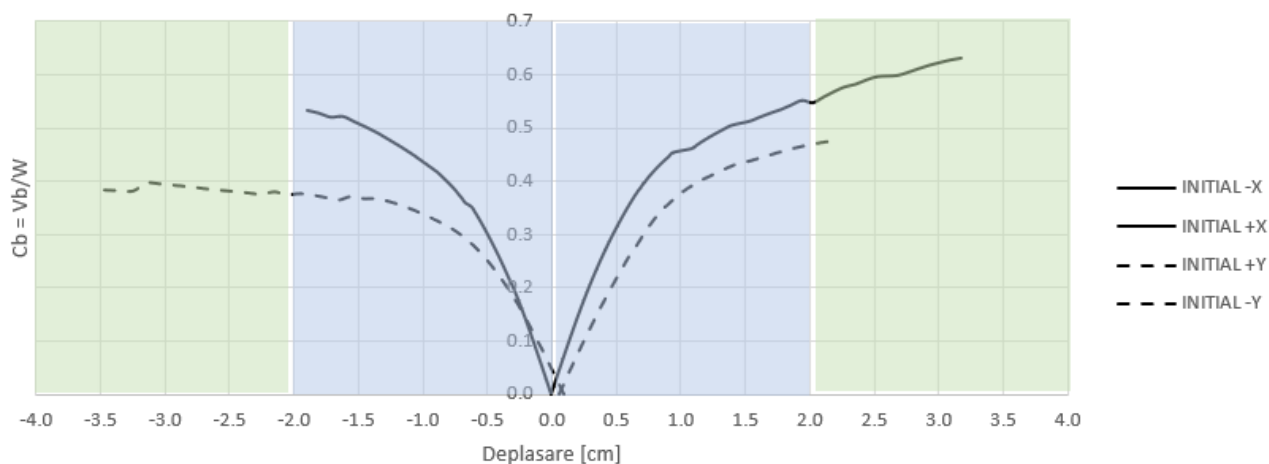
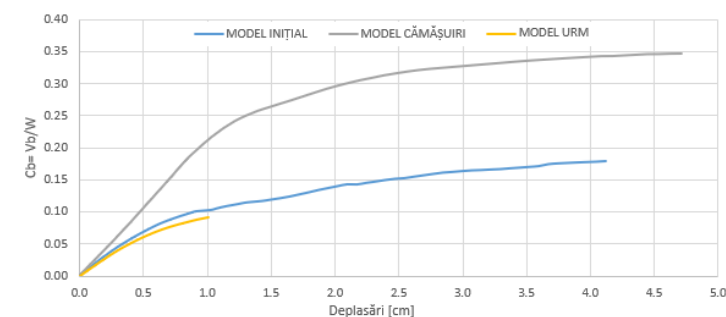


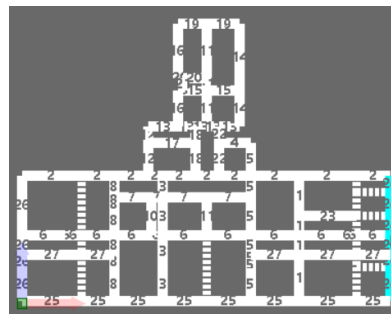
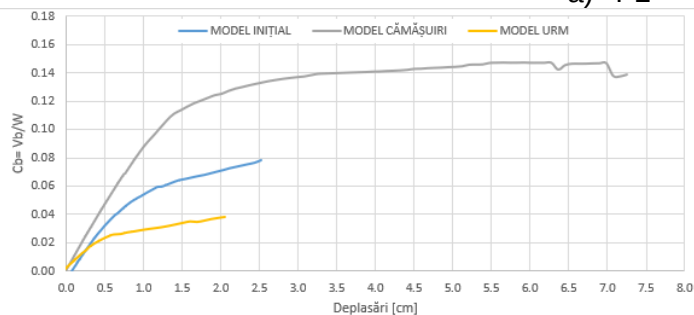
Fig. 19 Limite pentru criterii de performanță – modelul INIȚIAL

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).

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. 16.



a) P2



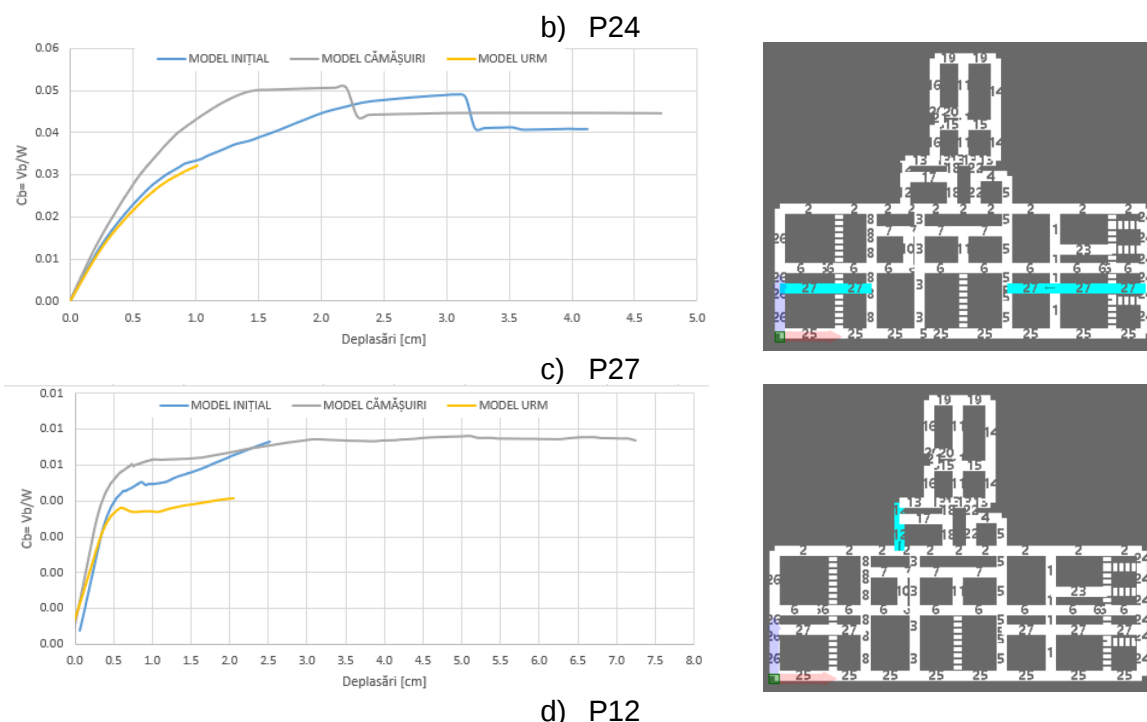


Fig. 20 Curbe de Pushover pentru pereții cămășuiți (a, b) și necămășuiți (c, d)

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. 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%, deplasarea relativă indicată în cod pentru prevenirea 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 țintă, modelul de zidărie portantă cedează prematur, înainte de criteriul de performanță pentru ocuparea imediată.

4.2.5. Analiza static neliniară: funcții de fragilitate

Funcțiile de fragilitate stabilesc relații între intensitatea acțiunii seismice și nivelul de avariere, prin intermediul probabilităților condiționate. Procedura aplicată primului studiu de caz și descrisă în capitolul 3 a fost folosită și pentru clădirea școlii.

Funcțiile 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. 21 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.

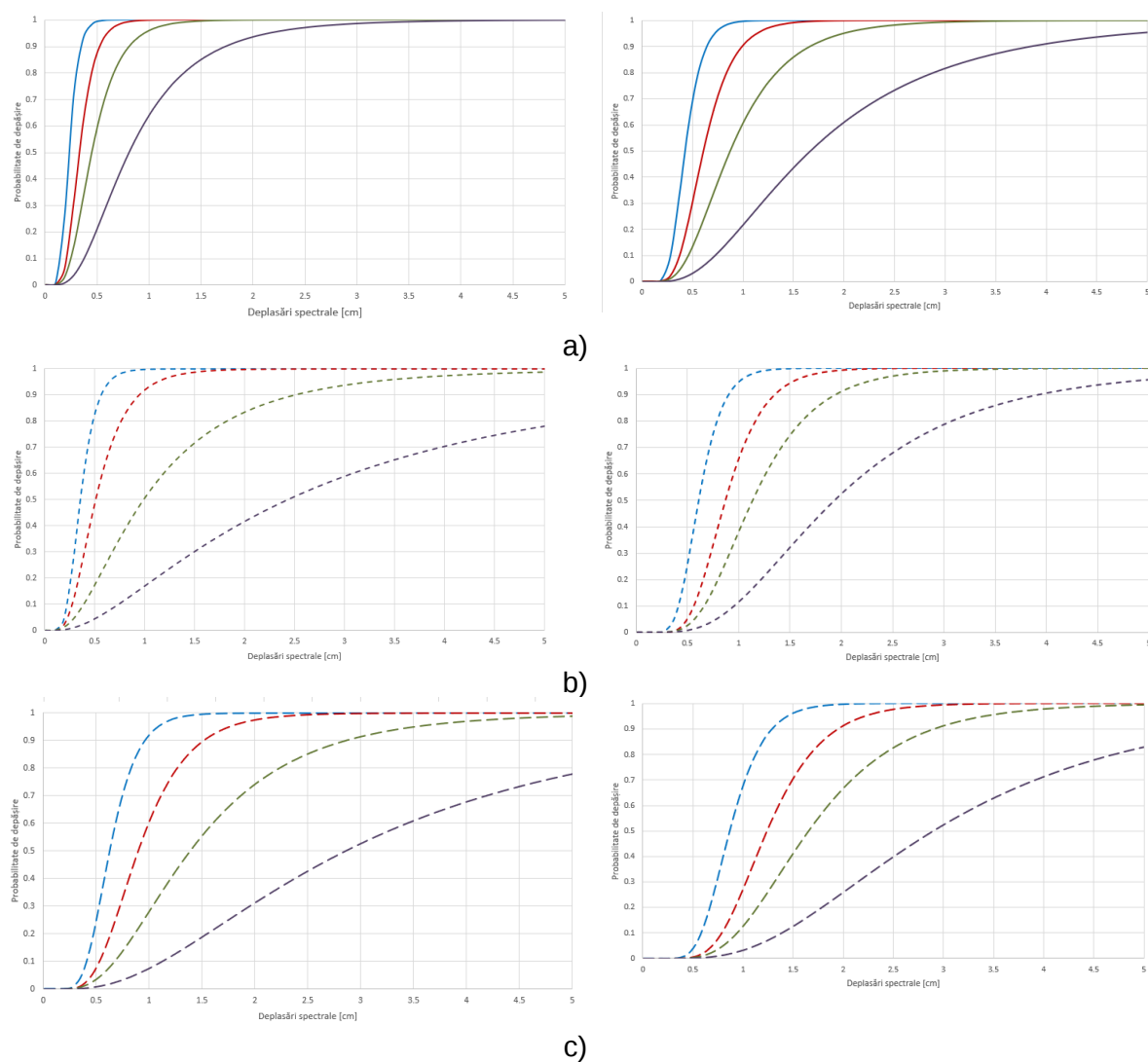


Fig. 21 Funcții de fragilitate: direcția +X (stânga) și +Y (dreapta) pentru a) Modelul URM, b) Modelul Inițial, c) Modelul Cămășuit

5. SECTORUL EDUCAȚIEI: ANALIZA DE RISC SEISMIC

5.1. Introducere

Pierderile din sectorul educației cauzate de cutremure din toate lumea reprezintă un argument puternic pentru promovarea unor politici publice de reducere a riscului seismic. Raportul realizat pentru țările din America de Sud (International Labor Office/CRISIS 2010) referitor la reducerea impactului cauzat de cutremure prezintă câteva dintre pierderile directe rezultate în unele dintre cele mai devastatoare cutremure din ultimii 20 de ani. Printre exemple se numără tragedia cauzată de cutremurul Molise din Italia din 2002, în urma căruia au decedat 26 dintre cei 51 de elevi aflați în clădirea unei școli prăbușite din San Giuliano. Cutremurul din Bingöl, Turcia din 2003 a provocat prăbușirea a 4 școli și ale 9 au fost avariate moderat, cauzând 84 de victime. Cutremure și mai devastatoare au avut loc în Pisco, Peru (2007) unde 18 clădiri au fost complet distruse și 118 au fost avariate în urma seismului, sau în Haiti (2010) unde 97% din școlile din Port Principe au fost distruse. Peste 90.000 de elevi din Sumatra au fost afectați de cutremurul din 2009 și 241 de școli s-au prăbușit (International Labor Office/CRISIS 2010).

Conform unui studiu realizat de Beraldo et al. (2009) între 1971 și 1998 în 19 țări, estimările referitoare la impactul pe care îl au investițiile în educație asupra produsului intern brut poate fi cuantificat printr-o creștere de 0,03% a PIB, valoare înregistrată pentru un plus de 1% în investiții din sectorul educației. Studii realizate în această privință accentuează importanța prioritizării investițiilor, identificarea potențialelor pierderi și pregătirea unor programe de consolidare bazate pe tehnici adecvate nevoilor de consolidare a fondului construit.

În ceea ce privește fondul construit din România, cele mai vechi școli din țară au fost inițial organizate în jurul bisericilor, iar ulterior, cele mai multe dintre clădirile de școală construite în a doua jumătate a secolului XIX erau organizate similar caselor boierești din orașe sau chiar locuințe transformate în clădiri de învățământ, de cele mai multe ori având parter și etaj (Tănăsioiu 1979).

Sfârșitul de secol generează schimbări în ceea ce privește arhitectura școlilor din România, încadrate în tiparul „școlilor academice”, caracterizate de simetrii riguroase și capacități mari comparativ cu clădirile folosite până atunci. La începutul secolului XX, peste 20.000 de elevi învățau în 69 de școli primare în București și alți 6.000 înscriși în învățământul secundar (Tănăsioiu 1979). Începând cu anii 1920, aceste clădiri de școli pentru învățământul secundar au reprezentat construcții monumentale, în special cele amplasate în orașele mari din țară. Odată cu schimbările politico-sociale din 1945 și cu utilizarea la scară largă a betonului armat, structurile clădirilor de școli au suferit schimbări drastice, adaptându-se și numărului crescut de elevi. Dacă la finalul anilor 40 erau aproximativ 1.600.000 elevi în ciclul elementar și în licee, în anii 70 cifrele ajungeau la aproape 3.400.000. Pentru a acoperi nevoia de unități de învățământ, institutele de proiectare (I.P.C.T.) au lucrat la proiecte tip, atât pentru mediul urban, cât și pentru cel rural (Tănăsioiu 1979).

