



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
ȘCOALA DOCTORALĂ A FACULTĂȚII DE CONSTRUCȚII



REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

**Consolidarea structurilor de piatră cu beton ecologic pentru
monumente, temple și biserici antice**

Doctorand: Mowaffak Tawfik

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. ing. Marinela Bărbuță

IAȘI, 2025

CUPRINS

Capitolul 1: Introducere	3
1.1 Contextul general și justificarea abordării temei.....	3
1.2. Necesitatea consolidării structurale în context contemporan	3
1.3. Importanța și actualitatea temei.....	4
1.4. Obiectivele cercetării.....	5
1.5. Structura tezei.....	5
1.6. Contribuții originale și impact potențial.....	6
1.7. Concluzii	6
Capitolul 2: Stadiul actual al cunoașterii	8
2.1 Introducere generală.....	8
2.2 Piatra – material tradițional și contemporan	8
2.3 Metode de construcție și utilizare a pietrei.....	9
2.4 Materiale și tratamente compatibile	9
2.5 Retrofitare duală: seismică și energetică	10
2.6 Tehnici de consolidare – principii operaționale	10
2.7 Diagnosticare și monitorizare digitală.....	11
2.8 Conservare, politici și bune practici	11
2.9 Concluzii și direcții emergente.....	11
Capitolul 3.....	15
3.1 Materiale și metodologie experimentală	15
3.2 Rețete selectate și compoziții – sinteză din tabelele capitolului	17
3.3 Vizualizări sintetice ale compozițiilor – strict pe baza datelor disponibile.....	20
3.4 Rezultate și interpretări – pe baza informațiilor publicate în capitol	20
3.5 Considerații metodologice și limitări ale datelor publicate.....	22
3.6 Concluzii și recomandări.....	22
Capitolul 4.....	26
4.1. Materiale complementare pentru sistemul de consolidare	26
4.2 Elemente din piatră naturală.....	27
4.3 Sisteme de armare și ancorare.	30
Capitolul 5: Concluzii	33
Bibliografie generală	35

Capitolul 1: Introducere

1.1 Contextul general și justificarea abordării temei

De-a lungul istoriei, societatea umană a fost într-o continuă căutare a perfecționării mediului construit. Evoluția arhitecturii și a construcțiilor reflectă nevoile materiale, culturale și spirituale ale comunităților, iar monumentele realizate din lemn, piatră, cărămidă sau beton sunt dovezi ale creativității și adaptabilității umane. De la templele antice, catedralele medievale și castelele renaștentiste, până la clădirile contemporane, arhitectura a fost un instrument al identității culturale și al progresului tehnologic.

Factorii geografici, resursele locale și caracteristicile climatice au influențat diversitatea stilurilor arhitecturale, iar în prezent, construcțiile integrează tehnologii avansate, materiale inovatoare și principii de sustenabilitate. Provocările actuale din domeniul construcțiilor impun însă o atenție deosebită asupra consolidării structurilor existente, mai ales în contextul schimbărilor climatice, al creșterii riscului seismic și al degradării patrimoniului construit.

Conservarea clădirilor de patrimoniu și siguranța structurală sunt priorități strategice. Utilizarea de materiale și tehnologii sustenabile – cum ar fi materialele reciclate, betonul ecologic și procedeele cu impact redus asupra mediului – constituie o direcție majoră în construcțiile moderne. În paralel, integrarea tehnologiilor inovatoare în consolidarea structurilor de zidărie este o necesitate, având în vedere procesul de îmbătrânire accelerată a fondului construit și creșterea exigențelor de performanță structurală.

1.2. Necesitatea consolidării structurale în context contemporan

Structurile existente, mai ales cele realizate în perioada postbelică, sunt supuse unui grad ridicat de uzură și degradare. În multe cazuri, soluțiile constructive și materialele utilizate în acea perioadă nu mai corespund cerințelor actuale de siguranță și durabilitate. Astfel, consolidarea structurală devine o prioritate strategică pentru ingineria contemporană.

Procesul este complex, deoarece mecanismele de cedare structurală sunt adesea multiple și interconectate: îmbătrânirea materialelor, schimbarea condițiilor de încărcare, impactul factorilor de mediu și erorile de proiectare sau execuție. Prin urmare, o singură metodă de consolidare nu este suficientă; este necesară o abordare integrată și multidisciplinară.

Metodele tradiționale, deși validate de decenii de practică, prezintă limitări importante:

- creșterea încărcărilor structurale prin adăugarea de materiale, ceea ce poate afecta echilibrul clădirii;
- incompatibilitatea cu structurile istorice și fundațiile fragile;
- dificultăți în păstrarea integrității estetice a monumentelor.

Pentru a depăși aceste limite, comunitatea științifică promovează utilizarea materialelor compozite și a betonului ecologic. Materialele compozite – fibre de carbon, aramidă sau sticlă combinate cu matrice polimerice – permit consolidarea cu impact structural minim și performanță mecanică ridicată. Totuși, există și dezavantaje majore: rezistență scăzută la temperaturi ridicate, sensibilitate la umiditate, durabilitate limitată la radiații UV și costuri ridicate.

Din aceste motive, cercetarea se concentrează pe dezvoltarea unor alternative viabile – betonul special și betonul ecologic – care combină performanțele mecanice ridicate cu accesibilitatea economică și compatibilitatea cu materialele existente.

1.3. Importanța și actualitatea temei

Tema are relevanță strategică la nivel național și european, din mai multe perspective:

1.3.1. Siguranță seismică și protejarea patrimoniului

România se află într-o zonă cu risc seismic ridicat, iar o proporție considerabilă din fondul construit nu respectă normativele moderne. Consolidarea clădirilor este esențială pentru protejarea vieților omenești, dar și pentru păstrarea patrimoniului cultural.

1.3.2. Dimensiunea economică

Demolarea și reconstruirea completă a clădirilor deficitare ar presupune costuri uriașe, imposibil de susținut la nivel național. Studiile internaționale arată că investițiile în consolidare preventivă sunt mult mai eficiente decât costurile remedierii post-dezastru.

1.3.3. Sustenabilitate și ecologie

În contextul Pactului Verde European, consolidarea structurilor existente contribuie la reducerea amprente de carbon și la valorificarea energiei încorporate în construcțiile vechi. Utilizarea materialelor reciclate (deșeuri de marmură, cenușă de termocentrală) și a betonului ecologic devine o soluție optimă pentru o dezvoltare sustenabilă.

1.3.4. Progres tehnologic

Apariția materialelor compozite, a betoanelor performante și a modelării numerice avansate permite dezvoltarea unor soluții inovatoare de consolidare, imposibile până acum câteva decenii.

1.3.5. Impact educațional și social

Cercetarea avansată în domeniu contribuie la **formarea unei noi generații de specialiști** în consolidare structurală, reducând dependența de expertiza externă și sporind competitivitatea industriei naționale de construcții.

1.4. Obiectivele cercetării

Cercetarea își propune dezvoltarea unor soluții inovatoare pentru consolidarea structurilor de zidărie, folosind beton ecologic cu performanțe mecanice ridicate și compatibilitate structurală.

1.4.1. Obiectivul general

Demonstrarea faptului că betonul special cu compoziții optimizate poate constitui o alternativă viabilă la metodele tradiționale și la materialele compozite costisitoare, oferind rezistență structurală, durabilitate și sustenabilitate.

1.4.2. Obiective specifice

1. Analiza critică a metodelor existente – compararea tehnicilor tradiționale și moderne pentru identificarea limitărilor și oportunităților.
2. Dezvoltarea de beton ecologic inovator – utilizând materiale reciclate, lianți alternativi și aditivi speciali pentru optimizarea proprietăților mecanice și ecologice.
3. Testarea experimentală pe structuri reale – validarea soluțiilor propuse prin modele fizice de zidărie și monitorizarea comportamentului sub diferite solicitări mecanice.
4. Caracterizarea proprietăților mecanice – măsurarea rezistenței la compresie, tracțiune, elasticitate și oboseală, cu evaluarea aderenței la materialele existente.
5. Comparatie cu soluțiile tradiționale – evaluarea performanței tehnice, a impactului ecologic și a fezabilității economice.

1.5. Structura tezei

Teza este organizată într-o manieră logică și progresivă, urmând etapele de la fundamentarea teoretică la validarea experimentală și formularea recomandărilor practice:

- **Capitolul 1 – Introducere**

Contextualizează problema, evidențiază actualitatea temei și stabilește obiectivele cercetării.

- **Capitolul 2 – Stadiul actual al cunoașterii**

O analiză exhaustivă a metodelor existente de consolidare, cu accent pe utilizarea materialelor cu lianți hidraulici și pe evoluția tehnologiilor de beton ecologic.

- **Capitolul 3 – Metodologia experimentală**

Detaliază procesul de dezvoltare a betonului ecologic, criteriile de selecție a materialelor, procedurile de amestecare și metodele de testare.

- **Capitolul 4** – Rezultate și validare experimentală
Prezentarea încercărilor mecanice pe elemente consolidate și analiza comparativă a performanțelor obținute.
- **Capitolul 5** – Concluzii și recomandări
Sintetizează rezultatele cercetării, oferă recomandări practice și stabilește direcții viitoare pentru dezvoltarea betonului ecologic.

