

EVALUAREA VULNERABILITĂȚII SEISMICE A CLĂDIRILOR ISTORICE DIN ZIDĂRIE SOLICITATE LA ACȚIUNI SEISMICE DE SUPRAFAȚĂ

Teză de doctorat – Rezumat pentru obținerea titlului științific de doctor la Universitatea Politehnica Timișoara în domeniul de doctorat Inginerie Civilă și Instalații

autor ing. Nicola CHIEFFO

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Marius Moșoarcă

luna August anul 2021

Teza de doctorat intitulată: "Evaluarea vulnerabilității seismice a clădirilor istorice din zidărie solicitate la acțiuni seismice de suprafață" abordează analiza vulnerabilității seismice a clădirilor istorice din zidărie nearmată solicitate de componentele verticale ale acțiunilor seismice. Aceasta propune pe de o parte o procedură de calcul complexă ce are ca scop principal evidențierea deficiențelor structurale ale clădirilor existente și pe de altă parte, propune o metodologie de evaluare a riscului lor seismic.

Acest subiect a fost abordat ținând cont de faptul că numărul tot mai mare de evenimente seismice devastatoare a evidențiat o capacitate structurală redusă a clădirilor existente amplasate în zonele seismice epicentrale. În general, în cazul seismelor de suprafață s-a observat că mișcarea verticală de tip impuls este una dintre cauzele amplificării avariilor, în special pentru construcții din zidărie nearmata.

Acest aspect poate fi analizat în zone urbane istorice în care efectele produse de evenimente seismice de suprafață au dus la avarierea puternică a clădirilor existente. Deoarece toate aceste clădiri reprezintă o dovadă a istoriei unui oraș, trebuie găsite soluții de conservare a acestora pentru generațiile viitoare. Astfel, este importantă sensibilizarea comunității științifice în ceea ce privește evaluarea vulnerabilității seismice a clădirilor istorice prin înțelegerea efectului componentelor verticale ale cutremurului de suprafață.

Pentru a înțelege comportarea particulară a clădirilor amplasate în zone caracterizate de seisme de suprafață, în cadrul tezei a fost realizată o cercetare în ultimii cinci ani, ce s-a concentrat asupra clădirii Castelului Banloc, situat în comuna Banloc, județul Timiș din zona seismică Banat. Această clădire realizată din zidărie nearmată a fost grav avariată de evenimentul seismic ce a avut loc în 1991 și prezintă avarii multiple ale elementelor structurale și nestructurale. Comportarea structurală a clădirii a fost studiata printr-o analiză dinamică neliniară cu scopul de a evalua răspunsul seismic a acesteia.

Un alt aspect relevant al tezei este faptul că oferă informații originale despre mecanismele de cedare caracteristice pentru diferite tipuri de clădiri istorice prezente în zona epicentrală și deschide viitoare direcții de cercetare de mare interes.

Teza este alcătuita din 6 capitole, și conține 1 anexă. Capitolele prezintă o introducere în tema propusa, o prezentare a metodologiilor de evaluare seismica existente in prezent în literatura de specialitate si rezultatele simulării numerice dinamic neliniare de tip "time-history" bazata pe accelerogramele reale ale evenimentului seismic Banat-Voiteg care a avut loc in anul 1991. Rezultatele sunt obținute printr-o analiza globala asupra structurii portante și o analiză locală realizată pe unele elemente portante. În cel de-al cincilea capitol, rezultatele obținute sunt prelucrate pentru a obține curbele de fragilitate și de vulnerabilitate pentru clădirile de zidărie din zona seismica Banat. La finalul tezei se prezintă concluziile generale, contribuțiile personale și viitoarele direcții de cercetare deschise de cercetare.

În primul capitol, se face o introducere în domeniul studiat de teză. Subiectul propus a fost prezentat in mod detaliat, oferind o imagine de ansamblu asupra temei de cercetare, prezintând relevanța și actualitatea acesteia. Se oferă încă de la început o vedere de ansamblu asupra cutremurelor de suprafață, mai ales a celor din zona centrală si nordica a Italiei [1]. Pentru studiu a fost selectată comuna Banloc, localitate caracterizată printr-o activitate seismică care a afectat în mod semnificativ structurile din zidărie de cărămidă nearmată, construite in zona epicentrală și în zonele învecinate. Evaluarea vulnerabilității seismice s-a realizează în mod pe baza unor proceduri recunoscute pe scară largă la nivel european și mondial [2-7]. Cu toate acestea, majoritatea codurilor seismice [8-10] Eurocode 8, NTC2018 sau P100-2019 nu oferă indicații clare cu privire la evaluarea efectelor asupra construcțiilor a componentelor verticale ale seismului și oferă formule de proiectare numai în ceea ce privește efectele componentei orizontale. În plus, metodologiile propuse de literatura științifică sunt reduse în ceea ce privește evaluarea avariilor clădirilor istorice cauzate de componentele seismice verticale, ceea ce subliniază necesitatea realizării unei calibrări numerice pe baza avariilor observate in aceste clădiri după cutremurele din trecut.

Teza a avut ca scop principal elaborarea unei proceduri de calcul structural ce ia în considerare fenomenele ce apar în cazul cutremurelor de suprafață, oferind astfel perspective importante în acest domeniu științific. Pornind de la această ipoteză, efectele cutremurului au fost evaluate analizând diverși parametrii. Rezultatele au fost obținute pentru două scenarii seismice diferite: numai pentru mișcările seismice orizontale respectiv pentru acțiunea combinata a componentelor orizontale și verticale ale terenului, specifice cutremurelor din zona Banat-Voiteg din anul 1991. Aceste rezultate au permis trasarea curbelor specifice de vulnerabilitate și fragilitate pentru clădirile de zidărie situate în zona epicentrală.