5.2. Situația actuală

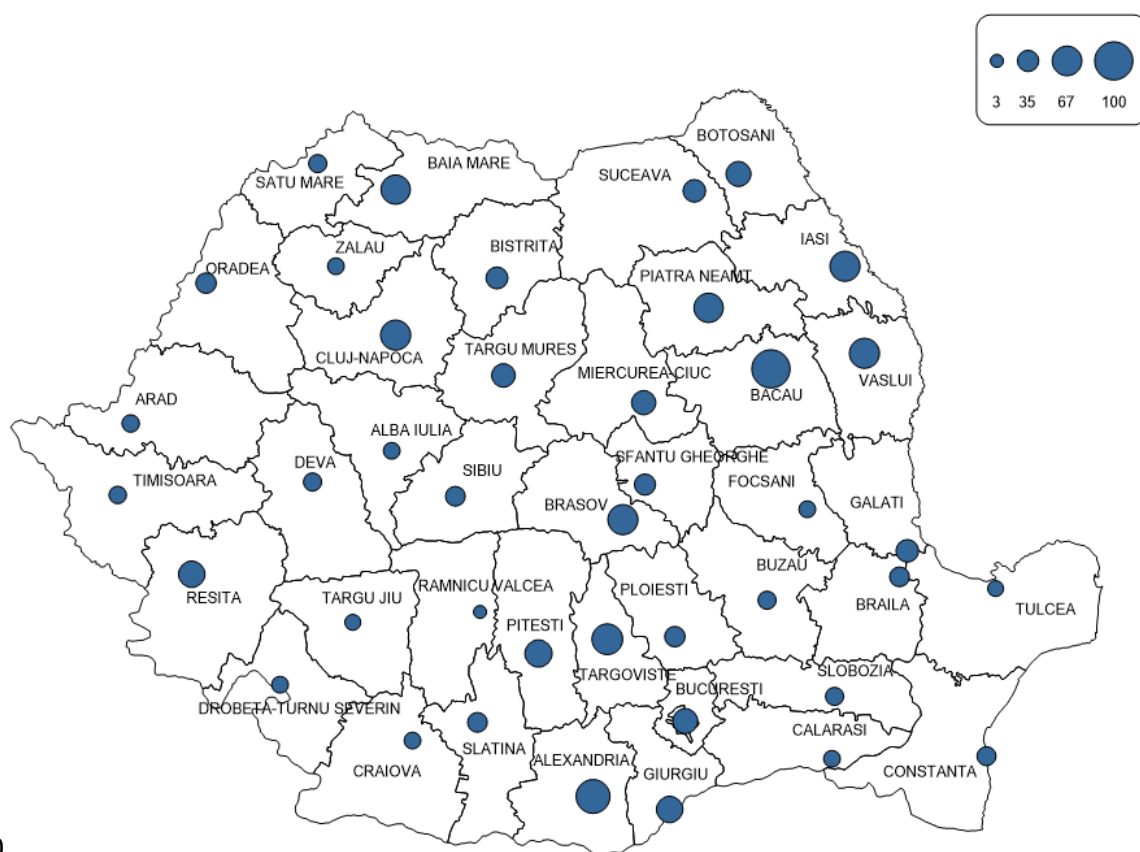
5.2.1. Descrierea eșantionului analizat

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 (Nistor 2013) menționa că există 605 clădiri aparținând patrimoniului educației, fiind incluse aici și facultăți, sedii ale universităților și biblioteci.

Harta din Fig. 22 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.



550

Fig. 22 Numărul de monumente istorice din sectorul educației

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 (măsuri invazive).

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 țării. Dintre acestea, 2% reprezintă clădiri de pe lista monumentelor istorice (2015) (Institutul Național al Patrimoniului 2015) din 315 unități școlare care au putut fi corelate cu datele din lista inițială de 546 de monumente (Anexa 3). 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).

Pornind de la lista de sisteme structurale predefinite în SIIIR, 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)

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.

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.

5.2.2. Intervenții de consolidare

Lista lucrărilor de consolidări realizate în cadrul proiectului P.R.I.S¹ au fost considerate împreună cu eșantionul analizat din baza de date SIIR pentru a evalua date referitoare la intervenții de consolidare la nivel național. Din datele disponibile pentru 1253 de unități (93% din totalul unităților de învățământ incluse în program), lucrări de consolidare au fost realizate pentru aproximativ 35% dintre ele. 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

5.3. Funcții de fragilitate

5.3.1. Prezentarea taxonomiei

Funcțiile de fragilitate folosite în continuare pentru a caracteriza structurile din portofoliul clădirilor din sectorul educației au fost stabilite pentru cele cinci tipologii reprezentative: structură de zidărie portantă cu planșee flexibile (URM_FF) sau rigide (URM_RF), structură de zidărie portantă consolidată prin cămășuire (RM), structură de zidărie confinată, cu stâlpișori și grinzi de beton armat (CM) și structură de zidărie confinată consolidată prin cămășuire (CM_RM).

Rezultatele prezentate în continuare pentru tipologiile de zidărie confinată (CM și CM-RM) au fost obținute din modelele numerice realizate cu ajutorul programului 3DMacro. Pentru a ilustra mai bine diferențele dintre clădirile de zidărie portantă cu planșee flexibile (URM_FF) și cele cu planșee rigide (URM_RF), precum și cele de zidărie portantă cămășuită (RM), a fost folosit programul Tremuri cu ajutorul căruia au fost realizate cele două modele structurale ale clădirii.

Pornind de la informațiile prezentate în secțiunea 4.2.1, modelul clădirii cu planșee flexibile are planșee cu bolți de zidărie și grinzi metalice peste demisol și planșee cu grinzi de lemn pentru restul etajelor. Acestea au fost transformate în diafragme rigide pentru a surprinde etapa inițială de consolidare a clăzii prin rigidizarea planșeelor și adăugarea unor grinzi de beton armat. Pornind apoi de la conformația modelului cu planșee rigide (URM_RF), pentru pereții consolidați prin cămășuire a fost definit un material diferit, păstrând caracteristicile zidăriei și modificând doar deplasările relative admisibile pentru încovoiere (2% față de 0,8%) și întindere (1% față de 0,4%). Aceste valori sunt recomandate în normativele din Italia (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018), (Ministerio delle Infrastrutture e dei Trasporti 2009), utilizându-se în analizele numerice simplificate pentru a cuantifica creșterea ductilității prin consolidarea zidăriei. De asemenea, pereților cămășuiți le-au fost adăugate în modelul numeric caracteristicile plaselor de armătură, conform propunerii de consolidare din expertiza tehnică.

5.3.2. Comparații ale funcțiilor de fragilitate propuse cu alte referințe din literatură

Funcțiile de fragilitate stabilesc relații între intensitatea acțiunii seismice și nivelul de avariere, prin intermediul probabilităților condiționate. Funcțiile de fragilitate sunt definite folosind

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.

valorile mediane ale accelerațiilor/deplasărilor spectrale și abateri standard, ținând cont astfel de incertitudini asociate fiecărei stări de avariere, conform procedurii prezentate în capitolul 3.

În baza studiului de caz realizat pentru clădirea școlii din București, au fost propuse funcții de fragilitate pentru fiecare tipologie de clădiri de zidărie: zidărie portantă (URM) cu planșee flexibile (FF) sau rigide (RF), zidărie confinată (CM) și zidărie portantă consolidată prin cămășuire (RM) sau zidărie confinată consolidată prin cămășuire (CM-RM). Pentru a valida parametrii de fragilitate propuși pentru fondul construit din România, au fost realizate comparații cu studii similare din literatura de specialitate.

În Tab. 6 sunt prezentate rezultatele centralizate pentru parametrii funcțiilor de fragilitate cu valori mediane exprimate în deplasări spectrale.

Tab. 6 Parametrii funcțiilor de fragilitate per tipologie (deplasări spectrale)

	Deplasări spectrale [cm]							
	avariere minoră		avariere moderată		avariere extinsă		avariere completă	
	Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β	Mediană	β
URM_FF	0,24	0,35	0,35	0,45	0,62	0,66	1,42	0,85
URM_RF	0,25	0,38	0,36	0,53	0,81	0,83	2,18	1,06
CM	0,36	0,36	0,51	0,48	0,99	0,72	2,43	0,93
RM_RF	0,47	0,37	0,68	0,52	1,51	0,81	4,00	1,04
CM_RM	0,63	0,33	0,90	0,41	1,39	0,56	2,86	0,73
CM_RM	0,89	0,33	1,28	0,41	1,98	0,56	4,07	0,73

În final, pentru a avea o imagine mai clară a diferențelor referitoare la comportarea tipologiilor propuse în prezenta lucrare și referințele din literatură, graficele din Fig. 23 și Fig. 24 ilustrează gradele medii de avariere așteptate pentru un set de deplasări spectrale de 1 cm, 2 cm și 3 cm. Pentru deplasări spectrale mici, structurile de zidărie confinată cămășuită ating grade minime de avariere, însă pentru deplasări spectrale de 2 sau 3 cm, CM-RM și RM ajung la valori apropiate. Singura tipologie pentru care comparația cu studiile citate nu indică valori foarte apropiate este CM-RM. Ținând cont de faptul că intervențiile incluse în modelul numeric CM-RM sunt mult mai invazive decât cele prezentate în Marques et al. (2018), se justifică diferența de aproximativ – 10% pentru gradele de avariere din Fig. 23.

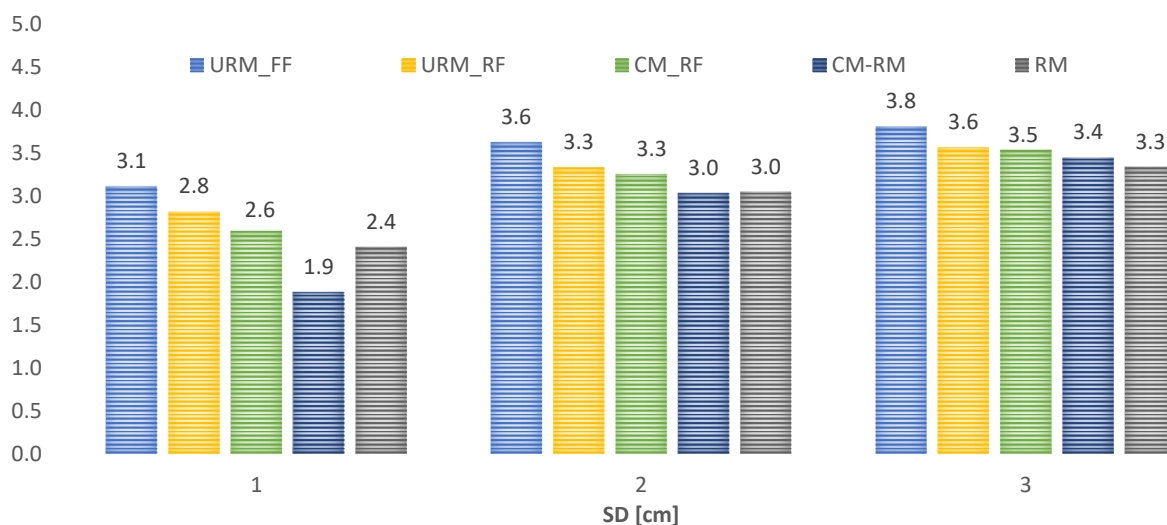


Fig. 23 Grade medii de avariere pentru tipologiile de clădiri de zidărie din România (SD)

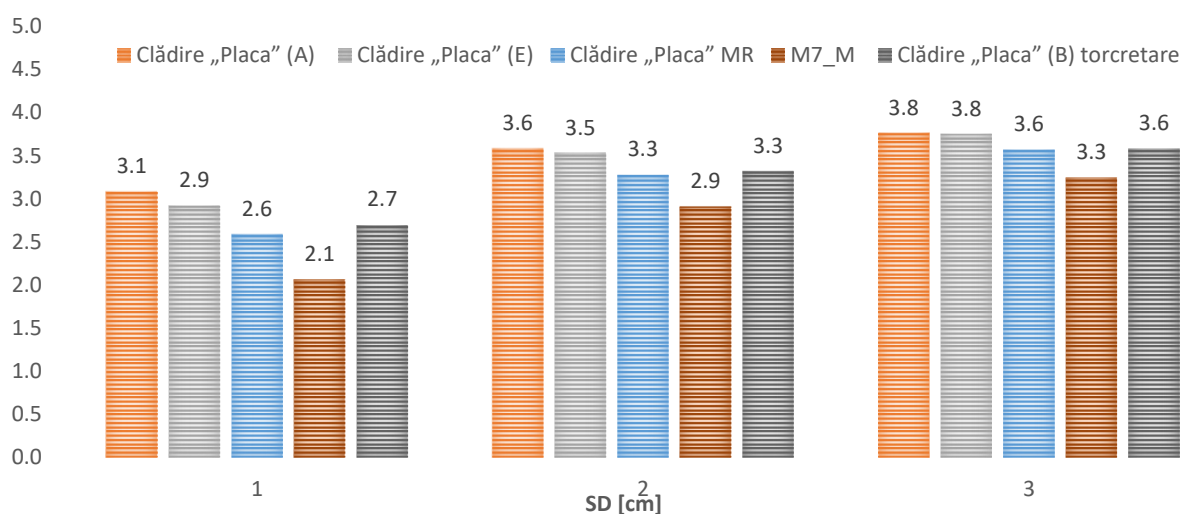


Fig. 24 Grade medii de avariere obținute pentru tipologii corespondente din referințe bibliografice (SD)

Fiind nevoie de funcții de fragilitate exprimate în accelerații, pentru a putea fi incluse în integrala de convoluție din calculele de risc, valorile mediane de deplasările spectrale din funcțiile de fragilitate au fost transformate în accelerații spectrale. În baza acestora, au fost estimate gradele medii de avariere pentru fiecare dintre cele cinci tipologii, pentru două valori de referință ale accelerațiilor spectrale. În Fig. 25 se poate observa că pentru tipologia CM-RM gradele medii de avariere așteptate sunt semnificativ mai mici decât pentru tipologia RM. De asemenea, pentru tipologia CM gradele de avariere sunt semnificativ reduse față de RM, tendință care nu era atât de pronunțată în cazul gradelor medii de avariere calculate pentru deplasări spectrale.

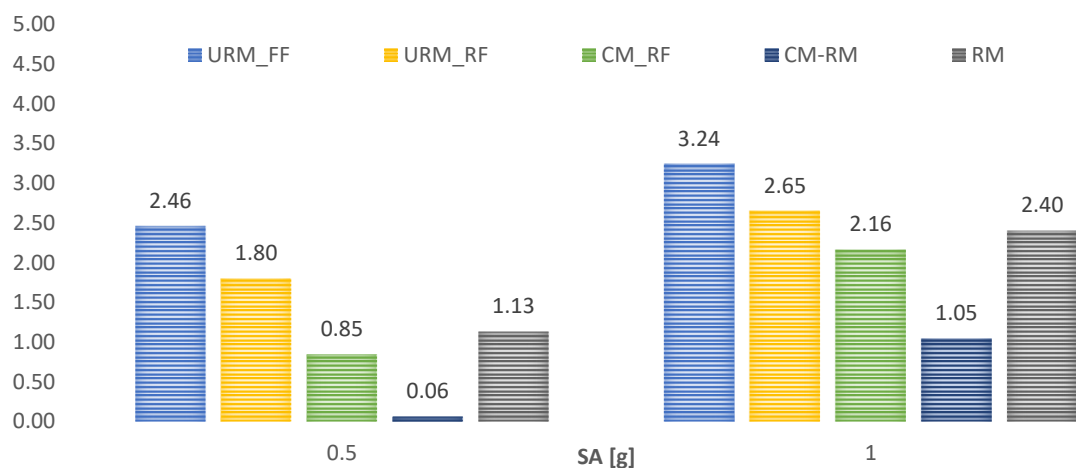


Fig. 25 Grade medii de avariere pentru tipologiile de clădiri de zidărie din România (SA)

5.4. Analiză de risc seismic

5.4.1. Prezentare succintă a metodologiei de estimare a probabilităților anuale de cedare

Analiza de risc seismic presupune estimarea unor probabilități anuale de cedare, bazându-se pe funcțiile de fragilitate și pe hazardul seismic, considerând o expunere permanentă. Amplitudinea mișcării seismice este estimată în funcție de perioada de revenire a cutremurelor, magnitudinea, locația și efectele produse de acestea, împreună cu incertitudinile asociate analizei. Date referitoare la ratele medii anuale de depășire au fost elaborate în cadrul proiectului național de cercetare BIGSEES (Pavel et al. 2016) au fost incluse 14 surse seismice pentru a obține curbe de hazard seismic agregate pentru toate localitățile din România. Probabilitatea de depășire P_F a unui anumit stadiu de avariere este calculată urmând procedura prezentată anterior în capitolul 3.

