

CONSOLIDAREA CLĂDIRILOR ISTORICE DIN ZIDĂRIE CU MATERIALE COMPOZITE ARMATE CU ȚESĂTURI

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie civilă și Instalații

autor arh. Dragoș Petru BOCAN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Adrian-Liviu CIUTINA

luna 12 anul 2024

Consolidarea seismică a structurilor istorice din zidărie reprezintă un subiect complex de cercetare, oferind multiple oportunități datorită diversității strategiilor de consolidare care pot fi utilizate în prezent, variind de la tehnicile și materialele tradiționale la cele contemporane.

Cu toate acestea, structurile din zidărie existente sau de patrimoniu ridică o serie de provocări. Complexitatea acestui subiect provine din faptul că majoritatea clădirilor istorice sunt decorate, fie la exterior, fie uneori la interior. Prin urmare, conservarea esteticii și a elementelor originale interioare și exterioare este crucială. Intervențiile la interior ar putea perturba aceste elemente decorative, ceea ce ar conduce la pierderi de valori culturale și istorice. În mod similar, pentru clădirile publice cu decorațiuni exterioare, intervențiile ar putea fi realizate pe interior, mai ales în cazul în care aspectul fațadei este esențial pentru contextul urban adiacent. În acest context au fost analizate soluțiile utile de consolidare.

Având în vedere aceste aspecte, s-a realizat un studiu asupra structurilor istorice din zidărie caracteristice orașului Timișoara, situat în partea de vest a României. Studiul subliniază importanța îmbunătățirii comportamentului structural al acestui tip de clădiri, menținând în același timp autenticitatea și estetica clădirii. Principalul obiectiv a fost testarea și înțelegerea comportamentului soluțiilor de consolidare, care pot să asigure autenticitatea clădirilor istorice și să limiteze intervenția de consolidare la suprafețele cele mai adaptate, păstrând decorațiunile originale și aspectul construcției.

Teza a fost organizată în cinci capitole, care urmăresc obiectivele principale definite și abordează consolidarea structurilor istorice din zidărie din două perspective, cea structurală și cea social-estetică. Studiul poate fi împărțit în trei părți principale:

1. Prima parte prezintă analiza mediului construit actual și a literaturii de specialitate disponibile pe acest subiect. Este menită să evidențieze principalele caracteristici ale structurilor istorice din zidărie, caracteristicile geometrice și tehnicile de construcție. În partea finală sunt prezentate soluțiile de consolidare frecvent utilizate și sunt evidențiate diferențele principale între acestea.
2. A doua parte prezintă comportamentul structural al specimenelor de zidărie istorică, realizate din cărămizi caracteristice perioadei de construcție, recuperate și reconstruite cu mortar pe bază de var, supuse încărcărilor la forfecare plană. Principalul scop a fost identificarea unor variante de consolidare acceptabile din punct de vedere estetic și social, care să contribuie la reabilitarea structurală a clădirilor istorice din zidărie, păstrând în același timp valoarea lor arhitecturală. Pentru consolidare au fost aplicate armături din plasă de fibre de oțel într-o matrice de mortar de var, amplasată pe una sau ambele fețe. Specimenele au fost testate la forfecare în condiții de laborator, conform standardului ASTM E519/E519M-15, iar rezultatele înregistrate au fost analizate pentru a observa performanța soluțiilor propuse din

punct de vedere al rezistenței, rigidității și ductilității.

3. În ultima parte, s-au realizat simulări numerice pe panouri de zidărie și respectiv pe o structură reprezentativă pentru a înțelege efectul soluțiilor de consolidare la scara unui imobil. Rezultatele înregistrate au fost analizate și interpretate pentru a observa performanțele soluțiilor propuse în termeni de rezistență și rigiditate și pentru validarea rezultatelor înregistrate în timpul testelor de laborator în proiectele de consolidare a structurilor istorice din zidărie.

Primul capitol prezintă o privire de ansamblu asupra studiului propus, evidențiind contextul, scopul principal și necesitatea intervenției.

La necesitatea intervențiilor pot contribui o serie de factori:

1. Degradarea indusă de activitatea seismică
2. Degradarea climatică, care este graduală prin natura sa, dar care poate conduce la evenimente de cedare bruscă, cum ar fi prăbușirea acoperișurilor sau a cornișelor din cauza acțiunii apei și umezelii asupra structurii acoperișului, sau chiar desprinderea bruscă a tencuielii și decorațiunilor care sunt deja avariate, în cele mai multe dintre cazuri în timpul furtunilor sau a înghețului.
3. Tăierea fundației, adesea cauzată de sisteme de colectare a apei pluviale deteriorate.
4. Intervențiile umane, precum demolarea fără discernământ a unor elemente structurale sau utilizarea materialelor incompatibile.

Capitolul se concentrează pe regiunea caracteristică studiului, respectiv Banat și în particular orașul Timișoara, situate în Europa de Est, în partea vestică a României [1].

Acțiunea seismică este semnificativă în această zonă, iar seismele sunt periculoase și prin natura lor imprevizibilă. Ele pot conduce la daune considerabile pentru clădirile din zidărie nearmată, la pierderi de vieți omenești și la pierderea unor elemente de valoare culturală ale clădirilor istorice sau a zonelor urbane. În România, regiunea Banat este cunoscută ca o zonă seismică cu caracteristici proprii, cu cutremure de perioadă scurtă de oscilație (de la sub 0,2 secunde la 0,3 secunde) afectând structurile rigide din zidărie, având un ciclu inițial puternic urmat de cicluri de intensitate mai redusă și componente orizontale și verticale cu accelerații comparabile.

Acest aspect este important în contextul în care centrul orașului Timișoara reprezintă o zonă istorică protejată supusă conservării. Aceeași situație este întâlnită și în orașele importante învecinate. De aici rezultă necesitatea stringentă a intervențiilor de consolidare a structurilor din zidărie în regiunile expuse la riscuri seismice, păstrând în același timp expresia arhitecturală și valoarea culturală a clădirilor istorice din cărămidă. Filosofia contemporană de conservare pune accent pe minimizarea alterării caracterului original al monumentelor, descurajând astfel utilizarea materialelor cu rezistență foarte mare și a adaosurilor rigide, considerate inadecvate pentru astfel de aplicații [2]. Studiul prezentat în manuscrisul tezei încearcă să armonizeze necesitatea consolidării structurale cu principiile ICOMOS [3], [4], [5], [6], [7], [8].