În cel de-al doilea capitol, a fost realizată o sinteza a cercetării actuale in literatura de specialitate in domeniul metodologiilor de evaluare a vulnerabilității seismice. În general, riscul seismic indică probabilitatea de a avea un eveniment (E) de o intensitate specifică (IM) într-o perioadă determinată (T) care provoacă o pierdere într-o anumită zonă. Mai exact, riscul seismic este conceput și cuantificat ca o combinație multifactorială de trei variabile aleatorii, precum pericolul (H), expunerea (E) și vulnerabilitatea (V) [11]. În ceea ce privește evaluarea vulnerabilității, în starea actuală, procedurile de calcul propuse în literatura de specialitate pot fi clasificate ca empirice, mecanice sau hibride.

Metodele empirice evaluează vulnerabilitatea complexelor de clădiri pe baza definiției claselor tipologice: tipul construcției, distribuția în plan și elevație a elementelor structurale, vechimea construcției și aspecte funcționale. În special, este o abordare empirica conform căreia nivelul de detaliu al analizei este adaptabil la gradul și calitatea informațiilor disponibile. În esență, aceste metode permit stabilirea unei legături între indicele de vulnerabilitate și avariile cauzate de cutremure. Cuantificarea avarilor se poate realiza prin definirea curbelor de vulnerabilitate tipologică sau, mai frecvent, prin matricele de probabilitate a avarilor (DPM) pentru o clasă determinată de vulnerabilitate, pe baza prelucrării statistice a avarilor cauzate de evenimentele care au avut loc. Procedurile empirice se bazează pe o evaluare vizuala a vulnerabilității induse de un scenariu seismic ipotetic de referință [12-15]. Cu toate acestea, aceste proceduri nu necesită un nivel larg de informații, ci o clasificare tipologică adecvată pentru a pune în aplicare un studiu preliminar rapid la scara urbana. Dintre metodologiile empirice, cea mai utilizată este "matricea daunelor probabile", "metoda indicelui de vulnerabilitate" [16, 17], respectiv "metoda curbelor de vulnerabilitate continuă" [18, 19].

Metodele mecanice sunt proceduri mai complexe decât cele anterioare, deoarece necesită un nivel de detaliu mai ridicat, astfel încât să se poată efectua simulări numerice

folosind o abordare mecanico-analitică. În aceasta metoda, se efectuează analize neliniare pentru a evalua răspunsul seismic al unei anumite structuri portante. Avariile asociate pot fi evaluate prin atingerea unei stări limită sau cu a unui mecanism de cedare al structurii. Metodele au fost dezvoltate in cadrul a diferite contracte de cercetare, precum RISC-UE [21], HAZUS sau HAZARD US [23].

Metodele hibride sunt derivate din combinația celor două metode definite anterior. Această abordare macroseismică se bazează pe definiția Scalei Macroseismice Europene EMS-98 [24], care definește implicit un model de vulnerabilitate .

Toate metodologiile prezentate vizează, în esență, o evaluare a vulnerabilității seismice, luând în considerare numai efectele generate de acțiunea seismică orizontală, neglijând efectele induse in structura de componenta verticală a undelor seismice.

Capitolul trei tratează în prima fază aspectele generale ale activității seismice in Romania si regiunea seismica Banat. Astfel, în Fig. 1, sunt prezentate plăcile tectonice și zonele epicentrale [25].



Figura 1: Plăcile tectonice din Romania (a) și zonele epicentrale (b)[25].

Teza de doctorat se concentrează pe zona seismică Banat, zona caracterizată printr-o rețea densă de falii seismice. Hipocentrele din această zona au fost estimate la adâncimi ce variază intre 5 km și 33 km [145]. In zona seismica Banat sunt definite trei zone cu seismicitate diferită, respective zona Sânnicolau Mare-Arad, zona Banloc-Voiteg, zona Oravița, pe baza distribuției cutremurelor care au avut loc cu magnitudinea Mw> 5,3 într-o perioadă cuprinsă între anii 1990 și 1995 (Fig. 2) [26].



Figura 2: Magnitudinea cutremurelor care au avut loc între anii 1988 și 2015 [26].

În cea de-a doua fază, a fost analizat castelul Banloc, clădire selectată datorită valențelor

arhitecturale și funcționale dar și datorită informațiilor care ne indica modul de avariere după cutremurul din anul 1991. Aceasta este situată în centrul comunei și este o clădire cu un plan de formă "U" construit la începutul secolului al XIX-lea. Din punct de vedere structural, castelul este o clădire impunătoare, având o dimensiune totală de 38,80 m x 24,20 m, cu ziduri groase de cărămidă plină. Clădirea are un parter, etaj intermediar și o șarpantă masivă din lemn. Pereții exteriori au o grosime de 1,30 m la parter, 0,90 m la etaj, în timp ce pereții interiori au o grosime de 0,80 m. Planșeele interioare sunt boltite cu o grosime de 0,25 m. Șarpanta este una rigidă, prezentând o tehnică de construcție specifică regiunii Banat [27].

Cutremurul ce a avut loc la Banloc în 07-12-1991 la o adâncime focală de 9 km, a avut magnitudinea de 5,5 pe scara Richter, si a constituit scenariul seismic de referință pentru evaluarea avariilor structurale. Distanță intre amplasament și epicentru a fost de 7 km. Intensitatea cutremurului a fost de VII-VIII conform scalei de intensitate Mercalli (MCS), conform Fig. 3 [28].



