

UNIVERSITATEA TEHNICĂ
"GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI
INSTALAȚII



**CONTRIBUȚII LA CONSOLIDAREA
ZIDĂRIILOR DIN PIATRĂ CU MATERIALE
COMPOZITE ECOLOGICE
-REZUMAT-**

Doctorand:

ing. Ionuț Alexandru Spiridon

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Dorina Nicolina Isopescu

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 28.06.2024 la ora 11:00 în sala de consiliu a „Facultatii de constructii si instalatii”, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

“ CONTRIBUTII LA CONSOLIDAREA ZIDĂRIILOR DIN PIATRĂ CU MATERIALE COMPOZITE ECOLOGICE”

elaborate de domnul **SPIRIDON IONUT ALEXANDRU** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Prof. univ. dr. ing. Andrei Burlacu, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași - președinte
2. Prof. univ. dr. ing. Dorina Nicolina Isopescu, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași - conducător de doctorat
3. Prof. univ. dr. ing. Radu Sorin Văcăreanu, Universitatea Tehnică de Construcții București - referent oficial
4. Prof. univ. dr. ing. Ioan Tuns, Universitatea Transilvania din Brașov - referent oficial
5. Prof. univ. dr. ing. Nicolae Țăranu, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași - referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

CONTRIBUȚII LA CONSOLIDAREA ZIDĂRIILOR DIN PIATRĂ CU MATERIALE COMPOZITE ECOLOGICE

Doctorand: ing. Ionuț Alexandru Spiridon

Domeniul Inginerie Civilă și Instalații

Președinte comisie doctorat:	Prof. univ. dr. ing. Andrei Burlacu Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
Conducător de doctorat:	Prof. univ. dr. ing. Dorina Nicolina Isopescu Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
Referenți oficiali:	Prof. univ. dr. ing. Radu Sorin Văcăreanu Universitatea Tehnică de Construcții București Prof. univ. dr. ing. Ioan Tuns Universitatea Transilvania din Brașov Prof. univ. dr. ing. Nicolae Țăranu Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași

CONTRIBUȚII LA CONSOLIDAREA ZIDĂRIILOR DIN PIATRĂ CU MATERIALE COMPOZITE ECOLOGICE

Rezumat

De-a lungul istoriei, construcțiile din zidărie din piatră au contribuit la evoluția societăților și la definirea patrimoniului construit în toate colțurile lumii. Această formă de construcție, prin durabilitatea și frumusețea sa, a fost adesea asociată cu monumentele și clădirile istorice, devenind parte integrantă a patrimoniului cultural și arhitectural al omenirii.

În ceea ce privește construcțiile monument, zidăria din piatră ocupă un loc central, reprezentând uneori chiar esența acestora. Aceste construcții sunt edificii sau structuri care, prin semnificația lor culturală, istorică, religioasă sau arhitecturală, au o importanță deosebită și sunt recunoscute ca atare la nivel național sau internațional.

Construcțiile monument sunt adesea supuse unor constrângeri specifice, atât din punct de vedere a conservării patrimoniului cultural și a valorii istorice, cât și a compatibilității dintre tehnologia și materialele disponibile la momentul edificării și cele utilizate la restaurare. Astfel, restaurarea și conservarea construcțiilor monument reprezintă adesea provocări complexe, care necesită expertiză interdisciplinară și abordări inovatoare. În acest context, cercetările aprofundate în domeniul construcțiilor din zidărie din piatră sunt fundamentale în determinarea comportamentului structural global, respectiv în proiectarea și dezvoltarea sistemelor de consolidare pentru îmbunătățirea acestuia. În acest sens, în ultimele decenii s-au dezvoltat numeroase metode moderne de consolidare (în special prin cămășuire) și s-au îmbunătățit metodele clasice, prin utilizarea unor materiale noi și performante, caracterizate prin masă redusă și caracteristici fizice/mecanice favorabile.

Având în vedere observațiile de mai sus, această teză de doctorat își propune să răspundă cerințelor actuale de proiectare a sistemelor de consolidare a zidăriilor din piatră prin dezvoltarea unui sistem de cămășuire bazat preponderent pe materiale ecologice. Acest sistem nu numai că poate aduce un aport structural semnificativ, ci poate prezenta și premise avantajoase pentru îmbunătățirea performanțelor termice ale construcției per ansamblu. Deși materialele ecologice sunt tot mai prezente în domeniul construcțiilor, integrarea lor în procesul de consolidare a zidăriilor din piatră reprezintă o direcție de pionierat. Dezvoltarea unui sistem de cămășuire bazat pe aceste materiale implică cercetări interdisciplinare și o abordare inovatoare, ținând cont de particularitățile structurale și istorice ale construcțiilor monumentale.

1.1 Generalități

Construcțiile din zidărie din piatră cu valoare monumentală constituie, alături de zidăriile din cărămidă, componentele cele mai vulnerabile din fondului cultural construit din Europa și din România. Privind în retrospectivă, construcțiile din zidărie din piatră au dezvoltat de-a lungul timpului degradări variate, în special datorită cumulului unor efecte nefavorabile, cauzate de: seisme, utilizarea inadecvată a tehnicilor de punere în operă, inclusiv a materialelor și acțiunea vântului (mai ale în contextul expunerii în medii agresive). Așadar, construcțiile monumentale din zidărie din piatră, în lipsa expertizării și reabilitării/conservării, reprezintă componente ale fondului construit, cu valoare culturală, istorică sau religioasă, care nu mai corespund exigențelor actuale, ca urmare a degradărilor, schimbării funcționalului sau evoluției normelor de proiectare, factori ce pot surveni independent sau cumulativ.

În ceea ce privește construcțiile monumentale din zidărie din piatră, care în majoritatea cazurilor sunt creații arhitecturale, care nu au un model structural conceput pe baza unor metodologii de proiectare, este dificil să se distingă contribuția individuală a elementelor structurale la capacitatea de rezistență globală. În contextul conservării acestor monumente, primele inițiative au apărut în secolul al XVIII-lea, dar abia în secolul al XX-lea au fost stabilite fundamentele proceselor de restaurare și conservare (Mogoșanu, 2018).

Carta de la Atena, adoptată în 1931 în cadrul *Congresului Internațional de Arhitectură Modernă* (CIAM), a avut ca scop să definească principiile și direcțiile de intervenție asupra monumentelor istorice. Documentul a subliniat importanța respectării integrității istorice și a caracteristicilor originale ale construcțiilor, promovând astfel o abordare conservatoare. Acesta a subliniat și necesitatea documentării și cercetării aprofundate înaintea oricărei intervenții, pentru a înțelege în profunzime istoria și evoluția structurii. De asemenea, a pus accent pe rolul arhitecților și al specialiștilor în conservare în procesul de restaurare.

Carta de la Veneția, adoptată în 1964 în cadrul celei de-a doua *Conferințe Internaționale a Arhitecților și Tehnicienilor pentru Conservarea și Restaurarea Monumentelor* (ICOMOS), a continuat și a dezvoltat aceste principii. Acest document a pus un accent special pe importanța autenticității, evidențiind necesitatea ca restaurările să fie reversibile și să nu afecteze caracteristicile originale ale monumentelor. De asemenea, a subliniat importanța conservării contextului istoric și a mediului înconjurător al monumentului.

Atât *Carta de la Atena*, cât și *Carta de la Veneția*, au avut un impact semnificativ asupra practicilor de conservare și restaurare din întreaga lume. Aceste documente au furnizat un cadru de referință pentru specialiștii din domeniul conservării și au contribuit la protejarea și valorificarea patrimoniului cultural mondial, inclusiv a monumentelor din zidărie din piatră, astfel încât acestea să poată fi admirate și apreciate de generațiile actuale și viitoare.