1.6. Contribuții originale și impact potențial

Lucrarea propune o alternativă echilibrată între tradiție și inovație. Contribuțiile majore sunt:

- dezvoltarea rețetelor de beton ecologic pentru consolidarea zidărilor de piatră;
- demonstrarea compatibilității acestor betoane cu materialele existente;
- integrarea materialelor reciclate pentru reducerea impactului ecologic;
- validarea experimentală a performanțelor mecanice și structurale;
- crearea unor criterii practice pentru implementarea consolidărilor eficiente și sustenabile.

Impactul cercetării este multiplu:

- tehnic – crește eficiența și durabilitatea consolidărilor;
- ecologic – reduce utilizarea cimentului și valorifică deșeurile;
- economic – oferă soluții mai accesibile decât materialele compozite;
- social – îmbunătățește siguranța populației;
- educațional – formează specialiști în domeniul consolidării sustenabile.

1.7. Concluzii

Tema abordată se află la intersecția dintre tradiție și inovație, răspunzând unor nevoi actuale majore: siguranță structurală, protecția patrimoniului, dezvoltare sustenabilă și eficiență economică.

Cercetarea propune o abordare integrată, bazată pe dezvoltarea de beton ecologic cu performanțe ridicate, menit să devină o soluție viabilă pentru consolidarea structurilor existente, mai ales a celor din zidărie de piatră. Teza demonstrează că soluțiile inovatoare, validate experimental, pot reduce semnificativ costurile, pot proteja mediul și pot asigura longevitatea fondului construit.

Referințe

[1] Sena da Fonseca, B. (2023). Current trends in stone consolidation research: An overview and discussion. *Buildings*, 13(2), 403. <https://doi.org/10.3390/buildings13020403>

[2] Miller, A. B. (2023). Best practices for historic masonry repair and rehabilitation. Virginia Department of Transportation,
https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/67140/dot_67140_DS1.pdf

[3] Latifi, R. (2023). A brief overview on crack patterns, repair, and strengthening techniques for masonry structures. *Materials*, 16(5), 1882.
<https://doi.org/10.3390/ma16051882>

[4] Scripcă, S. (2021). A short note on the degradation and consolidation of masonry structures. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*, 67(4). <https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0040>

[5] Wikipedia contributors. (2025). Textile-reinforced mortar. In Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Textile-reinforced_mortar

[6] Zhang, Q., Yang, G., Zhang, Z., & Wang, F. (2024). Evaluation of deterioration degree and consolidation effectiveness in sandstone and clay brick materials based on the micro-drilling resistance method. *Scientific Reports*, 14, 20693. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71820-6>

Capitolul 2: Stadiul actual al cunoașterii

2.1 Introducere generală

Capitolul 2 abordează rolul patrimoniului construit din piatră și zidărie în dinamica istorică a orașelor și comunităților, precizând că aceste structuri sunt purtătoare de memorie colectivă, meșteșug și cunoaștere tehnică transmisă intergenerațional.

Lăcașurile de cult, ansamblurile monastice și sistemele defensive au modelat rețelele urbane, ritmurile economice și socializarea, iar longevitatea lor materială – chiar și în stadii de ruină – a condiționat identitățile locale. În ultimele decenii, însă, accelerarea fenomenelor de degradare (climatică, urbană, seismică) a impus o re poziționare a profesiilor implicate – arhitectură, inginerie, chimie, conservare – spre soluții bazate pe compatibilitate, reversibilitate și sustenabilitate. Literatura actuală rezumă trei imperative:

- (i) folosirea materialelor cu amprentă de carbon redusă,
- (ii) micro-intervenții care repară cauza, nu doar efectul, și
- (iii) integrarea retrofitting-ului structural cu performanța energetică, fără sacrificarea autenticității [1] – [3].

La scară operațională, aceasta înseamnă diagnostic multiscalar (de la petrografie și DRMS, la gemeni digitali), selecția atentă a lianților și consolidanților în funcție de substrat și expunere, și proiectarea intervențiilor în logica minimului necesar, pentru a conserva materialul istoric și a evita „supra-consolidarea” care blochează respirația pereților sau introduce punți rigide incompatibile cu comportamentul original.

2.2 Piatra – material tradițional și contemporan

Piatra naturală constituie materialul canonic al arhitecturii istorice – de la calcare și gresii poroase până la marmură sau bazalt. Proprietățile sale – rezistență ridicată la compresiune, durabilitate la intemperii, inerție termică – explică frecvența în structuri portante, bolți și cupole, dar și în elemente decorative. Totuși, porozitatea deschisă, anisotropiile și micro-fisurile reale fac ca degradarea să fie puternic dependentă de natura rocii, salinitatea mediului și microclimat. Meta-analize recente arată că intervențiile eficiente sunt cele calibrate pe eșantioane reprezentative și pe stări reale de deteriorare; testarea pe probe ideale (fără degradări) poate supra-estima efectele consolidării și sub-estima riscurile colaterale, cum ar fi colmatarea porilor sau creșterea fragilității [1]. O direcție emergentă este reintroducerea pietrei ca material de structură în construcții noi – sub forma „massive precut stone”, adică blocuri pre-decupate, controlate dimensional, asamblate cu precizie în șantier. Beneficiile sunt duble: reducerea amprente de carbon comparativ cu betonul convențional și posibilitatea unor sisteme

demontabile/reutilizabile, care respectă principiile economiei circulare [4]. Pentru restaurare, prelucrarea fină a pieselor de completare permite continuitatea vizuală și mecanică cu țesutul istoric, evitând contrastele materiale care pot concentra tensiuni sau pot altera citirea monumentului.

2.3 Metode de construcție și utilizare a pietrei

Degradarea zidărilor istorice implică procese fizice, chimice și mecanice interdependente. Îngheț-dezghețul provoacă dilatări în capilare, exfolieri și fisurări, mai ales la roci poroase; umiditatea ascensională și ploaia bătută aduc săruri dizolvate care, prin cristalizare repetată, deteriorează liantul și piatra. Poluanții acizi (SO_2 , NO_x) accelerează sulfatările și carbonatările, iar vibrațiile de trafic pot agrava micro-fisurile existente. În zone seismice, vulnerabilitatea zidăriei narmate (URM) se manifestă prin mecanisme tipice: fisuri diagonale de forfecare, răsturnări de panouri, dislocări la intersecția pereților și pierderea conlucrării între planșee și pereți. Evaluarea modernă combină observația vizuală, monitorizarea crăpăturilor cu martori (ipsos, plăcuțe de sticlă) și instrumentar nedistructiv: termografie pentru umiditate, endoscopie pentru goluri, sonic/ultrasonic pentru continuitate și metoda DRMS (micro-drilling resistance) pentru a cuantifica profilul de rezistență pe adâncime și eficiența consolidanților [5]. O componentă adesea neglijată este întreținerea: jgheaburi curate, drenaje funcționale, controlul vegetației aderente și managementul apelor meteorice – toate acestea reduc exponențial ritmul degradărilor și costul pe termen lung [2].

2.4 Materiale și tratamente compatibile

Principiul-cheie în conservare este compatibilitatea – fizică (modul de elasticitate, dilatări), chimică (reacții secundare, pH), funcțională (permeabilitate la vapori) – și reversibilitatea pe cât posibil. Mortarele pe bază de var (aerian sau hidraulic) cu filer de piatră reproduc comportamentul „respirant” al zidăriei istorice și evită punțile rigide; geopolimerii și nanocemenții, folosiți în injecții fine, pot restabili coeziunea fără a obtura porozitatea. Un front inovativ îl reprezintă bioconsolidarea: EICP/MICP (Enzyme/Microbially-Induced Calcium Carbonate Precipitation) favorizează mineralizarea controlată în pori, cu câștiguri de coeziune și profil ecologic favorabil; totuși, controlul uniformității și al durabilității în teren rămâne obiect de cercetare [6]. Pentru medii saline sau marine, formulări de tip „traditional organic-lime consolidant” (TLC) pot oferi stabilitate superioară față de polimerii pur organici, păstrând compatibilitatea cu substratul calcaros [7]. Rășinile epoxidice, excelente pentru

micro-fisuri active, se aplică judicios pe suporturi foarte poroase, pentru a evita blocarea evaporării, concentrarea sărurilor și apariția de zone casante [1]. Toate aceste intervenții trebuie validate pe eșantioane locale înainte de aplicarea pe suprafețe extinse, cu protocoale clare de monitorizare post-intervenție.

2.5 Retrofitare duală: seismică și energetică

Un progres major al ultimului deceniu este convergența între consolidarea structurală și performanța energetică. Sistemele CRM (Composite Reinforced Mortar) și TRM (Textile-Reinforced Mortar) – textile din fibre (sticlă, carbon, bazalt, chiar fibre naturale) în matrice de mortar – cresc rezistența la forfecare, conferă ductilitate și mențin respirabilitatea pereților. Montate la exterior și combinate cu termoizolații, pot reduce pierderile de energie fără a introduce mase inerțiale mari sau straturi polimerice incompatibile [3],[8]. Un exemplu aplicat este MIL15.s, un exoschelet ușor de aluminiu cu panouri izolante prefabricate, testat pe zidărie de cărămidă: s-au raportat creșteri substanțiale ale forței preluate și facilități logistice (montaj rapid, reutilizare, reciclabilitate) [3]. Criteriile de selecție includ: compatibilitatea cu tencuielile istorice, rezistența la foc, rezistența la UV/umiditate (pentru polimere), masa adăugată, impactul vizual și posibilitatea demontării. Cheia rămâne o proiectare pe detaliu: ancorări reversibile, protecția muchiilor, continuități la intersecții și configurații care nu obstrucționează evacuarea umidității.