5.4.2. Reprezentarea probabilităților anuale de cedare

Pentru a reprezenta pe hartă probabilitățile anuale de depășire a stadiilor DS3 și DS4 de avariere, valorile absolute au fost grupate în 5 intervale, de la 0,01 până la 0,000001, conform legendei de culori din Fig. 26.

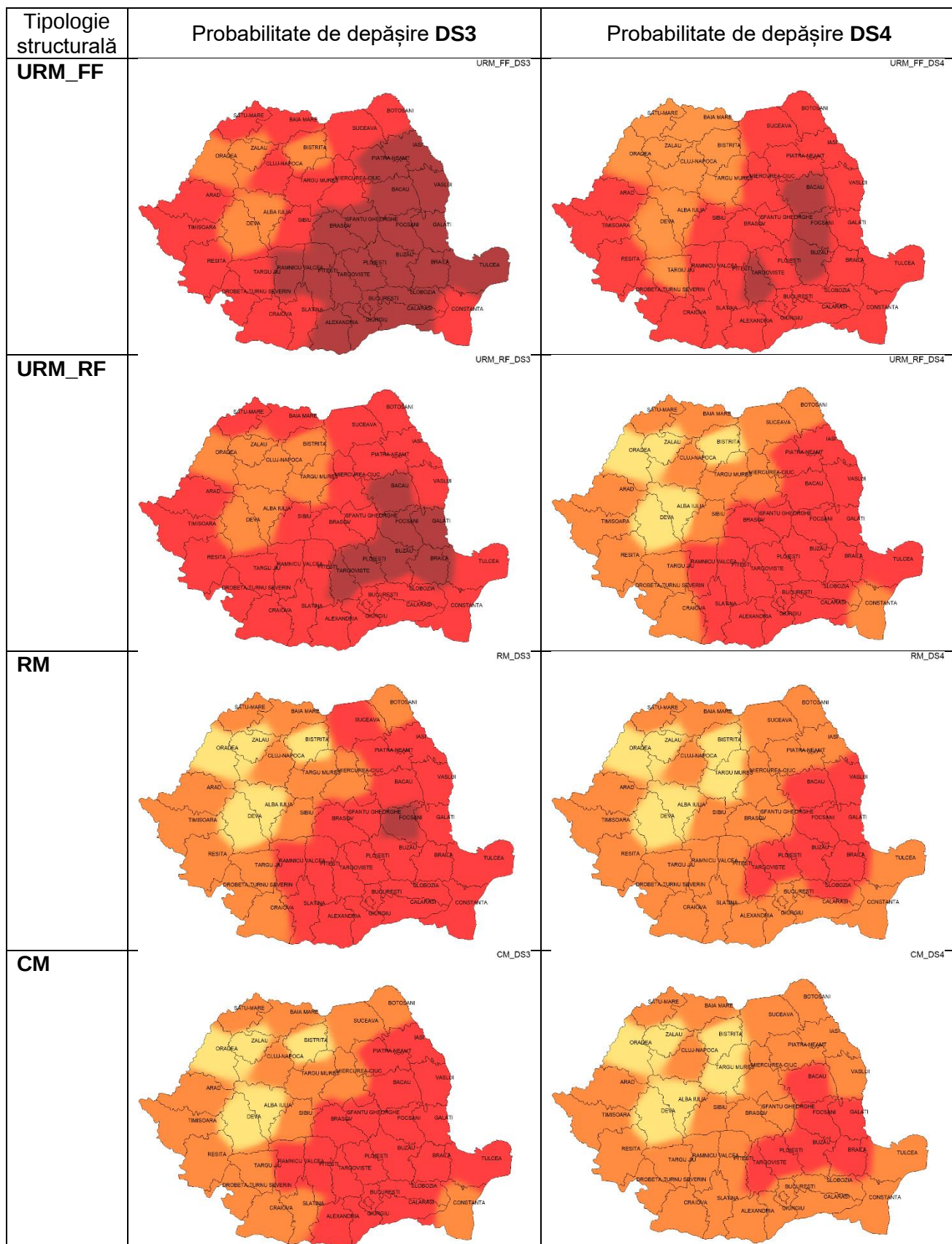
În Tab. 7 se pot observa județele în care riscul seismic estimat prin intermediul probabilității anuale de cedare este maxim. În principiu, zona de nord-vest înregistrează cel mai redus risc, ținând cont de faptul că sursa seismică Vrancea influențează în mod principal sud-estul țării. Analizând trecerea de la DS43 la DS4 se poate observa o scădere a probabilității anuale de depășire, însă depășirea unui nivel de avariere extinsă (DS3) pentru o clădire de zidărie portantă presupune fisurarea extinsă a pereților, posibile prăbușiri ale pereților de fronton sau a parapetelor. Pentru depășirea stadiului de avariere completă (DS4) există o probabilitate de aproximativ 15% să aibă loc prăbușirea completă a clădirii (Federal Emergency Management Agency 2015).

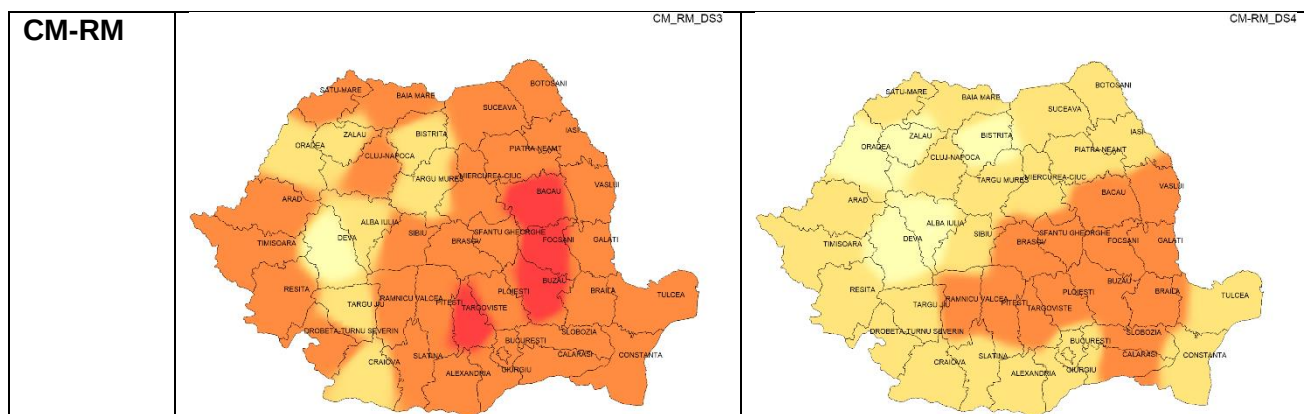
Tipologia structurală care înregistrează cele mai ridicate valori pentru probabilitățile anuale de cedare este zidăria portantă cu planșee flexibile, la polul opus aflându-se clădirile de zidărie confinată consolidate prin cămășuire. Este important de remarcat că atât pentru DS3, cât și pentru DS4, clădirile cu zidărie confinată prezintă un risc mai mic decât cele din zidărie portantă consolidată prin cămășuire. Aceste rezultate confirmă beneficiile existenței unor elemente de confinare (centuri și stâlpișori) realizate din beton armat.



Fig. 26 Legendă intervale pentru probabilități anuale de cedare

Tab. 7 Hărți de risc seismic: probabilități anuale de cedare pentru tipologiile de clădiri cu structură de zidărie





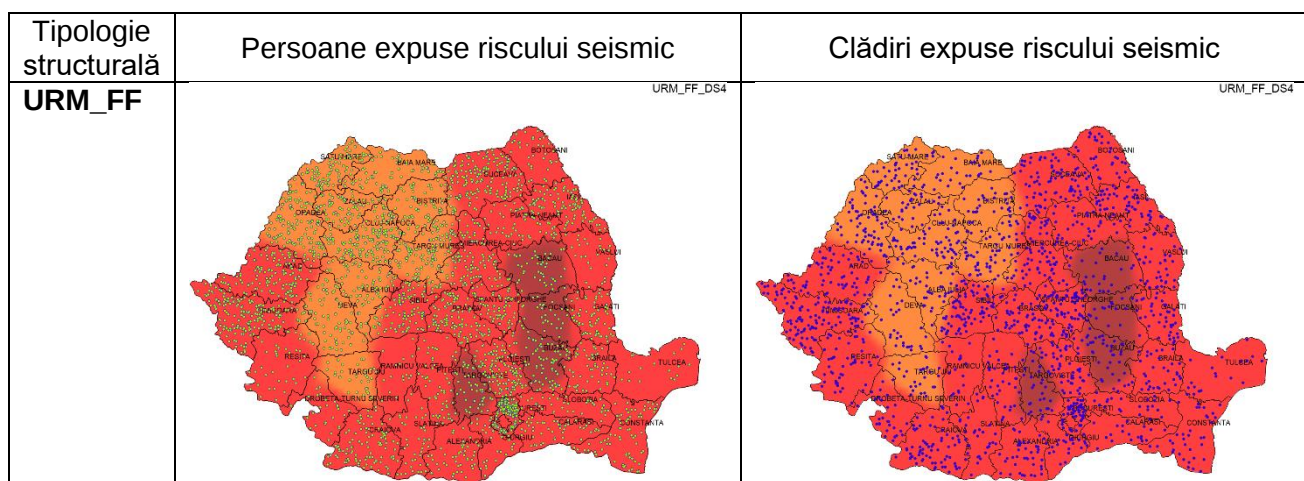
5.4.3. Suprapunerea datelor cu expunere cu cele de risc seismic

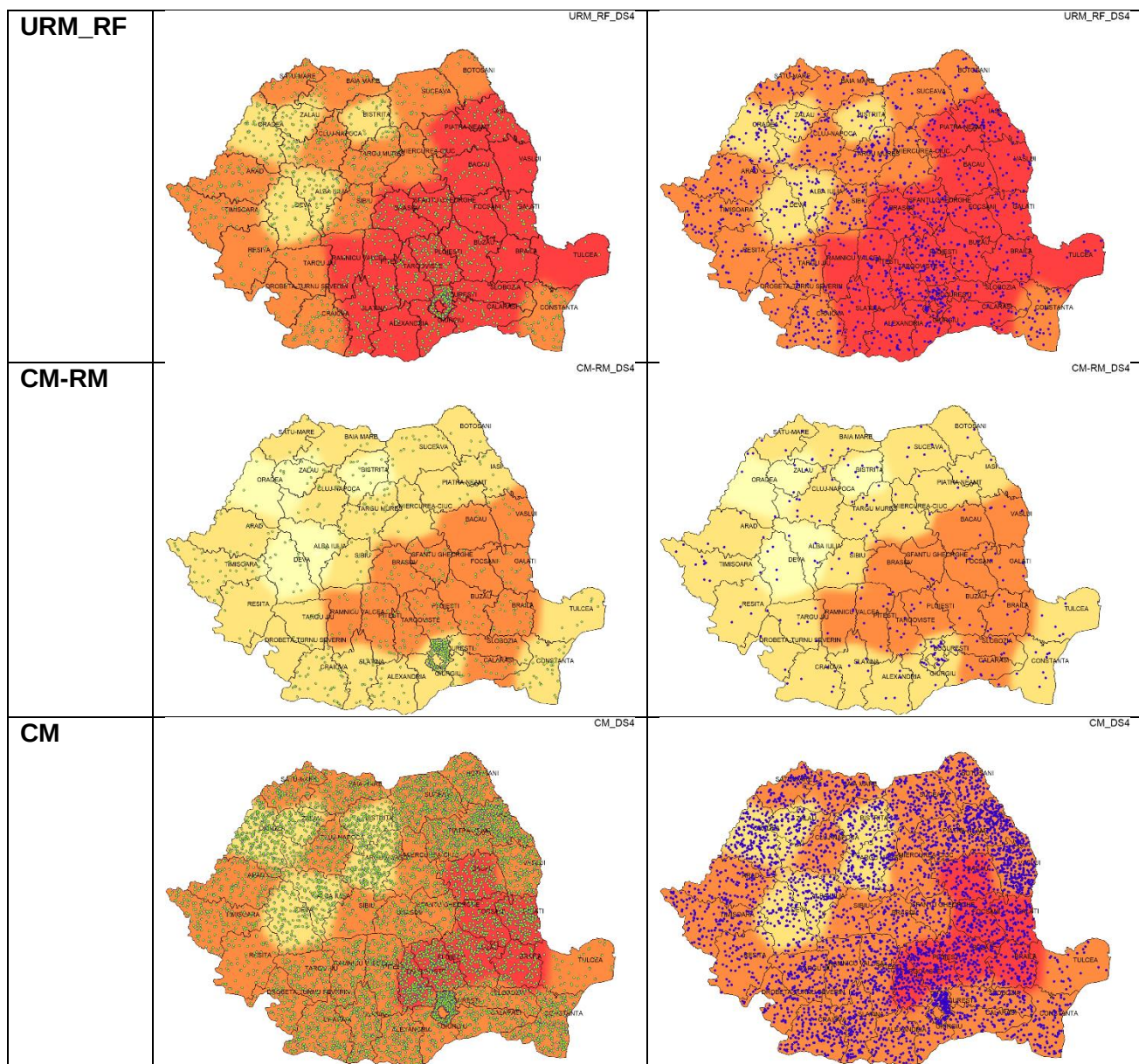
Tab. 8 ilustrează expunerea din sectorul de educație, datele fiind centralizate la nivel de județ. Este prezentat numărul absolut de persoane expuse, respectiv numărul total de elevi înscriși din fiecare clădire și numărul de clădiri, încadrate în fiecare dintre tipologiile analizate. Întrucât nu există informații referitoare la intervențiile de consolidare realizate până acum în sectorul educației, au fost folosite hărțile de risc seismic obținute pentru tipologia CM-RM, ținând cont de faptul că deseori clădirile de zidărie portantă au fost transformate măcar parțial în zidărie confinată, pentru a fi consolidate conform cerințelor actuale.