În 1976, în cadrul Consiliului Europei s-a stabilit un cadru unic, aplicabil în toate țările membre, care permite dezvoltarea armonioasă a reglementărilor referitoare la consolidarea și conservarea construcțiilor monumentale. În timp, acest cadru a suferit modificări și adaptări,

convenite în cadrul unor evenimente specifice, cu scopul de a ține cont de particularitățile legislative ale fiecărui stat membru. Printre cele mai semnificative reglementări introduse după anul 1976 se remarcă următoarele (Tereja, 2008; Țăranu, 2009; Gonzalez et al, 2021):

- **„Carta europeană a planificării teritoriale” - redactată în 1983**
Stabilește bazele comune pentru implementarea politicilor de protejare a naturii și a patrimoniului construit.
- **„Convenția de la Granada” – redactată în 1985**
Stabilește setul minimal de obiective pentru elaborarea legislației naționale privind protejarea patrimoniului cultural.
- **„Carta internațională pentru salvarea orașelor istorice” – redactată în 1987**
Stabilește obiectivele și metodologia pentru conservarea orașelor istorice.
- **„Declarația de la Helsinki” – redactată în 1996**
Stabilește cadrul legal, în contextul dezvoltării durabile, pentru utilizarea și conservarea patrimoniului cultural.

În România, pe baza cadrului unitar european, au fost adoptate o serie de norme metodologice și legi care reglementează statutul clădirilor istorice. Cele mai semnificative acte legislative, ordine ministeriale și hotărâri guvernamentale emise la nivel național, ce vizează problema clădirilor monumentale, sunt prezentate în Figura 1 (adaptat după: <http://www.cultura.ro/Documents.aspx?ID=66>). Consolidarea unei construcții monumentale din zidărie din piatră poate fi realizată numai în conformitate cu cadrul legal prezentat în Figura 1 și numai după o expertiză detaliată care investighează atât materialele componente și tehnicile de zidire, cât și principiile după care a fost construită. Prin urmare, alegerea metodei și strategiei de consolidare reprezintă un proces amplu, care implică următoarele etape premergătoare:

Prima etapă implică expertizarea clădirii de către un expert tehnic. Acesta va efectua o evaluare a stării materialelor din care este construită structura de rezistență, utilizând metode analitice, calcul numeric și teste experimentale (încercări distructive și nedistructive, după caz). Evaluarea are și scopul de a determina compatibilitatea dintre materialele existente și cele propuse pentru utilizare în procesul de consolidare. Pe baza acestei evaluări, expertul tehnic va selecta și proiecta intervențiile necesare asupra structurii, în concordanță cu normele și reglementările tehnice valabile la momentul respectiv (Budescu et al, 2003). Evaluarea și propunerile pentru de intervenție vor fi documentate de către expert într-un raport de expertiză, în conformitate cu forma și conținutul stipulate de legislația în vigoare (conform normelor P100-3, 2018).

În cadrul celei de-a doua etape, se organizează execuția lucrărilor de intervenție, cu respectarea specificațiilor prevăzute în ghidurile de consolidare și în fișele tehnice ale materialelor. Atunci când se utilizează materiale noi, sisteme prototip pentru consolidare sau se dorește extinderea aplicabilității materialelor, se efectuează o evaluare experimentală, prin replicare, a răspunsului structural al sistemului reabilitat la solicitările la care a fost proiectat (Țăranu, 2009).

Legea 157/1997	<ul style="list-style-type: none"> privind ratificarea Convenției pentru protecția patrimoniului arhitectural al Europei, adoptată la Granada la 3 octombrie 1985
ORDIN nr. 2.032 din 14 iulie 1999	<ul style="list-style-type: none"> pentru înființarea Comisiei de Atestare în Domeniul Monumentelor Istorice și aprobarea normelor și criteriilor de atestare a experților în domeniul protejării monumentelor istorice și a specialiștilor în domeniul conservării și restaurării monumentelor istorice
Legea 5/2000	<ul style="list-style-type: none"> privind aprobarea Planului de amenajare a teritoriului național - Secțiunea a III-a - zone protejate
Legea 422/2001	<ul style="list-style-type: none"> privind protejarea monumentelor istorice
Legea 564/2001	<ul style="list-style-type: none"> pentru aprobarea Ordonanței Guvernului nr. 47/2000 privind stabilirea unor măsuri de protecție a monumentelor istorice care fac parte din Lista patrimoniului mondial
HOTĂRÂRE nr. 1.258 din 2001	<ul style="list-style-type: none"> privind organizarea și funcționarea Oficiului Național al Monumentelor Istorice
Legea 451/2002	<ul style="list-style-type: none"> pentru ratificarea Convenției europene a peisajului, adoptată la Florența la 20 octombrie 2000
HOTĂRÂRE nr. 1.309 din 20 noiembrie 2002	<ul style="list-style-type: none"> pentru aprobarea Normelor metodologice privind cuantumul timbrului monumentelor istorice și modalitățile de percepere, încasare, virare, utilizare și evidențiere a sumelor rezultate din aplicarea acestuia
HOTĂRÂRE nr. 610 din 29 mai 2003	<ul style="list-style-type: none"> pentru aprobarea Normelor metodologice privind procedura de acordare a creditelor necesare efectuării de lucrări de protejare la monumentele istorice deținute de persoanele fizice sau juridice de drept privat
HOTĂRÂRE nr. 1.430 din 4 decembrie 2003	<ul style="list-style-type: none"> pentru aprobarea Normelor metodologice privind situațiile în care Ministerul Culturii și Cultelor, respectiv autoritățile administrației publice locale, contribuie la acoperirea costurilor lucrărilor de protejare și de intervenție asupra monumentelor istorice, proporția contribuției, procedurile, precum și condițiile pe care trebuie să le îndeplinească proprietarul, altul decât statul, municipiul, orașul sau comuna
HOTĂRÂRE nr. 493 din 1 aprilie 2004	<ul style="list-style-type: none"> pentru aprobarea Metodologiei privind monitorizarea monumentelor istorice înscrise în Lista patrimoniului mondial și a Metodologiei privind elaborarea și conținutul-cadru al planurilor de protecție și gestiune a monumentelor istorice înscrise în Lista patrimoniului mondial

Figura 1 Acte legislative, ordine ministeriale și hotărâri guvernamentale emise la nivel național, ce vizează problema clădirilor monumentale (adaptat după: <http://www.cultura.ro/Documents.aspx?ID=66>)

În cadrul procesului de reabilitare a construcțiilor istorice, se recomandă utilizarea materialelor tradiționale, cum ar fi lemnul, piatra în forma brută sau prelucrată, mortarul, oțelul, și altele asemenea, care prezintă caracteristici fizice și mecanice similare cu cele ale materialelor istorice originale. Această abordare asigură că aspectul vizual al elementelor reabilite și restaurate se integrează armonios în structura generală a clădirii, păstrându-i caracterul unitar (Tudor, 2012; Syngellakis, 2013; Gattesco et al, 2015; Panagiotis și Vagelis, 2015; Feo et al, 2016; Costa et al, 2018; Ferreira et al, 2019).

Cu toate acestea, utilizarea materialelor tradiționale implică o masă adițională considerabilă, ceea ce poate avea un impact negativ asupra greutateii totale a elementelor consolidate și poate duce la o solicitare crescută asupra fundațiilor existente. Mai mult decât atât, în multe cazuri, cerințele actuale privind comportamentul structural în cazul acțiunilor seismice nu pot fi îndeplinite doar prin utilizarea sistemelor tradiționale de consolidare.

În ultimele decenii, la consolidarea monumentelor istorice s-au folosit materiale și sisteme compozite, compuse din polimeri vinilesterici și acrilici, rășini epoxidice sau poliesterice, țesături din fibre de carbon, sticlă, aramidice, dar și materiale compozite pultrudate, de diferite forme. Utilizarea acestor materiale este însă dificilă la zidăriile din piatră, ca urmare a neregularității rosturilor și a lipsei de planeitate a elementelor datorate fețelor pietrelor. Mai mult, cerințele actuale referitoare la sustenabilitate și economia de resurse pot rareori fi satisfăcute doar prin utilizarea acestor soluții structurale.