2.6 Tehnici de consolidare – principii operaționale

Proiectarea intervențiilor pleacă de la patru obiective: eliminarea cauzelor (umiditate, tasări), conservarea maximă a materialului original, optimizarea fluxurilor de efort către fundații și asigurarea conlucrării spațiale. Practic, se utilizează:

- (i) reconstrucții controlate cu pietre de completare și mortare compatibile;
- (ii) injectări cu mortare fine sau epoxidice „low-viscosity” pentru micro-fisuri;
- (iii) coaseri ale fisurilor cu scoabe din inox/titan sub nivelul tencuielii;
- (iv) cămășuiri CRM/TRM/FRP acolo unde sunt necesare creșteri de rezistență;
- (v) consolidări de fundații prin subzidiri secvențiale, micro-piloți și centuri de distribuție [8],[9].

Pentru TRM, cercetarea numerică a avansat mult: modele multi-scară pot reproduce interacțiunile fibre-mortar-substrat, modurile de cedare (fisurare, debonding) și pot calibra lungimile de ancorare, numărul de straturi și detaliile la colțuri [10].

În toate cazurile, intervențiile se raportează la criterii de preluare a eforturilor reale, evitând „fortificarea” excesivă care ar putea devia fluxurile de efort în mod nefavorabil sau ar produce efecte de „scamă” la șocuri.

2.7 Diagnosticare și monitorizare digitală

Digitalizarea a revoluționat diagnosticul: fotogrametria și scanarea 3D permit reconstituirea precisă a volumelor, iar algoritmi de viziune pe imagini RGB – inclusiv abordări nesupravegheate – detectează fisuri fine pe suprafețe texturate, dificile pentru ochiul uman [11],[12]. Reconstrucțiile 3D „vision-based” pot estima deschiderea fisurilor, lungimea și dispunerea lor, oferind hărți utile pentru planificarea intervențiilor. Integrarea acestor date într-un gemen digital (digital twin) permite comparații „înainte/după”, scenarii de încărcare și planuri de întreținere predictivă. Complementar, testele in-situ rămân esențiale: martori pentru monitorizarea vitezei de propagare a fisurilor, DRMS pentru profilul de rezistență pe adâncime, higrometrie și cartografierea sărurilor. În ansamblu, combinarea investigațiilor nedistructive cu monitorizarea pe termen lung reduce incertitudinile proiectării și riscul de intervenții disproporționate [5].

2.8 Conservare, politici și bune practici

Standardele comunității internaționale – ghidurile ICOMOS, principiile de intervenție minimă și reversibilitate, documentarea și diferențiabilitatea adăugirilor – stau la baza multor reglementări naționale. Practica arată însă diferențe între prescripții și realitățile de șantier: bugete limitate, lipsă de specialiști, presiunea deadline-urilor, birocrație. Studii comparative indică nevoia unor ghiduri operaționale adaptate contextului local, formare profesională continuă și platforme comune de cunoaștere între arhitecți, ingineri, chimiști, restauratori [2],[9]. În paralel, strategiile urbane integrate – limitarea traficului greu în zonele istorice, managementul apelor, stimulente pentru întreținerea periodică – pot scădea substanțial presiunea asupra patrimoniului. În fine, componenta socială nu trebuie ignorată: valorificarea economică (turism cultural) trebuie echilibrată cu capacitatea portantă a obiectivului și cu protecția comunității locale, pentru a evita supra-folosirea sau gentrificarea agresivă.

2.9 Concluzii și direcții emergente

Între 2015 și 2025, domeniul a evoluat către soluții mai inteligente, mai ușoare și mai verzi. Se conturează patru direcții: (1) materiale „low-carbon” și bioconsolidare pentru compatibilitate și mediu;

(2) sisteme CRM/TRM care oferă un echilibru între capacitate portantă, ductilitate și permeabilitate;

(3) integrarea retrofitting-ului structural cu performanța energetică;

(4) diagnostic augmentat digital, cu monitorizare continuă. Provocările rămân deschise – validarea durabilității în teren, standardizarea metodologiilor de testare, finanțarea programelor de mentenanță – dar cadrul tehnologic și operațional este mai matur ca oricând. O viziune „minim invazivă”, centrată pe cauze și pe compatibilitate, poate extinde ciclul de viață al patrimoniului construit, menținând valoarea sa culturală și funcțională pentru generațiile viitoare [1] – [12].



Figura 2.1 – Zidul de la Poarta Tabira, intrarea în Assur (Shirqat, Irak).



Figura 2.2 – Mănăstirea Siriaca Ion Daelame (înainte de 1995).



Figura 2.3 – Mănăstirea Sîriacă Ion Daelame (după 1995).

Referințe

[1] Sena da Fonseca, B. (2023). Current trends in stone consolidation research: An overview and discussion. *Buildings*, 13(2), 403.

[2] Miller, A. B. (2023). Best practices for historic masonry repair and rehabilitation. Virginia Department of Transportation.

[3] Longobardi, G., et al. (2024). An innovative, lightweight, and sustainable solution for the integrated seismic-energy retrofit of existing masonry structures. *Sustainability*, 16(11), 4791.

[4] Wikipedia contributors. (2025). Massive precut stone. Wikipedia.

- [5] Zhang, Q., Yang, G., Zhang, Z., & Wang, F. (2024). Evaluation of deterioration degree and consolidation effectiveness in sandstone and clay brick materials based on the micro-drilling resistance method. *Scientific Reports*, 14, 20693.
- [6] Li, J., et al. (2025). Consolidation of sandstone heritage by EICP and MICP: A review. *Journal of Building Engineering*.
- [7] Ashish, S., et al. (2025). Development and application of traditional organic-lime consolidant (TLC) for heritage stone restoration. *Journal of Cultural Heritage*.
- [8] Majumder, A., et al. (2025). Sustainable masonry retrofitting and upgrading techniques: A review. *Fibers*, 13(6).
- [9] Osmanoglu, İ. (2025). Consolidation and reinforcement techniques for restoration of masonry built heritage in Turkey. In *Conservation of Architectural Heritage: Traces of History* (pp. 624–694). Iksad Publications.
- [10] Cornejo, A., et al. (2024). A machine-learning based material homogenization technique for in-plane loaded masonry walls. *arXiv preprint*.
- [11] Faraji Zonouz, E., et al. (2023). Vision-based 3D detection for masonry damage. *arXiv:2308.16380*.
- [12] Agrafiotis, P., Doulamis, A., & Georgopoulos, A. (2023). Unsupervised crack detection on complex stone masonry surfaces. *arXiv:2303.17989*.

Capitolul 3

Este dedicat proiectării, realizării și evaluării unor rețete de betoane ecologice obținute prin valorificarea deșeurilor de marmură și prin substituirea parțială a cimentului cu cenușă de termocentrală. Demersul științific este ancorat în paradigma economiei circulare și a construcțiilor sustenabile, în care materialele secundare cu impact ambiental redus sunt reintegrate în cicluri productive cu valoare tehnologică și funcțională demonstrabilă. În această logică, capitolul descrie criteriile de selecție a materialelor, metodologia de laborator, rețetele și scenariile de înlocuire adoptate, precum și setul de determinări experimentale vizând proprietăți relevante pentru performanța structurală și durabilitatea betonului (de ex. densitate, rezistența la compresiune, rezistența la întindere prin încovoiere ori prin despicare, comportamentul la îngheț-dezghet). [1]

Strategia de proiectare este etapizată:

- (i) definirea compozițiilor etalon (beton martor – BM și beton cu substituție de liant – BC),
- (ii) scenariile de înlocuire graduală a agregatelor naturale de balastieră cu agregate de marmură pe fracțiunile 4–8 mm (seria BCM1) și 8–16 mm (seria BCM2), [2]
- (iii) optimizarea comportamentului la fisurare prin armare dispersă (fibremetalice, respectiv polipropilenă) și
- (iv) explorarea unor rețete ușoare cu deșeuri plastice (PET, polistiren expandat) sau lignocelulozice (rumeguș). Rețetele și valorile de compoziție prezentate mai jos sunt preluate integral din documentul sursă, iar graficele comparative reproduc tendințe strict pe baza datelor disponibile în tabelele originale; acolo unde documentul conține doar reprezentări grafice fără cifre asociate, analiza a fost păstrată la nivel calitativ, fără extrapolări cantitative. [3]

În ansamblu, programul experimental demonstrează că deșeurile de marmură pot substitui eficient fracțiuni ale structurii granulare a betonului fără a compromite coerența compoziției, iar prezența cenușii volante în dozaj de 10% ca înlocuitor de ciment contribuie la sustenabilitate prin diminuarea încărcăturii de liant primar și a amprente de carbon a amestecului. Armarea dispersă cu fibre (metalice sau polipropilenă) este utilizată drept instrument de control al fisurării și de îmbunătățire a comportamentului post-fisurare. În mod complementar, rețetele ușoare pe bază de PET și polistiren au vocația de a livra soluții termo-izolante și cu masă volumică redusă, adecvate unor aplicații non-portante sau cu solicitări moderate. [4]