Cele mai multe clădiri incluse în analiza de risc sunt cele de zidărie confinată (aproximativ 8700), în care învață aproximativ 700.000 elevi. Raportat la această parte a portofoliului, 18% dintre aceste clădiri și elevi sunt expuse unui risc seismic mare, cu o probabilitate anuală de cedare de aproximativ 0.001.

Situația celor mai vulnerabile structuri, cele de zidărie portantă cu planșee flexibile afectează într-o măsură mai mare fondul construit din sectorul educației. În analiză sunt incluse aproape 3500 de astfel de clădiri, dintre care 70% au asociată o probabilitate de depășire DS4 egală cu 0.001 și alte 7% au o probabilitate de depășire de 0.01. Aproape 190.000 de elevi care învață în școli cu structuri de zidărie portantă sunt expuși acestui nivel de risc de prăbușire parțială.

Tab. 8 Hărți de risc seismic și expunere pentru clădirile cu structură de zidărie din învățământul preuniversitar





5.5. Analiză de cost beneficiu

5.5.1. Metodologia de prioritizare a investițiilor de consolidare a fondului construit din sectorul educației

Datele de intrare referitoare la clădiri au fost fie preluate din baza de date SIIIR (cod de identificare al clădirii și al unității de învățământ, suprafața construită, anul de construire, localizare), fie prelucrate în funcție de datele din SIIIR (tipologie structurală, număr de persoane expuse) și de alte baza de date referitoare la intervenții de consolidare a unităților de învățământ preuniversitar.

Pentru a putea stabili o ierarhizare în funcție de nivelul de risc seismic, a fost propusă o matrice de prioritizare bazată pe patru parametri cheie referitori la nivelul de hazard stabilit în funcție de localizare, nivelul de vulnerabilitate stabilit în funcție de anul construirii și sistemul structural al clădirii și nivelul de expunere exprimat în baza numărului de elevi din clădire. Pentru fiecare dintre cei patru parametri au fost stabilite patru intervale de valori, astfel încât valorile incluse în intervale să poată fi asociate unui scor cu valori între 1 și 4, unde 1 indică o prioritate crescută și 4 o prioritate scăzută.

Tab. 9 Matrice de prioritizare pentru clădiri

Scor	1	2	3	4	Pondere
Hazard seismic: valoarea de vârf a accelerației terenului (în funcție de localitate)	$\geq 0,30g$	0,3g – 0,25g	0,25g – 0.15g	$< 0,15g$	0,30
Anul construirii	≤ 1920	1920- 1950	1950- 1977	> 1977	0,20
Tipologie structurală	URM+FF	URM+RF	CM	RM	0,20
Importanță (expunerea elevilor)	A patra cuartilă (75% - 100%)	A treia cuartilă (50% - 75%)	A doua cuartilă (25% - 50%)	Prima cuartilă (0% - 25%)	0,30

Legendă: URM+FF = zidărie portantă cu planșee flexibile, URM+RF = zidărie portantă cu planșee rigide, CM = zidărie confinată și RM = zidărie consolidată prin cămășuire.

Parametrul referitor la importanța școlii în sistemul de educația este evaluat în funcție de numărul de elevi înscriși în anul școlar 2019-2020. Astfel, a patra cuartilă cuprinde școlile din țară care au cei mai mulți elevi, ținând cont de distribuția la nivel național, respectiv peste 1740 de elevi per clădire. Estimările referitoare la numărul de persoane expuse din fiecare clădire sunt calculate în funcție de numărul de elevi înscriși în fiecare unitate de învățământ, distribuiți în clădirile care aparțin acesteia proporțional cu suprafața clădirii.

Ponderile folosite pentru cei patru parametri sunt următorii: a) hazardul seismic – 0.3; b) anul construirii – 0.2; c) tipologia structurală – 0.2; d) importanța clădirii – 0.3. Pentru anul de construire și pentru tipul de sistem structural au fost atribuite ponderi mai mici, având în vedere că cele două criterii sunt corelate prin prisma tehnicilor de construire specifice fiecărei perioade. Scorul final pentru fiecare clădire reprezintă media ponderată a celor patru parametri prezentați anterior.

5.5.2. Analiza de cost-beneficiu pentru intervențiile de consolidare a fondului construit din sectorul educației

Analiza de cost-beneficiu a fost realizată pentru cele 15 084 de clădiri cu structură de zidărie (zidărie portantă cu planșee flexibile: URM_FF sau rigide: URM_RF, zidărie confinată: CM și zidărie confinată consolidată prin cămășuire: CM_RM) pentru a compara beneficiile economice cu pierderile potențiale în cazul unor cutremure cu 63%, respectiv 39% probabilitate de depășire în 50 de ani. Cele două scenarii de cutremur sunt definite prin parametrii de hazard seismic, în particular sub formă de valori PGA pentru fiecare locație (la nivel de localitate), conform datelor din proiectul BIGSEES (Pavel et al. 2016). Considerând un magnitudinea moment generată de un cutremur de adâncime medie în Vrancea, primul scenariu cu 50 de ani perioadă de revenire corespunde unui $M_w = 7,2...7,3$, iar cel de-al doilea scenariu cu 100 de ani perioadă de revenire corespunde unui $M_w = 7,5...7,6$.

Folosind valorile medii propuse, investiția totală de consolidare a celor 15 084 clădiri incluse în analiza de cost-beneficiu a rezultat de 4 388 mil. €. Pornind de la ipoteza că în cursul unui an se pot realiza lucrări la 100 de clădiri, perioada de implementare a proiectului este de 15 ani. Pentru a estima valoarea actuală a clădirilor a fost considerată o sumă de 600€/mp pentru valoarea clădirii și a dotărilor sau a bunurilor a căror distrugere potențială constituie pierderi directe în analiza de cost-beneficiu.

Funcțiile de fragilitate folosite pentru analiza de cost-beneficiu sunt cele prezentate anterior în secțiunea 5.3.2.

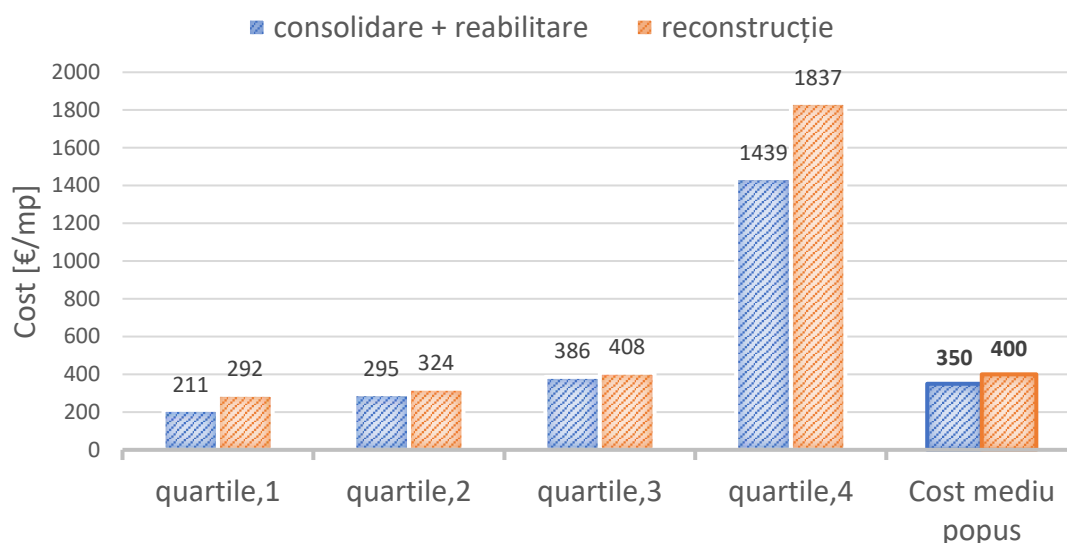


Fig. 27 Costurile/mp asociate investițiilor de reabilitare a infrastructurii școlare

Pentru a estima valoarea potențialelor pierderi de vieți omenești pentru cele 1 285 275 persoane expuse din clădirile analizate, s-a folosit conceptul de valoare statistică a vieții. Analiza de cost-beneficiu pentru un proiect de investiții în consolidarea fondului construit din sectorul educației presupune estimarea beneficiilor generate de salvarea unor potențiale decese în urma unui cutremur. Nu există estimări oficiale pentru valoarea statistică a vieții pentru cetățenii României, însă s-a folosit ca țară de referință SUA, pentru care Agenția de Protecția a Mediului (US Environmental Protection Agency²) folosea o valoare medie de 9,7 mil.\$ în 2018. Calibrarea valorii folosite în SUA s-a făcut în funcție de raportul dintre Produsul

² Conform: <https://www.epa.gov/environmental-economics/mortality-risk-valuation>

Intern Brut din SUA (65 118 \$) și cel din România (12 920 \$), conform datele prezentate de Banca Mondială pentru anul 2019³.

Pierderile exprimate în potențiale pierderi de vieți omenești și pierderi directe asociate prăbușirii clădirilor au fost calculate conform metodologiei HAZUS (Federal Emergency Management Agency 2015). Metodologia presupune o legătură între nivelul de avariere al elementelor structurale sau nestructurale și potențialele victime. Tipurile de vătămare prezentate în HAZUS sunt numerotate de la 1 la 4, în funcție de severitate. Pentru analiza de cost-beneficiu au fost considerate doar ratele propuse pentru victime încadrate la severitate 4, adică persoanele decedate sau cu răni fatale. Pentru fiecare stare de avariere au fost folosite rate de vătămare de severitate 4, considerând că avarierea completă presupune prăbușirea clădirii, având în vedere că o prăbușire parțială implică înlocuirea clădirii mai degrabă decât consolidarea ei. Tab. 10 prezintă valorile procentuale de pierderi de vieți omenești folosite pentru clădirile de zidărie incluse în analiza de cost-beneficiu.

Tab. 10 Rate de vătămare în funcție de tipologia structurală, conform HAZUS (Federal Emergency Management Agency 2015)

Tipologie structurală	Avariere minoră [%]	Avariere moderată [%]	Avariere extinsă [%]	Avariere completă [%]
URM_FF URM_RF CM	0	0,001	0,002	10
RM	0	0	0,001	10

Folosind funcțiile de fragilitate propuse pentru fiecare dintre tipologii și nivelul de hazard seismic pentru fiecare locație, au fost calculate probabilitățile de depășire a unei stări de avariere. Probabilitatea ca o clădire să se afle într-o anumită stare de avariere se înmulțește cu procente corespunzătoare din Tab. 10 pentru a obține probabilitatea de a exista persoane încadrate la victime de nivel 4. Estimarea numărului de decese pentru fiecare clădire se face înmulțind numărul de persoane expuse din clădire cu probabilitatea de a exista victime încadrate la severitate 4.

Evaluarea pierderilor directe asociate prăbușirii presupune estimarea costurilor totale necesare reparării sau înlocuirii clădirii afectate de cutremur. Costul mediu considerat pentru înlocuirea clădirii a fost de 600 €/mp, pornind de la costul mediu de reconstrucție din Fig. 27 egal cu 400€/mp la care s-au adăugat 200€/mp reprezentând valoarea bunurilor existente în clădire (mobilier, dotări, documente, etc.). Raportul costurilor de reparație, exprimat în procente din valoarea de înlocuire a clădirii a fost stabilit conform metodologiei HAZUS, în funcție de probabilitatea de a se afla într-unul dintre cele patru stadii de avariere: minoră, moderată, severă și completă.

Estimarea pierderilor în termeni financiari presupune transformarea probabilităților de a se afla într-o anumită stare de avariere în valori echivalente exprimate în unități monetare. Pierderile directe totale însumează pierderile cauzate de avarierea elementelor structurale ale clădirii și pe cele cauzate de avarierea componentelor nestructurale (Federal Emergency Management Agency 2015), sensibile la accelerații (ex: tavane, echipamente tehnice, tubulatură, lifturi, etc.) sau la deplasări (ex: pereți de compartimentare, ornamente, etc.).

Beneficiile incluse în analiza de cost-beneficiu cuprind viețile salvate (numărul de potențiale victime înmulțite cu valoarea statistică a vieții) și pierderile directe evitate prin consolidarea

³ Conform: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=US-RO>

clădirilor incluse în analiză. Costurile sunt calculate considerând suprafețele existente și costul mediul de consolidare de 350 €/mp.

Pentru a calcula rata de actualizare financiară, a fost considerată o rată de creștere a consumului pe termen lung de aproximativ 4,9. Odată calculată rata socială a preferinței de timp, se reduc atât beneficiile, cât și costurile pe toată perioada de planificare a investiției, respectiv pe 50 de ani.

Indicatorii economici rezultați din analiza de cost-beneficiu sunt: raportul cost-beneficiu, rata internă de rentabilitate financiară, valoarea netă actualizată și perioada de recuperare a investiției. Rezultatele analizei de cost-beneficiu referitoare la consolidarea fondului construit compus din clădiri de zidărie din sectorul educației, precum și datele de intrare sunt prezentate în Tab. 11.

Tab. 11 Parametrii folosiți în analiza de cost-beneficiu și indicatorii economici rezultați

Descriere	Unitate de măsură	Implementarea proiectului de consolidare a infrastructurii școlare SCENARIUL 1	Implementarea proiectului de consolidare a infrastructurii școlare SCENARIUL 2
Hazard seismic: valori PGA	cm/s ²	În funcție de locația fiecărei clădiri	
Probabilitatea de depășire (hazard seismic)	% în 50 de ani	63% în 50 de ani	39% în 50 de ani
Valoarea investiției	Mil. Euro	4.388	
Numărul total de elevi înscriși	Nr. persoane	1.285.275	
Numărul total de clădiri	Nr. clădiri	12.084	
Numărul total de unități de învățământ	Nr. unități de învățământ	10.170	
Valoarea totală a clădirilor	Mil. Euro	7.522	
Suprafața totală construită	Mil. m ²	12,5	
Numărul de potențiale victime	Nr. persoane	2.459	3.622
Valoarea statistică a vieții	Euro ⁴	700.018	
Valoarea pierderilor de vieți evitate	Mil. Euro	1.721	3.622
Valoarea pierderilor directe evitate	Mil. Euro	388	544
Valoarea totală a pierderilor evitate	Mil. Euro	2.109	2.536
Perioada de planificare a investiției	ani	50	
Rata de actualizare financiară	%	5	
Raportul cost-beneficiu	-	2,95	2,42
Valoarea economică netă actuală	Mil. Euro	6.356	4.612
Rata internă de rentabilitate financiară	%	13	10,8
Perioada de recuperare	ani	18	22

Prin proiectul de investiție în reducerea riscului seismic asociat unităților de învățământ cu structură de zidărie pot beneficia cei 1,285,275 de elevi înscriși în grădinițe, școli și licee din sistemul de învățământ de stat. Dintre ei, 3611 pot fi potențiale victime în cazul unui cutremur

⁴ Curs valutar: 1 US\$ = 0.82 Euro

cu o probabilitate de depășire de 39% în 50 de ani (al doilea scenariu). Având în vedere că investiția totală necesară consolidării acestor clădiri este de 4.388 mil. Euro, rezultă o valoare de aproximativ 1,2 mil. Euro asociată salvării unei vieți, comparativ cu valoarea statistică a vieții estimată la 0,7 mil. Euro. Calculând însă investiția totală raportată la numărul total de beneficiari, respectiv vei aproximativ 1,28 mil. elevi, reiese un cost mediu de 3400 Euro/persoană.