Așadar, în prezent, există un real interes din partea cercetătorilor, cu privire la dezvoltarea unor sisteme de consolidare a zidăriilor din piatră cu materiale compozite ecologice (Cardinale et al, 2021; Lopes et al, 2024). Această abordare combină avantajele sistemelor compozite cu principiile și politicile actuale privind economia de resurse și utilizarea materialelor ecologice, oferind o alternativă sustenabilă la sistemele clasice de consolidare.

Independent de sistemul de consolidare ales, premurgător lucrărilor, trebuie stabilită o serie de elemente principale, după cum este ilustrat în Figurile 2, 3 și 4: elemente privind identificarea construcției și a tipului structurii, elemente privind identificarea cauzelor degradărilor, precum și determinarea avariilor caracteristice.

Consolidarea zidăriilor din piatră poate implica atât metode și materiale tradiționale, cât și moderne. Indiferent de alegerea făcută, sistemele de consolidare reprezintă adaptări ale unor soluții similare, utilizate în mod obișnuit pentru zidăriile din cărămidă. Această lucrare se concentrează, în special, asupra sistemelor și metodelor de consolidare aplicate pereților din zidărie din piatră brută sau prelucrată.

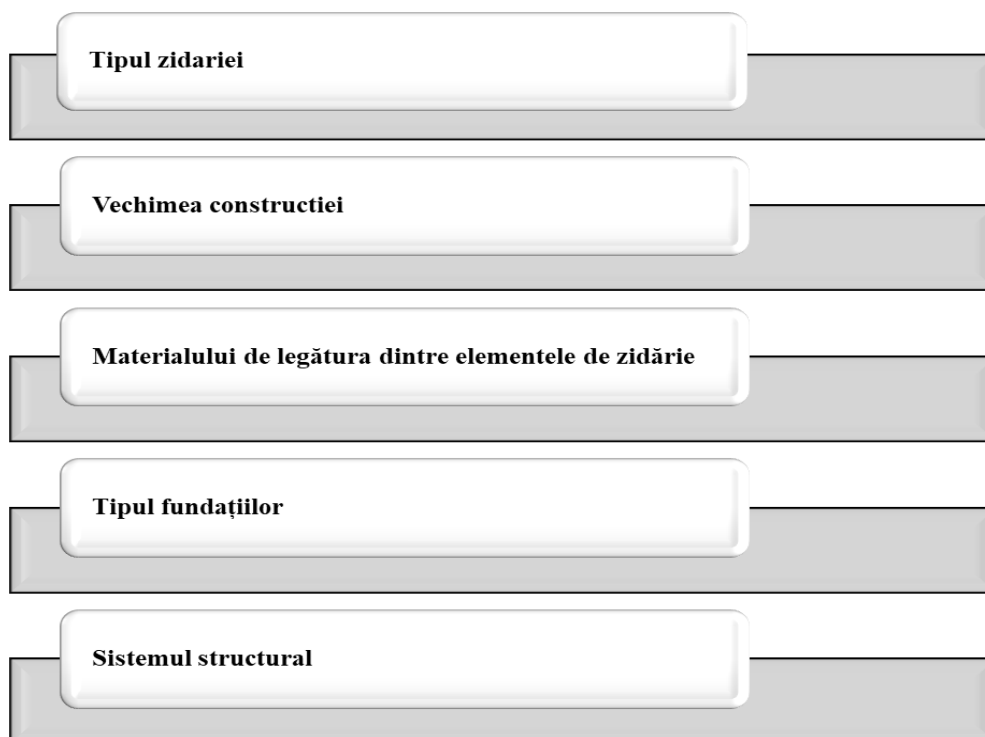


Figura 2 Elemente privind identificarea construcției și a tipului structurii

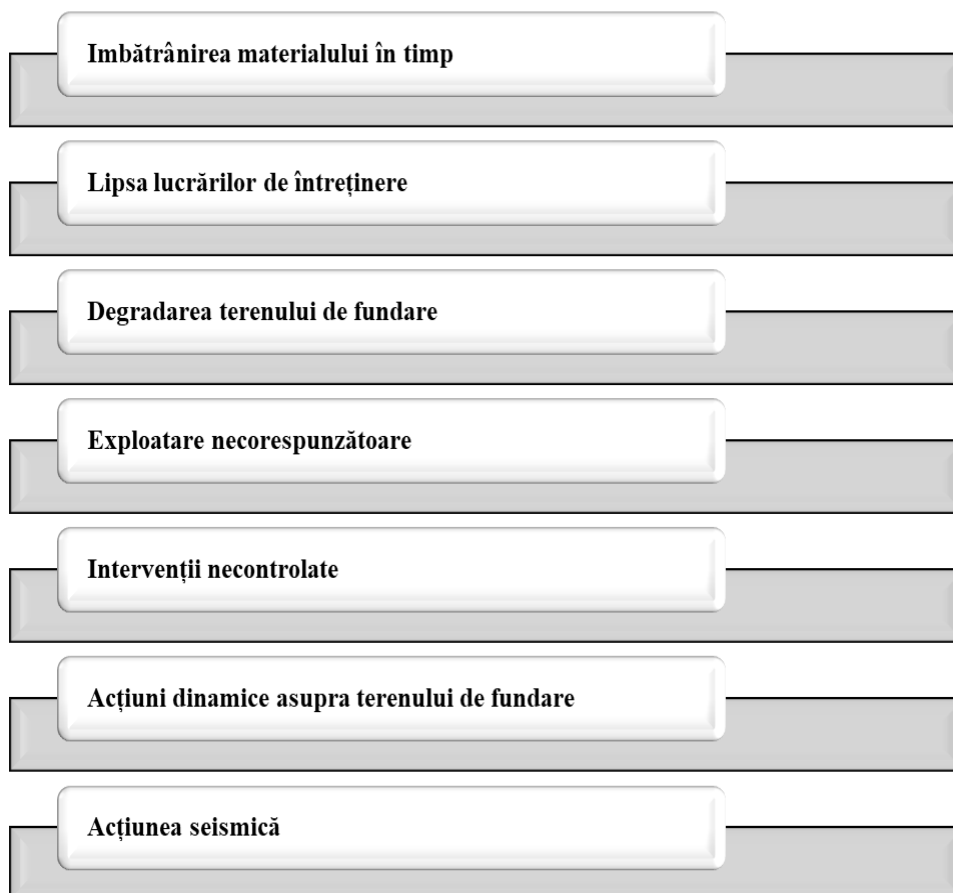


Figura 3 Elemente privind identificarea cauzelor degradărilor



Figura 4 Determinarea avariilor caracteristice

1.2 Motivația și obiectivele cercetării

Tematica generală a tezei de doctorat se referă la eficiența structurală și performanța termică a sistemelor de consolidare prin cămășuire, aplicate la pereții din zidărie din piatră. Aceste sisteme prezintă alcătuirii variate și pot include o paletă largă de materiale tradiționale sau moderne. Cu toate acestea, conform legislației din România, cerința fundamentală a acestor sisteme este cea referitoare la rezistență și stabilitate, iar aspecte precum sustenabilitatea sau performanțele termice sunt de multe ori neglijate. Ca urmare a acestui fapt, în literatura de specialitate, atât la nivel național cât și la nivel internațional, se regăsesc puține studii referitoare la acest subiect. Această constatare a condus la proiectarea și realizarea unui program de cercetare complex, structurat pe mai multe paliere.