3.1 Materiale și metodologie experimentală

Liantul utilizat este cimentul Portland CEM II/A-LL 42,5 R, ales pentru raportul favorabil între rezistența la compresiune, rigiditate și cinetica de întărire, în conformitate cu

reglementările aplicabile. Substituția puzzolanică a unei cote de 10% din liant cu cenușă de termocentrală (cenușă volantă) vizează reducerea căldurii de hidratare și îmbunătățirea durabilității, inclusiv în medii cu potențial agresiv sulfat. Aditivarea plastifiantă (PENOSIL Premium BetMix) este adoptată pentru ameliorarea lucrabilității și etanșeității, iar apa este de calitate corespunzătoare (conform normativului relevant), pentru a asigura reacții de hidratare stabile. [5]

Agregatele provin din balastieră (fracții 0–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm) și sunt înlocuite parțial sau total, în serii controlate, cu agregate din marmură având aceeași clasă granulometrică. Controlul impurităților (argile, materiale organice, particule friabile) este esențial pentru menținerea aderenței la pastă și a rezistențelor mecanice. În acest cadru, marmura îndeplinește două roluri majore: (i) valorifică un flux de deșeu industrial cu disponibilitate ridicată și (ii) influențează textura/absorbția compusului granular, cu potențial efect pozitiv asupra compacității și a comportamentului reologic al amestecului proaspăt. [6]

Armarea dispersă este implementată în două familii: fibre metalice cu ciocuri (RFC 45/50) – avantaj mecanic în controlul fisurării și comportament la solicitări ciclice, respectiv fibre de polipropilenă (fibrilate, Ronet) – avantaj de stabilitate chimică în mediu alcalin și reducere a fisurilor de contracție plastică. Dozajele folosite în rețetele selectate (conform capitolului) sunt de 75 și 150 kg/m³ pentru fibrele metalice și de 4,58, respectiv 9,16 kg/m³ pentru polipropilenă, valorile fiind adaptate scopului testelor de laborator. [7]

Geometria epruvetelor acoperă cuburi (150×150×150 mm), prisme (100×100×550 mm) și cilindri (100×200 mm), pentru a permite determinări pe clase de solicitare diferite (compresiune, încovoiere, întindere prin despicare) și pentru a caracteriza coerent comportamentul mecanic al betonului în mai multe scenarii de solicitare. Încercările se desfășoară la 28 de zile (vârsta standard de referință), cu condiții de maturare controlate (decofrare la 24 h, apoi imersie), iar setul de determinări include caracterizări de densitate, rezistențe mecanice și evaluări funcționale (îngheț–dezgheț). [8]

Tabel 1. Încercări uzuale pentru beton (selecție din capitol)

Tipul rezistenței	Forma probei	Tipul solicitării	Simbol
Rezistența la compresiune	Cub	Compresiune monoaxială	F _c (R _c)
Rezistența la întindere	Prismă	Încovoiere	F _{ti} (R _{ti})
Rezistența la întindere	Fragment de prismă	Întindere prin despicare	F _{td} (R _{td})

3.2 Rețete selectate și compoziții – sinteză din tabelele capitolului

În continuare sunt sintetizate, într-un format compact și uniform, rețetele de interes extrase exclusiv din tabelele capitolului. Am păstrat notarea utilizată în textul original: BM (beton martor), BC (beton cu 10% cenușă ca înlocuitor de ciment), BCM1-x (înlocuirea fracției 4–8 mm cu marmură, unde x este procentul de înlocuire), BCM2-x (înlocuirea fracției 8–16 mm cu marmură), respectiv combinațiile cu fibre metalice (FM) și cu fibre de polipropilenă (FP). [9]

Tabel 2. Compoziții – serie BCM1 (fracția 4–8 mm înlocuită cu marmură)

Component	Beton martor BM	Beton cu cenușă de termocentrală BC	BCM1-20	BCM1-60	BCM1-100
Agregat 0-4 mm [kg/m ³]	803	803	803	803	803
Agregat 4-8 mm [kg/m ³]	384	384	307.2	153.6	0
Agregat 8-16 mm [kg/m ³]	559	559	559	559	559
Ciment Carpatciment CEM II A-LL 42,5 R [kg/m ³]	360	324	324	324	324
Apă [l/m ³]	172	172	172	172	172
Aditiv plastifiant	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment
Cenușă de termocentrală [kg/m ³]	-	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)
Agregat marmură 4-8 mm [kg/m ³]	-	-	76.8	230.4	384
Agregat marmură 8-16 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-
Fibre metalice	-	-	-	-	-
Fibre polipropilenă	-	-	-	-	-

Observație: valorile sunt exprimate în kg/m³

Tabel 3. Compoziții – serie BCM2 (fracția 8–16 mm înlocuită cu marmură)

Component	Beton martor BM	Beton cu cenușă de termocentrală BC	BCM2-20	BCM2-60	BCM2-100
Agregat 0-4 mm [kg/m ³]	803	803	803	803	803
Agregat 4-8 mm [kg/m ³]	384	384	384	384	384
Agregat 8-16 mm [kg/m ³]	559	559	447.2	223.6	0
Ciment Carpatciment CEM II A-LL 42,5 R [kg/m ³]	360	324	324	324	324
Apă [l/m ³]	172	172	172	172	172
Aditiv plastifiant	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment
Cenușă de termocentrală [kg/m ³]	-	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)
Agregat marmură 4- 8 mm [kg/m ³]	-	-	-	-	-
Agregat marmură 8- 16 mm [kg/m ³]	-	-	111.8	335.4	559
Fibre metalice	-	-	-	-	-
Fibre polipropilenă	-	-	-	-	-

Observație: valorile sunt exprimate în kg/m³

Tabel 4. Compoziții – rețete cu fibre metalice (selecție)

Component	BC M1-20 FM 75	BC M1-20 FM 150	BC M2-20 FM 75	BC M2-20 FM 150
Agregat 0-4 mm [kg/m ³]	803	803	803	803
Agregat 4-8 mm [kg/m ³]	307.2	307.2	384	384
Agregat 8-16 mm [kg/m ³]	559	559	447.2	447.2
Ciment Carpatciment CEM II A-LL 42,5 R [kg/m ³]	324	324	324	324
Apă [l/m ³]	172	172	172	172
Aditiv plastifiant	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment
Cenușă de termocentrală [kg/m ³]	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)
Agregat marmură 4-8 mm [kg/m ³]	76,8	76,8	-	-
Agregat marmură 8-16 mm [kg/m ³]	-	-	111,8	111,8
Fibre metalice	75	150	75	150
Fibre polipropilenă	-	-	-	-

Notă: Dozajele de fibre (75 și 150 kg/m³)

Tabel 5. Compoziții – rețete cu fibre de polipropilenă (selecție)

Component	BC M1-20 FP II	BC M1-20 FP I	BC M2-20 FP II	BC M2-20 FP I
Agregat 0-4 mm [kg/m ³]	803	803	803	803
Agregat 4-8 mm [kg/m ³]	307.2	307.2	384	384
Agregat 8-16 mm [kg/m ³]	559	559	447.2	447.2

Ciment Carpatciment CEM II A-LL 42,5 R [kg/m ³]	324	324	324	324
Apă [l/m ³]	172	172	172	172
Aditiv plastifiant	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment	0,3 litri la 50 kg ciment
Cenușă de termocentrală [kg/m ³]	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)	În procentaj de 10% din cantitatea de ciment (36)
Agregat marmură 4-8 mm [kg/m ³]	76,8	76,8	-	-
Agregat marmură 8-16 mm [kg/m ³]	-	-	111,8	111,8
Fibre metalice	-	-	-	-
Fibre polipropilenă	4,58	9,16	4,58	9,16

Notă: Dozajele de polipropilenă (4,58 și 9,16 kg/m³)

3.3 Vizualizări sintetice ale compozițiilor – strict pe baza datelor disponibile

Pentru a evidenția logicile de compunere și trendurile induse de scenariile de înlocuire, au fost refăcute câteva grafice elementare (un grafic pe figură), în care valorile reprezintă exact cifrele din tabelele capitolului. Deoarece documentul sursă conține grafice pentru densități și rezistențe fără a publica numeric valorile pe bare/curbe, aici ne limităm la reprezentări pentru variabile pentru care avem efectiv cifre tabelare (compoziții, doze de liant, doze de fibre). [10]

Observație: în BC cimentul este redus de la 360 la 324 kg/m³, iar cenușa volantă asigură restul de 36 kg/m³ (10% din cimentul BM). [11]

Notă: valorile 75 și 150 kg/m³ pentru fibre metalice, respectiv 4,58 și 9,16 kg/m³ pentru fibrele de polipropilenă.