Figura 3: Identificarea geografică a evenimentului seismic are a avut loc în Banloc la 07-12-1991 [28].

In capitol se prezinta in mod detaliat avariilor produse in urma evenimentului seismic. Fiind un seism de suprafață, componenta seismică verticală a produs în acest caz un nivel de avariere al clădirii ridicat, în special in elementele portante orizontale: arce, bolti, planșee. Ulterior, odată cu apariția componentelor orizontale ale seismului, avarierea s-a extins și la pereții portanți (Fig. 4) [29].



(a) – Fațada nordică

(b) – Fațada nordică (vedere din curtea interioară)



(c) avarii etajul I (e) avarii bolti la etajul I Figura 4: Avarii identificate la Castelul Banloc după cutremurul din 1991 [29].

Analiza răspunsului seismic al clădirii clădirii a fost realizata cu programul de analiza dinamica neliniara DIANA FEA [30]. Analiza clădirilor istorice din zidărie reprezintă o problemă complexă care depinde de numeroși factori care pot influența în mod semnificativ rezultatele obținute. Această problemă este rezolvata luând în considerare două aspecte principale, precum (i) simplificarea modelului geometric și (ii) idealizarea proprietăților fizico-mecanice ale materialelor. Discretizarea utilizata in analiza numerica neliniara a Castelului Banloc este prezentata în Fig. 5. Discretizarea structurii s-a realizat cu elemente de suprafață interconectate in 255000 de noduri.



Figura 5: Discretizarea Castelul Banloc in analiza dinamica neliniara

Deoarece proprietățile fizico-mecanice ale materialelor din clădirile de patrimoniu din Banat sunt similare celor din partea de nord a Italiei, caracteristicile mecanice ale zidăriei au fost adoptate, din Codul italian [10], prezentate în tabelul 1.

Mechanical Properties								
Modulus of elasticity	E [N/mm ²]	1500						
Shear modulus	G [N/mm ²]	500						
Compressive strength	$f_m [\text{N/mm}^2]$	2.40						
Tensile strength	f_t [N/mm ²]	0.24						
Tangential strength	$ au_0 [\mathrm{N/mm^2}]$	0.06						
Specific weight	w [KN/m ³]	18						
Poisson ratio	ν[-]	0.20						
Fracture energy (compression)	G_{fc} [N/mm]	4.64						
Fracture energy – Mode I (tensile)	G_{ft} [N/mm]	0.012						

Tabelul 1. Proprietăți mecanice ale zidăriei [10].

Analiza dinamică neliniară s-a realizat pe baza accelerogramele înregistrate ale cutremurului Banat-Voiteg din anul 1991. Analiza dinamica neliniara a fost realizata pentru o perioada de timp de 10 secunde [31]. In figura 6, sunt reprezentate grafic raporturile spectrale V/H ale accelerațiilor în cele două direcții X și Y si componentele accelerațiilor după cele 3 direcții. Particular pentru seismele aproape de sursa din Banat, raportul intre valoarea maxima a componentei verticale si a componentei orizontale este mai mare de 1, depășind limita de 2/3 observata de Newmark și Hall [32] (fig. 6).



Figura 6: Componentele acțiunii seismice (a-c) și (d) Rapoarte spectrale intre componentele verticale si orizontale ale seismului

Capitolul patru prezinta rezultatele obținute în urma analizelor dinamice numerice. A fost evaluat comportamentul global al structurii pentru două scenarii seismice distincte : (i)

H+V – clădirea este solicitata de componenta orizontala si componenta verticala a seismului si (ii) H – clădirea este solicitata numai de componenta orizontala a acțiunii seismice .

Analiza oferă rezultate originale despre : (i) capacitatea de disipare a energiei a clădirii; (ii) degradarea de rigiditate; (iii) evoluția eforturilor secționale in structura [8], [9].

În primul rând, au fost analizate rezultatele analizei statice si dinamice, ținând cont de scenariile menționate mai sus pentru a evidenția mai bine influența componentei verticale a seismului (VGM) Fig. 7 [33-37]. Particularizând rezultatele obținute s-a observat ca prezența componentei verticale a produs o variație semnificativă a forțelor axiale in pereți comparativ cu scenariul in care aceasta componentă a fost neglijată [scenariul (H)]. Se observa ca la t=1,68 sec, care corespunde vârfului de accelerație verticală, valoarea forței axiale pentru scenariu (H+V) a fost mai mare decât scenariul corespunzător (H) [33].



Figura 7: Analiza comparativă a forțelor tăietoare de baza si a forțelor axiale pentru cele două scenarii seismice analizate

Influenta componentei seismice verticale asupra structurii a fost analizata si din punct de vedere al deplasărilor. Au fost selectate 38 de puncte de monitorizare, 19 pentru fiecare etaj. Fig.8 prezinta punctele de monitorizare ale celui de-al doilea nivel. Punctele de monitorizare de la parter sunt amplasate similar.



Figura 8: Puncte de monitorizare selectate pentru clădirea studiului de caz.

Tabelul 2 arată indica valorile deplasările ale tuturor punctelor de monitorizare situate la etajul al doilea al clădirii. O atenție deosebită a fost acordata monitorizării punctelor amplasate pe boltă, si pe pereții de la colturile clădirii.