„Carta Internațională pentru Conservarea și Restaurarea Monumentelor și Siturilor (Carta de la Veneția 1964)” [3], „Declarația de la Amsterdam” [4], „Documentul de la Nara privind autenticitatea” [5] și „Carta de la Burra” [7] subliniază importanța valorii culturale a structurilor de patrimoniu, contextul social și fizic al clădirii și, în cele din urmă, consecințele sociale ale intervențiilor, în special în cazul proprietarilor și chiriașilor, punând accent pe importanța păstrării autenticității patrimoniului construit.

Capitolul aduce astfel în prim-plan principalele obiective ale cercetării relevante în acest context:

1. Asigurarea autenticității materialelor și designului arhitectural
2. Limitarea intervenției de consolidare la suprafețele cele mai adaptate intervenției, păstrând în același timp decorațiunile originale
3. Utilizarea materialelor compatibile cu structura originală atât dintr-un punct de vedere

istoric, cât și din punct de vedere fizico-chimic

4. Luarea în considerare a impactului asupra mediului datorat materialelor și tehnicilor utilizate
5. Adaptarea intervenției la factorii umani și sociali – în România, contextul formei de proprietate a apartamentelor prezintă provocări unice pentru consolidarea pereților din zidărie, în special în zonele expuse riscurilor seismice. Multe apartamente sunt ocupate de proprietari, ceea ce face impracticabilă relocarea rezidenților în timpul intervențiilor structurale, din motive financiare, logistice și sociale. Mulți rezidenți pot fi, de asemenea, reticenți să-și părăsească locuințele, chiar și temporar, din cauza atașamentelor personale și preocupărilor de siguranță. Prin urmare, există o tendință puternică de a realiza lucrările de consolidare exclusiv din exterior.
6. În cazul clădirilor istorice, păstrarea esteticii interioare și a caracteristicilor originale poate fi esențială. Intervențiile la interior ar putea perturba aceste elemente, conducând la pierderea valorii culturale și istorice. În mod similar, pentru clădirile publice cu decorațiuni exterioare, preferința ar putea fi de a realiza intervenția pe interior, mai ales în cazul în care aspectul exterior al fațadei este esențial pentru contextul urban adiacent.

Capitolul al doilea se concentrează pe o evaluare a stadiului și situației actuale în domeniul soluțiilor de consolidare a structurilor din zidărie.

Principalele domenii de interes au fost analiza materialelor și a tehnicilor tradiționale și contemporane de consolidare, înțelegerea strategiilor adecvate de analiză numerică și integrarea soluțiilor de reabilitare seismică și termică. Scopul capitolului este de a evidenția evoluțiile recente în tehnicile de consolidare și modul în care aceste tehnici pot fi utilizate pentru a îmbunătăți performanța structurală a clădirilor din zidărie, ținând cont de valoarea lor culturală.

Zidăria a fost un material important utilizat de-a lungul istoriei datorită durabilității, esteticii și capacității sale portante. Mai mult decât atât, a fost folosită în diverse regiuni, cu sau fără activitate seismică, demonstrând versatilitatea sa, dar și conducând la vulnerabilități mari în timp. Prin urmare, pentru a menține integritatea structurală și a asigura siguranța ocupanților, trebuie identificate soluții adecvate de consolidare, care să asigure și protecția elementelor de valoare [9].

De-a lungul istoriei, structurile din zidărie au evoluat semnificativ și au fost influențate de progresele tehnologice, stilurile arhitecturale, cunoștințele inginerești și de materialele disponibile. O înțelegere aprofundată a acestor tehnici de construcție este necesară pentru dezvoltarea unor metode de consolidare care să păstreze aspectul original și, în același timp, să îmbunătățească performanța structurală [10]. De la o varietate diversă de blocuri de zidărie, incluzând piatră, cărămizi de argilă și blocuri de beton, utilizate în diverse scopuri de-a lungul istoriei, la analiza diferitelor modele de țesere (ex. țeserea engleză, flamandă, decalată în lung – „stretcher bond” și transversală - „header bond”), a fost de subliniat faptul că fiecare decizie privind materialele și tehnicile de construcție poate îmbunătăți transferul încărcărilor și, în cele din urmă, poate influența comportamentul structural [11].

Un alt aspect important abordat în acest capitol a fost înțelegerea geometriei clădirilor istorice din zidărie. Studiile arată că zidurile de cărămidă ale clădirilor istorice pot avea grosimi de până la 1–2 metri. Pe de altă parte, structurile contemporane din zidărie sunt adesea mai subțiri, datorită prezenței elementelor suplimentare din beton armat care au rolul de a asigura un comportament structural mai superior [12], ajungând chiar la 95 mm în cazul zidurilor portante din zone cu seismicitate redusă [13]. Cu toate acestea, zidurile mai groase pot fi mai vulnerabile la acțiunile seismice datorită masei lor crescute. Metodele de consolidare trebuie, așadar, să atingă un echilibru între parametri pentru a îmbunătăți comportarea generală a pereților portanți. Zidurile armate mai subțiri și mai flexibile reduc greutatea totală și sporesc flexibilitatea, îmbunătățind astfel comportarea seismică [14].

În ultima parte a capitolului s-a pus accentul pe înțelegerea materialelor contemporane de consolidare compatibile cu structurile istorice din zidărie. Au fost luate în considerare opt soluții diferite, unele respectând ghidurile de consolidare ICOMOS, iar altele nu. Procedeele analizate sunt:

1. Cămășuirea cu beton armat cu plasă de oțel – o soluție utilizată din secolul al XX-lea pentru consolidarea și stabilizarea structurilor din zidărie, în special în zonele seismice [15]. Această metodă oferă un înveliș extern robust care îmbunătățește distribuția sarcinii și rezistența la forțele laterale, sporind rezistențele la compresiune și forfecare ale zidăriei de cărămidă, fiind utilizată pe scară largă pentru reabilitarea clădirilor istorice și creșterea rezilienței lor seismice.
2. Fâșii din polimeri armați cu fibre (FRP) – o soluție care cuprinde materiale compozite armate cu fibre de carbon, sticlă și aramidă, menite să ofere o rezistență mare la tracțiune combinată cu greutate redusă și rezistență la coroziune. Acestea sunt flexibile și pot fi aplicate sub diverse forme, precum foi, benzi sau tije [16], fiind utilizate frecvent pentru armarea la suprafață menită să îmbunătățească rezistența la tracțiune și flexibilitate a structurilor din zidărie existente [17].
3. Matricile de mortare cimentoase armate cu fibre (FRCM) – combină fibre de armare, precum cele din carbon sau sticlă, cu o matrice cimentoasă, oferind o îmbunătățire a aderenței cu substraturile de zidărie. Acest material compozit asigură o durabilitate sporită și rezistență la degradare, oferind în același timp o combinație echilibrată între rezistență și compatibilitate [18].
4. Mortar armat cu textile (TRM) – încorporează materiale textile de înaltă rezistență, precum fibrele de sticlă, bazalt sau chiar oțel, într-o matrice de mortar, îmbunătățind ductilitatea și rezistența pereților din zidărie. Această metodă este deosebit de potrivită pentru consolidarea geometriilor complexe și a suprafețelor curbe, fiind adecvată atât pentru structuri istorice, cât și moderne. Flexibilitatea și adaptabilitatea sa o reprezintă o alegere ideală pentru păstrarea integrității estetice a clădirilor istorice, oferind în același timp consolidare structurală [19].
5. Mortare compozite armate cu fibre (CRM) – integrează fibre și aditivi în mortar, îmbunătățindu-i proprietățile mecanice și durabilitatea. Acest material compozit este utilizat pentru armarea pereților din zidărie, oferind o rezistență sporită la fisurare și la degradarea datorată mediului, contribuind semnificativ la creșterea capacității portante a pereților [20].
6. Polimeri armați cu fibre de oțel (SFRP) – combină fibre cu o matrice din polimeri, oferind o rezistență sporită la tracțiune și o creștere a capacității de distribuție a încărcării. SFRP oferă o rezistență ridicată la tracțiune și o durabilitate crescută, fiind adecvat pentru armarea elementelor structurale critice. Este utilizat în mod obișnuit pentru consolidarea structurilor din zidărie împotriva încărcărilor seismice și dinamice. De asemenea, poate fi aplicat în cazul clădirilor istorice, conducând la îmbunătățiri semnificative ale performanței structurale fără a compromite valoarea patrimoniului arhitectural [21].
7. Panouri de lemn laminat (CLT) – folosite în soluții de consolidare care oferă rapoarte ridicate rezistență / greutate și sunt utilizate pentru intervenții la interior. Aceste soluții îmbunătățesc performanța seismică, păstrează estetica exterioară și reprezintă o opțiune sustenabilă și reversibilă de consolidare [22].

Ulterior, capitolul prezintă diverse proceduri de evaluare a zidăriei istorice pentru structurile situate în zone seismice, care includ teste de forfecare, teste de compresiune diagonală și simulări numerice. Aceste metode de evaluare sunt utilizate pentru a înțelege influența diferitelor soluții de consolidare [23]. În timpul testelor de laborator, o componentă importantă în înțelegerea comportării la seism al unei structuri este analiza rezistenței la forfecare a unui specimen de perete, care poate fi realizată conform ghidurilor definite în diferite standarde, precum EN 1052-3 [24] sau ASTM E519/E519M-15 [25].

În plus, pentru a înțelege efectul soluțiilor de consolidare seismică asupra unei structuri

în ansamblu, pot fi utilizate diverse programe de modelare computerizată, precum modelarea prin elemente discrete (DEM) sau analiza cu elemente finite (FEA) [26]. Programe de calcul bine-cunoscute precum ANSYS, ABAQUS, DIANA și altele similare oferă instrumente pentru simularea structurilor complexe [27], iar studiile de caz demonstrează că acestea pot fi aplicate cu succes pentru a înțelege comportamentul atât al structurilor din zidărie contemporană, cât și al celor istorice [21], [28], [29].

În acest capitol au fost de asemenea descrise perspective importante asupra stadiului și eficienței unor game largi de materiale și tehnici de consolidare, subliniind necesitatea de a furniza soluții adecvate pentru clădirile istorice din zidărie. Pentru a oferi soluții de reabilitare holistice, cercetările viitoare ar trebui să se concentreze pe dezvoltarea unor materiale inovatoare, optimizarea soluțiilor de consolidare și dezvoltarea unor soluții interdisciplinare. În special, printre domeniile care necesită cercetări suplimentare se numără comportamentul pe termen lung și durabilitatea materialelor moderne de armare, optimizarea metodelor de consolidare pe o singură față, crearea unor soluții accesibile și scalabile pentru combinarea măsurilor de reabilitare seismică și termică și îmbunătățirea instrumentelor de modelare numerică pentru a avea răspunsuri realiste ale comportamentului zidăriei armate [30].

Capitolul al treilea investighează cedarea la forfecare pe diagonală a pereților din zidărie istorică. Acest mecanism de cedare reprezintă un pericol real, care poate conduce la prăbușiri bruște și fragile ale clădirilor.

În contextul menționat în primul capitol, studiul se concentrează pe clădirile de patrimoniu din Timișoara și zonele învecinate, având în vedere contextul istoric. Această zonă este compusă din numeroase clădiri care utilizează tehnici de construcție similare, datând din secolul al XIX-lea până la începutul secolului al XX-lea. Studiul începe cu analiza structurilor din zidărie de cărămidă caracteristice părții de vest a României, construite până la începutul secolului al XX-lea; caracteristicile lor structurale fiind evidențiate în urma unor studii extinse efectuate între 2015 și 2021 [31]. În plus, pe baza analizei țeserii cărămizilor vizibile în cazul clădirilor cu tencuială exterioară deteriorată sau al structurilor aflate în restaurare, s-a observat în mod evident utilizarea țeserii englezești, cu un rând de cărămizi dispuse longitudinal („stretchers”) și un rând următor dispus transversal („headers”).

Pentru a înțelege comportamentul caracteristic la forfecare al panourilor din zidărie analizate, ca bază pentru configurația de testare, a fost selectat standardul internațional ASTM E519/E519M-15, deoarece rezultatele pot fi comparate cu un număr mare de studii similare. Testele experimentale au fost efectuate într-un laborator dedicat din cadrul INCD URBAN-INCERC (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Construcții, Urbanism și Dezvoltare Durabilă).

Pentru testele de laborator, au fost construite cincisprezece specimene de zidărie conform dimensiunilor standard de 1200 x 1200 mm în plan. Grosimea specimenelor a fost selectată astfel încât să fie similară cu grosimea pereților istorici din zidărie prezenți la primul etaj al multor clădiri din epoca studiată, utilizând o grosime de 1½ cărămidă. Zidurile au fost construite folosind o țesere englezescă, rezultând o grosime totală de 450 mm. Trebuie notat că această grosime este mai mare decât grosimea majorității specimenelor testelor prezentate în literatura de specialitate.