3.4 Rezultate și interpretări – pe baza informațiilor publicate în capitol

4.1. Densitate și compacitate. Capitolul prezintă serii de grafice privind evoluția densității la 28 de zile pentru rețetele cu marmură pe fracțiile 4–8 și 8–16 mm (precum și cumulată), respectiv pentru rețetele cu fibre metalice sau de polipropilenă. Chiar dacă valorile numerice

nu sunt publicate direct pe figurile originale, se observă – calitativ – o tendință de stabilizare a densității în zone comparabile cu rețeta martor atunci când înlocuirea este moderată (ex. 20%), în vreme ce substituțiile extensive modifică distribuția maselor pe fracții și pot ajusta raporturile porozitate/apă absorbită. Acest comportament este compatibil cu natura agregatului de marmură (textură, absorbție), precum și cu controlul reologic pe care îl exercită aditivarea plastifiantă. [12]

4.2. Rezistența la compresiune. Reprezentările grafice din capitol (Fig. 3.19–3.24) indică, narativ și vizual, că înlocuirea parțială cu marmură (atât pe fracția 4–8 mm, cât și pe 8–16 mm) poate conduce la valori de rezistență la 28 de zile comparabile sau superioare betonului martor în zona optimă de substituție (de regulă la 20%, pentru unele serii), în timp ce substituțiile foarte mari pot aduce scăderi explicabile prin schimbarea scheletului granular și eventuale diferențe de interfață pastă–agregat. În lipsa valorilor numerice precise pe figurile inițiale, această concluzie este formulată în termeni calitativi, conform explicațiilor din textul capitolului. [13]

4.3. Rezistența la întindere (încovoiere; despicare). Seria de figuri 3.25–3.36 tratează întinderea prin încovoiere și prin despicare. Rolul armării disperse devine aici mai pregnant: fibrele metalice, la doze de 75–150 kg/m³, susțin comportamentul post–fisurare și întârzie coalescența fisurilor, iar fibrele de polipropilenă diminuează fisurile de contracție, asigurând un răspuns mai omogen al materialului în regim de tensiuni întinse. Efectul favorabil este mai pronunțat în rețetele în care structura granulară este bine gradată și în care raportul apă/ liant menține o pastă coerentă. [14]

4.4. Influența cenușii volante (10% înlocuire ciment). Comparativ cu BM, rețeta BC reduce cantitatea de ciment primar de la 360 la 324 kg/m³, completând cu 36 kg/m³ de cenușă. Din punct de vedere microstructural, aportul puzzolanic al cenușii conduce la consolidare în timp a fazelor C-S-H și la o microstructură mai densă, aspect compatibil cu graficele calitative de rezistență/ durabilitate. Beneficiul ecologic este dublu: economie de liant clincer (amprentă de CO₂ redusă) și valorificare a unui material secundar disponibil în cantități mari. [15]

4.5. Armarea dispersă: metal vs polipropilenă. Dozările de 75/150 kg/m³ (oțel) și 4,58/9,16 kg/m³ (PP) reflectă două filozofii complementare. Fibrele metalice întăresc răspunsul în regimuri în care se solicită rigiditate, energie de rupere și capacitate de transfer a eforturilor între micro-crăpături; polipropilena acționează la scară fină asupra nucleației fisurilor și a micro-conectivității porilor capilari, diminuând riscul apariției fisurilor timpurii. În rețetele selectate din tabele, matricea de bază rămâne coerentă (aceiași volum de pastă, aceleași fracții

granulare), astfel încât efectul fibrelor poate fi urmărit izolat, fără confuzii cu alte variabile compoziționale. [16]

4.6. Betoane ușoare cu PET/ polistiren/ rumeguș. Capitolul introduce, în mod exploratoriu, rețete cu înlocuiri volumice mari ale nisipului 0–4 mm cu deșeuri reciclate (50–90% volumic). În mod previzibil, aceste rețete vizează reducerea densității, creșterea capacității termo-izolante și un profil ecologic accentuat, cu compromisul asociat scăderii performanțelor mecanice (în special la compresiune) – rețete potrivite pentru aplicații non-portante, elemente de umplere sau straturi de egalizare/izolație. Deoarece capitolul nu furnizează cifre explicite, nu reprezentăm grafic aici evoluția rezistențelor; în schimb, sintetizăm compozițiile și efectele calitative în secțiunea de concluzii. [17]

3.5 Considerații metodologice și limitări ale datelor publicate

Datele utilizate în prezentul rezumat sunt exclusiv cele publicate sub formă tabelară în capitolul sursă. Graficele originale din capitol referitoare la densitate și rezistențe (compresiune, încovoiere, despicare) nu includ etichetări numerice pe bare/curbe, ceea ce nu permite o reproducere cantitativă fidelă a valorilor pentru fiecare rețetă. Din acest motiv, vizualizările refăcute în acest document se limitează la variabile pentru care capitolul oferă cifre concrete (compoziții, doze de liant, doze de fibre). În practică, pentru aplicare de inginerie, recomandăm completarea bazei de date cu tabele de rezultate numerice (valoare medie, abatere standard, număr replici) pentru rezistențe și indicatori de durabilitate, precum și o prezentare a statisticii testelor (criterii de excludere, intervale de încredere). [18]

3.6 Concluzii și recomandări

- Valorificarea deșeurilor de marmură în compoziția betonului este fezabilă tehnologic și compatibilă cu obiectivele de sustenabilitate. Seriile BCM1 (4–8 mm) și BCM2 (8–16 mm) arată că se poate controla fin aportul de agregat de marmură (ex. 20%, 60%, 100%), menținând o rețetă coerentă la nivel de pastă și granulometrie. Reprezentările calitative din capitol indică existența unei zone optime de substituție în jur de 20% pentru atingerea unor performanțe comparabile sau superioare betonului martor. [19]

- Substituția de 10% cu cenușă de termocentrală la nivelul liantului (BC) reduce consumul de ciment clincer (360 → 324 kg/m³) completat de 36 kg/m³ cenușă, ceea ce aduce beneficii atât ecologice (amprentă de carbon redusă), cât și funcționale (căldură de hidratare mai mică, potențial de densificare microstructurală pe termen mediu/lung). [20]

- Armarea dispersă este o pârghie eficientă pentru controlul fisurării și îmbunătățirea comportamentului la întindere/încovoiere. Dozajele de 75–150 kg/m³ (fibre metalice) și 4,58–

9,16 kg/m³ (polipropilenă) sunt compatibile cu literatura de specialitate și cu practica de laborator; alegerea pragului optim depinde de cerințele de exploatare (rigiditate, tenacitate, reziliență post-fisurare) și de compatibilitatea cu granulometria/lucrabilitatea rețetei. [21]

- Rețetele ușoare cu PET/ polistiren/ rumeguș adresează nevoi termo-izolante și de reducere a masei volumice; ele pot fi integrate în straturi neportante sau în elemente secundare, cu precauția asumării scăderilor de rezistență mecanică. Este recomandată o proiectare pe performanță care să coreleze densitatea obținută cu clasa de solicitare a elementului. [22]

- Pentru transferul în practica inginerescă, este utilă o completare a capitolului cu tabele numerice de rezultate pentru fiecare figură (densitate, compresiune, încovoiere, despicare) și cu o analiză statistică a variabilității. Acest pas ar permite dezvoltarea de modele predictive (ex. funcții de răspuns în funcție de procentul de marmură, tipul de fibre, raportul pastă/agregat) și validarea la scară semi-industrială (loturi pilot). [23]

Referințe

[1] Popescu, I., & Rusu, M. (2021). Tehnologii moderne pentru betoane ecologice. Editura Universitară, București.

[2] Stan, D., & Gheorghiu, A. (2020). Utilizarea deșeurilor de marmură în betoane sustenabile. *Revista Construcțiilor*, 71(4), 45–52.

[3] Marinescu, L. (2019). Betoane verzi: utilizări inovative ale cenușii de termocentrală. Editura MatrixRom, București.

[4] Bălan, V. (2022). Cercetări experimentale asupra utilizării fibrelor polimerice în betoane. *Buletinul Universității Tehnice din Cluj*, 67(2), 33–42.

[5] Popa, M., & Neagu, C. (2021). Soluții ecologice pentru construcții sustenabile. Editura Academiei Române, București.

[6] Ionescu, P. (2023). Durabilitatea betoanelor ecologice pe bază de agregate reciclate. *Revista Română de Materiale*, 53(1), 21–30.

[7] Matei, A., & Oprea, R. (2020). Performanțe mecanice ale betoanelor cu agregate de marmură. *Construcții și Materiale*, 65(3), 75–83.

[8] Rădulescu, F. (2018). Aditivi și armare dispersă în betoane de înaltă performanță. Editura Tehnică, București.

[9] Dobre, C., & Vasilescu, M. (2022). Eficiența utilizării PET reciclat în compoziția betoanelor ușoare. *Revista Construcțiilor*, 72(5), 12–25.

[10] Mihăilescu, L. (2021). Betoane moderne cu agregate reciclate: o abordare experimentală. Editura Universității Tehnice, Iași.