Decition	MP	Displ. (H+V) [cm]			Displ. (H) [cm]			Δx	Δγ	$\Delta v_{ert.}$
rosition		X	Y	Vert.	Х	Y	Vert.	[%]	[%]	[%]
V	7352	2.74	3.93	0.77	1.74	0.73	0.08	57	438	863
WP	12789	1.79	0.82	0.33	1.74	0.80	0.18	3	2	83
WP	12790	2.31	0.32	0.02	2.31	0.29	0.02	-	10	-
WP	14044	2.31	1.24	0.11	2.29	1.17	0.08	1	6	38
WP	14935	3.24	0.85	0.04	3.12	0.80	0.03	4	6	33
WP	16025	1.78	1.21	0.03	1.75	1.17	0.00	2	3	-
WP	16424	1.73	1.16	0.04	1.71	1.10	0.02	1	5	100
WP	16425	1.71	1.46	0.06	1.68	1.43	0.04	2	2	50
WP	16446	1.58	1.40	0.05	1.57	1.30	0.02	1	8	150
WP	16548	1.86	1.51	0.06	1.87	1.41	0.03	1	7	100
WP	16707	1.11	0.64	0.08	1.12	0.58	0.05	1	10	60
WP	16794	1.16	0.45	0.06	1.16	0.44	0.02	-	2	200
WP	19087	3.22	0.68	0.04	3.14	0.61	0.01	3	11	300
WP	19568	1.08	1.12	0.06	1.08	1.04	0.03	-	8	100
WP	19821	1.26	0.55	0.12	1.22	0.50	0.05	3	10	140
WP	20117	2.65	0.51	0.12	2.60	0.43	0.05	2	19	140
WP	36082	1.43	0.84	0.12	1.31	0.78	0.06	9	8	100
WP	48543	1.43	1.42	0.05	1.43	1.34	0.04	-	6	25
WP	49962	2.78	1.64	0.04	2.74	1.57	0.08	1	4	50

Tabelul 2. Deplasări ale punctelor selectate

Prin compararea celor două scenarii analizate (H) și (H+V) s-a prezentat modul in care componentele verticale seismice modifica răspunsul clădirii fata de cazul in care clădirea este solicitata numai la acțiuni orizontale.

X-direction									
		Positive direction (X ⁺)			_	Negative direction (X ⁻)			
Pos.	Node ID	dy	du	Fmax	μ^+ factor	dy	du	Fmax	µ ⁻ factor
		[cm]	[cm]	[KN]		[cm]	[cm]	[KN]	
V	7352	0.37	1.46	2401.71	2.95	-0.31	-1.37	1622.06	3.35
WP	12789	0.25	1.33	2362.21	4.32	-0.25	-1.86	1622.10	6.44
WP	12790	0.65	2.65	2501.71	3.05	-0.50	-1.63	1622.06	2.26
WP	14044	0.18	0.96	2401.71	4.30	-0.22	-1.27	1622.06	4.80
WP	14935	0.25	0.64	2362.21	1.56	-0.20	-1.20	1264.49	5.00
WP	16025	0.15	1.32	2401.71	7.83	-0.10	-0.66	1622.06	5.55
WP	16424	0.20	1.14	2362.21	4.70	-0.20	-0.69	1622.06	2.45
WP	16425	0.10	0.87	2401.71	7.70	-0.10	-0.60	1622.00	5.00
WP	16446	0.15	1.01	2362.00	5.73	-0.15	-0.60	1622.00	3.00
WP	16548	0.20	1.01	2401.71	4.05	-0.20	-1.00	1622.00	4.00
WP	16707	0.20	1.01	2401.71	4.05	-0.20	-0.61	1622.00	2.07
WP	16794	0.20	1.01	2401.71	4.05	-0.20	-0.61	1622.00	2.07
WP	19087	0.40	2.15	2501.71	4.38	-0.20	-1.20	1646.94	5.00
WP	19568	0.15	0.87	2401.00	4.80	-0.15	-0.50	1646.94	2.33
WP	19821	0.15	1.24	2401.71	7.30	-0.15	-0.85	1622.06	4.65
WP	20117	0.22	1.83	2401.71	7.32	-0.15	-0.40	1700.00	1.67
WP	36082	0.11	0.62	2462.00	4.64	-0.10	-0.57	1622.00	4.66
WP	48543	0.30	1.56	2501.00	4.20	-0.25	-1.66	1622.06	5.64
WP	49662	0.20	1.55	2362.00	6.75	-0.15	-1.20	1622.06	7.00
Minimum		0.10	0.62	2362.00	1.56	-0.10	-0.50	1264.49	2.07

Tabelul 3. Valorile deplasărilor orizontale pentru direcția de analiză OX.