Pentru a obține rezultate precise, s-a acordat o atenție deosebită acurateții istorice a specimenelor în ceea ce privește materialele utilizate și execuția lucrării. Prin urmare, cărămizile folosite au fost recuperate de la un sit de demolare al unei construcții utilitare din 1910 (grajd de animale) situată în apropierea Timișoarei, iar toate rosturile, inclusiv cele verticale, au fost umplute cu mortar preparat conform unuia dintre manualele de construcție ale vremii. A fost consultat manualul „Allgemeiner Bauratgeber - Ein Hand- und Hilfsbuch für Bauherren, Architekten, Baunternehmer, Baumeister, Bautechniker, Bauhanweker, Landwirte und Rechnungsbeamte” de Lothar Abel [32], și s-a utilizat o proporție volumetrică de 1:3:1,25

(var hidratat, nisip, apă).

Pentru testele în laborator au fost pregătite patru seturi de specimene:

1. Primul grup, format din trei specimene, reprezentat de zidăria originală nearmată, care a fost utilizată ca referință pentru testele ulterioare, fiind acoperită doar cu un strat simplu de tencuială pe bază de var și nisip, conform informațiilor istorice.
2. Al doilea set, format din trei specimene, a fost consolidat pe ambele fețe. Pentru aceste specimene, stratul de consolidare a fost compus din mortar Geocalce F Antisismico [35], un mortar de var NHL clasa M15, cu o grosime de 10–15 mm. Pe ambele fețe, două straturi perpendiculare de armare din Geosteel G600 [36], cu o lățime de 300 mm, au fost aplicate pe un strat de mortar proaspăt și acoperite imediat cu un alt strat de același mortar.
3. Al treilea set, format din trei specimene, a fost consolidat doar pe o singură față pentru a simula intervenția pe o parte fără a deranja proprietarii apartamentelor sau a distruge decorațiunile. În acest caz, consolidarea a constat în aplicarea a două straturi perpendiculare din Geosteel G1200 [33], prin trei benzi de 300 mm lățime în fiecare direcție, pe întreaga lățime de 1200 mm a specimenului. Mortarul Geocalce F Antisismico a fost utilizat ca matrice pentru armare. Partea nearmată a fost finisată cu o tencuială din var și nisip.
4. Al patrulea set de trei specimene a fost păstrat pentru soluții alternative de consolidare.

Specimenele de pereți din zidărie au fost testate sub încărcări axiale de compresiune diagonală pentru a determina comportamentul la forfecare în plan al speciimenelor neconsolidate și ulterior consolidate. Pe ambele părți, fiecare diagonală a fost monitorizată utilizând senzori de deplasare, care au permis măsurarea atât a expansiunii, cât și a contracției.

După finalizarea testelor de laborator, rezultatele obținute au fost analizate și ulterior comparate pentru a înțelege pe deplin eficiența soluțiilor de consolidare considerate. Rezultatele au fost interpretate din perspectiva curbelor forță-deformație, a curbelor caracteristice forță-drift, a curbelor efort-deformație specifică și, în cele din urmă, din punct de vedere al ductilității și disipării de energie. În final, au fost analizate mecanismele de cedare pentru fiecare specimen.

Mai întâi, a fost testat și analizat specimenul de perete neconsolidat. Deformațiile înregistrate în timpul testelor de laborator au fost destul de similare pe ambele direcții, ajungând la o deplasare de până la 0,7 mm orizontal și 0,85 mm vertical, evidențiind rigiditatea panourilor analizate. La aproximativ 80 kN, specimenul a experimentat o cedare fragilă, în ciuda deformațiilor mici. Comportamentul specimenului neconsolidat a confirmat natura fragilă a mecanismului de cedare prin fisurare diagonală cauzată de întinderi.

În pasul secund au fost testate două dintre speciimenele consolidate pe două fețe. Principala diferență față de specimenul de zidărie neconsolidat a fost faptul că, după începutul deformării plastice, forța a continuat să crească treptat, manifestând un fenomen de „strain-hardening”. Comparativ cu specimenul de zidărie neconsolidat, forța maximă aplicată asupra panourilor din zidărie a ajuns până la 280 kN, prezentând o creștere de 3,5 ori. Deformațiile înregistrate pe direcțiile orizontală și verticală au evidențiat, de asemenea, un anumit nivel de ductilitate. Curba caracteristică efort-deformație specifică a arătat un comportament ductil al specimenului și faptul că zidăria armată poate suporta eforturi suplimentare după fisurare.

Comparând comportamentul la forfecare al specimenului de zidărie neconsolidat cu cel al speciimenelor consolidate pe două fețe, s-a observat o creștere semnificativă a ductilității panourilor, drift-ul crescând de la 0,155% în cazul specimenului de zidărie neconsolidat până la 0,493% în cazul speciimenelor consolidate. De asemenea, s-a observat o creștere de 176% a efortului de forfecare la punctul de fisurare pentru speciimenele consolidate.

În pasul trei au fost studiate rezultatele testelor efectuate pe speciimenele consolidate pe o singură față. În timpul testelor de laborator, niciunul dintre speciimenele testate nu a suferit o cedare completă. Deteriorările au fost vizibile pe partea neconsolidată, în timp ce partea consolidată nu a prezentat fisuri vizibile. Acestea au fost relativ distribuite pe aria specimenului, datorită tracțiunii exercitate asupra cărămidilor de către plasa de oțel, care a rezistat alungirii pe

direcția orizontală, pe partea consolidată.

S-a observat o creștere semnificativă a ductilității panourilor datorită prezenței armăturii din oțel, drift-ul crescând de la 0,155% în cazul specimenului de zidărie neconsolidat până la 1,093% în cazul specimenelor consolidate pe o singură față. Efortul de forfecare la punctul de fisurare a prezentat, de asemenea, o creștere de 52% în cazul specimenelor consolidate. Similar specimenelor consolidate pe două fețe, cele consolidate pe o singură față au demonstrat ductilitate, iar deteriorările au fost localizate în masa de zidărie. Prezența armăturii din oțel a condus și în acest caz la fenomenul de „strain-hardening” în regiunea post-elastică și la o ductilitate importantă a sistemului. Energia introdusă prin forfecare a fost absorbită de fibrele de oțel, ceea ce a întârziat cedarea.