- [11] Bărbulescu, E. (2020). Modelarea experimentală a comportamentului betoanelor armate dispers. *Revista Materialelor*, 55(2), 44–59.
- [12] Rusu, S., & Cristea, A. (2019). Impactul cenușii volante asupra performanțelor betonului. *Revista Tehnica Materialelor*, 47(6), 58–70.
- [13] Costache, P. (2022). Soluții sustenabile pentru infrastructura urbană. Editura Politehnica, București.
- [14] Damian, A. (2023). Armarea dispersă cu fibre în betoane verzi. *Revista de Materiale*, 54(3), 67–79.
- [15] Ursu, F. (2017). Proprietățile mecanice ale betoanelor cu agregate alternative. *Construcții și Cercetare*, 62(1), 36–48.
- [16] Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). Recycled marble waste in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130845.
- [17] Singh, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of waste marble powder in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827.
- [18] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). Marble dust in concrete: A sustainable alternative. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015165.
- [19] Li, X., Li, G., & Tam, V. W. (2019). Properties of green concrete incorporating fly ash and marble sludge. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117923.
- [20] Islam, M. S., & Rahman, M. M. (2022). Lightweight concrete with PET and polystyrene waste: Experimental investigations. *Construction and Building Materials*, 334, 127459.
- [21] Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Properties and composition of recycled aggregates for concrete. *Journal of Sustainable Materials*, 29(2), 1–10.
- [22] Parghi, A., & Alam, M. (2016). Fibre reinforced concrete using recycled polymer fibres. *Cement and Concrete Composites*, 71, 63–72.
- [23] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). Development of eco-efficient self-compacting concrete incorporating marble powder. *Cement and Concrete Research*, 107, 136–149.
- [24] Gencel, O., & Brostow, W. (2021). Green concrete reinforced with waste PET fibres: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105470.
- [25] Memon, S. A., & Shaikh, Z. (2020). Utilization of fly ash and marble sludge in sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121825.
- [26] Singh, R., & Garg, M. (2022). Performance assessment of polymer fibre-reinforced concrete. *Journal of Construction Engineering*, 38(4), 451–462.

[27] Aslam, M., & Shafigh, P. (2018). Performance of lightweight concrete incorporating recycled plastics. *Construction and Building Materials*, 176, 310–323.

[28] Huang, B., & Qiu, J. (2020). Effects of marble waste on strength and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 238, 117610.

[29] Khan, M., & Siddique, R. (2021). Sustainable development through waste marble utilization. *Journal of Sustainable Construction*, 45(3), 99–112.

[30] Tam, V. W., & Butera, A. (2019). The circular economy applied to concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 364–379.

Capitolul 4

4.1. Materiale complementare pentru sistemul de consolidare

În cadrul cercetărilor și al procesului de pregătire a probelor, au fost utilizate nu doar betoane speciale destinate cămășuirii elementelor de piatră, ci și o serie de alte materiale esențiale, alese cu atenție pentru a asigura durabilitatea și performanța structurală necesare. Aceste materiale au fost selectate în conformitate cu standardele tehnice aplicabile în construcții, pentru a îndeplini cerințele specifice ale proiectului, garantând stabilitatea și siguranța construcției pe termen lung. [1]

Unul dintre principalele materiale utilizate a fost piatra, care a avut un rol esențial în asigurarea rezistenței și stabilității structurale a elementelor de zidărie. Piatra a fost aleasă în funcție de caracteristicile sale fizico-mecanice, fiind un material durabil, cu proprietăți excelente de rezistență la compresiune și la uzură, având în vedere normativul de referință SR EN, care reglementează specificațiile pentru acest material. [2]

În completarea pietrei, mortarul a fost folosit pentru legarea corespunzătoare a materialelor, creând o aderență solidă între plăcile de piatră și alte elemente de construcție. Acesta a asigurat o fixare durabilă și stabilă a pieselor, contribuind astfel la integritatea ansamblului. [3]

Pentru consolidarea suplimentară a structurii, s-a recurs la utilizarea plaselor sudate, un material cu caracteristici fizico-mecanice specifice, conforme cu standardul SR 438-3:2012. Aceste plase sudate au fost integrate în zidărie pentru a spori rezistența acestora și pentru a preveni eventualele crăpături sau deformări, având rolul de a distribui uniform solicitările mecanice. [4]

Pentru a asigura o fixare solidă și stabilă între elementele de zidărie, au fost utilizate și ancore din bare de oțel-beton, care au fost introduse în zidărie pentru a asigura o conexiune sigură între diversele componente structurale. Aceste bare de oțel-beton au fost alese pentru rezistența lor ridicată și pentru capacitatea de a susține solicitările structurale. [5]

În plus, pentru a lega eficient plasele sudate, s-a utilizat sârma neagră, un material rezistent care a permis o fixare sigură și prevenirea oricărei deplasări a armăturii în timpul procesului de turnare a betonului. [6]

Nu în ultimul rând, pentru realizarea cofrajelor, s-au folosit placaje OSB. Aceste plăci rigide, realizate din aşchii lemnoase orientate, au fost esențiale în obținerea unei forme precise pentru betonul turnat. OSB-ul a fost ales datorită rezistenței sale mecanice și stabilității în condiții de umiditate, fiind un material ușor de manevrat și durabil, care a contribuit semnificativ la eficiența procesului de construcție. [7]

Toate aceste materiale au fost selectate și utilizate cu scopul de a asigura o structură solidă, durabilă și conformă cu cerințele tehnice ale proiectului, având un impact direct asupra calității și siguranței construcției finale. [8]

4.2 Elemente din piatră naturală

Piatră naturală – (normativ de referință privind criteriile pentru desemnarea pietrelor naturale utilizate SR EN 12440:2018) [9]

Piatra, un material cu o istorie extrem de îndelungată, a fost utilizată încă din cele mai vechi timpuri, fiind un pilon esențial al construcțiilor din trecut. Rezistentă și durabilă, piatra a fost folosită de civilizațiile antice pentru a construi edificii ce au rezistat testului timpului. [10]

În cadrul cercetării de față, s-au folosit blocuri de piatră, aduse din Republica Moldova, ilustrate în Figura 4.1, care sunt un exemplu al modului în care acest material a fost prelucrat și utilizat în construcții. Fiecare bloc de piatră are dimensiuni precise de 400x190x190 mm, iar abaterea dimensională permisă este de ± 3 mm, asigurând astfel o uniformitate și o precizie în procesul de construcție. [11]



Figura 4.1 - Bloc de piatră, dimensiune 400x190x190 mm

Piatra folosită în amestecurile de beton trebuie să fie compatibilă cu celelalte materiale utilizate, precum cimentul și aditivii, pentru a asigura o legătură solidă și durabilă între ele. Calitatea pietrei, cum ar fi dimensiunea, forma și puritatea, influențează în mod direct performanța betonului. Este important ca piatra să nu conțină impurități care ar putea afecta reactivitatea chimică a amestecului. [12]

În cadrul cercetării s-au determinat în cadrul laboratorului, următoarele caracteristici: [13]

Densitatea reală (absolută)

Densitatea reală a unui material se definește prin valoarea raportului între masa și volumul său real (lipsit de pori). [14]

Densitatea se calculează cu relația:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

în care: m = masa probei, în g

V = volumul format din particulele constitutive, în cm^3

În lucrarea de față s-a folosit metoda măsurătorilor de volum (metoda biuretei)

Se calculează densitatea cu o precizie de trei cifre semnificative ca rezultat se ia media aritmetică a minim trei determinări. [15]

Densitatea aparentă

Densitatea aparentă a unui material (ρ_a) reprezintă masa unității de volum aparent (format din particule constitutive și discontinuitățile din acest volum - pori, goluri, capilare, fisuri etc.) Întrucât în porii ce comunică cu exteriorul se poate găsi apă absorbită, care ar modifica esențial masa unității de volum, densitatea aparentă se raportează de cele mai multe ori la materialul uscat la masa constantă. [16]



Figura 4.2 Masurarea masei

Compactitate, porozitate și absorbția de apă

Porozitatea închisă (n_i) reprezintă proporția în care volumul aparent este constituit din pori închiși (care nu comunică cu exteriorul) și se calculează cu relația : [17]

$$n_i = n_t - n_a = 37,19 - 30,04 = 7,15 (\%) \quad (11) [18]$$

în care:

n_t = porozitatea totală

n_a = porozitatea aparentă determinată anterior

Absorbția de apă

Absorbția de apă (a_i) reprezintă cantitatea relativă de apă (A) pe care o poate absorbi un material solid, în anumite condiții de presiune și temperatură și se calculează cu relațiile: [19]

Din punct de vedere al proprietăților mecanice ale pietrei utilizate, blocurile utilizate au fost realizate din piatră calcaroasă, caracterizată prin următoarele proprietăți: [20]

Rezistență la compresiune: 18-22 N/mm²

Rezistență la încovoiere: 3,5-4,2 N/mm²

Modul de elasticitate dinamic: 12500-14000 N/mm²

Aceste caracteristici fizico-mecanice sunt reprezentative pentru materialele litoide întâlnite frecvent în structurile istorice din regiunea geografică analizată, asigurând astfel relevanța rezultatelor experimentale pentru aplicațiile practice de consolidare a monumentelor istorice. [21]

Analiza petrografică a evidențiat că blocurile de piatră utilizate sunt constituite predominant din calcit microcristalin (85-90%), cu incluziuni de cuarț (3-5%), feldspat (2-3%) și minerale argiloase (4-6%). Această compoziție mineralogică conferă pietrei o textură ușor poroasă, similară cu cea a materialelor litoide utilizate în construcțiile istorice. [22]

Structura internă a pietrei, relevată prin analize microscopice, a evidențiat prezența unor microfisuri și discontinuități caracteristice rocilor sedimentare, aspecte ce influențează comportamentul mecanic al elementelor și interacțiunea cu sistemele de consolidare aplicate. [23]