Indicatorul de performanță economică denumit valoare economică netă actualizată reprezintă diferența dintre beneficiile și costurile actualizate. În consecință, rata de actualizare pentru care valoarea economică netă actuală este egală cu zero la finalul perioadei de planificare se numește rata economică internă de rentabilitate (Direcția Generală Politică Regională 2008). La finalul perioadei de planificare a investiției se obține raportul cost-beneficiu calculând raportul dintre valoarea actualizate ale beneficiilor și ale costurilor.

În Fig. 28 sunt ilustrate principale rezultate ale analizei de cost-beneficiu pentru cele două scenarii de cutremur. Raportul de cost-beneficiu pentru perioada de planificare de 50 de ani este în ambele scenarii supraunitar, perioadele de recuperare fiind de 18, respectiv 22 de ani. Astfel, investiția poate fi considerată rentabilă din punct de vedere economic, fără să fie incluse în analiză costurile de reabilitare termică sau modernizare, însă nici beneficiile sociale asociate reducerii riscului seismic pentru sistemul de învățământ preuniversitar.

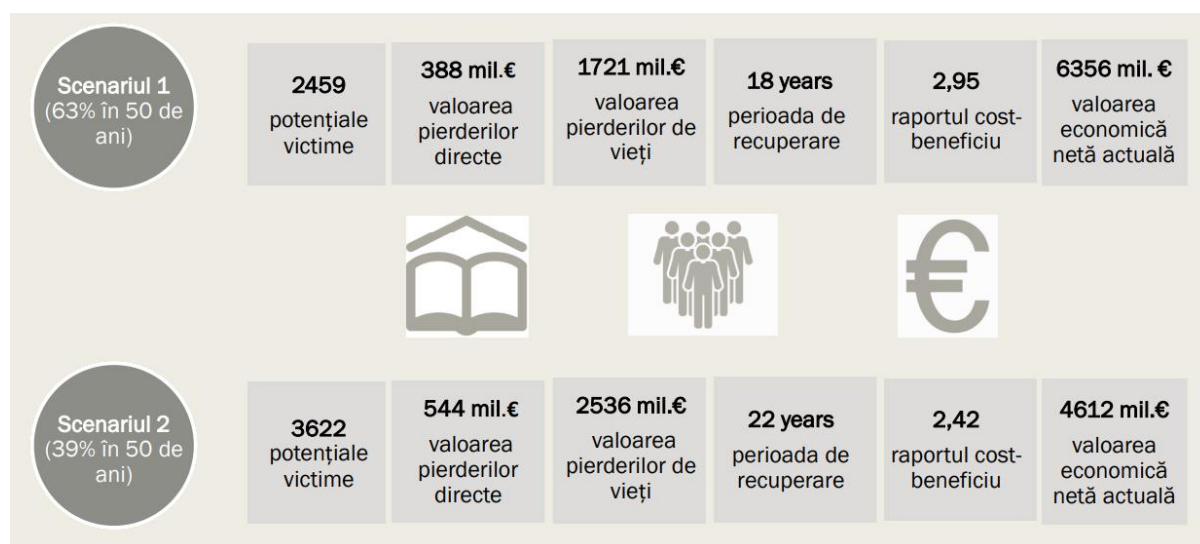


Fig. 28 Pierderile așteptate în cazul celor două scenarii de cutremur și indicatorii economici ai analizei de cost-beneficiu

Pentru a avea o imagine mai clară asupra distribuției spațiale a numărului preconizat de victime în cazul celor două scenarii de cutremur propuse, Fig. 29 prezintă în paralel rezultatele obținute, fiecare punct verde reprezentând o potențială victimă. Numărul cumulat de puncte de pe harta din stânga (scenariul 1) este egal cu 2459, iar pentru harta din dreapta (scenariul 2) este de 3622, concentrate în ambele cazuri în zona de sud și de est a țării. Cele mai multe victime așteptate se află în zona București-Ilfov, Buzău, Prahova, Galați, județe expuse unui hazard seismic ridicat. Raportul dintre numărul de pierderi de vieți omenești obținute pentru un cutremur cu perioada medie de revenire de 50 ani (scenariul 1) și cel de 100 de ani (scenariu 2) sunt între 1.4 (județele cu valori PGA maxime) și 1.8 (județe cu valori PGA minime).

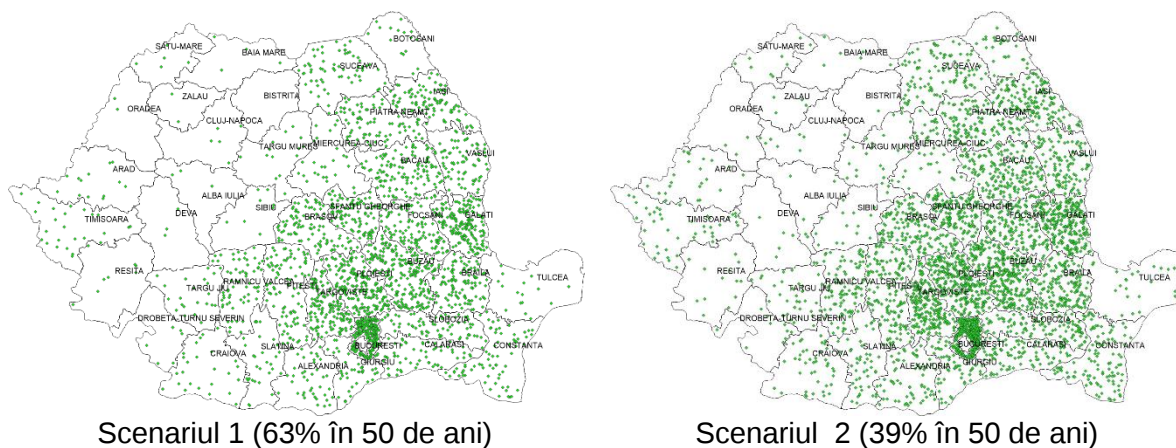


Fig. 29 Distribuția numărului de potențiale victime în cazul celor două scenarii de cutremur

5.5.3. Rezultatele analizei de cost-beneficiu

Rezultate prezentate anterior sunt bazate pe alocarea fondurilor în funcție de prioritățile stabilite prin metodologia de prioritizare. În funcție de ierarhia stabilită în baza scorurilor finale obținute din etapa de prioritizare, clădirile de zidărie sunt incluse progresiv pe lista de investiții. Astfel, clădirile cu scor final minim ocupă o poziție fruntașă în lista de priorități stabilite în vederea reducerii riscului seismic din sectorul educației. În cazul în care fondurile alocate nu pot acoperi nevoia întregului portofoliu de unități de învățământ, se poate stabili un prag în ierarhia stabilită, astfel încât să se asigure direcționarea investiției către obiectivele care maximizează beneficiile rezultate.

Pentru a evidenția importanța direcționării fondurilor cu prioritate către unitățile de învățământ cu riscul seismic cel mai ridicat, au fost propuse două variate alternative în analiza de cost-beneficiu:

- planificarea investițiilor în mod aleatoriu (fără prioritizare)
- planificarea investițiilor în funcție de ierarhia rezultată în urma procesului de prioritizare descris în secțiunea 5.5.1.

Valorile totale absolute referitoare la numărul de potențiale victime sau pierderi asociate avariilor sunt egale în ambele variante. Nici parametrii economici finali nu diferă semnificativ, așa cum se poate observa în Tab. 11 pentru scenariul corespunzător unui cutremur cu 50 de ani perioadă medie de revenire. Primul set de grafice prezintă evoluția costurilor și a beneficiilor cumulative actualizate pe parcursul perioadei de planificare de 50 de ani. Trecerea de la costuri mai mari decât beneficiile marchează finalul perioadei de recuperare a investiției, respectiv anul în care raportul cost-beneficiu ajunge egal cu 1. Astfel, în cazul aplicării unui proces de prioritizare, durata de recuperare a investiției se reduce de la 21 la 18 ani.

Al doilea set de grafice permite de asemenea compararea valorilor de beneficii cumulate an de an, observându-se o creștere mult mai rapidă în primii zece ani de implementare pentru varianta de investiție prioritizată. Pe de altă parte, și costurile au o creștere mai accentuată la începutul celor 15 ani necesari pentru consolidarea portofoliului de clădiri de zidărie.

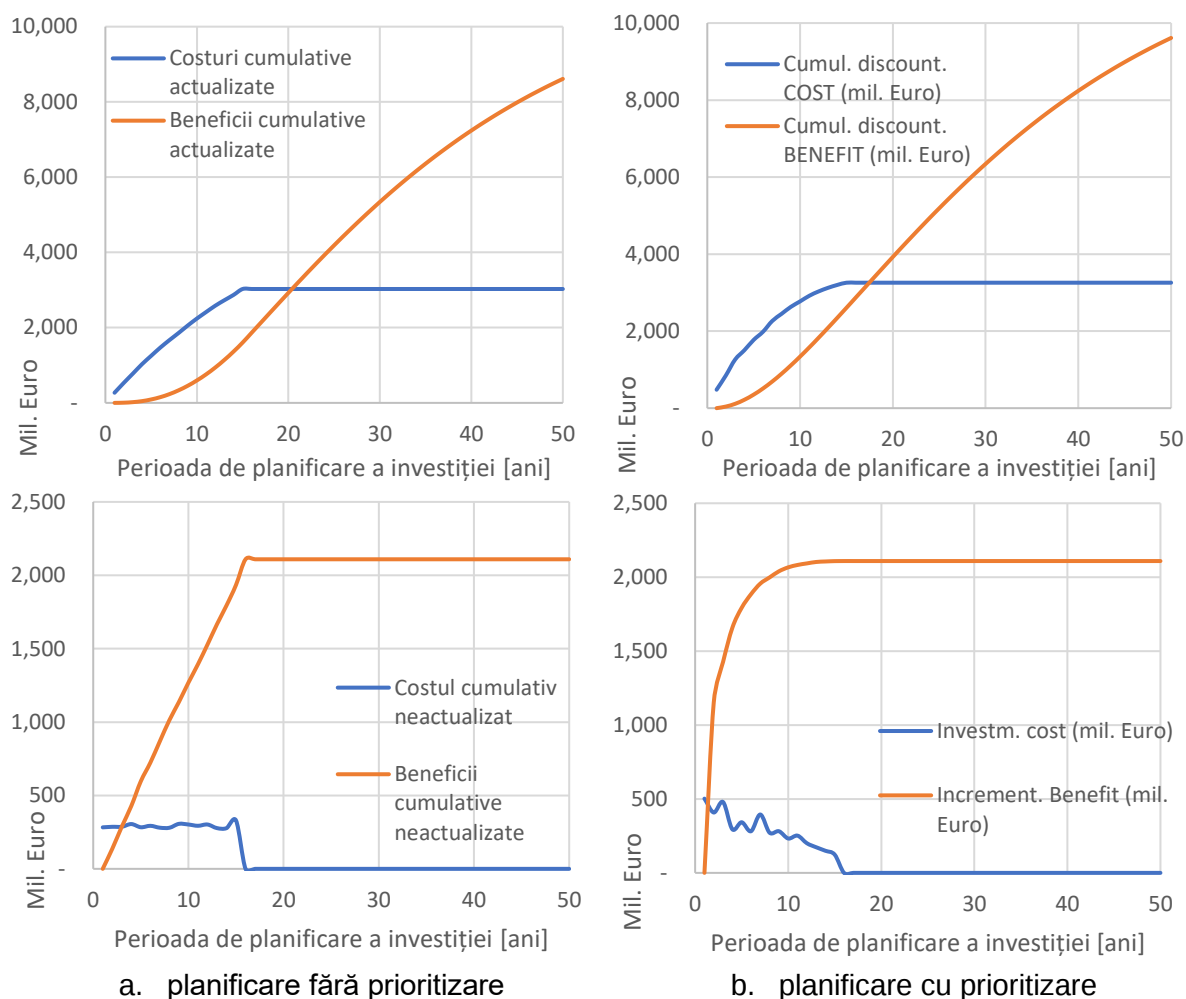


Fig. 30 Indicatori economici ai analizei de cost-beneficiu: fără prioritizare (stânga) și cu prioritizare (dreapta)

Importanța unui proces de prioritizare se reflectă mai bine în impactul unui astfel de program de consolidare a infrastructurii școlare măsurat prin prisma pierderilor evitate. Dat fiind faptul că cele mai semnificative pierderi sunt cele cauzate de potențialele victime, în graficul din Fig. 31 este ilustrată evoluția numărului de potențiale victime salvate prin consolidarea clădirilor din primii 20 de ani din planificare. După anul 15, proiectele sunt finalizate și astfel platoul atins reprezintă numărul maxim așteptat de potențiale pierderi de vieți omenești pentru fiecare dintre cele două scenarii seismice.

Se poate observa că diferențele dintre cele două variante de implementare (cu sau fără aplicarea metodologiei de prioritizare) sunt semnificative încă din primii ani. Direcționând fonduri către unitățile de învățământ în funcție de scorul obținut în etapa de prioritizare, se maximizează numărul de vieți salvate. După doar doi ani de implementare în cazul scenariului seismic cu perioadă medie de revenire de 100 de ani, urmând un proces de prioritizare se pot salva aproximativ 2500 de vieți (70% din totalul de potențiale victime), spre deosebire de doar 500 (14% din totalul de potențiale victime) atunci când fondurile sunt alocate aleatoriu.

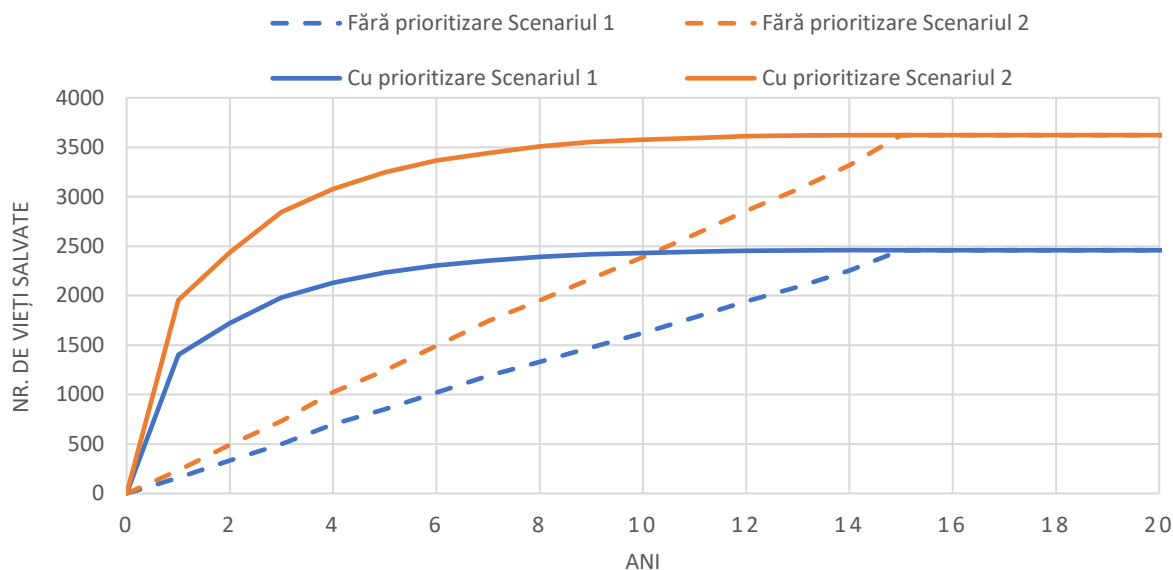


Fig. 31 Evoluția cumulativă a pierderilor de vieți evitate prin consolidare clădirilor cu și fără prioritzarea investițiilor

5.5.4. Evaluarea proiectelor de consolidare a infrastructurii școlare prin intermediul analizei de cost-beneficiu

Pornind de la rezultatele obținute pentru studiul de caz referitor la clădirea de școală consolidată din secțiunea 4.2.3, funcțiile de fragilitate propuse pentru clădirile de zidărie portantă consolidată prin cămășuire au fost considerate a fi reprezentative pentru lucrările de consolidare realizate până în prezent la clădirile de zidărie portantă sau confinată. Astfel, a fost realizată o altă analiză de cost-beneficiu pentru eșantionul de 443 clădiri de zidărie (portantă sau confinată) consolidate în cadrul Proiectului de Reabilitare a Infrastructurii Școlare (P.R.I.S.).