O analiză detaliată a fost efectuată asupra graficelor rezultate drift-efort de forfecare, identificând și comparând eforturile maxime de forfecare și drift-urile corespunzătoare. S-a observat o creștere a pseudo-ductilității de 277% pentru speciemele consolidate pe două fețe și respectiv de 240–323% pentru cele consolidate pe o singură față.

Capitolul a evidențiat impactul soluțiilor de consolidare experimentate asupra comportamentului la forfecare al panourilor testate. Din cele trei seturi de teste, soluția care utilizează consolidarea pe o singură față prezintă următoarele îmbunătățiri față de panourile de zidărie neconsolidate:

1. Transformă drastic comportamentul zidăriei dintr-unul fragil într-un ansamblu zidărie-armare pseudo-ductil.
2. Extinde comportamentul elastic al zidăriei cu 39-52% (176-200% în cazul consolidării pe două fețe).
3. Crește pseudo-ductilitatea cu cel puțin 140%. Speciemele consolidate pe două fețe au prezentat o creștere similară a capacității de drift.

Se evidențiază faptul că, în contextul în care, din cauza anumitor limitări și obiective, nu este posibilă consolidarea ambelor fețe ale unei zidării, consolidarea pe o singură față poate oferi rezultate tangibile în ceea ce privește siguranța clădirilor și limitarea avarierilor cauzate de activitatea seismică anticipată. Prin urmare, devine evident că, în funcție de amploarea reabilitării structurale și de starea de conservare a structurii istorice din zidărie, pot fi utilizate soluții de consolidare pe o singură față sau pe două fețe.

În capitolul al patrulea, au fost realizate simulări numerice computerizate pentru a înțelege mai bine comportamentul soluțiilor de consolidare analizate pe baza rezultatelor experimentale obținute din testele de compresiune diagonală, a testelor separate efectuate pe materialele constitutive (cărămizi și mortar de var) și a informațiilor furnizate de producătorii de materiale.

Au fost utilizate trei abordări și două programe diferite de simulare numerică, după cum urmează:

1. Software-ul DIANA, a fost folosit pentru a realiza o analiză macro-model a specimenelor de zidărie testate și pentru a identifica dacă modelul de fisurare observat în timpul testelor de laborator poate fi reprodus folosind un software de simulare numerică calibrat.
2. Software-ul 3Muri, a fost utilizat inițial pentru a calibra echivalentul numeric al materialelor analizate pe baza comportamentului observat în timpul testelor de laborator și ulterior pentru a folosi valorile calibrate în simulări numerice suplimentare pe o structură reprezentativă care cuprinde caracteristicile specifice ale structurilor din zidărie .

Pentru macro-modelarea realizată în software-ul DIANA, s-a folosit un model omogen cu anizotropie, adoptând legi constitutive diferite pentru direcția paralelă cu rosturile de mortar orizontale față de direcția perpendiculară pe acestea (rosturile verticale).

S-a utilizat o extensie a modelului de fisurare distribuită (smeared crack model), în care descrierea legilor constitutive ale materialului a fost modificată de la o relație izotropă tensiune-deformație la una ortotropă odată cu apariția fisurilor [34]. Fisurarea din întindere și zdrobirea

la compresiune au fost setate să apară de-a lungul rosturilor de orizontale și verticale, în timp ce cedarea prin forfecare a fost considerată doar de-a lungul rosturilor orizontale. Comportamentul la întindere a fost simulat identic atât în direcția rosturilor orizontale, cât și în direcția rosturilor verticale.

Răspunsul efort-deformație specifică a fost caracterizat de o diminuare liniară cu descărcare secantă, iar pentru cedarea prin forfecare s-a utilizat modelul Coulomb de-a lungul rosturilor orizontale, curba efort-deformație specifică prezentând o diminuare liniară până la reducerea coeziunii la zero. Proprietățile mecanice ale modelului nearmat (URM) s-au bazat pe testele de laborator realizate pe elementele de zidărie, în timp ce caracteristicile materialelor armate pe o față și respectiv pe două fețe au fost selectate conform specificațiilor furnizorilor [35][36].

În cazul modelului armat pe o singură față, parametrii au fost mediile dintre modelele nearmate (URM) și cele armate pe două fețe, cu excepția coeziunii, care a fost mai mare în cazul modelului armat pe o singură față. Această ajustare a fost realizată pentru a ține cont de deformarea în afara planului observată la pereții consolidați pe o singură față după testare, sugerând că încărcarea a fost concentrată în principal de fața consolidată, necesitând astfel o creștere a coeziunii.

Cele trei modele au generat răspunsuri efort de forfecare-deformație specifică similare cu rezultatele experimentale. Analizând diferențele dintre rezultatele testelor de laborator și cele numerice, s-a observat că în cazul panourilor de zidărie nearmată, diferențele sunt sub 5%. Aceleași diferențe sub 5% au fost observate și în cazul specimenelor consolidate pe două fețe, atât în zona elastică, cât și în cea plastică, însă în zona de diminuare (softening) înainte de vârful de efort, diferențele au ajuns până la 15%. În cazul specimenelor consolidate pe o singură față, a fost observată o simulare foarte bună pentru forța de fisurare prin forfecare, însă în zona elastică și plastică potrivirea a fost considerată ca fiind acceptabilă, cu o diferență de răspuns de maximum 15%.

Totuși, modelul consolidat pe două fețe nu a prezentat o parte descendentă (softening) înainte de vârful de efort, ci a arătat un comportament elastic-plastic, cel mai probabil deoarece modelele la scară macro au tratat zidăria ca pe un material omogen [34][29]. Modelele de fisurare și progresia fisurilor au fost similare cu cele observate în experimente. Inițial, deteriorarea a apărut în colțurile panoului și s-a extins odată cu creșterea deformării. În starea ultimă, deteriorările prin forfecare erau distribuite pe întregul perete, în zone similare cu cele din experimente.

Pentru a evalua efectele consolidării la scara unei clădiri, s-a efectuat o analiză complementară cu elemente finite (FE) utilizând software-ul 3Muri de la S.T.A. DATA, un program capabil să simuleze încărcările seismice la scara unui imobil, putând fi utilizat în general în zonele seismice unde structurile din zidărie sunt reabilitate.