Principalele obiective urmărite în cadrul programului doctoral au fost:

- Descrierea componentelor structurilor din zidărie din piatră;

- Identificarea sistemelor structurale din zidărie din piatră și ale formelor arhitecturale asociate, în raport cu funcționalul construcțiilor și cu perioada de timp în care acestea au fost edificate;
- Elaborarea unui studiu de sinteză care prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul consolidării construcțiilor din zidărie din piatră;
- Descrierea cauzelor și factorilor externi care pot contribui la dezvoltarea degradărilor, respectiv la diminuarea durabilității construcțiilor din zidărie din piatră;
- Identificarea metodologiilor de investigare, expertizare, respectiv de aplicare a lucrărilor de intervenții la structurile din zidărie din piatră;
- Identificarea și descrierea celor mai utilizate metode tradiționale și moderne de consolidare a zidărilor din piatră, în raport cu elementul pe care sunt aplicate (fundații, pereți, stâlpi, arce, planșee, bolți);
- Realizarea unor studii microscopice, spectroscopice și petrografice pe diverse eșantioane de piatră în vederea identificării unui set de parametri necesar pentru selectarea unor pietre compatibile din punct de vedere fizic și chimic cu materialele utilizate la construcțiile monumentale din zidărie din piatră din zona Moldovei;
- Identificarea metodologiilor de investigare pe cale experimentală a răspunsului structural la forfecare al pereților din zidărie din piatră;
- Conceperea și elaborarea unui amplu program experimental privind identificarea și descrierea factorilor ce definesc răspunsul structural la forfecare al pereților din zidărie din piatră, consolidați prin cămășuire, pe o față sau pe ambele fețe, cu mortare de var și perlit armate cu fibre din cânepă;
- Identificare criteriilor de cedare (adaptate comportamentului global în domeniul neliniar) ale pereților din zidărie din piatră și exemplificarea lor prin intermediul analizelor avansate micro-numerice;
- Conceperea și elaborarea unui program experimental privind îmbunătățirea performanțelor termice ale pereților din zidărie din piatră, consolidați prin cămășuire, pe o față sau pe ambele fețe, cu mortare de var și perlit armate cu fibre din cânepă;

1.3 Conținutul tezei

Teza de doctorat este structurată pe nouă capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 – *Introducere*, definește motivația și stabilește obiectivele ce au stat la baza cercetărilor din programul de doctorat. De asemenea, în cea de a doua parte, este descris succint conținut fiecărui capitol al tezei de doctorat.

Capitolul 2 – *Structuri din zidărie – Specificații generale de alcătuire*, tratează evoluția structurilor din zidărie din piatră și descrie materialele utilizate la realizarea lor.

Capitolul 3 – *Stadiul actual al cercetării în domeniul consolidării construcțiilor din zidărie din piatră*, prezintă, în prima parte, o sinteză bibliografică referitoare la degradarea și nivelele de avarii asociate construcțiilor din piatră. În cea de a doua parte a Capitolului 3 este prezentat cadrul legal care stă la baza expertizării construcțiilor monumentale din piatră și sunt exemplificate lucrările de intervenție, din perspectiva prescripțiilor tehnice și normativelor actuale. Pentru fiecare metodă de consolidare exemplificată se evidențiază avantajele și dezavantajele rezultate ca urmare a utilizării materialelor componente, cât și a tehnologiilor de punere în practică.

Capitolul 4 – *Cercetări privind identificarea sursei de piatră utilizată la clădirile monumentale*, prezintă o serie de studii pentru identificarea unui set de parametri necesar pentru selectarea unor pietre compatibile din punct de vedere fizic și chimic cu materialele utilizate la construcțiile monumentale din zidărie din piatră din zona Moldovei. Aceste cercetări au condus la identificarea pietrei utilizată la realizarea modulelor din zidărie de piatră pentru programul experimental prezentat în capitolele următoare.

Capitolul 5 – *Cercetări experimentale privind sistemele de cămășuire cu materiale compozite ecologice aplicate pereților din zidărie de piatră*, constă în descrierea programului experimental dezvoltat în scopul determinării răspunsului structural la forfecare a sistemelor de consolidare moderne și sustenabile, aplicate la pereții din zidărie din piatră. În acest capitol, se descriu materialele utilizate pentru realizarea modulelor din zidărie din piatră, materialele componente ale sistemului de cămășuire, rezultatele încercărilor mecanice preliminare realizate pe toate materialele constitutive și modalitatea de instrumentare a modulelor din zidărie, în vederea monitorizării pe parcursul testării la compresiune pe diagonală.

Capitolul 6 – *Rezultate ale programului experimental privind sistemele de consolidare prin cămășuire a zidărilor din piatră*, prezintă și analizează rezultatele obținute pe cale experimentală. Astfel, pentru fiecare modul din zidărie din piatră:

- se descrie modul specific de cedare;
- se evaluează forța capabilă ultimă, deplasarea ultimă și deformația specifică unghiulară ultimă;
- se trasează graficele încărcare - deplasare;
- se trasează curbele tensiuni tangențiale - deformații specifice unghiulare;
- se determină modulii de elasticitate și rigiditate;
- se evaluează îmbunătățirea ductilității.

Capitolul 7 – *Modelarea numerică a comportamentului structural la forfecare a pereților consolidați din zidărie din piatră*, descrie în detaliu starea de tensiuni-deformații specifice din zidăria din piatră și prezintă diferite metode de modelare, respectiv de analiză numerică/micro-numerică destinate pereților consolidați din zidărie nearmată. În cea de a doua parte a Capitolului 7, se prezintă un studiu de analiză numerică cu element finit, dezvoltate pentru determinarea

răspunsului structural la forfecare a modulelor din zidărie din piatră ce au făcut obiectul programului experimental descris în cadrul Capitolului 6.

Capitolul 8 – *Performanțe termice ale sistemului de cămășuire cu mortar de var, perlit și țesături din cânepă*, prezintă principalele aplicații din domeniul construcțiilor ale perlitului și a cânepii. În cea de a doua parte a Capitolului 8 se descrie metoda de instrumentare a modulelor din zidărie din piatră, precum și programul experimental, respectiv rezultatele generate prin cercetările efectuate cu privire la performanțele termice sistemului de cămășuire cu mortar de var, perlit și țesături din cânepă.

Capitolul 9 – *Concluzii generale. Contribuții personale. Valorificarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare*, încheie teza de doctorat prin formularea concluziilor generale și prezentarea în detaliu a contribuțiilor personale, respectiv a modul de valorificare a acestora. De asemenea sunt propuse posibile direcții de cercetare viitoare.

1.4 Aspecte teoretice și studii întreprinse pe parcursul ciclului doctoral

Zidăria din piatră reprezintă una dintre cele mai vechi și mai utilizate tehnici de construcție utilizate de către om. De-a lungul istoriei, construcțiile din piatră au fost martore la evoluția societăților și au contribuit la definirea peisajului urban și rural în toate colțurile lumii. Această formă de construcție, prin durabilitatea și frumusețea sa, a fost adesea asociată cu monumentele și clădirile istorice, devenind parte integrantă a patrimoniului cultural și arhitectural al omenirii.

În ce privește construcțiile monument, zidăria din piatră ocupă un loc central, reprezentând uneori chiar esența acestora. Aceste construcții sunt edificii sau structuri care, prin semnificația lor culturală, istorică, sau arhitecturală, au o importanță deosebită și sunt recunoscute ca atare la nivel național sau internațional. Acestea pot fi simboluri ale unor civilizații sau epoci istorice, mărturii ale realizărilor umane sau pur și simplu opere de artă în sine.

Construcțiile monument sunt adesea supuse unor constrângeri specifice, atât din punct de vedere al conservării patrimoniului cultural și al valorii istorice, cât și al compatibilității dintre tehnologia și materialelor disponibile la momentul construcției și cele utilizate la restaurare. Astfel, restaurarea și conservarea construcțiilor monument reprezintă adesea provocări complexe, care necesită expertiză interdisciplinară și abordări inovatoare. Mai mult, cu toate că tehnologia de execuție a zidărilor din piatră nu prezintă o complexitate ridicată, analiza performanțelor structurale ale acestor structuri la diferite solicitări și scenarii de utilizare reprezintă o provocare inginerescă remarcabilă. Existența rosturilor neuniforme contribuie la formarea unor zone slabe în structura internă a materialului, care se concretizează prin reducerea capacității de rezistență a elementului din zidărie din piatră la întindere și forfecare.