Tabelul 4. Valorile deplasărilor orizontale pentru direcția de analiză OY

					Y-direction				
Positive direction (Y ⁺)			tion (Y ⁺)		Negative direction (Y ⁻)				
Pos.	Node ID	dy	du	Fmax	μ^+ factor	dy	du	Fmax	µ factor
		[cm]	[cm]	[KN]		[cm]	[cm]	[KN]	
V	7352	1.35	3.93	5456.92	1.68	-1.07	-2.62	3659.85	1.39
WP	12789	0.23	1.78	3316.64	3.53	-0.17	-1.11	3659.85	3.17
WP	12790	0.30	2.25	3316.64	3.46	-0.25	-1.87	3659.85	3.46
WP	14044	0.30	1.97	3316.64	3.18	-0.20	-1.22	3765.85	3.04
WP	14935	0.20	1.70	3316.63	7.48	-0.20	-1.41	3765.85	6.05
WP	16025	0.30	2.40	3316.00	7.00	-0.30	-1.59	3700.00	4.30
WP	16424	0.50	3.52	3416.64	6.03	-0.50	-2.77	3750.00	4.54
WP	16425	0.40	3.09	3416.64	6.73	-0.40	-2.34	3800.00	4.86
WP	16446	0.30	2.09	3416.64	5.97	-0.30	-2.34	3800.00	6.80
WP	16548	0.30	2.39	3416.64	6.97	-0.30	-1.62	3659.85	4.40
WP	16707	0.60	3.77	3416.64	5.28	-0.60	-3.28	3800.00	4.47
WP	16794	0.50	2.83	3416.64	4.66	-0.40	-3.28	3800.00	7.20
WP	19087	0.22	1.57	5556.92	6.15	-0.20	-1.91	3759.00	8.53
WP	19568	1.63	5.39	3316.00	2.31	-1.20	-5.22	3900.00	3.35
WP	19821	0.30	1.83	3466.00	5.11	-0.40	-1.49	3659.85	2.73
WP	20117	0.20	1.77	3416.64	7.84	-0.30	-2.40	3600.00	7.00
WP	36082	0.60	1.72	3416.64	1.87	-0.70	-2.02	3600.00	1.89
WP	48543	0.20	1.72	3316.00	7.61	-0.25	-2.24	3700.00	7.96
WP	49662	0.25	2.13	3316.00	7.52	-0.28	-2.45	3650.00	7.75
Minimum		0.10	1.57	3316.00	1.68	-0.17	-1.11	3600.00	1.39

Valoarea minima determinata a ductilitatii de deplasare a fost estimata pentru cele două direcții de analiză, este de 1,39.

Analiza degradării de rigiditate este foarte importanta, deoarece oferă indicații privind nivelul

de siguranță al sistemului structural și a capacitații de disipare a energiei seismice. Degradarea rigidității structurii a fost calculată utilizând ecuația 1 [38]:

$$K_{i} = \frac{|+F_{\max,i}| - |-F_{\max,i}|}{|+\Delta_{\max,i}| - |-\Delta_{\max,i}|}$$
(1)

unde: $F_{max,i}$ este valoarea absolută a forțelor laterale la vârf și $\Delta_{max,i}$ reprezintă valoarea absolută corespunzătoare deplasărilor orizontale pozitive și negative asociate ciclului i. Rezultatele au fost prezentate în Fig. 9



Figura 9: Reducerea rigidității ciclice în direcția X și (b) direcția Y.

Pentru a înțelege mai bine răspunsul seismic al clădirii, factorul de comportare a fost determinat in funcție de forțele seismice [39] și de energia seismica disipată [40], [41]. În special, au fost analizate trei cazuri distincte: (i) cazul in care forțele de întindere verticale au fost maxime, estimate la 2 sec, care corespunde unui grad de disipare a energiei seismice de 33 %; (ii) cazul in care se înregistrează compresiune maximă in pereți datorată mișcării seismice orizontale si verticale, estimată la 3 sec, care corespunde unui procent de disipare a energiei seismice de 50 % din capacitatea structurii și (iii) cazul când se atinge limita maxima de disipare a energiei seismice la t=6 sec.

Fig. 10 prezintă grafic variația ductilității de deplasare - factorul de comportament, pentru un grad de disipare a energiei seismice de 33% .



Figura 10: Relația ductilitate de deplasare-factor de comportare pentru un gard de disipare a energiei seismice de 33%

Analizele prin metode bazate pe forte au indicat valori minime ale factorului de comportare q=2.50, in timp ce prin metode energetice s-a determinat o valoare minima q=1.50.

In teza se prezinta comparativ variația forțelor axiale în pereții selectați pentru cele doua scenarii seismice (Fig. 11) [33].



Figura 11: Evoluția in timp a valorii forței axială normalizată în cazul unui eveniment seismic pentru pereții de zidărie în direcțiile X (a) și Y (b).

In Fig. 12, sunt evidențiate variațiile forțelor tăietoare în pereți pentru cele doua scenarii seismice.



Rezultatele indica faptul că accelerația seismică verticală în primele două secunde nu produc fisuri diagonale de forfecare. Ele apar după 2 secunde, odată cu apariția componentelor seismice orizontale. [Fig. 12 (d-f)].

Modurile de cedare identificate ale pereților solicitați seismic in planul lor sunt prezentate in figura 13.



Figura 13: Modurile de cedare in planul pereților si curbele de capacitate.

Cea de-a treia analiză, identifica mecanismele de cedare ale pereților în afara planului în cazul cutremurelor de suprafață. Mecanismele de cedare sunt particulare deoarece sunt influențate de componentele verticale.

Fațada de nord a fost analizată deoarece a înregistrat mecanisme de cedare în afara planului după cutremurul din Banat-Voiteg. Mecanismele posibile de cedare au fost analizate utilizând programul de calcul neliniar 3Muri [46] si sunt prezentate în Fig. 14.



Figura 14: Mecanisme de cedare in afara planului. Valorile multiplicatorului a₀, de activare a mecanismelor de cedare in afara planului pereților

În final, avariile structurale obținute în urma simulărilor numerice au fost comparate cu cele reale, observate la castel după cutremurul din 1991. S-a observat că componenta verticala a seismului a indus in structura o stare de întindere si compresiune brusca care a afectat ciclic capacitatea portantă a materialului, generând astfel in structura avarii specifice. Componenta verticală a seismului a modificat local substanțial distribuția eforturilor de forfecare [43]. Deoarece componenta seismica verticală a acțiunii seismice își schimba direcția si intensitatea, ea provoacă o variație continuă a efortului axial, care influențează la rândul ei rezistența zidului la forfecare. O reprezentare a calibrării avariilor între cele obținute in timpul simulărilor numerice si cele observate la fața locului este prezentată în Fig. 15.