Această analiză a fost realizată doar pentru a compara pierderile așteptate în varianta inițială a clădirilor cu structură de zidărie cu cele rezultate în urma unor consolidări. Astfel, pentru cele 443 de clădiri consolidate sistemul structural a fost schimbat în RM (zidărie consolidată prin cămășuire). Trecerea de la zidărie portantă/confinată la zidărie consolidată implică diferențe semnificative în ceea ce privește pierderile așteptate, așa cum se poate observa în Fig. 32. Pentru scenariul 1, pierderile așteptate în urma consolidării celor 443 de clădiri sunt de aproximativ 30 de ori mai mici decât cele din varianta inițială, neconsolidată. Pentru cel de-al doilea scenariu, proiectele de consolidare implementate indică reduceri de 20 de ori a pierderilor așteptate. Aceste rezultate confirmă viabilitatea economică a investiției de consolidare dedicată reducerii riscului seismic pentru clădiri de zidărie cu funcțiune educațională.

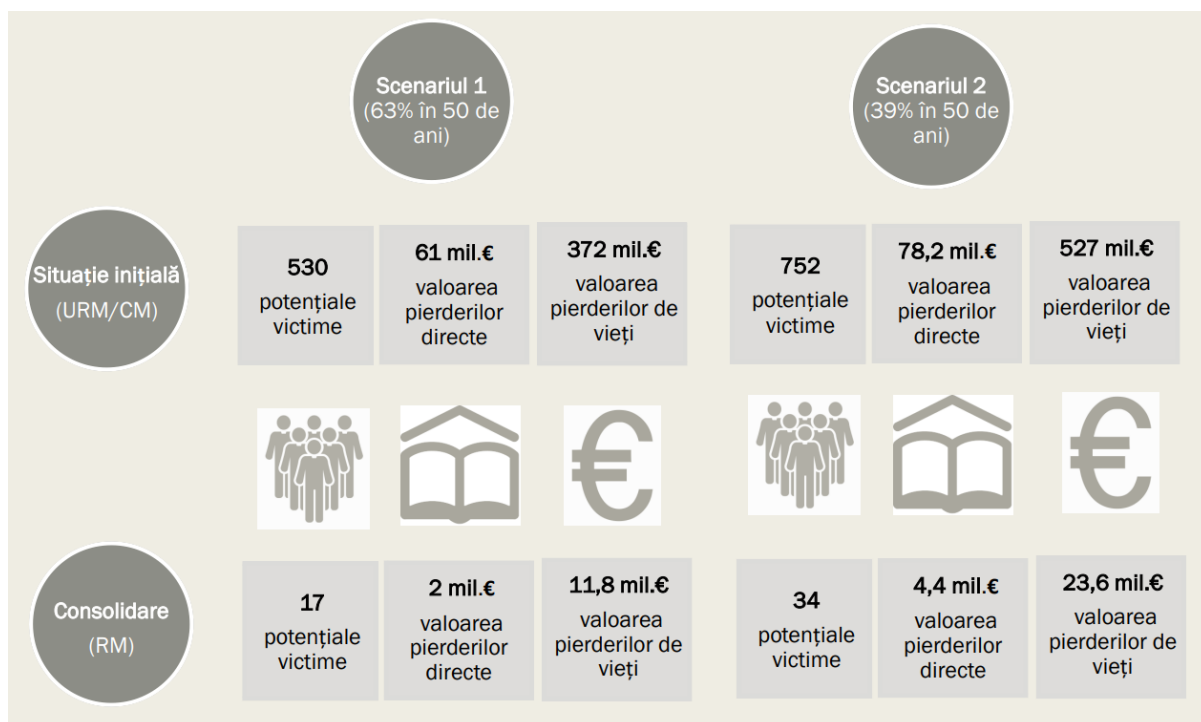


Fig. 32 Pierderile așteptate în cazul celor două scenarii de cutremur: situația inițială vs consolidare

6. CONCLUZII

6.1. Concluzii

Pornind de la motivația de a cerceta comportarea clădirilor istorice de zidărie din România, prezenta lucrare propune o metodă simplificată de evaluare a vulnerabilității structurale pentru astfel de clădiri, rezultatele putând fi ulterior folosite pentru analize de risc seismic. Pornind de la modele numerice ale unor clădiri reprezentative pentru taxonomia propusă (zidărie portantă cu planșee flexibile sau rigide, zidărie confinată, zidărie portantă consolidată prin cămășuire și zidărie confinată consolidată prin cămășuire), evaluarea nivelului de avariere se face folosind procedura de nivel II propusă în cadrul proiectului RISK-UE. Această metodologie permite stabilirea parametrilor pentru funcțiile de fragilitate exprimate în funcție de deplasări sau accelerații spectrale. Pentru a valida funcțiile de fragilitate propuse în lucrare, au fost realizate comparații cu rezultate din literatura de specialitate pentru sisteme structurale similare și de asemenea au fost comparate avariile înregistrate post-cutremur cu cedările obținute din analizele numerice.

Rezultatele obținute în urma analizelor statice neliniare pentru modelul inițial al Muzeului Geologic au putut fi comparate cu avariile consemnate în documentele anexe ale expertizei tehnice, astfel încât modelul de calcul propus să poată fi validat. Degradările semnificative observate la nivelul pereților portanți post-cutremur sunt confirmate de procente mari de avariere la nivel de pereți și de stadiile în care se află macro-elementele la finalul analizelor Pushover. Fisurile în scară sunt prezente în elementele care au cedat din forță tăietoare, în timp ce fisurile orizontale din încovoiere apar frecvent în cazul montajilor zvelți. Pereții curbi de legătură dintre cele două corpuri au fost aproximați în modelul de calcul cu forme ortogonale, însă comportarea acestora din modelul de calcul îi plasează pe primele locuri în lista celor mai avariați pereți, dată fiind zveltețea acestora și diferențele de rigiditate dintre cele două corpuri ale Muzeului. Deplasările relative maxime înregistrate pentru modelul numeric se găsesc la nivelul porticului, zonă care a suferit de asemenea desprinderi și rotiri remanente ca urmare a acțiunii cutremurului din 1977. Așadar, comportarea structurală surprinsă în modelul inițial al Muzeului Geologic corespunde observațiilor prezentate în expertiza tehnică.

Deplasările ultime rezultate din analizele de Pushover global s-au dovedit a fi mai mici decât deplasările pereților generate de cedări locale. Astfel, compararea deplasărilor relative cu valori limită diferite la nivel de perete și al nivel de etaj s-a dovedit a fi în concordanță cu pragurile sugerate în literatură. Pentru modelul inițial, deplasările maxime la nivel de clădire raportate la înălțimea totală indică depășirea criteriului de performanță pentru protejarea vieții utilizatorilor, în timp ce limitele de deplasări relative ale pereților din zona de foisor depășesc în unele cazuri criteriul pentru prevenirea colapsului.

Intervențiile de consolidare realizate în 1980 au fost evaluate prin comparații cu modelul inițial în ceea ce privește forța laterală maximă capabilă, deplasările relative ale pereților avariați și funcțiile de fragilitate. Creșterea capacității portante ajunge până la 80% pe direcția transversală unde sunt concentrate intervențiile de consolidare, însă deplasarea ultimă scade în cazul modelului consolidat. Din acest motiv, capacitatea de disipare a energiei seismice nu crește decât cu 25% pentru modelul consolidat. Comparând însă deplasările relative la nivel de pereți se observă o scădere semnificativă a deplasărilor locale, unde pereții care anterior indicau depășiri ale limitei pre-colaps (1,01 %) scad până stadiul de control al avariilor (0,46 %). Valorile globale de deplasări relative folosite în analiza de fragilitate, atât în funcție de deplasări spectrale, cât și în funcție de accelerații spectrale nu conduc la concluzii care să susțină îmbunătățirile comportării la nivel local. Din analiza de fragilitate în deplasări spectrale pentru modelul consolidat sunt obținute probabilități de depășire a stărilor de avariere mai mari

decât pentru modelul inițial. Pentru a evidenția aportul intervențiilor de cămășuire în evaluarea fragilității seismice au fost determinate și funcții de fragilitate în funcție de accelerații spectrale. Reducerile probabilităților de cedare apar de această dată, însă doar pentru starea de avariere ușoară și moderată și parțial pentru starea de avariere extinsă și completă, doar pentru valori SA sub 0,3g.

Având în vedere că eficiența metodei de consolidare prin cămășuire nu a putut fi evidențiată prin intermediul analizelor de fragilitate, s-a decis analizarea unei metode alternative: consolidarea pereților portanți cu fâșii de fibre de polimeri de carbon FRP. Modelul consolidat cu FRP a presupus înlocuirea pereților cămășuiți cu beton armat cu consolidări folosind fâșii FRP. Pentru creșteri ale capacității similare cu cele înregistrate de modelul consolidat în 1982, creșterile de deplasări ultime sunt în acest caz de peste 40%, rezultând astfel o capacitate de disipare a energiei seismice crescută cu peste 160% față de modelul inițial. Aceste rezultate s-au reflectat și în curbele de fragilitate obținute pentru modelul consolidat cu FRP, unde probabilitățile de cedare sunt semnificativ reduse în comparație cu modelul inițial neconsolidat.

Pentru cel de-al doilea model structural, clădirea școlii din București a fost aleasă pentru a permite analiza structurii din zidărie confinată, ulterior consolidată prin îndesirea stâlpișorilor de beton armat și prin cămășuirea pereților de zidărie. Sistemul structural mixt a necesitat o abordare diferită a modelului de calcul, într-un program adaptat interacțiunii dintre elementele de beton armat (stâlpi și centuri) și panourile de zidărie portantă.

Comparând diferitele etape prin care a trecut clădirea și modificările sistemului structural, au fost înregistrate creșteri de 50-60% ale capacității, comparând modelul de zidărie portantă cu cel cămășuit, pentru direcția longitudinală unde au fost concentrate intervențiile de consolidare. Valorile supraunitare ale raportului dintre forța laterală și greutatea clădirii obținute în analiza modelului consolidat indică totuși măsuri excesive de consolidare. Modelul intermediar de zidărie confinată cu stâlpișori rari prezintă deja îmbunătățiri semnificative față de structura de zidărie portantă, deoarece elemente de beton armat reușesc să asigure redistribuirea eforturilor și să evite cedările locale, așa cum se întâmpla în cazul clădirii Muzeului de Geologie. Analizele numerice indică pentru zidăria portantă un prag de 0.06% al deplasărilor laterale pentru inițierea cedărilor, ceea ce corespunde limitei de control a avariilor pentru astfel de structuri.

Evaluând capacitatea structurală în funcție de deplasările globale, se constată că modelul de zidărie portantă atinge valori ale deplasărilor ultime mai mici chiar și decât deplasarea țintă pentru cerința de ocupare imediată, ceea ce sugerează nevoia unor intervenții de consolidare din cauza cedărilor premature ale panourilor de zidărie. Cu scopul de a evidenția influența măsurilor de consolidare prin cămășuire, cei mai importanți pereți au fost evaluați din punct de vedere al deplasărilor relative înainte și după cămășuire. Creșterile înregistrate pentru forța capabilă cresc cu 70%, în timp ce deplasările laterale ultime ajung la valori și de patru ori mai mari.

Rezultatele analizelor de fragilitate realizate pentru studiul de caz al școlii sunt propuse ca reprezentative pentru tipologia clădirilor de școli cu structură de zidărie din România. Au fost realizate analize comparative între funcțiile de fragilitate obținute și cele folosite în literatură pentru caracterizarea unui sistem structural similar din Europa, în particular clădirile „Placa” din Lisabona, echivalentul clădirilor de zidărie confinată din România.

Modele de calcul elaborate în cadrul tezei pornesc de la două clădiri reprezentative pentru fondul construit de clădiri de zidărie istorice din România: clădirea unui muzeu și a unei școli, ambele amplasate în București și clasate în lista monumentelor istorice. Avariile suferite de acestea în urma cutremurelor au condus la modificări structurale menite să îmbunătățească

comportarea lor, intervenții care au marcat trecerea de la un sistem structural de zidărie portantă la un sistem structural de zidărie consolidat prin cămășuire. Analizele comparative realizate între comportarea structurilor inițiale și a celor consolidate dorește să evidențieze beneficiile intervențiilor de consolidare, dar și situațiile în care măsurile aplicate sunt excesive. Sunt prezentate succint și metode alternative de consolidare, mai puțin invazive, precum înlocuirea cămășuirilor cu plase de beton armat cu fâșii de fibre de polimeri de carbon. Prezenta lucrare își dorește să evidențieze importanța analizelor numerice în cazul evaluării structurilor existente de zidărie, prin intermediul cărora se pot determina zonele predispuse cedărilor locale. Cu ajutorul acestora se pot propune intervenții de consolidare localizate, evitând astfel aplicarea unor intervenții excesive, acoperitoare.

Importanța analizelor de fragilitate și de risc seismic la nivel tipologic este evidențiată prin aplicarea metodologiei propuse cu scopul de a estima pierderile așteptate pentru clădirile de zidărie din sectorul educației. Pornind de la informațiile de expunere și vulnerabilitate a clădirilor de școli colectate prin Sistemul Informatic Integrat al Învățământului din România (SIIR), au fost estimate pierderile așteptate pentru clădirile de zidărie și au fost propuse criterii de prioritizare a intervențiilor de consolidare pentru maximizarea beneficiilor în raport cu costurile. Astfel de instrumente pot contribui la planificarea investițiilor necesare pentru acțiuni de reducere a riscului seismic asociat fondului construit din România. Ținând cont de ponderea clădirilor de zidărie, prezenta lucrare reprezintă doar un demers inițial în vederea analizării comportării unor astfel de clădiri, fiind nevoie în continuare de cercetarea diferitelor tipologii structurale pentru o mai bună evaluare a fondului construit din România expus acțiunii seismice.