Construcțiile din zidărie din piatră cu valoare monumentală constituie, alături de zidăriile din cărămidă, componentele cele mai vulnerabile din fondului cultural construit din Europa și din România. Privind în retrospectivă, construcțiile din zidărie din piatră au dezvoltat de-a lungul

timpului degradări variate, în special datorită cumulului unor efecte nefavorabile, cauzate de: seisme, utilizarea inadecvata a tehnicilor de punere în operă, inclusiv a materialelor și acțiunea vântului (mai ale în contextul expunerii în medii agresive). Așadar, construcțiile monumentale din zidărie din piatră, în lipsa expertizării și reabilitării/conservării, reprezintă componente ale fondului construit, cu valoare culturală, istorică sau religioasă, care nu mai corespund exigențelor actuale, ca urmare a degradărilor, schimbării funcționalului sau evoluției normelor de proiectare, factori ce pot surveni independent sau cumulativ.

În cadrul Capitolului 2, s-au explorat și analizat în detaliu elementele cheie legate de structurile din zidărie, cu accent pe zidăriile din piatră. În prima parte se prezintă importanța acestor structuri în arhitectura și istoria construcțiilor, evidențiind rolul lor în dezvoltarea societăților umane de-a lungul timpului. În continuare, s-au investigat și prezentat diferitele componente ale zidăriilor, cum ar fi unitățile de zidărie și mortarele de zidărie, evidențiind diversitatea materialelor și tehnicilor utilizate în varii contexte. S-au analizat, de asemenea, mortare de zidărie utilizate în România, aducând în discuție caracteristicile lor specifice și evoluția lor de-a lungul timpului. În secțiunea dedicată tipurilor de zidării din piatră, s-au investigat și descris detaliat zidăriile din piatră brută, cele din piatră prelucrată și zidăriile mixte din piatră. S-au identificat elementele componente ale acestor structuri, s-a evidențiat diversitatea materialelor și tehnicilor utilizate, și s-a subliniat importanța cunoașterii și conservării acestor tradiții în construcții. Acest fundament solid de cunoștințe va servi drept bază pentru capitolele următoare ale tezei, care se vor concentra pe aspecte mai specifice și detaliate ale zidăriilor din piatră.

Capitolul 3 a adus în prim-plan o panoramă comprehensivă a cunoștințelor actuale din domeniu consolidării zidăriilor din piatră. Analiza literaturii de specialitate a relevat mai multe aspecte esențiale cu privire la degradarea, expertizarea și consolidarea structurilor din zidărie din piatră, furnizând o imagine clară asupra progreselor, tendințelor și provocărilor care înconjoară acest subiect, important și necesar, pentru conservarea patrimoniului arhitectural și pentru asigurarea securității construcțiilor. Unul dintre aspectele semnificative abordate în acest capitol este nivelul de degradare a structurilor din zidărie din piatră și modul în care acesta poate afecta performanța structurală și securitatea acestora. În acest context, s-a evidențiat că expertizarea structurilor este importantă pentru evaluarea stării de degradare și determinarea necesității intervenției. De asemenea, s-au investigat proprietățile materialelor și sistemelor utilizate în repararea și consolidarea zidăriilor din piatră, subliniindu-se importanța selecției acestora în funcție de particularitățile necesităților de utilizare. În ultima parte a capitolului s-au detaliat metodele de consolidare a pereților din piatră, evidențiind avantajele și limitările fiecăreia. S-a constatat astfel că există o varietate de abordări și tehnici disponibile, care pot fi adaptate în funcție de necesitățile specifice pentru atingerea unei capacități portante îmbunătățite.

Pentru fiecare caz au fost punctate avantajele și limitările datorate atât materialelor componente ale sistemelor, cât și tehnologiilor de punere în practică. Pe baza acestor considerente, a fost proiectat și s-a desfășurat programul experimental prezentat în cadrul capitolelor următoare. Datorită compatibilității cu substratul din zidărie și a unor caracteristici mecanice favorabile, a fost

selectată metoda de cămășuire cu mortare armate cu fibre, metodă aplicată pereților din zidărie nearmată din cărămidă.

În cadrul capitolului 4 au fost prezentate principiile care stau la baza selecției pietrelor utilizate în procesele de restaurare a zidărilor din piatră și importanța studiilor petrografice, microscopice și spectroscopice, în contextul dat. În cea de a doua parte a capitolului, s-a prezentat un program experimental dezvoltat în scopul selecției unor pietre cu caracteristici similare celor utilizate la construcția monumentelor. Aceste materiale au fost ulterior folosite pentru construirea modulelor din zidărie din piatră care au făcut obiectul programului experimental prezentat în cadrul capitolelor 5 și 6. În urma analizei detaliate a probelor de piatră S1, S2, S3 și S4, precum și a comparației acestora cu piatra originală din zidul Mănăstirii Frumoasa, se pot formula mai multe concluzii importante:

- Identificarea tipului de piatră: Toate cele trei probe de carieră (S2, S3, S4) au fost identificate ca fiind calcar, compatibile cu piatra originală din zidul Mănăstirii Frumoasa, proba S1, care a fost confirmată a fi de asemenea calcar.
- Deteriorările interne și externe: Proba S1, care reprezintă piatra originală din zidul Mănăstirii Frumoasa, prezintă deteriorări semnificative, atât interne, cât și externe, cu zone de sedimentare slăbite. De asemenea, conține concentrații mai mari ale elementelor K (potasiu) și Fe (fier), care pot fi atribuite mineralelor de argilă și oxihidroxizilor de fier care au constituit micritul din structura sa.
- Compoziția a carbonaților: Analiza XRF a identificat prezența următorilor carbonați în cele patru probe: CaCO_3 (calcit), FeCO_3 (siderit) și $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ (ankerit).
- Similaritatea petrografică: Proba S3, care provine de la Cotnari (Poiana Deleni), se apropie cel mai mult de compoziția probei S1 din zidul original. Această similitudine poate face din piatra de la Cotnari o alegere potrivită pentru restaurarea sau înlocuirea pietrei din zidul original.
- Compatibilitatea de textură și aspect: Deoarece factorul estetic este important în placarea pereților interiori și exteriori, în realizarea zidăriei aparente și a aleilor pietonale, nu se recomandă utilizarea calcarului de Vama. Acest tip de piatră conține oxizi de fier care, în condiții de umiditate, pot cauza pete inestetice. De asemenea, acești oxizi de fier pot contribui la expansiunea mineralelor din piatră, slăbind astfel structura rocii.

În cadrul programului doctoral, pentru modulele de zidărie realizate și testate, s-a optat pentru utilizarea pietrei de la Poiana Deleni (Cotnari). Acest tip de piatră s-a dovedit a fi o alegere

adecvată, luând în considerare similitudinea sa cu piatra originală și capacitatea sa de a satisface cerințele estetice și de durabilitate în diferite aplicații de construcție și restaurare.

În cadrul programului experimental au fost utilizate, ca materiale pentru zidăria din piatră și sistemul de consolidare, două tipuri de mortare pe bază de var: un mortar pentru construirea modulelor de zidărie realizat din var și nisip și un mortar pentru soluția de consolidare realizat din var, nisip și perlit. Pentru aceste două tipuri de mortare, în Capitolul 5 s-au identificat caracteristicile de rezistență necesare pentru evidențierea performanțelor structurale ale acestora și, în mod special, pentru realizarea modelărilor numerice cu elemente finite prezentate în capitolul 7.

În baza tuturor aspectelor prezentate, în ultima parte a Capitolului 5 au fost descrise, proiectarea și realizarea modulelor de zidărie, neconsolidate și consolidate pe una sau ambele fețe, module realizate cu unități de piatră din cariera Deleni și mortare pe bază de var. Sistemul de consolidare inovativ propus a fost un material compozit ecologic, cu matricea din mortar pe bază de var și perlit și armatură din țesătură din cânepă, straturile de material compozit fiind fixate de zidărie prin ancore chimice realizate din fibre de cânepă impregnate cu rășină epoxidică. Totodată a fost prezentată și echiparea în vederea efectuării de măsurători în încercările experimentale.