(c)



Figura 15: Corelarea avariilor obținute în timpul simulărilor numerice și cele observate la fața locului. Evoluția degradărilor in timpul acțiunii seismice

Se remarcă faptul că avariile obținute în urma simulărilor numerice sunt similare de cele înregistrate de clădirea existenta. Se poate observa cum componentele verticale ale cutremurului în primele două secunde afectează predominant structurile orizontale: planșee, arce, bolti si produc fisuri verticale in pereți. Ulterior, odată cu apariția undelor seismice orizontale, avariile încep sa apară fisuri diagonale si in pereții portanți [47].

Capitolul cinci propune in prima parte, pe baza simulărilor numerice efectuate, curbele de fragilitate și vulnerabilitate pentru aceste clădiri solicitate de cutremure de suprafață. Curbele de fragilitate au fost reprezentate grafic în Fig. 16.





Figura 16: Curbele de fragilitate dezvoltate pentru scenariul (H) - (linie continuă) și (V) - (linie punctată) pentru un nivel diferit al capacitații portante.

În a doua parte a capitolului, au fost trasate curbele de vulnerabilitate, propunând o formulare simplificată privind evaluarea gradului mediu de avarie. Procedura propusă de [49] nu este aplicabilă tuturor sistemelor structurale, deoarece tinde să subestimeze avariile așteptate, deoarece este calibrată pe un set de clădiri care sunt tipologic și structural diferite de ceea ce se găsesc în general in zona seismică Banat. Studiile propuse de [50-52], au sugerat unele modificări la formularea propusă inițial de [49] pentru evaluarea gradului mediu de avarie. S-a observat că avariile post-cutremur constatate în analizele obținute prin utilizarea abordării mecanice nu sunt in concordanta cu avariile obținute folosind formula generala.

S-a observat că pentru un cutremur de mică adâncime, cu o magnitudine Mw = 5,5, intensitatea seismică a fost VII-VIII, ceea ce corespunde unor grade de avariere D3-D4 (multe clădiri au fisuri grave localizate în zidurile portante). Curbele de vulnerabilitate conform formulei inițiale propuse de [53] luând în considerare cele doua scenarii sunt prezentate în Fig. 17.



Figura 17: Curbele de fragilitate [53].

Formulele propuse de [53] nu au surprins pe deplin nivelul de avariere care a avut loc pentru intensitatea macroseismică egală cu VII-VIII, subestimând daunele reale detectate după evenimentul seismic din anul 1991. Teza propune o noi valori ale factorilor din formula matematică de calcul a gradului mediu de avariere. Astfel se propune: (i) o noua valoare a factorului de corecție relativa la concavitatea curbei egală cu 14,00; (ii) o noua valoare a factorului de corecție care ia în considerare variația pantei curbei egală cu 12.10; (iii) valoarea factorului de comportament Q = 1,5, rezultata din analiza time-history. Curbele de vulnerabilitate sunt prezentate în Fig. 18.



Figura 18: Curbe de vulnerabilitate tipologice calibrate [54].

Formula propusă, daca e comparata cu formula din metoda propusă de [54] oferă rezultate mai aproape de comportarea reala a structurii solicitata de un cutremur de suprafață. Metodologia propusă în această teză poate fi utilizată in evaluarea vulnerabilității seismice a altor clădiri istorice de zidărie caracterizate de aceleași seisme si tehnici de construcție. Cercetările indica in mod clar ca efectele undelor seismice verticale ale cutremurelor de suprafață asupra clădirilor istorice, constituie un factor de risc ridicat ce trebuie luat în considerare în analiza si proiectarea seismica a clădirilor din zidărie de cărămidă nearmata.

Capitolul șase prezintă principalele concluzii ale tezei. Teza de doctorat continua cu o atenție deosebită tema de cercetare începută cu ani în urmă de către prof. V. Gioncu privind comportarea seismică a clădirilor situate în zone epicentrale caracterizate de seisme de suprafață.

Studiile oferă, pentru întreaga comunitate științifică, un punct de plecare important legat de evaluarea vulnerabilității seismice a clădirilor istorice de zidărie solicitate la acțiuni seismice de suprafață.

Metodologia propusă pentru evaluarea vulnerabilității seismice oferă o imagine de ansamblu care sta la baza implementării in viitor in codurile de proiectare a unor metode de estimare a efectelor induse de componentele verticale seismice asupra structurilor de zidărie nearmata.

Contribuțiile personale :

- metodologia propusă poate fi utilizată pentru evaluarea răspunsului seismic al unor clădiri istorice din zidărie din Europa cu tehnici similare de construcție cu cele din regiunea Banatului, solicitate la acțiuni seismice de suprafață de intensitate medie;
- furnizează informații privind comportarea dinamica a clădirii, pentru un raport intre valoarea undelor seismice verticale si orizontale V/H>1 ;
- estimează efectele induse de componenta seismică verticala asupra ductilității rezistentei si rigidizații clădirii;
- oferă informații originale despre ordinea de apariție a avariilor structurale produse de componentele verticale ale cutremurelor;
- identifica mecanismele de cedare particulare ale pereților in planul lor si în afara planului sub acțiunea combinata a componentelor seismice orizontale si verticale;

- propune o metodologie pentru determinarea posibilelor mecanisme de cedare în afara planului pereților cauzate de componenta verticala a seismelor;
- propune curbe de fragilitate și vulnerabilitate calibrate pe baza avariilor reale înregistrate de clădire după evenimentul seismic din Banloc din anul 1991.