Înainte de a trece la analiza unei structuri mai mari, parametrii utilizați pentru materiale au fost calibrați. În acest scop, a fost modelat un ansamblu mic care include speciunile de zidărie de 1200x1200x450 mm, analizate în timpul testelor de laborator. Folosind datele calibrate pentru zidăria nearmată și valorile cunoscute ale fabricantului pentru armătura bidirecțională utilizată, au fost efectuate simulări de tip pushover pentru toate cele trei modele. Modelul nearmat a arătat o similaritate bună între speciunile real și cel simulat, în timp ce modelele consolidate pe o față și pe două fețe au prezentat diferențe între 7% și 8% în cazul forțelor maxime de forfecare. Pentru modelele consolidate pe o singură față, partea descendentă (softening) înainte de vârful de efort nu a fost redată de simulare, similar cu ce s-a observat și în mediul DIANA.

În pasul ulterior, a fost realizat un model structural simplificat pentru a studia comportamentul panourilor de perete într-un ansamblu de panouri cu forme geometrice diferite. Modelul 3D a constatat dintr-o structură tip turn cu 3 niveluri și grosimi ale pereților similare celor identificate în cazul clădirilor istorice din Timișoara.

Pentru simulare, s-a utilizat EN 1998-1 pentru estimarea încărcărilor seismice. Tipul acțiunii seismice și parametrii solului au fost selectați în concordanță cu cei ai regiunii Banat din Timișoara, iar solul de tip D, conform Eurocod 8, a fost considerat cel mai potrivit.

După efectuarea simulării numerice de tip pushover, a fost analizată starea zidărilor la finalul încărcării, precum și curbele de răspuns forță de forfecare – deplasare (drift) maximă la vârf pentru fiecare model.

S-a evidențiat că, în cazul zidăriei neconsolidate analizate, după cedarea prin forfecare, comportamentul a devenit constant, dar cu o ductilitate scăzută. Cedarea a fost înregistrată la o deplasare maximă de 5,84 cm. Pentru modelul de zidărie neconsolidat (URM), majoritatea deteriorărilor au avut loc la primul nivelul, unde șpaletii au cedat. Elementele etajelor superioare au preluat doar o parte limitată din forțele laterale de forfecare.

Răspunsul modelului consolidat pe două fețe a fost de tip elastic-plastic, demonstrând o ductilitate foarte bună. Cedarea a fost înregistrată la o deplasare maximă de 11,55 cm, prezentând o creștere semnificativă, aproape dublă, a deplasării maxime comparativ cu modelul din zidărie neconsolidat. Consolidarea pe două fețe s-a dovedit eficientă în creșterea și distribuirea deteriorărilor la toate nivelurile într-o primă etapă. Totuși, în stările finale, elementele de legătură (spandrels), și nu șpaletii, au fost mai încărcate și au cedat. Din acest punct de vedere o conexiune mai bună între șpaleti la fiecare nivel ar putea fi luată în considerare.

Răspunsul modelului consolidat pe o singură față a fost, de asemenea, elastic-plastic, arătând o ductilitate foarte bună. Cedarea a fost înregistrată la o deplasare maximă de 10,76 cm, prezentând, de asemenea, o creștere dublă a deplasării maxime comparativ cu modelul neconsolidat din zidărie. Conform curbei de răspuns, s-a observat o ușoară scădere a rezistenței la forfecare după zona elastică. Peretele consolidat pe o singură față a prezentat deteriorări similare celui consolidat pe două fețe, dar cu unele diferențe la nivelul inferior, unde șpaletul deteriorat a prezentat fisurări importante datorate forfecării, și nu încovoierii. Deplasarea finală atinsă a fost similară, dar la o forță mai mică decât în cazul modelului consolidat pe două fețe.

Pentru cele trei scenarii, curbele pushover au fost cele mai concludente și au oferit informațiile cele mai relevante despre comportamentul panourilor de perete. Deplasarea maximă la vârf pentru structura neconsolidată a fost utilizat ca punct de referință, la 5,84 cm. La această valoare a deplasării la vârf, s-a realizat o comparație a forțelor pentru fiecare scenariu.

Analiza comparativă a arătat că armarea pe două fețe îmbunătățește rigiditatea inițială a pereților din zidărie cu 4% comparativ cu zidăria neconsolidată, în timp ce consolidarea pe o singură față reduce ușor rigiditatea inițială cu 0,33%. Totuși, o îmbunătățire semnificativă de 25% a fost observată în cazul forței maxime de forfecare și a forței de forfecare la deplasarea la vârf de 5,84 cm pentru soluția consolidată pe două fețe. Pe de altă parte, soluția de consolidare pe o singură față a oferit o creștere de 17% a forței maxime de forfecare comparativ cu modelul neconsolidat și o creștere de aproximativ 8% a forței de forfecare la deplasarea la vârf de 5,84 cm.

Concluziile capitolului subliniază că materialele de consolidare aplicate pe suprafețele pereților din zidărie pot îmbunătăți semnificativ comportamentul unei clădiri și că poate fi utilizată chiar și o abordare de consolidare pe o singură față, în ciuda beneficiilor mai reduse comparativ cu cea pe două fețe. În plus, simulările numerice mai demonstrează faptul că ansamblul poate fi afectat de schimbările în rigiditatea elementelor și pot apărea mecanisme alternative de cedare și de redistribuire a încărcărilor, elementele mai slabe fiind cel mai probabil cauza degradărilor. Astfel abordarea necesită o investigație mai complexă la nivelul clădirii ca ansamblu pentru a explora legături mai bune între elementele de zidărie și pentru a propune măsuri adecvate de consolidare pentru componentele cele mai vulnerabile.

Ultimul capitol prezintă concluziile tezei și contribuțiile autorului și subliniază că pentru conservarea și restaurarea clădirilor istorice trebuie să existe o abordare

interdisciplinară, pentru a crește capacitatea portantă a structurii, păstrând în același timp autenticitatea și estetica clădirii.

Capitolul evidențiază principalele rezultate ale studiului și diferența semnificativă în comportamentul specimenelor de perete în funcție de soluția de consolidare folosită. În timp ce cedarea panoului de zidărie neconsolidat a fost bruscă și fragilă, speciunile consolidate au prezentat un nivel crescut de ductilitate, permițând o deschidere semnificativă a fisurilor. Forțele de forfecare preluate de speciunile consolidate comparativ cu panoul de zidărie neconsolidat au arătat o creștere de 85% pentru consolidarea pe o singură față, respectiv de 350% pentru consolidarea pe două fețe. Graficele efort-deformație au arătat o scădere post-vârf foarte mică comparativ cu teste similare. Acest lucru se poate datora utilizării armăturii din fibre de oțel, care rămâne elastică la valorile de deformație testate, deteriorarea fiind localizată în zidărie și în mortarul de legătură.