6.2. Diseminarea rezultatelor

Lucrări științifice publicate în reviste indexate Web of Science-WoS (ISI):

Pavel F., Scupin A., Văcăreanu R. (2021) Analysis of the seismic risk of low-code masonry and large panels structures in Romania, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00736-2>

Pavel, F., Văcăreanu, R., Arion, C., Aldea, A., Scupin, A. (2021). Seismic risk assessment of lifelines in Bucharest, International Journal of Disaster Risk Reduction, 66 (2021) 102629, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102629>

Pavel, F., Văcăreanu, R., Scupin, A. (2020). Seismic fragility assessment for post-1977 high-rise reinforced concrete structures in Romania, Bulletin of Earthquake Engineering, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01014-8>

Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings):

Scupin A, Văcăreanu R., Pavel F. (2020) Evaluation of invasive retrofitting interventions on an unreinforced masonry heritage building, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, pp. 3462-3473, ISBN 978-84-123222-0-0

Scupin A, Văcăreanu R., Pavel F. (2020) Vulnerability assessment of masonry walls by using capacity curves obtained from experimental testing, 19th National Technical-Scientific Conference on Modern Technologies for the 3rd Millennium, Oradea, Romania, 2020, pp. 247-254, ISBN 978-88-87729-68-9 (în curs de indexare WoS, conferința anterioară 2019 indexată WoS)

Scupin A., Văcăreanu R. (2021) Numerical simulation of the non-linear response of historic masonry, *10th International Conference on energy and environment (CIEM)*, Bucuresti, Romania, pp. 1-5, DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614765

6.3. Contribuții personale

Clădirile cu structură de zidărie, în particular cele istorice, construite înainte de existența unor prevederi de calcul antisismic, reprezintă o parte importantă a fondului construit din România. De multe ori, astfel de clădiri au beneficiat de-a lungul timpului de intervenții de consolidare, reparații locale sau modificări structurale. Evaluarea clădirilor existente reprezintă un subiect de interes pentru zonele supuse acțiunilor seismice și preocupate de reducerea impactului unui cutremur în viitor. Cu acest scop, prezenta lucrare cuprinde următoarele contribuții personale din domeniul evaluării vulnerabilității clădirilor de zidărie:

- A fost realizat un studiu bibliografic referitor la metode de evaluare a fragilității structurale și a riscului seismic pentru clădirile cu structură de zidărie, precum și metode de evaluare a eficienței intervențiilor de consolidare realizate pentru astfel de clădiri.
- A fost prezentată o metodologie de evaluare a riscului seismic asociat clădirilor de zidărie, care poate fi folosită la nivel de clădire sau la nivel de tipologie, pentru a estima pierderile așteptate. Aceasta a fost constituită în baza exemplelor analizate în cadrul studiului bibliografic, adaptând metodele în funcție de disponibilitatea datelor de intrare necesare pentru astfel de analize.
- Au fost realizate modele numerice pentru două clădiri studii de caz, calibrate folosind datele din expertizele tehnice și din avariile post-cutremur din 1977.
- Pentru fiecare studiu de caz, au fost prezentate analize comparative între starea inițială a clădirii și modificările progresive ale sistemelor structurale, realizate cu scopul de a remedia deficiențele și de a îmbunătăți comportarea structurală.
- A fost studiată aplicabilitatea limitelor de deplasări relative globale și locale propuse în literatura de specialitate sau în normativele de evaluare a clădirilor existente, cu scopul de a stabili corelații între acestea și avariile înregistrate în modelele de calcul.
- A fost verificată și validată aplicabilitatea limitelor de deplasări relative globale și locale pentru clădiri de zidărie, stabilind legătură între acestea și stadiile de avariere așteptate.
- Au fost analizate rezultatele înregistrate în modelul numeric pentru o soluție alternativă de consolidare prin aplicarea fibrelor de polimeri de carbon (FRP), în locul cămășuirilor cu plase de beton armat, pentru clădirea Muzeului Geologic.
- Au fost propuse curbe de fragilitate la nivel de tipologie pentru structuri de zidărie portantă cu planșeu rigid, structuri de zidărie portantă cu planșeu flexibil, structuri de zidărie confinată, cu stâlpișori și centuri de beton armat, structuri de zidărie confinată consolidate prin cămășuire și structuri de zidărie portantă consolidate prin cămășuire.
- Pentru ambele clădiri analizate sub formă de studiu de caz, au fost calculate pierderile anuale așteptate, exprimate prin probabilități anuale de depășire asociate fiecărui stadiu de avariere.
- Au fost calculate pierderile anuale așteptate pentru cele cinci tipologii de clădiri de zidărie, în sensul probabilităților de depășire a stadiilor de avariere, folosind date de din cele mai recente analize probabilistice de hazard seismic pentru teritoriul României.
- A fost realizată o bază de date a unităților de învățământ pre-universitar cu clădiri istorice care se regăsesc pe lista Monumentelor Istorice.

- A fost analizat un eșantion de 29284 de clădiri din 15929 de unități de învățământ din sectorul pre-universitar de învățământ din România. Prelucrarea datelor de intrare a presupus corectarea neconcordanțelor observate între parametrii structurali de interes pentru analiză (sistemul structural, anul construirii, suprafețele construite, regimul de înălțime).
- Pentru întreg eșantionul analizat din sectorul educației, au fost realizate hărți de expunere la nivel de județ, cu informații referitoare la numărul de elevi înscriși în anul 2018-2019 și numărul de clădiri cu unități de învățământ.
- A fost realizată o analiză de risc seismic pentru un eșantion restrâns din sectorul educației, compus doar din clădirile de zidărie. Acesta a cumulat 15084 din 10170 unități de învățământ, pentru care au fost realizate hărți de expunere suprapuse hărților de risc seismic, pentru probabilități anuale de depășire a stadiilor de avariere DS3 (avarie extinsă) și DS4 (avarie completă).
- În vederea optimizării investițiilor în lucrări de consolidare, a fost propus un set de parametri și o matrice de prioritizare a clădirilor din sectorul educației.
- Au fost propuse costuri medii de consolidare, estimate în funcție de investițiile anterioare de reabilitare și consolidare a clădirilor din sectorul educației.
- A fost elaborată o analiză de cost-beneficiu pentru eșantionul de 15084 clădiri de zidărie, cu scopul de a evidenția pierderile evitate prin investiții în consolidarea fondului construit din sectorul educației, folosind metodologia HAZUS de estimare a pierderilor.
- În baza rezultatelor analizei de pierderi pentru două scenarii de cutremure, au fost realizate hărți care ilustrează distribuția potențialelor victime din sectorul educației.
- Pentru a evidenția importanța etapei de prioritizare, au fost analizate în paralel rezultatele a două scenarii pentru analiza cost-beneficiu: planificarea aleatorie a investițiilor și planificarea investițiilor în funcție de procesul de prioritizare.
- A fost elaborată o analiză de cost-beneficiu pentru clădirile de zidărie din sectorul educației care au beneficiat deja de intervenții de consolidare, pentru a evidenția viabilitatea economică a proiectelor, beneficiile așteptate și pierderile evitate prin intermediul unor astfel de acțiuni de reducere a riscului seismic.

În concluzie, rezultatele cercetării și contribuțiile personale din prezenta teză constituie elemente relevante pentru analizarea comportării clădirilor istorice de zidărie. Metodele propuse pot fi aplicate pentru analize de risc seismic la scară națională și baza de date din sectorul educației prelucrată cu acest scop poate reprezenta un pas inițial în pregătirea unor politici publice de reducere a riscului seismic pentru clădirile istorice.

6.4. Perspective de continuare a cercetării

Demersurile inițiate în cadrul prezentei lucrări pot fi completate de cercetări în domeniul evaluării clădirilor existente cu scopul reducerii riscului seismic asociat lor, după cum urmează:

- Cercetarea comportării clădirilor istorice de zidărie din alte sectoare, precum: sectorul sanitar, rezidențial, administrativ, etc.
- Realizarea unor baze de date pentru întreg fondul construit cu parametrii cheie necesari analizelor de risc seismic și stabilirii unor criterii de prioritizare, în mod similar propunerilor prezentate pentru sectorul educației.
- Crearea și analizarea mai multor modele numerice cu scopul de a defini comportarea clădirilor la nivel de tipologie structurală, în particular pentru clădirile de zidărie.
- Calibrarea modelelor numerice și a caracteristicilor de material folosite în cadrul acestor prin intermediul testelor de laborator.

Bibliografie

- (VTT), Technical Research Centre of Finland. 2011. "Constructive and Performance Analysis of the Retrofit Systems for Vertical Masonry Elements."
- Agent, Radu. 1998. *Expertizarea Şi Punerea În Siguranţă a Clădirilor Existente Afectate de Cutremure*. FAST PRINT.
- AlShawa, Omar, Luigi Sorrentino, and Domenico Liberatore. 2017. "Simulation Of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part (II): Combined Finite-Discrete Elements." *International Journal of Architectural Heritage* 11 (1): 79–93. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1237588>.
- Anwar, Naveed. 2017. "Making Schools Safer for Earthquakes Effectiveness of Retrofitting :," no. November 2016.
- Apostol, Iasmina. 2020. "Seismic Vulnerability Assessment of Historical Urban Centres." Universitatea Politehnica Timișoara.
- ASCE. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*.
- ASCE. 2014. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13)*. American Society of Civil Engineers.
- ATC. 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California*.
- Ayala, Dina Francesca D, Abdelghani Meslem, Dimitrios Vamvatsikos, and Keith Porter. 2014. "GEM Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low / Mid-Rise Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low / Mid-Rise Buildings Report Produced in the Context of The," no. February.
- Bălan, Ștefan, Dan Căpățînă, Ion Cornea, Valeriu Cristescu, Dan Dumitrescu, Dumitru Enescu, Vasile Lăzărescu, et al. 1982. *Cutremurul de Pământ Din România de La 4 Martie 1977*. București: Editura Academiei Republicii Socialiste România.
- Barbat, Alex H., Luis G. Pujades, and Nieves Lantada. 2008. "Seismic Damage Evaluation in Urban Areas Using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28 (10–11): 851–65. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.006>.
- Beraldo, Sergio, Daniel Montolio, and Gilberto Turati. 2009. "Healthy, Educated and Wealthy: A Primer on the Impact of Public and Private Welfare Expenditures on Economic Growth." *Journal of Socio-Economics* 38 (6): 946–56. <https://doi.org/10.1016/j.soec.2009.06.013>.
- Borzi, Barbara, Helen Crowley, and Rui Pinho. 2008. "Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings." *International Journal of Architectural Heritage* 2 (4): 353–76. <https://doi.org/10.1080/15583050701828178>.
- Brzev, Svetlana. 2007. *Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction*. National Information Center of Earthquake Engineering.
- Calvi, G. M., R. Pinho, G. Magenes, J. J. Bommer, L. F. Restrepo-Vélez, and H. Crowley. 2006. "Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies over the Past 30 Years." *ISET Journal of Earthquake Technology* 43 (3): 75–104.
- Calvi, Gian Michele. 1999. "A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings." *Journal of Earthquake Engineering* 3 (3): 411–38. <https://doi.org/10.1080/13632469909350353>.
- Casabonne, Carlos. 2000. "Masonry in the Seismic Areas of the Americas, Recent

- Investigation and Developments." *Progress in Structural Engineering and Materials* 2 (3): 319–27. [https://doi.org/10.1002/1528-2716\(200007/09\)2:3<319::aid-pse36>3.3.co;2-n](https://doi.org/10.1002/1528-2716(200007/09)2:3<319::aid-pse36>3.3.co;2-n).
- Cattari, Serena, Ivan Giongo, Salvatore Marino, and Yi-wei Lin. 2015. "Numerical Simulation of the Seismic Response of an Earthquake Damaged URM Building," no. April.
- Cattari, Serena, Sergio Lagomarsino, and Daria Ottonelli. 2014. "FRAGILITY CURVES FOR MASONRY BUILDINGS FROM EMPIRICAL AND ANALYTICAL MODELS." In *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1–12. Istanbul, Turkey.
- Churilov, S. 1963. "Analysis of Masonry Walls Strengthened with RC Jackets."
- Cimellaro, Gian Paolo, Ioannis P Christovasilis, Andrei M Reinhorn, Alessandro De Stefano, and Tatiana Kirova. 2010. "L'Aquila Earthquake of April 6, 2009 in Italy: Rebuilding a Resilient City To Withstand Multiple Hazards." *Technical Report MCEER-10-0010*.
- Correia Lopes, Gonalo, Romeu Vicente, Tiago Miguel Ferreira, and Miguel Azenha. 2019. *Intervened URM Buildings with RC Elements: Typological Characterisation and Associated Challenges. Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 17. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00651-y>.
- D'Ayala, D., and E. Speranza. 2003. "Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings." *Earthquake Spectra* 19 (3): 479–509. <https://doi.org/10.1193/1.1599896>.
- D'ayala, Dina F. 2005. "Force and Displacement Based Vulnerability Assessment for Traditional Buildings." *Bulletin of Earthquake Engineering* 3 (3): 235–65. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-1239-x>.
- D'Ayala, Dina Francesca, Robin Spence, Carlos S Oliveira, and Antonios Pomonis. 1997. "Earthquake Loss Estimation for Europe's Historic Town Centres." *Earthquake Spectra*, no. July. <https://doi.org/10.1193/1.1585980>.
- Decanini, Luis, Adriano De Sortis, Agostino Goretti, Randolph Langenbach, Fabrizio Mollaioli, and Alessandro Rasulo. 2004. "Performance of Masonry Buildings during the 2002 Molise, Italy, Earthquake." *Earthquake Spectra* 20 (SPEC. 1): 191–220. <https://doi.org/10.1193/1.1765106>.
- Derakhshan, Hossein, and Michael Griffith. 2018. "Final Report on Pushover Analysis of Classes of URM Buildings to Characterise Drift Ratios for Different Damage Levels."
- Dirrecia Generală Politică Regională. 2008. "Ghidul Pentru Analiza Cost-Beneficiu a Proiectelor de Investiții."
- Dolce, Mauro, Andreas Kappos, Angelo Masi, Gregory Penelis, and Marco Vona. 2006. "Vulnerability Assessment and Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) Using Italian and Greek Methodologies" 28: 357–71. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.08.009>.
- Douglas, John, Thomas Ulrich, Caterina Negulescu, John Douglas, Thomas Ulrich, Caterina Negulescu, John Douglas, and Thomas Ulrich. 2013. "Risk-Targeted Seismic Design Maps for Mainland France To Cite This Version : HAL Id : Hal-00744513 Risk-Targeted Seismic Design Maps for Mainland France." *Natural Hazards* 65 (3): 1999–2013.
- Earthquake Engineering Research Institute. 2007. "Learning from Earthquakes - The Pisco, Peru, Earthquake of August 15, 2007," no. October: 12. https://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_pisco_eeri_preliminary_reconnaissance.pdf.
- EN 1998-1. 2004. *Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules*,