Obiectivul principal urmărit în cadrul Capitolului 6 a constat în prezentarea comparativă a rezultatelor programului experimental și a celor numerice. Aceste rezultate au fost raportate la principalii parametri ce definesc performanțele structurale la solicitarea de forfecare ale pereților din zidărie din piatră, consolidați prin cămășuire. Prezentarea în detaliu a analizelor numerice se regăsește în cadrul Capitolului 7.

Rezultatele obținute (forțe ultime, deplasări și deformațiilor specifice unghiulare) nu au fost comparate cu valori determinate pe cale analitică, deoarece există o incompatibilitate, în principal datorată modurilor de cedare determinate pe cale experimentală și a celor definite de modelele teoretice de calcul. Aceste incompatibilități apar datorită prezenței ancorelor de fixarea de modulul de zidărie a straturilor compozite din sistemul de consolidare, particularitate a căror influențe nu sunt incluse în modelele analitice.

Modelele analitice au fost dezvoltate considerând un mod de cedare unic, pentru zidăriile din piatră și din cărămizi, caracterizat prin dezvoltarea unei fisuri pe direcția diagonalei verticale, cu aspect „în trepte”. În cazul modulelor din zidărie din piatră consolidate prin cămășuire, configurațiile ancorajelor chimice pot induce o modificare a acestui mod de cedare, după cum a fost evidențiat de testele efectuate în cadrul programului experimental.

Pentru toate modulele experimentale s-a constatat existența unui mod de cedare dominant, caracterizat prin separarea în două părți simetrice, datorat unei fisuri dezvoltate de-a lungul diagonalei verticale. Cu toate acestea, în cazul modulelor experimentale cămășuite pe ambele fețe, tiparul fisurii este ușor diferit, prin faptul că urmează traseul radial descris de zona perimetrală a ancorelor. Prin urmare, se poate concluziona că dispunerea fibrelor în formă radială a constituit o

armare adițională, independentă față de cămășuia propriu zisă, fapt ce a asigurat patru regiuni distincte (capetele ancorelor chimice) ce nu au înregistrat degradări importante pe parcursul testelor. Odată cu debutul etapei post-elastice, pentru cazul modulelor cămășuite pe ambele fețe, se remarcă apariția și dezvoltarea unui mod caracteristic de cedare, independent, caracterizat prin smulgerea fibrelor de cânepă de la capetele ancorelor. Cu toate acestea, smulgerea fibrelor are, în toate cazurile întâlnite, un caracter izolat.

După generarea curbelor încărcare-descărcare, s-a constatat un comportament liniar pentru toate modulele testate, cu modificări de pantă doar în cazul modulului neconsolidat. În cazul celor 3 module din zidărie din piatră cămășuite pe ambele fețe s-a identificat un palier în deplasarea măsurată cuprins între 0 și ± 4 mm, pe parcursul căruia forța rămâne cvasi-constantă. Ca alură, acest palier este asemănător cu zona de curgere a oțelului moale. Existența acestui palier certifică îmbunătățirea ductilității globale ca urmare a eficienței structurale a sistemului de consolidare.

În ceea ce privește primul modul de referință, care reprezintă un perete neconsolidat, forța maximă înregistrată (forța ultimă) a fost de aproximativ 27 kN. Această forță a fost însoțită de o deplasare totală de 2,83 mm în direcție verticală și de 1,91 mm în direcție orizontală.

În cazul modulelor consolidate pe o singură față, valorile ultime ale forțelor determinate pe cale experimentală prin testarea celor două module (43, respectiv 44 kN) și valoarea determinată prin intermediul analizei numerice (45 kN), rezultatele sunt similare. De asemenea, deplasările înregistrate prezintă valori ultime similare (≈ 14 mm în direcție orizontală, respectiv ≈ 12 mm în direcție verticală).

În etapa post-elastică, modulele din zidărie din piatră consolidate prin cămășuire pe ambele fețe au prezentat un mod de cedare adițional, caracterizat prin smulgerea fibrelor de cânepă de pe regiunea de capăt a ancorajelor. În ce privește valorile ultime ale forțelor, rezultatele înregistrate pe cale experimentală (59 kN pentru primul modul, respectiv 60 kN pentru modulele 2 și 3) sunt aproximativ egale cu cele înregistrate pe cale numerică (60 kN). De asemenea, deplasările înregistrate prezintă valori ultime similare (≈ 12 mm atât în direcție orizontală, cât și în direcție verticală).

Pentru a evidenția aportul de rezistență structurală, se prezintă în continuare, creșterile procentuale ale forțelor ultime înregistrate pentru modulele consolidate în raport cu modulul neconsolidat:

➤ Pentru modulele consolidate pe o singură față:

Valori determinate experimental

- Pentru modulul cu forța maximă de 43 kN:

Creștere procentuală cu $\approx 59.26\%$

- Pentru modulul cu forța maximă de 44 kN:

Creștere procentuală cu $\approx 62.96\%$

Valoare determinată numeric

- Pentru modulul consolidat pe o singură față:

Creștere procentuală cu $\approx 66.67\%$

➤ Pentru modulele consolidate pe ambele fețe:

Valori determinate experimental

- Pentru modulul cu forța maximă de 59 kN:

Creștere procentuală cu $\approx 118.52\%$

- Pentru modulul cu forța maximă de 60 kN:

Creștere procentuală cu $\approx 122.22\%$

Valori determinată numeric

- Pentru modulul consolidat pe ambele fețe:

Creștere procentuală cu $\approx 122.22\%$

Aceste creșteri procentuale reflectă îmbunătățirile în valoarea de referință a forței ultime înregistrată pentru modulele consolidate față de peretele neconsolidat. Se observă că valorile obținute experimental și cele determinate numeric sunt în general similare, cu mici variații.

O observație semnificativă identificată în cadrul programului experimental se referă la distribuțiile de deplasări ale modulului de zidărie consolidat pe o singură față. Datele captate de la cele patru traductoare evidențiază variații asemănătoare atât până la atingerea forței ultime, cât și după diminuarea acesteia cu aproximativ 30%. Acest aspect unitar al comportamentului structural al modulului consolidat pe o singură față sugerează aplicabilitatea acestui sistem de cămășuire în cazul construcțiilor monumentale din zidărie, în special atunci când intervenția structurală la ambele fețe ale peretelui nu este fezabilă din considerente legate de conservarea detaliilor arhitecturale.

Analizând variațiile tensiunilor tangențiale, s-a remarcat o creștere aproape liniară până la atingerea nivelului maxim. Valorile ultime ale tensiunilor tangențiale, înregistrate pentru modulele cămășuite pe ambele fețe, sunt cu aproximativ 20 – 25% mai mari decât cele înregistrate pentru modulele cămășuite pe o singură față. De asemenea, în cazul valorilor furnizate de analiza numerică, se observă o creștere cu 35% a tensiunilor tangențiale maxime obținute în analiza numerică cu element finit pentru modelul micro-numeric asociat modulelor cămășuite pe ambele fețe, în comparație cu modelul micro-numeric asociat modulelor consolidate pe o singură față.

De asemenea, deformațiile specifice unghiulare ultime, determinate pe cale experimentală sunt cu 20-25% mai mari în cazul modulelor cămășuite pe ambele fețe, în comparație cu modulul cămășuit pe o singură față.

Proprietățile favorabile ale sistemelor de consolidare evaluate sunt subliniate de o creștere semnificativă a ductilității, cu valori cuprinse între 10% și 60%, în comparație cu rezultatele obținute pentru perețele neconsolidat. În plus, deși sistemul de cămășuire are o grosime totală redusă, utilizarea ancorelor chimice a contribuit semnificativ la stabilitatea laterală, fără a fi înregistrate deformări în afara planului de încărcare.