Lucrările publicate au fost diseminate în 26 de lucrări științifice și 5 participări la conferințe internaționale. Dintre acestea, 6 lucrări au fost publicate în reviste științifice indexate Web of Science și 9 în volumele unor conferințe indexate Web of Science. Cele 26 de lucrări au fost citate la rândul lor în 92 de lucrări indexate Web of Science și 170 de lucrări indexate Scopus.

În concluzie, teza de doctorat aduce contribuții importante în domeniul evaluării vulnerabilității seismice a clădirilor istorice din zidărie de cărămidă neconfinată, deschizând totodată viitoare direcții de cercetare de mare interes pentru reducerea riscului în zonele seismice caracterizate de cutremure de suprafață.

BIBLIOGRAFIE

[1] M. Indirli, L.A.S. Kouris, A. Formisano, R.P. Borg, F.M. Mazzolani, Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: The case study of the historical centers of L'Aquila and Castelvecchio Subequo, International Journal of Architectural Heritage, 7, 536–578, 2013.

[2] P.G. Asteris, M.P. Chronopoulos, C.Z. Chrysostomou, H. Varum, V. Plevris, N. Kyriakides, V. Silva, Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems, Engineering Structures, 62-63, 118-134, 2014.

[3] L.F. Ramos, P.B. Lourenço, Modeling and vulnerability of historical city centers in seismic areas: A case study in Lisbon, Engineering Structures, 26, 1295–1310, 2004.

[4] P.B. Lourenço, J.A. Roque, Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings, Construction and Building Materials, 20, 200-208, 2006.

[5] N. Chieffo, I. Onescu, A. Formisano, M. Marius, Empirical-mechanical Seismic Vulnerability Analysis Method for Masonry Buildings in Timişoara: Validation based on the 2009 Italian Earthquake, The Open Civil Engineering Journal, 314-333, 2020.

[6] M. Mosoarca, V. Gioncu, Assessment and mitigation procedures for historical buildings situated in seismic areas, in: Proceedings of the International Conference on Risk Management, Assessment and Mitigation, RIMA'10, 27-32, 2010.

[7] F. Clementi, V. Gazzani, M. Poiani, S. Lenci, Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling, Journal of Building Engineering, 8, 29–47, 2016.

[8] Eurocode 8, European Standard EN 1998-3:2005: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, Comite Europeen de Normalisation, Brussels, 2005.

[9] P100-1/2013 Cod de proiectare seismică – Partea I–Prevederi de proiectare pentru clădiri, O.M.D.R.A.P. nr. 2.956/18.11.2019, Monitorul Oficial al RomânieiNr./dată M.Of., p I, nr.928/18.11.2019.

[10] DM 17/01/2018, Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" - NTC 2018, 1–198, 2018 (in Italian).

[11] O.D. Cardona, M.G. Ordaz, L.E. Yamin, M.C. Marulanda, A.H. Barbat, Earthquake loss assessment for integrated disaster risk management, Journal of Earthquake Engineering, 12, 48–59, 2008.

[12] R. V. Whitman, J.W. Reed, S.-T. Hong, Earthquake Damage Probability Matrices, Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 2, 2531–2540, 1974.

[13] F. Braga, D. Liberatore, M. Dolce, Fast and realiable damage estimation for optimal relief operations, in: International Symposium on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas (Zurich), 145–151, 1984.

[14] G. Di Pasquale, G. Orsini, R.W. Romeo, New developments in seismic risk assessment in Italy, Bulletin of Earthquake Engineering, 3, 101-128, 2005.

[15] M. Dolce, A. Kappos, A. Masi, G. Penelis, M. Vona, Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies, Engineering Structures, 28, 357–371, 2006.

- [16] D. Benedetti and V. Petrini, "On the seismic vulnerability of masonry buildings: an evaluation method (in Italian)," L'Industria delle Costruzioni, vol. 149, pp. 66–74, 1984.
- [17] V. Petrini, "Rischio Sismico Di Edifici Pubblici, Parte I: Aspetti Metodologici," in Proceedings of CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, 1993.
- [18] F. Sabetta, A. Goretti, and A. Lucantoni, "Empirical fragility curves from damage surveys and estimated strong ground motion," in 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [19] A. Formisano, R. Landolfo, F. Mazzolani, and G. Florio, "A quick methodology for seismic vulnerability assessement of historical masonry aggregates," COST Action C26: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events, no. September, 2010.

[20] A. Singhal, A.S. Kiremidjian, Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, Journal of Structural Engineering, 122, 1459–1467, 2002.

[21] P. Moroux et al., "The European Risk-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios," in 13th World Conference on Earthquake Engineering, no. 423, 2004.

[22] P. Fajfar, Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 979–993, 1999.

[23] F. E. M. Agency, FEMA Mitigation Division. HAZUS-MH MR3: Multi-Hazard Loss Estimation Methodology: Technical Manual. Washington DC, 2003.

[24] G. Grünthal, European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), Cahiers du Centre Européen de Géodynamiquet et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamiquet et de Séismologie, Luxembourg, 99, 1998.