- Seismic Actions and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, Burssels, Belgium.
- European Standard. 2005. "Eurocode 6 - Design of Masonry Structures." Vol. 1.
- Federal Emergency Management Agency. 2015. "Hazard-MH 2.1 Earthquake Model Technical Manual," 718. <https://doi.org/https://www.fema.gov/hazus-mh-user-technical-manuals>.
- Formisano, A. 2014. "Seismic Behaviour and Retrofitting of a School Masonry Building Subject to the 2012 Emilia-Romagna Earthquake." *Civil-Comp Proceedings* 106 (September). <https://doi.org/10.4203/ccp.106.83>.
- Gilani, Amir S.J., H. Kit Miyamoto, and Tsutomu Nifuku. 2018. "Seismic Risk Assessment and Retrofit of School Buildings in Developing Countries." *11th National Conference on Earthquake Engineering 2018, NCEE 2018: Integrating Science, Engineering, and Policy* 8 (June): 4691–4700.
- Giovinazzi, Sonia. 2005. "The Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis," no. May 2005: 222.
- Gociman, Cristina Olga, Emil Sever Georgescu, Tiberiu Constantin Florescu, Iolanda-gabriela Craifaleanu, Cristian Iosif Moscu, and Mihaela Stela Georgescu. 2016. *Strategii Și Reziliență În Reducerea Riscului La Multihazard*. Editura Universitară Ion Mincu.
- Gospodinov, Nicola, and Eugen Lozinca. 2011. "Raport de Expertiză Tehnică Privind Starea Structurii Ansamblului Imobiliar Muzeul Național de Geologie Sector 1, București."
- Grunthal, G. 1998. *European Macroseismic Scale 1998*. Vol. 15. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- IBC. 2018. "Italian Building Code Aggiornamento Sulle Norme Tecniche per Le Costruzioni." Rome, Italy.
- Ingham, Jason, and Michael C Griffith. 2011. "The Performance of Earthquake Strengthened URM Buildings in the Christchurch CBD in the 22 February 2011 Earthquake (Addendum Report to the Royal Commission of Inquiry)," no. February: 1–111.
- Institutul Național al Patrimoniului. 2015. "Lista Monumentelor Istorice." 2015. <https://patrimoniu.ro/monumente-istorice/lista-monumentelor-istorice>.
- Institutul Național de Statistică. 2011. "Recensământul Populației Și Locuințelor." 2011. <http://www.recensamantromania.ro/rezultate-2/>.
- International Labor Office/CRISIS. 2010. *Seismic Risk Assessment of Schools in the Andean Region in South America and Central America*. International Labor Office/CRISIS.
- Kappos, Andreas J., Georgios Panagopoulos, Christos Panagiotopoulos, and Gregorios Penelis. 2006a. "A Hybrid Method for the Vulnerability Assessment of R/C and URM Buildings." *Bulletin of Earthquake Engineering* 4 (4): 391–413. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9023-0>.
- Kappos, Andreas J., Georgios Panagopoulos, Christos Panagiotopoulos, and Gregorios Penelis. 2006b. "A Hybrid Method for the Vulnerability Assessment of R / C and URM Buildings." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 391–413. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9023-0>.
- Kennedy, Robert P. 2011. "Performance-Goal Based (Risk Informed) Approach for Establishing the SSE Site Specific Response Spectrum for Future Nuclear Power Plants &." *Nuclear Engineering and Design* 241 (3): 648–56. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.08.001>.

- Lagomarsino, Sergio, and Serena Cattari. 2013. "Seismic Vulnerability of Existing Buildings: Observational and Mechanical Approaches for Application in Urban Areas." *Seismic Vulnerability of Structures*, 1–62. <https://doi.org/10.1002/9781118603925.ch1>.
- Lagomarsino, Sergio, and Serena Cattari. 2015. "PERPETUATE Guidelines for Seismic Performance-Based Assessment of Cultural Heritage Masonry Structures." *Bulletin of Earthquake Engineering* 13 (1). <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1>.
- Lagomarsino, Sergio, and Sonia Giovinazzi. 2006. "Macroseismic and Mechanical Models for the Vulnerability and Damage Assessment of Current Buildings," 415–43. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>.
- Lagomarsino, Sergio, Sonia Giovinazzi, Sonia Resemini, and Stefano Podestà. 2003. "RISK-UE WP5: Vulnerability Assessment of Historical and Monumental Buildings."
- Lagomarsino, Sergio, and Guido Magenes. 2009. "Evaluation and Reduction of Vulnerability of Masonry Buildings." In *The State of the Earthquake Engineering Research in Italy: The Re-LUIS-DPC 2005-2008 Project*, edited by G. Manfredi and Mauro Dolce. Napoli.
- Lagomarsino, Sergio, Andrea Penna, Alessandro Galasco, and Serena Cattari. 2013. "TREMURI Program : An Equivalent Frame Model for the Nonlinear Seismic Analysis of Masonry Buildings." *ENGINEERING STRUCTURES* 56: 1787–99. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.
- Lamego, Paula, Paulo B Lourenco, Maria L Sousa, and Rui Marques. 2016. "Seismic Vulnerability and Risk Analysis of the Old Building Stock at Urban Scale : Application to a Neighbourhood in Lisbon." <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0072-8>.
- Lourenço, P.B., D.V. Oliveira, J.C. Leite, J.M. Ingham, C. Modena, and F. da Porto. 2013. "Simplified Indexes for the Seismic Assessment of Masonry Buildings: International Database and Validation." *Engineering Failure Analysis* 34 (December): 585–605. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2013.02.014>.
- Lozincă, Eugen, Viorel Popa, Dragoş Coţofană, and Cheşcă Alexandru Basarab. 2016. "Unidirectional Cyclic Behavior of Old Masonry Walls in Romania." In *The 1940 Vrancea Lessons Learnt Insights and Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt*, 351–61. Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29844-3>.
- Lucantoni, Antonio, Vittorio Bosi, Fabrizio Bramerini, Roberto De Marco, Tiziana Lo Presti, and Giuseppe Naso. 1998. "IL RISCHIO SISMICO IN ITALIA Antonio Lucantoni, Vittorio Bosi, Fabrizio Bramerini, Roberto De Marco, Tiziana Lo Presti, Giuseppe Naso e Fabio Sabetta. SOMMARIO -."
- Lumantarna, Elisa, Jerry Vaculik, Mike Griffith, and Nelson Lam. 2006. "Seismic Fragility Curves for Un-Reinforced Masonry Walls." *Earthquake*, no. November: 33–40.
- Marques, Rui, Paula Lamego, Paulo B. Lourenço, and Maria L. Sousa. 2018. "Efficiency and Cost-Benefit Analysis of Seismic Strengthening Techniques for Old Residential Buildings in Lisbon." *Journal of Earthquake Engineering* 22 (9): 1590–1625. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1286616>.
- Marques, Rui, and Paulo B. Lourenço. 2014. "Unreinforced and Confined Masonry Buildings in Seismic Regions: Validation of Macro-Element Models and Cost Analysis." *Engineering Failure Analysis* 64: 52–67.
- Milosevic, Jelena, Serena Cattari, and Rita Bento. 2020. *Definition of Fragility Curves through Nonlinear Static Analyses: Procedure and Application to a Mixed Masonry-RC Building Stock. Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 18. Springer Netherlands.

<https://doi.org/10.1007/s10518-019-00694-1>.

- Milutinovic, Z V, and G S Trendafiloski. 2003. "WP4: Vulnerability of Current Buildings (RISK-UE)." *RISK-UE Project Handbook*, 111.
- Milutinovic, Zoran V., and Goran S. Trendafiloski. 2003. "An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns. WP4: Vulnerability of Current Buildings."
- Ministerio delle Infrastrutture e dei Trasporti. 2009. "Circolare n. 617 Istruzioni per l'applicazione Delle «Nuove Norme Tecniche per Le Costruzioni» Di Cui Al Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008."
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. 2018. "Aggiornamento Delle 'Norme Tecniche per Le Costruzioni' (in Italian)," 1–198.
- Monteiro, M, and R Bento. 2012. "Characterization of ' Placa ' Buildings."
- Morales-esteban, Antonio. 2019. "Optimal Seismic Retrofitting Techniques for URM School Buildings Located in the Southwestern Iberian Peninsula," 1–18.
- Moroni, M. O., M. Astroza, and C. Acevedo. 2004. "Performance and Seismic Vulnerability of Masonry Housing Types Used in Chile." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 18 (3): 173–79. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2004\)18:3\(173\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2004)18:3(173)).
- Murphy, J R, and L J O'Brien. 1977. "The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude with Seismic Intensity and Other Physical Parameters." *Bulletin of the Seismological Society of America* 67 (3): 877–915.
- National Institute of Building Sciences. 2020. "Mitigation Saves up to \$ 13 per \$ 1 Invested."
- NEHRP. 2000. *Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, Developed by the Applied Technology Council.
- FEMA. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440)*.
- Nistor, Sergiu. 2013. "18 Aprilie: Ziua Mondială a Monumentelor. Patrimoniul Educației." ICOMOS. 2013. <http://www.icomos.ro/nou/ZMM-2013.htm>.
- OECD. 2004. "Keeping Schools Safe in Earthquakes." In *Experts' Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*, edited by Richard Yelland and Brian Tucker. Paris: OEDC. <https://doi.org/10.1787/9789264063549-zh>.
- Oropeza, M., C. Michel, and P. Lestuzzi. 2010. "A Simplified Analytical Methodology for Fragility Curves Estimation in Existing Buildings." *14Ecee*, no. Lang 2002: 599.
- Parammal, Ahsana, and Vatterli Dina. 2021. *Classification and Seismic Fragility Assessment of Confined Masonry School Buildings*. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01061-9>.
- Pavel, Florin, and Radu Vacareanu. 2017. *Elemente Generale de Hazard Și Risc Seismic*. MatrixRom.
- Pavel, Florin, Radu Vacareanu, John Douglas, Mircea Radulian, Carmen Cioflan, and Alex Barbat. 2016. "An Updated Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania and Comparison with the Approach and Outcomes of the SHARE Project." *Pure and Applied Geophysics* 173 (6): 1881–1905. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1223-6>.
- Penazzi, D, M R Valluzzi, A Saisi, L Binda, and C Modena. 2001. "Repair and Strengthening of Historic Masonry Building in Seismic Areas."

- Pitilakis, Kyriazis, H Crowley, a M Kaynia, and Critical Facilities. 2014. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. 11. Vol. 27. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7872-6>.
- Pomba, Filipe José Campos. 2007. "Comportamento Sísmico de Edifícios de Pequeno Porte." *Master Thesis*.
- Porter, Keith. 2015. *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. Vol. 23. University of Colorado Boulder.
- Porter, Keith, K Farokhnia, I H Cho, D Grant, K Jaiswal, and D Wald. 2012. "Global Vulnerability Estimation Methods for the Global Earthquake Model." *15th World Conference on Earthquake Engineering*, no. 4504: 24–28.
- Ravara, Artur, Carlos Sousa Oliveira, Eduardo Cansado Carvalho, Mário Santos Lopes, Paula Teves Costa, Raimundo Delgado, Rogério Bairrão, and Córias e Silva Vítor. 2001. "Redução Da Vulnerabilidade Sísmica Do Edificado."
- Restrepo-Velez, Luis F, and Guido Magenes. 2004. "Simplified Procedure For The Seismic Risk Assessment of Unreinforced Masonry Buildings." *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE*, no. 2561: 15.
- Romeu, Vicente, Dina D'Ayala, Tiago Miguel Ferreira, Humberto Varum, Aníbal Costa, J.A.R. Mendes da Silva, and Sergio Lagomarsino. 2014. "Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Historic Masonry Buildings." *In Structural Rehabilitation of Old Buildings*, 307–48. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1_11.
- Rota, Maria, Andrea Penna, and Guido Magenes. 2008. "A Procedure for Deriving Analytical Fragility Curves for Masonry Buildings," no. January.
- S.T.A. DATA. 2012. "3MURI User Manual (12.2.0)."
- Sandi, H. 1986. "Working Group Vulnerability and Risk Analysis for Individual and Systems of EAEE, Report to 8th ECEE, 1986. Some Data on Vulnerabilty Obtained in European Countries."
- Scupin, A., R. Văcăreanu, and F. Pavel. 2021. "Evaluation of Invasive Retrofitting Interventions on an Unreinforced Masonry Heritage Building," 1–12. <https://doi.org/10.23967/sahc.2021.091>.
- Scupin, A, R Vacareanu, and F Pavel. 2021. "Seismic Performance Assessment Based on Displacement Capacity of Unreinforced Masonry Structures." *{IOP} Conference Series: Earth and Environmental Science* 664 (1): 12087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/664/1/012087>.
- Scupin, Alexandra, and Radu Văcăreanu. 2021. "Numerical Simulation of the Non-Linear Response of Historic Masonry." *In 2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CIEM52821.2021.9614765>.
- Scupin, Alexandra, Radu Vacareanu, and Florin Pavel. 2021. "Analysis of the Seismic Risk of Low-Code Masonry and Large Panels Structures in Romania." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.
- Scupin, Alexandra, Radu Văcăreanu, and Florin Pavel. 2020. "Vulnerability Assessment of Masonry Walls by Using Capacity Curves Obtained from Experimental Testing." *In 19th National Technical-Scientific Conference on Modern Technologies for the 3rd Millenium*, 247–54.
- Singhal, Ajay, and Anne S. Kiremidjian. 1996. "METHOD FOR PROBABILISTIC

- EVALUATION OF SEISMIC STRUCTURAL DAMAGE By Ajay Singhal! And Anne S. Kiremidjian 1.” *J Structural Engineering*, Asce 122 (December): 1459–67.
- Spencer, Robin J S, Carlos S Oliveira, Dina F D Ayala, and Filomena Papa. 1998. “THE PERFORMANCE OF STRENGTHENED MASONRY BUILDINGS IN RECENT EUROPEAN EARTHQUAKES .,” 1–8.
- Taffarel, S, C Marson, C Valotto, M Roverato, M Munari, F Porto, C Modena, and M Mosoarca. 2016. “Seismic Vulnerability Maps of Timisoara Historical Center Based on Fragility Curves.” In *Structural Analysis of Historical Constructions*.
- Tănăsioiu, Radu. 1979. *Arhitectura Construcțiilor Școlare*. Editura Tehnică București.
- Ufuk Hancilar, Eser Durukal, Mustafa Erdik. 2009. “Seismic Assessment and Rehabilitation of Historical Unreinforced Masonry (URM) Buildings in Istanbul.” In *Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 1305–16.
- Văcăreanu, R, D Lungu, and C Arion. 2012. “Seismic Fragility Functions for Masonry Buildings in Romania.” In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE 98*: 1–10.
- Zuccaro, G, and F Cacace. 2015. “Seismic Vulnerability Assessment Based on Typological Characteristics . The First Level Procedure ‘ SAVE .’” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 69: 262–69. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.11.003>.
- Zuccaro, Giulio. 2015. “Territorial Seismic Risk Assessment,” 473–99. <https://doi.org/10.14599/r101313>.
- Zuccaro, Giulio, Francesco Cacace, Filomena Dato, and Salvatore Sessa. 2017. “Seismic Collapse Mechanisms Analyses and Masonry Structures Typologies : A Possible Correlation.” *Ingegneria Sismica* 4.