Modelele cu elemente finite considerate, atât cu programul DIANA, cât și cu programul FEM 3MURI, calibrate pe baza testelor de laborator efectuate, au oferit rezultate concludente în termeni de rezistență, rigiditate inițială și ductilitate. Acestea pot servi în analize parametrice ulterioare pentru a obține rezultate îmbunătățite, adaptate intervențiilor structurale specifice.

Deși soluția de consolidare pe două fețe a arătat o influență semnificativă asupra rezistenței la forfecare a specimenelor de pereți din zidărie conform testelor de laborator, simulările numerice au evidențiat că aceasta s-ar putea să nu fie complet eficientă în situațiile reale de consolidare. Efectul real al consolidării poate fi ineficient dacă soluțiile de consolidare corespunzătoare nu sunt aplicate pe toate elementele structurale și dacă nu se asigură legături corespunzătoare între acestea.

În același timp, analiza a mai demonstrat că, în majoritatea situațiilor, aplicarea soluțiilor de consolidare pe o singură față a elementelor portante exterioare de zidărie poate fi suficientă pentru a asigura o îmbunătățire adecvată rezistenței la forfecare. Astfel, reabilitarea structurală cu îmbunătățiri asupra răspunsului seismic și static este posibilă fără a reloca locatarii clădirii și poate fi luată în considerare pentru proiecte viitoare. Acest tip de intervenție are cel mai mic impact asupra imaginii clădirii consolidate, lucru crucial pentru clădirile listate de patrimoniu și pentru zona istorică analizată și orașele acesteia.

Principalele realizări și contribuții personale sunt:

1. Analiza detaliată a studiilor similare efectuate pe structuri istorice din zidărie, cu accent pe consolidarea pe o față și pe două fețe a acestor structuri și reducerea vulnerabilităților seismice.
2. Cercetare amplă, teoretică și de teren, asupra structurilor caracteristice din zidărie din vestul României.
3. Testări de laborator pentru determinarea proprietăților mecanice caracteristice ale specimenelor de zidărie și mortar recuperate.
4. Reconstrucția specimenelor de zidărie utilizând cărămizi istorice recuperate dintr-o clădire demolată și o rețetă tradițională de mortar de var, nisip și apă (raport 1:3:1,25).
5. Teste de forfecare efectuate în laborator pe speciune de zidărie nearmată și înțelegerea comportamentului lor la forfecare, având în vedere grosimea de 45 cm. Această grosime este rar utilizată în studiile practice.
6. Analiza de laborator a efectului consolidării pe o față și pe două fețe asupra comportamentului la forfecare al specimenelor de zidărie considerate; analiza și compararea deformațiilor verticale și orizontale în plan măsurate pe speciunile de zidărie.
7. Modelarea cu elemente finite (FE) a panourilor de zidărie nearmată și armată și calibrarea modelelor în raport cu rezultatele testelor de laborator.
8. Modelarea neliniară cu elemente finite a unei structuri utilizând proprietățile materialelor de zidărie rezultate din testările experimentale.
9. Analiza rezultatelor obținute din modelul neliniar cu elemente finite.

Studiul deschide o serie de direcții de cercetare care ar trebui abordate în continuare pentru a asigura conservarea structurilor de patrimoniu pentru generațiile viitoare, cum ar fi:

- înțelegerea pe deplin a efectului soluțiilor contemporane de consolidare, cum ar fi benzi verticale, tije sau bare elicoidale oblice, asupra comportamentului seismic al structurilor istorice din zidărie de cărămidă;
- până în prezent, testele de laborator au fost realizate pe panouri de zidărie cu grosimea de 45 cm, supuse compresiunii diagonale în plan. Este, de asemenea, important să se exploreze efectul soluțiilor de consolidare asupra comportamentului în afara planului;
- pentru a înțelege completă a eficienței soluțiilor de consolidare asupra clădirilor ar trebui efectuate
- testele ciclice de încărcare, care simulează complet încărcările seismice;
- simulările numerice au fost calibrate luând în considerare comportamentul panourilor testate și valorile calibrate pentru înțelegerea comportamentului unei structuri, studiu de caz de tip turn. Este important totuși ca analizele să integreze simulări neliniare dinamice pe clădiri reprezentative existente și să se înțeleagă efectul soluțiilor de consolidare asupra comportamentului seismic global al acestora;
- soluțiile integrate de rehabilitare termică și seismică sunt destul de puține, dar studiul arată că prin utilizarea unor materiale adecvate pot fi obținute îmbunătățiri din ambele perspective, în special pentru încărcările din afara planului. Sunt necesare studii suplimentare pentru a dezvolta pe deplin și a înțelege efectul unor soluții integrate asupra clădirilor istorice.

Rezultatele cercetării prezentate în această teză au fost diseminate prin publicări în reviste și lucrări prezentate la conferințe:

- 1 articol în reviste indexate în Web of Science;
- 4 articole în volume de conferințe indexate în Web of Science;
- 3 articole în volume de conferințe indexate în baze de date internaționale (SCOPUS).

Bibliografie:

- [1] "Google Earth Image ~ 45°43'54.02"N , 21°13'27.98"E," Feb. 16, 2023, *Google Earth, Timisoara*.
- [2] A. Benedetti, "In Plane Behaviour of Masonry Walls Reinforced with Mortar Coatings and Fibre Meshes," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 13, no. 7, pp. 1029–1041, 2019, doi: 10.1080/15583058.2019.1618972.
- [3] Icomos, "International Charter for the conservation and restoration of monuments and sites (The Venice Charter 1964)," *IInd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments*, 1964.
- [4] ICOMOS, "The Declaration of Amsterdam," Amsterdam, 1975.
- [5] ICOMOS, "ICOMOS Nara document of authenticity 1994," 1994.
- [6] ICOMOS, "The Valletta Principles for the Safeguarding and Management of Historic Cities, Towns and Urban Areas Principes de la Valette pour la sauvegarde et la gestion des villes et ensembles urbains historiques," 2011.
- [7] ICOMOS, *The Burra Charter : the Australia ICOMOS charter for places of cultural significance 2013*. Australia ICOMOS Incorporated, 2013.
- [8] ICOMOS, "Resolutions of the General Assembly 19GA Agenda item 1 Official Opening of the General Assembly," 2017.
- [9] D. Bocan, C. Bocan, A. Keller, and A. Gruin, "Analysis of Thermal Rehabilitation and Seismic Strengthening Solutions Suitable for Heritage Structures," *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 5369*, vol. 16, no. 13, p. 5369, Jun. 2024, doi: 10.3390/SU16135369.