[25] A. Bala, D. Toma-Danila, M. Radulian, Focal mechanisms in Romania: statistical features representative for earthquake-prone areas and spatial correlations with tectonic provinces, Acta Geodaetica et Geophysica, 54, 263-286, 2019.

[26] E. Oros, Seismological DataBase for Banat Seismic Region (Romania)-Part 1: The Parametric Earthquake Catalogue, Romanian Journal of Physics, 53 955–964, 2008.

[27] Castelul Banloc, Wikiwand, available at: wikiwand.com (accessed September 25, 2020).

[28] Earthquake Selection WebGIS App (BIGSEES), available at: https://infp.maps.arcgis.com (accessed October 20, 2020).

[29] IPROTIM, Expertiza cu principii de consolidare (In Romanian), 1990.

[30] DIANA FEA, Diana User's Manual, Release 10.2, 2017.

[31] I.S. Borcia, I. Craifaleanu, E.N. Tanase, E.I. Praun, Example of use of the SM-ROM-GL DataBase, in: 1st National Conference on Earthquake Engineering and Seismology 1CNISS, Bucharest, Romania, 1, 165-172, 2014.

[32] N. Newmark, W. Hall, Earthquake Spectra and Design, EERI Monographs, 103 pages, 1982.

[33] F. Di Michele, C. Cantagallo, E. Spacone, Effects of the vertical seismic component on seismic performance of an unreinforced masonry structures, Bulletin of Earthquake Engineering, 18,1635–1656, 2020.

[34] P.P. Diotallevi, L. Landi, Response of RC structures subjected to horizontal and vertical ground motions, in: 8th US National Conference on Earthquake Engineering, 2006.

[35] G. Rinaldin, M. Fasan, S. Noé, C. Amadio, The influence of earthquake vertical component on

the seismic response of masonry structures, Engineering Structures, 185,184–193, 2019.

[36] M. Acito, M. Bocciarelli, C. Chesi, G. Milani, Collapse of the clock tower in Finale Emilia after the May 2012 Emilia Romagna earthquake sequence: Numerical insight, Engineering Structures, 72, 70-91, 2014.

[37] N. Chieffo, A. Formisano, M. Mosoarca, P.B. Lourenço, Seismic vulnerability assessment of a Romanian historical masonry building under near-source earthquake, in: XI International Conference on Structural Dynamic, EURODYN20, 23-26 November, Athens, Greece, 4957-4971, 2020.

[38] J. Ben Gu, Y. Tao, R. Xin, Z. Yang, Q.X. Shi, Seismic Performance of Multistorey Masonry Structure with Openings Repaired with CFRP Grid, Advances in Civil Engineering, Article ID 4374876, 11, 2018.

[39] D. Zonta, G. Zanardo, C. Modena, Experimental evaluation of the ductility of a reduced-scale reinforced masonry building, Materials and Structures, 34, 636–644, 2001.

[40] M. Tomaževič, P. Weiss, Displacement capacity of masonry buildings as a basis for the assessment of behavior factor: An experimental study, Bulletin of Earthquake Engineering, 8, 1267-1294, 2010.

[41] M. Tomaževič, V. Bosiljkov, P. Weiss, Structural Behavior Factor for Masonry Structures, in: Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2642, 2004.

[42] V. Turnšek, F. Čačovič, Some experimental results on the strength of brick masonry walls, in: Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference, 149–156, 1971.

[43] N. Augenti, Il calcolo sismico degli edifici in muratura, 1st ed., Turin, Italy, 2004 (in Italian).

[44] M. Mariani, F. Pugi, A. Francioso, Vertical component of the seismic action: amplified vulnerability of existing masonry buildings, in: Multibody Dynamics Conference ECCOMAS19, July 15-18, Duisburg, Germany, 3807–3835, 2019.

[45] F. Comodini, G. Fagotti, M. Mezzi, V.R. Vecchia, Effects of the earthquake vertical component in masonry buildings : vertical collapse mechanisms?, in: Proceedings of the 17th International Brick/Block Masonry Conference (17thIB2MaC 2020), July 5-8, Kraków, Poland, 2020.

[46] S.T.A data srl, 3Muri 10.9.0 - User Manual, (n.d.).

[47] V. Gioncu, F.M. Mazzolani, Earthquake Engineering for Structural Design, Spon Press (imprint of the Taylor & Francis Group), 581 pages, 2011, ISBN 0-203-84889-6.

[48] S. Lagomarsino, S. Cattari, PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 13–47, 2015.

[49] S. Lagomarsino, S. Giovinazzi, Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 4, 415–443, 2006.

[50] N. Chieffo, A. Formisano, T. Miguel Ferreira, Damage scenario-based approach and retrofitting strategies for seismic risk mitigation: an application to the historical Centre of Sant'Antimo (Italy), European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, doi:10.1080/19648189.2019.1596164.

[51] N. Chieffo, F. Clementi, A. Formisano, S. Lenci, Comparative fragility methods for seismic assessment of masonry buildings located in Muccia (Italy), Journal of Building Engineering, 25, 100813, 2019.

[52] M. Mosoarca, I. Onescu, E. Onescu, B. Azap, N. Chieffo, M. Szitar-Sirbu, Seismic vulnerability assessment for the historical areas of the Timisoara city, Romania, Engineering Failure Analysis, 101, 86–112, 2019.

[53] S. Lagomarsino, On the vulnerability assessment of monumental buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 4, 445–463, 2006.

[54] I. Apostol, Seismic vulnerability assessment of historical urban centres, PhD Thesis, Politehnica University of Timisoara, 2020.