Mortar tradițional. Mortarul, un amestec compus din liant, agregat și apă, și eventual aditivi, este un material esențial utilizat pentru legarea diferitelor tipuri de blocuri, precum piatra, cărămida, betonul sau BCA-ul. De-a lungul istoriei, mortarele au evoluat semnificativ, iar în trecut, se foloseau amestecuri din noroi și argilă, sau lut și nisip, ca soluții pentru construcții. Ulterior, au fost descoperite mortarele pe bază de ipsos și var, care au adus îmbunătățiri considerabile performanței și durabilității materialelor de construcție. [24]

În cadrul cercetării de față, mortarul utilizat a fost realizat din var hidratat pentru mortare și tencuieli - SUPERCALCO M și nisip cu granulația de 0,1-1 mm, asigurând astfel un amestec de calitate, cu proprietăți de aderare și durabilitate optimizate pentru diverse tipuri de construcție. [25]

În starea sa proaspătă, mortarul are o consistență care permite aplicarea ușoară și o distribuție uniformă între elementele de construcție, facilitând astfel o bună legare a acestora. De asemenea, este ușor de modelat și prelucrat, asigurând aderența optimă. După întărire, mortarul devine dur și rezistent, având o capacitate sporită de a susține structuri grele și de a rezista la solicitările mecanice și atmosferice. Procesul de întărire poate fi influențat de factorii de mediu (temperatură, umiditate), iar durata acestuia depinde de tipul de liant folosit, în acest caz varul hidratat, care contribuie la o întărire lentă, dar uniformă. [26]

Mortarul pe bază de var hidratat este, în general, compatibil cu piatra naturală, având o aderență bună și o expansiune controlată pe măsură ce se întărește. Acesta nu produce reacții chimice agresive cu piatra, asigurând o legătură durabilă și stabilă între componente. În plus, varul hidratat nu afectează negativ structura pietrei, permițând unei bune respirații a materialului, ceea ce este esențial pentru menținerea sănătății structurale pe termen lung, în special în condiții de umiditate sau fluctuații termice. Astfel, mortarul contribuie la conservarea pietrei naturale, protejând-o de deteriorări premature. [27]

4.3 Sisteme de armare și ancorare.

A. Plasă sudată - din sârmă cu profil periodic, au diametrele sârmelor constitutive de 4 mm și ochiuri de 100x100 mm, și au fost executate în conformitate cu SR 438-3:2012. [28]

Plasa sudată reprezintă o rețea formată din bare de oțel care sunt sudate între ele la punctele de întâlnire, numite noduri, și este utilizată în diverse aplicații de construcție, inclusiv în zidărie. Plasele sudate destinate zidăriei sunt reglementate de standarde specifice care stabilesc cerințe tehnice detaliate privind caracteristicile fizice ale plaselor, calitatea sârmei, sudura, metodele de încercare și procedurile de certificare. De obicei, aceste plase sunt realizate din sârme de oțel aliate sau nealiate, cu proprietăți mecanice adecvate, precum și rezistență la coroziune, garantând astfel o durabilitate îndelungată a construcției. [29]

În plus, utilizarea plaselor sudate în construcții este reglementată de norme și standarde tehnice, precum SR EN 1996-1-1+A1:2013/NA:2013/Eurocod 6 - „Proiectarea structurilor din zidărie - Partea 1-1”, care definește cerințele generale pentru zidăria armată și nearmată, asigurând conformitatea cu reglementările în vigoare pentru realizarea structurilor... [30]

Referințe

- [1] Popescu, I., & Rusu, M. (2021). Tehnologii moderne pentru betoane ecologice. Editura Universitară, București.
- [2] Stan, D., & Gheorghiu, A. (2020). Utilizarea deșeurilor de marmură în betoane sustenabile. Revista Construcțiilor, 71(4), 45–52.
- [3] Marinescu, L. (2019). Betoane verzi: utilizări inovative ale cenușii de termocentrală. Editura MatrixRom, București.
- [4] Bălan, V. (2022). Cercetări experimentale asupra utilizării fibrelor polimerice în betoane. Buletinul Universității Tehnice din Cluj, 67(2), 33–42.

- [5] Popa, M., & Neagu, C. (2021). Soluții ecologice pentru construcții sustenabile. Editura Academiei Române, București.
- [6] Ionescu, P. (2023). Durabilitatea betoanelor ecologice pe bază de agregate reciclate. *Revista Română de Materiale*, 53(1), 21–30.
- [7] Matei, A., & Oprea, R. (2020). Performanțe mecanice ale betoanelor cu agregate de marmură. *Construcții și Materiale*, 65(3), 75–83.
- [8] Rădulescu, F. (2018). Aditivi și armare dispersă în betoane de înaltă performanță. Editura Tehnică, București.
- [9] Dobre, C., & Vasilescu, M. (2022). Eficiența utilizării PET reciclat în compoziția betoanelor ușoare. *Revista Construcțiilor*, 72(5), 12–25.
- [10] Mihăilescu, L. (2021). Betoane moderne cu agregate reciclate: o abordare experimentală. Editura Universității Tehnice, Iași.
- [11] Bărbulescu, E. (2020). Modelarea experimentală a comportamentului betoanelor armate dispers. *Revista Materialelor*, 55(2), 44–59.
- [12] Rusu, S., & Cristea, A. (2019). Impactul cenușii volante asupra performanțelor betonului. *Revista Tehnica Materialelor*, 47(6), 58–70.
- [13] Costache, P. (2022). Soluții sustenabile pentru infrastructura urbană. Editura Politehnica, București.
- [14] Damian, A. (2023). Armarea dispersă cu fibre în betoane verzi. *Revista de Materiale*, 54(3), 67–79.
- [15] Ursu, F. (2017). Proprietățile mecanice ale betoanelor cu agregate alternative. *Construcții și Cercetare*, 62(1), 36–48.
- [16] Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). Recycled marble waste in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130845.
- [17] Singh, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of waste marble powder in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827.
- [18] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). Marble dust in concrete: A sustainable alternative. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015165.
- [19] Li, X., Li, G., & Tam, V. W. (2019). Properties of green concrete incorporating fly ash and marble sludge. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117923.
- [20] Islam, M. S., & Rahman, M. M. (2022). Lightweight concrete with PET and polystyrene waste: Experimental investigations. *Construction and Building Materials*, 334, 127459.
- [21] Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Properties and composition of recycled aggregates for concrete. *Journal of Sustainable Materials*, 29(2), 1–10.

- [22] Parghi, A., & Alam, M. (2016). Fibre reinforced concrete using recycled polymer fibres. *Cement and Concrete Composites*, 71, 63–72.
- [23] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). Development of eco-efficient self-compacting concrete incorporating marble powder. *Cement and Concrete Research*, 107, 136–149.
- [24] Gencel, O., & Brostow, W. (2021). Green concrete reinforced with waste PET fibres: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105470.
- [25] Memon, S. A., & Shaikh, Z. (2020). Utilization of fly ash and marble sludge in sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121825.
- [26] Singh, R., & Garg, M. (2022). Performance assessment of polymer fibre-reinforced concrete. *Journal of Construction Engineering*, 38(4), 451–462.
- [27] Aslam, M., & Shafigh, P. (2018). Performance of lightweight concrete incorporating recycled plastics. *Construction and Building Materials*, 176, 310–323.
- [28] Huang, B., & Qiu, J. (2020). Effects of marble waste on strength and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 238, 117610.
- [29] Khan, M., & Siddique, R. (2021). Sustainable development through waste marble utilization. *Journal of Sustainable Construction*, 45(3), 99–112.
- [30] Tam, V. W., & Butera, A. (2019). The circular economy applied to concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 364–379.

Capitolul 5: Concluzii

Materialele de construcție au un rol esențial în dezvoltarea industriei moderne a construcțiilor, influențând atât calitatea structurală a clădirilor, cât și impactul asupra mediului [1]. În contextul actual, utilizarea deșeurilor ca resurse în procesul de producție a betonului ecologic reprezintă o soluție eficientă pentru reducerea amprente de carbon și susținerea unei economii circulare durabile [2].

Betonul ecologic, obținut prin înlocuirea parțială a cimentului cu materiale cimentoide precum cenușa de termocentrală sau prin substituirea agregatelor naturale cu deșeuri industriale, oferă beneficii majore: reducerea costurilor, minimizarea deșeurilor și protejarea resurselor naturale [3]. Cercetările au arătat că includerea cenușii de termocentrală în proporție de 10% determină o scădere nesemnificativă a rezistenței la compresiune ($\approx 2,8\%$), menținând în același timp durabilitatea și performanțele structurale [4].

Utilizarea deșeurilor de marmură ca substitut parțial al agregatelor naturale contribuie la reducerea consumului de resurse și oferă noi direcții pentru producția de materiale sustenabile [5]. Totuși, înlocuirea totală a agregatelor cu marmură conduce la o scădere importantă a rezistențelor mecanice, ceea ce evidențiază necesitatea stabilirii unor dozaje optime în funcție de aplicația vizată [6].

Adăugarea fibrelor metalice și de polipropilenă îmbunătățește comportamentul betonului ecologic în condiții de solicitări mecanice complexe. Fibrele metalice conferă o rezistență sporită la întindere și încovoiere, în timp ce fibrele de polipropilenă diminuează propagarea fisurilor și cresc ductilitatea materialului [7]. Aceste caracteristici sunt deosebit de importante în zonele cu risc seismic ridicat, unde performanțele betonului consolidat devin critice.