Modelele analitice de calcul ale pereților consolidați din zidărie din piatră prezintă diferențe semnificative în comparație cu cele concepute pentru elementele din beton, în principal din cauza complexității tensiunilor prezente în structură. În plus, din cauza caracterului neuniform și anizotrop al zidărilor din piatră, utilizarea ca atare a modelelor teoretice este impracticabilă. În anumite situații, s-au reușit adaptări ale formulărilor analitice pentru sisteme de consolidare mai simple, care implică o gamă limitată de materiale compozite. Cu toate acestea, în majoritatea cazurilor, aceste modele se bazează pe analize matematice complexe, făcându-le dificil de aplicat în practică, în special în cazul sistemelor de consolidare complexe, care utilizează materiale cu proprietăți mecanice și elastice diferite. Pentru astfel de situații, este necesară utilizarea analizelor numerice pentru a determina toate componentele tensiunilor și deformațiilor specifice. Modelele numerice trebuie definite astfel încât să fie cât mai apropiate de realitatea fizică și să fie validate prin intermediul programelor experimentale corespunzătoare. De asemenea, analizele numerice pot oferi informații valoroase în faza de proiectare a programelor experimentale.

Pe baza analizelor numerice prezentate în Teza de Doctorat, se pot formula următoarele concluzii/aprecieri:

- Modelele analitice de calcul, dezvoltate pentru a determina și caracteriza comportamentul structural global al elementelor din zidărie din piatră, fac parte din categoria modelelor teoretice pentru materiale și elemente cu rezistențe nesemnificative la întindere. În consecință, pereții din zidărie din piatră sunt considerați deficitari în a rezista la forțe de întindere și manifestă un comportament cvasi liniar-elastic atunci când sunt supuși încărcărilor de compresiune. Chiar și în aceste condiții, în funcție de caracteristicile fizice, elastice și mecanice ale constituenților, modelul analitic și/sau cel numeric asociat, pot varia de la cele dezvoltate pentru materiale cu comportament liniar-elastic, la cele specifice materialelor cu comportament structural elasto-plastic.
- Până în prezent, modelele macro-numerice bazate pe elemente finite au fost în mod obișnuit acceptate pentru analiza sistemelor de consolidare cu plăci, platbande sau bare compozite.

- Modelele macro-numerice în analiza numerică cu element finit nu permit detalierea caracteristicilor micro-mecanice ale nivelurile de interfață și, în consecință, nu pot identifica și cuantifica zonele susceptibile pentru concentrații de tensiuni. În contrast, abordările de modelare numerică mai actuale, cum ar fi modelele micro-numerice, oferă capacitatea de a identifica și cuantifica toate aspectele legate de tensiuni și deformări specifice ale oricărui sistem de consolidare aplicabil structurilor din zidărie nearmată din cărămidă sau din piatră.
- Caracteristicile complexe ale geometriei și natura neomogenă a zidărilor din piatră legate sau nu cu mortar nu permit aplicarea ipotezelor de calcul specifice modelele analitice și numerice dezvoltate la nivel macro, pentru elemente și structuri din zidărie din cărămidă. Modul general de calcul static/dinamic, în care deformată unui structuri este exprimată în termeni de parametri independenți, cum ar fi rotirile și deplasările, iar ecuațiile de echilibru (la nivelul nodurilor) sunt obținute prin metoda deplasărilor, nu pot fi utilizate din cauza distribuției inegale a nodurilor pe suprafața elementelor.
- În cazul modelului micro-numeric aferent modulului consolidat, rezistența globală la forfecare este semnificativ mai mare decât cea înregistrată pentru modulul neconsolidat. După cum se poate observa, forța ultimă înregistrează o creștere de 35 kN (de la 25 kN - modulul neconsolidat la 60 kN - modulul consolidat). Totodată, tensiunile tangențiale maxime sunt de două ori mai mari (20 MPa) comparativ cu cele înregistrate pentru modulul de zidărie din piatră neconsolidat (9 MPa).
- În cazul modulului din zidărie din piatră neconsolidat, fisurile se dezvoltă în primele etape de încărcare, în timp ce în cazul modulului din zidărie consolidat, tiparele de fisurare se dezvoltă în etapele avansate de încărcare și prezintă o distribuție cvasi-uniformă.
- Modelul numeric al modulului neconsolidat a indicat o reducere accentuată a rigidității post-elastice, comparativ cu rezultatele înregistrate pentru modulul consolidat. Astfel, dacă forța ultimă scade cu 15 % (domeniul elasto-plastic), deplasarea totală este aproximativ egală pentru ambele modele micro-numerice.

În contextul utilizării perlitolui și a cânepii în domeniul construcțiilor, soluția prezentată în acest capitol depășește cadrul tradițional al produselor pentru construcții realizate din aceste materiale. În timp ce perlitul și cânepa au fost inițial utilizate în construcții într-un mod restrâns și convențional, sistemul de cămășuire propus în acest studiu aduce o abordare inovatoare și eficientă

pentru îmbunătățirea atât a performanțelor structurale, cât și a performanțelor termice ale clădirilor monument.

Prin înglobarea perlitului și a țesăturilor din cânepă în compoziția mortarului de var, soluția propusă nu numai că oferă o izolație termică eficientă, dar și rezolvă alte provocări specifice conservării patrimoniului construit. Spre deosebire de materialele tradiționale de izolație, cum ar fi vata minerală sau polistirenul, utilizarea perlitului și a cânepii în construcții nu numai că respectă cerințele estetice și de conservare, dar și contribuie la îmbunătățirea eficienței energetice și a confortului termic al clădirilor monument.

Prin urmare, soluția prezentată în acest studiu reprezintă un pas înainte în direcția promovării construcțiilor durabile și sustenabile. Integrarea perlitului și a cânepii în construcții nu doar oferă o alternativă ecologică și economică la materialele tradiționale, dar și deschide noi posibilități pentru utilizarea acestor materiale într-un mod inovator și eficient. Astfel, soluția propusă în acest studiu demonstrează potențialul și avantajele utilizării materialelor naturale și durabile în construcții și încurajează adoptarea unor practici mai sustenabile în domeniul construcțiilor.

Analiza rezultatelor experimentale privind aportul în izolarea termică al sistemului de cămășuire cu mortar de var, perlit și țesături din cânepă, dezvoltat în Capitolul 8, a oferit concluzii semnificative cu privire la eficiența acestui sistem în îmbunătățirea performanțelor termice ale clădirilor.

Modulul neconsolidat, reprezentând situația de referință în care zidăria nu a fost armată cu sistemul de cămășuire propus, a prezentat o temperatură finală de 61°C după aproximativ 12 ore de testare la 200°C. Această temperatură ridicată evidențiază incapacitatea peretelui neconsolidat de a oferi o izolație termică eficientă.

Comparativ cu modulul neconsolidat, atât modulul cămășuit pe o singură față, cât și modulul consolidat pe ambele fețe au prezentat temperaturi finale semnificativ mai scăzute, de 24,4°C, respectiv 17°C. Aceste temperaturi finale reduse reflectă eficacitatea sistemului de cămășuire în reducerea transferului de căldură prin zidărie și îmbunătățirea confortului termic al clădirilor.

În ceea ce privește diferențele procentuale, se remarcă că temperatura finală a fost redusă cu aproximativ 59,0% în cazul modulului cămășuit pe o singură față și cu aproximativ 72,1% în cazul modulului consolidat pe ambele fețe, comparativ cu modulul neconsolidat.

În cazul în care măsurătorile s-au efectuat în centrul ancorei chimice, din analiza modulului din zidărie din piatră consolidat pe ambele fețe, se deduce că adăugarea unor straturi suplimentare de mortar armat ar fi redundantă. Deși se observă o similaritate a graficului de variație a temperaturilor între acest modul și cel consolidat doar pe o față, valorile finale ale temperaturilor înregistrate sunt comparabile și indică că cele trei straturi din cazul precedent au același efect cu cele șase straturi din cazul modulului consolidat pe ambele fețe. Această observație subliniază eficacitatea soluției propuse, arătând că adăugarea de straturi suplimentare nu aduce beneficii

semnificative în ceea ce privește performanțele termice. Astfel, se confirmă că sistemul de cămășuire cu mortar de var, perlit și țesături din cânepă este nu doar eficient, ci și economic în utilizarea materialelor, contribuind la reducerea consumului de resurse și la eficientizarea procesului de construcție în general.