- [10] D. Bocan, A. Keller, C. Bocan, I. Onescu, and M. Marius, "Potential Results of Using Current Thermal Rehabilitation Techniques on a City Block of Timisoara and their Structural Strengthening Opportunities," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 471, p. 062037, Feb. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/6/062037.
- [11] R. Agliata, A. Marino, L. Mollo, and P. Pariso, "Historic building energy audit and retrofit simulation with hemp-lime plaster-A case study," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, 2020, doi: 10.3390/su12114620.
- [12] A. Buda *et al.*, "Conservation-compatible retrofit solutions in historic buildings: An integrated approach," 2021. doi: 10.3390/su13052927.
- [13] S. Türkmen, B. T. De Vries, S. N. M. Wijte, and A. T. Vermeltoort, *In-plane behaviour of clay brick masonry wallettes retrofitted with single-sided fabric-reinforced cementitious matrix and deep mounted carbon fibre strips*, vol. 18, no. 2. Springer Netherlands, 2020. doi: 10.1007/s10518-019-00596-2.
- [14] L. D. Pereira, V. Tavares, and N. Soares, "Up-to-date challenges for the conservation, rehabilitation and energy retrofitting of higher education cultural heritage buildings," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 4, 2021, doi: 10.3390/su13042061.
- [15] E. Mustafaraj and Y. Yardim, "Retrofitting damaged unreinforced masonry using external shear strengthening techniques," *Journal of Building Engineering*, vol. 26, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100913.
- [16] F. Longo, A. Cascardi, P. Lassandro, and M. A. Aiello, "Thermal and seismic capacity improvements for masonry building heritage: A unified retrofitting system," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.3390/su13031111.
- [17] A. Ilki, M. Ispir, C. Demir, N. Kumbasar, and F. As, "FRP RETROFIT OF WALLS CONSTRUCTED WITH HISTORICAL BRICKS Risk Algilama / Risk Perception View project Bolted Moment Connection System for Precast Reinforced Concrete Members View project FRP RETROFIT OF WALLS CONSTRUCTED WITH HISTORICAL BRICKS," 2008. [Online]. Available: <http://www.ins.itu.edu.tr/eers/labhome.htm>
- [18] M. Tomaževič, "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: Shear versus tensile strength of masonry," *Mater Struct*, vol. 42, pp. 889–907, Aug. 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9430-6.
- [19] F. S. Murgu, F. Ferretti, and C. Mazzotti, "A discrete-cracking numerical model for the in-plane behavior of FRCM strengthened masonry panels," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, no. 11, 2021, doi: 10.1007/s10518-021-01129-6.
- [20] M. Del Zoppo, M. Di Ludovico, A. Balsamo, and A. Prota, "In-plane shear capacity of tuff masonry walls with traditional and innovative Composite Reinforced Mortars (CRM)," *Constr Build Mater*, vol. 210, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.133.
- [21] F. Parisi, I. Iovinella, A. Balsamo, N. Augenti, and A. Prota, "In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites," *Compos B Eng*, vol. 45, no. 1, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.09.068.
- [22] M. R. Valluzzi *et al.*, "Nested buildings: An innovative strategy for the integrated seismic and energy retrofit of existing masonry buildings with CLT panels," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.3390/su13031188.
- [23] N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, and J. M. Ingham, "Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars," *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 12, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063.
- [24] "EN 1052-3. Methods of test for masonry – Part 3: Determination of initial shear strength," 2007.
- [25] ASTM International, "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages," 2015, *ASTM International*.

- [26] A. Benedetti, “In Plane Behaviour of Masonry Walls Reinforced with Mortar Coatings and Fibre Meshes,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 13, no. 7, pp. 1029–1041, 2019, doi: 10.1080/15583058.2019.1618972.
- [27] P. Cassese, C. Balestrieri, L. Fenu, D. Asprone, and F. Parisi, “In-plane shear behaviour of adobe masonry wallets strengthened with textile reinforced mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 306, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124832.
- [28] S. Elmalyh, A. Bouyahyaoui, T. Cherradi, A. Rotaru, and P. Mihai, “Shear strength of unreinforced masonry walls retrofitted with CFRP,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, vol. 5, no. 2, 2020, doi: 10.25046/AJ050246.
- [29] L. Miccoli, A. Garofano, P. Fontana, and U. Müller, “Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry,” *Eng Struct*, vol. 104, pp. 80–94, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.09.020.
- [30] A. Soleymani, M. A. Najafgholipour, A. Johari, and S. Jowkar, “In-plane shear strengthening of traditional unreinforced masonry walls with near surface mounted GFRP bars,” *Constr Build Mater*, vol. 367, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130362.
- [31] M. Mosoarca, I. Onescu, E. Onescu, and A. Anastasiadis, “Seismic vulnerability assessment methodology for historic masonry buildings in the near-field areas,” *Eng Fail Anal*, vol. 115, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104662.
- [32] L. Abel, T. Kroner, and R. Rambauser, *Allgemeiner Bauratgeber Ein Hand- und Hilfsbuch für Bauherren, Architekten, Baunternehmer, Baumeister, Bautechniker, Bauhanwerker, Landwirte und Rechnungsbeamte*, 2nd Edition. Wien und Leipzig: A. Hartlenben’s Verlag, 1908.
- [33] Kerakoll Spa, “GeoSteel G1200,” Aug. 2018, *Kerakoll Spa, Sassuolo*. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Geosteel_G1200_2023_en.pdf
- [34] P. B. Lourenco, P. Roca, J. L. González, E. Oñate, and P. B. Lourenço, “Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS II EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ISSUES IN THE MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF MASONRY.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/255606974>
- [35] Kerakoll Spa, “GeoCalce ® F Antisismico,” Apr. 2017, *Kerakoll Spa, Sassuolo*. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/GeoCalce_F_Antisismico_0723_en.pdf
- [36] Kerakoll Spa, “GeoSteel G600,” Jun. 2018, *Kerakoll Spa, Sassuolo*. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Geosteel_G600_2023_en.pdf