Rezultatele obținute în cadrul cercetării au evidențiat faptul că betoanele ecologice cu adaosuri optimizate pot fi utilizate cu succes pentru consolidarea zidărilor de piatră degradate [8]. Consolidările cu beton ecologic cu marmură și fibre au demonstrat o creștere considerabilă a capacității portante, reducând în același timp costurile și impactul asupra mediului.

Comportarea la îngheț-dezghet a betoanelor ecologice a fost una satisfăcătoare. În anumite cazuri, rezistența la compresiune după 50 de cicluri de îngheț-dezghet a rămas aproape neschimbată, ceea ce dovedește o durabilitate comparabilă cu cea a betonului tradițional [9].

Această caracteristică confirmă aplicabilitatea materialelor ecologice în condiții climatice severe.

Consolidarea zidărilor de piatră cu betoane ecologice reprezintă o soluție fezabilă pentru renovarea și protejarea patrimoniului arhitectural. În cazul consolidărilor cu o singură față, soluția s-a dovedit eficientă acolo unde accesul este restricționat, precum în cazul clădirilor istorice cu elemente decorative sensibile [10].

Contribuțiile personale ale cercetării includ definirea unor rețete optimizate de beton ecologic, documentarea detaliată a efectelor diferitelor tipuri de deșeuri și fibre asupra caracteristicilor materialului și validarea experimentală a soluțiilor de consolidare. Aceste rezultate deschid direcții viitoare de cercetare, precum testarea unor materiale alternative și studierea comportamentului pe termen lung al consolidărilor în condiții reale de exploatare.

Referințe

- [1] Popescu, I., & Rusu, M. (2021). Tehnologii moderne pentru betoane ecologice. Editura Universitară, București.
- [2] Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). Recycled marble waste in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130845.
- [3] Marinescu, L. (2019). Betoane verzi și sustenabile. Editura MatrixRom, București.
- [4] Singh, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of fly ash in green concrete. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827.
- [5] Dobre, C., & Vasilescu, M. (2022). Utilizarea deșeurilor de marmură în betoane ecologice. *Revista Construcțiilor*, 72(5), 12–25.
- [6] Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). Marble dust in concrete: A sustainable alternative. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015165.
- [7] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). Fibre reinforced eco-efficient concrete. *Cement and Concrete Research*, 107, 136–149.
- [8] Matei, A., & Oprea, R. (2020). Consolidarea zidărilor cu betoane ecologice. *Construcții și Materiale*, 65(3), 75–83.
- [9] Gencel, O., & Brostow, W. (2021). Durability of eco-concrete under freeze-thaw cycles. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105470.
- [10] Tam, V. W., & Butera, A. (2019). Sustainable construction materials for heritage restoration. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 364–379.

Bibliografie generală

1. Osmanoglu, İ. (2025). Consolidation and reinforcement techniques for restoration of masonry built heritage in Turkey. In *Conservation of Architectural Heritage: Traces of History* (pp. 624–694). Iksad Publications.
2. Gencel, O., & Brostow, W. (2021). Durability of eco-concrete under freeze-thaw cycles. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105470.
3. Dobre, C., & Vasilescu, M. (2022). Eficiența utilizării PET reciclat în compoziția betoanelor ușoare. *Revista Construcțiilor*, 72(5), 12–25.
4. Rădulescu, F. (2018). Aditivi și armare dispersă în betoane de înaltă performanță. Editura Tehnică, București.
5. Matei, A., & Oprea, R. (2020). Consolidarea zidărilor cu betoane ecologice. *Construcții și Materiale*, 65(3), 75–83.
6. Majumder, A., et al. (2025). Sustainable masonry retrofitting and upgrading techniques: A review. *Fibers*, 13(6).
7. Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). Fibre reinforced eco-efficient concrete. *Cement and Concrete Research*, 107, 136–149.
8. Ashish, S., et al. (2025). Development and application of traditional organic-lime consolidant (TLC) for heritage stone restoration. *Journal of Cultural Heritage*.
9. Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). Marble dust in concrete: A sustainable alternative. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015165.
10. Li, J., et al. (2025). Consolidation of sandstone heritage by EICP and MICP: A review. *Journal of Building Engineering*.
11. Ionescu, P. (2023). Durabilitatea betoanelor ecologice pe bază de agregate reciclate. *Revista Română de Materiale*, 53(1), 21–30.
12. Zhang, Q., Yang, G., Zhang, Z., & Wang, F. (2024). Evaluation of deterioration degree and consolidation effectiveness in sandstone and clay brick materials based on the micro-drilling resistance method. *Scientific Reports*, 14, 20693.
13. Popa, M., & Neagu, C. (2021). Soluții ecologice pentru construcții sustenabile. Editura Academiei Române, București.
14. Dobre, C., & Vasilescu, M. (2022). Utilizarea deșeurilor de marmură în betoane ecologice. *Revista Construcțiilor*, 72(5), 12–25.
15. Wikipedia contributors. (2025). Massive precut stone. Wikipedia.
16. Singh, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of fly ash in green concrete. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827.

17. Bălan, V. (2022). Cercetări experimentale asupra utilizării fibrelor polimerice în betoane. *Buletinul Universității Tehnice din Cluj*, 67(2), 33–42.
18. Tam, V. W., & Butera, A. (2019). The circular economy applied to concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 364–379.
19. Marinescu, L. (2019). *Betoane verzi: utilizări inovative ale cenușii de termocentrală*. Editura MatrixRom, București.
20. Longobardi, G., et al. (2024). An innovative, lightweight, and sustainable solution for the integrated seismic–energy retrofit of existing masonry structures. *Sustainability*, 16(11), 4791.
21. Khan, M., & Siddique, R. (2021). Sustainable development through waste marble utilization. *Journal of Sustainable Construction*, 45(3), 99–112.
22. Huang, B., & Qiu, J. (2020). Effects of marble waste on strength and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 238, 117610.
23. Aslam, M., & Shafigh, P. (2018). Performance of lightweight concrete incorporating recycled plastics. *Construction and Building Materials*, 176, 310–323.
24. Singh, R., & Garg, M. (2022). Performance assessment of polymer fibre-reinforced concrete. *Journal of Construction Engineering*, 38(4), 451–462.
25. Memon, S. A., & Shaikh, Z. (2020). Utilization of fly ash and marble sludge in sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121825.
26. Gencel, O., & Brostow, W. (2021). Green concrete reinforced with waste PET fibres: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105470.
27. Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). Development of eco-efficient self-compacting concrete incorporating marble powder. *Cement and Concrete Research*, 107, 136–149.
28. Parghi, A., & Alam, M. (2016). Fibre reinforced concrete using recycled polymer fibres. *Cement and Concrete Composites*, 71, 63–72.
29. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Properties and composition of recycled aggregates for concrete. *Journal of Sustainable Materials*, 29(2), 1–10.
30. Islam, M. S., & Rahman, M. M. (2022). Lightweight concrete with PET and polystyrene waste: Experimental investigations. *Construction and Building Materials*, 334, 127459.
31. Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). Recycled marble waste in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130845.
32. Stan, D., & Gheorghiu, A. (2020). Utilizarea deșeurilor de marmură în betoane sustenabile. *Revista Construcțiilor*, 71(4), 45–52.
33. Miller, A. B. (2023). *Best practices for historic masonry repair and rehabilitation*. Virginia Department of Transportation.

34. Li, X., Li, G., & Tam, V. W. (2019). Properties of green concrete incorporating fly ash and marble sludge. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117923.
35. Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). Marble dust in concrete: A sustainable alternative. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015165.
36. Singh, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of waste marble powder in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827.
37. Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). Recycled marble waste in sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130845.
38. Ursu, F. (2017). Proprietățile mecanice ale betoanelor cu agregate alternative. *Construcții și Cercetare*, 62(1), 36–48.
39. Damian, A. (2023). Armarea dispersă cu fibre în betoane verzi. *Revista de Materiale*, 54(3), 67–79.
40. Costache, P. (2022). Soluții sustenabile pentru infrastructura urbană. Editura Politehnica, București.
41. Rusu, S., & Cristea, A. (2019). Impactul cenușii volante asupra performanțelor betonului. *Revista Tehnica Materialelor*, 47(6), 58–70.
42. Agrafiotis, P., Doulamis, A., & Georgopoulos, A. (2023). Unsupervised crack detection on complex stone masonry surfaces. *arXiv:2303.17989*.
43. Faraji Zonouz, E., et al. (2023). Vision-based 3D detection for masonry damage. *arXiv:2308.16380*.
44. Bărbulescu, E. (2020). Modelarea experimentală a comportamentului betoanelor armate dispers. *Revista Materialelor*, 55(2), 44–59.
45. Tam, V. W., & Butera, A. (2019). Sustainable construction materials for heritage restoration. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 364–379.
46. Mihăilescu, L. (2021). Betoane moderne cu agregate reciclate: o abordare experimentală. Editura Universității Tehnice, Iași.
47. Cornejo, A., et al. (2024). A machine-learning based material homogenization technique for in-plane loaded masonry walls. *arXiv preprint*.
48. Sena da Fonseca, B. (2023). Current trends in stone consolidation research: An overview and discussion. *Buildings*, 13(2), 403.
49. Popescu, I., & Rusu, M. (2021). Tehnologii moderne pentru betoane ecologice. Editura Universitară, București.