Cumulat, aceste concluzii subliniază importanța și beneficiile utilizării sistemului de cămășuire propus în îmbunătățirea eficienței energetice și a confortului termic al clădirilor. Prin integrarea perlitului și a țesăturilor din cânepă în compoziția mortarului de var, sistemul de cămășuire oferă o soluție durabilă și eficientă pentru izolarea termică a clădirilor, contribuind astfel la reducerea consumului de energie și a emisiilor de carbon.

1.5 Contribuții personale

Pe baza considerentelor prezentate anterior, se pot identifica următoarele contribuții personale ale autorului, în raport cu domeniul studiat:

- ❖ Descrierea componentelor structurilor din zidărie din piatră;
- ❖ Identificarea sistemelor structurale din zidărie din piatră și ale formelor arhitecturale asociate, în raport cu funcționalul construcțiilor și cu perioada de timp în care acestea au fost edificate;
- ❖ Elaborarea unui studiu de sinteză care prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul consolidării construcțiilor din zidărie din piatră;
- ❖ Descrierea cauzelor și factorilor externi care pot contribui la dezvoltarea degradărilor, respectiv la diminuarea durabilității construcțiilor din zidărie din piatră;
- ❖ Identificarea metodologiilor de investigare-expertizare, respectiv de aplicare a lucrărilor de intervenții la structurile din zidărie din piatră;
- ❖ Identificarea și descrierea celor mai utilizate metode tradiționale și moderne de consolidare a zidărilor din piatră, în raport cu elementul pe care sunt aplicate (fundații, pereți, stâlpi, arce, planșee, bolți);
- ❖ Realizarea unor studii microscopice, spectroscopice și petrografice pe diverse eșantioane de piatră în vederea identificării unui set de parametri necesar pentru selectarea unor pietre compatibile din punct de vedere fizic și chimic cu materialele utilizate la construcțiile monumentale din zidărie din piatră din zona Moldovei;
- ❖ Identificarea metodologiilor de investigare pe cale experimentală a răspunsului structural la forfecare al pereților din zidărie din piatră;
- ❖ Conceperea și elaborarea unui amplu program experimental privind identificarea și descrierea factorilor ce definesc răspunsul structural la forfecare al pereților din zidărie din

piatră, consolidați prin cămășuire, pe o față sau pe ambele fețe, cu mortare de var și perlit armate cu fibre din cânepă sub formă de țesături;

- ❖ Identificare criteriilor de cedare (adaptate comportamentului global în domeniul neliniar) ale pereților din zidărie din piatră și exemplificarea lor prin intermediul analizelor avansate micro-numerice;
- ❖ Conceperea și elaborarea unui program experimental privind îmbunătățirea performanțelor termice ale pereților din zidărie din piatră, consolidați prin cămășuire, pe o față sau pe ambele fețe, cu mortare de var și perlit armate cu fibre din cânepă.

1.6 Valorificarea rezultatelor programului de doctorat

Activitatea de cercetare desfășurată pe parcursul programului doctoral, a furnizat numeroase rezultate, ce au fost valorificate în următoarele moduri:

- ❖ Contribuții la conceperea și realizarea unor materiale didactice pentru programele de master:
 - Reabilitarea și creșterea siguranței construcțiilor
 - Procedee performante de reabilitare a construcțiilor
- ❖ Publicarea, în calitate de autor sau coautor, a unui număr de 10 lucrări științifice, astfel:

Lucrări publicate în reviste cotate ISI cu factor de impact (4):

1. **Spiridon, I.A.**; Ungureanu, D.; Țăranu, N.; Onuțu, C.; Isopescu, D.N.; Șerbănoiu, A.A. Structural Assessment and Strengthening of a Historic Masonry Orthodox Church. Buildings 2023, 13, 835. (**IF = 3,8**)
2. Onuțu, C.; Ungureanu, D.; Isopescu, D.N.; Vornicu, N.; **Spiridon, I.A.** Sourcing Limestone Masonry for the Restoration of Heritage Buildings: Frumoasa Monastery Case Study. Materials 2022, 15, 7178. (**IF = 3,4**)
3. Ungureanu, D.; Onuțu, C.; Isopescu, D.N.; Țăranu, N.; Zghibarcea, Ș.V.; **Spiridon, I.A.**; Polcovnicu, R.A. A Novel Approach for 3D Printing Fiber-Reinforced Mortars. Materials 2023, 16, 4609. (**IF = 3,4**)
4. Ungureanu, D.; Onuțu, C.; Țăranu, N.; Vornicu, N.; Zghibarcea, Ș.V.; Ghiga, D.A.; **Spiridon, I.A.** Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. Buildings 2023, 13, 2813. (**IF = 3,8**)

Lucrări publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (3):

5. **Spiridon I**, Isopescu DN, Ungureanu D, Țăranu N, Alupoae S, Sbirlea C, (2022), Shear structural response of a prototype strengthening system designed for stone masonry panels,

MODTECH International Conference - Modern Technologies in Industrial Engineering X (MODTECH 2022), International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 14, 3, 245-250 DOI10.54684/ijmmt.2022.14.3.245 (SCOPUS)

6. Ghiga DA, Ungureanu D, Onuțu C, Țăranu N, **Spiridon IA** (2023) Converting an industrial hall into a museum of industrial archeology: Approaches and plans for the transformation of "The tobacco storehouse in Iasi, Romania, 14th International Conference on non destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage, Brescia November 28th/30th, 2023 in Proceedings of AIPnD art 23, edited by Monica Volinia and Antonello Tamburrino, pp 239-244, Editura WriteUp, Print ISBN 979-12-5544-031-4, Brescia, Italy, 2023.
7. Onuțu C, Polcovnicu RA, Țăranu N, Ungureanu D, **Spiridon IA** (2023) A review of the additive manufacturing techniques used in the construction area Modern Technologies in Industrial Engineering XI (MODTECH 2023), International Journal of Modern Manufacturing Technologies 15, 3, 107-116 DOI 10.54684/ijmmt.2023.15.3.107 (SCOPUS)

Lucrări prezentate la conferințe naționale/ internaționale (3):

8. Polcovnicu R-A, Onuțu C, Țăranu N, Ungureanu D, **Spiridon IA**, Hudisteanu SV (2023) A review of the building integrated photovoltaics systems, Lucrare prezentată la: Modern Technologies in Industrial Engineering XI (MODTECH 2023)
9. Isopescu DN, Ungureanu D, Onuțu C, **Spiridon IA** (2022) Elemente constitutive ale construcțiilor monument din zidărie, Simpozionului Internațional „Monumentul – Tradiție și Viitor”
10. **Spiridon I**, Isopescu DN, Ungureanu D, Țăranu N, Alupoae S, Sbirlea C, (2022), Shear structural response of a prototype strengthening system designed for stone masonry panels, MODTECH International Conference - Modern Technologies in Industrial Engineering X (MODTECH 2022)

1.7 Direcții viitoare de cercetare

Autorul propune următoarele teme de cercetare viitoare pentru completarea și extinderea domeniului utilizat:

1. Actualizarea modelelor analitice de evaluare a capacității de rezistență a sistemelor de consolidare cu materiale compozite ecologice pentru pereții din zidărie din piatră, cu evidențierea influenței ancorelor chimice în realizarea cerințelor de rezistență și stabilitate.

2. Analiza durabilității compozitele ecologice cu armături din fibre naturale utilizate ca sisteme de consolidare.

3. Impactul schimbărilor climatice asupra materialelor și tehnologiilor utilizate pentru consolidarea clădirilor monument în vederea refacerii capacității de rezistență.

4. Optimizarea soluțiilor de consolidare la clădirile existente prin aplicarea principiilor de sustenabilitate și de asigurare a confortului termic.