

Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
Facultatea de Construcții și Instalații

BETOANE ECOLOGICE
UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ
- rezumatul tezei de doctorat -

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Bărbuță Marinela

Doctorand:

Ing. Bogdan Ionel Luca

Iași
2025



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

CAPITOLUL 1. – INTRODUCERE

- 1.1 Obiectivul tezei de doctorat
- 1.2. Organizarea tezei.

CAPITOLUL 2. – BETONUL RUTIER ECOLOGIC

- 2.1 Considerații generale asupra îmbrăcăminților rutiere rigide
- 2.2. Descriere ale betoanelor rutiere
- 2.3. Aplicații ale betoanelor rutiere
- 2.4. Definirea betonului rutier ecologic
- 2.5 Compoziția betonului ecologic
 - 2.5.1. Cimentul
 - 2.5.2. Agregate
 - 2.5.3. Adaosuri
 - 2.5.4. Apa
 - 2.5.5. Aditivi
 - 2.5.6. Deșeuri

CAPITOLUL 3. – PROGRAMUL EXPERIMENTAL

- 3.1 Materii prime ce au fost folosite în compoziția betonului rutier.
 - 3.1.1 Cimentul
 - 3.1.2. Agregatele
 - 3.1.3. Adaosuri minerale
 - 3.1.4. Adaosuri sintetice - Aditivi
 - 3.1.5. Apa
- 3.2 Încercări mecanice
 - 3.2.1. Determinarea densității



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



3.2.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

3.2.3. Determinarea rezistenței la compresiune

3.2.4. Determinarea rezistenței la întindere prin despicare

3.3 Metode de testare a caracteristicilor de durabilitate a betonului rutier ecologic

3.3.1 Determinarea rezistenței la îngheț – dezgheț

3.3.2 Determinarea caracteristicilor de permeabilitate

3.4 Evaluarea ciclului de viață

3.4.1 Definiție

3.4.2 Obiectiv și caracteristici

3.4.3 Metodologia utilizată

3.4.4 Metodologie de lucru conform standardelor ISO

CAPITOLUL 4 – STANDARDE ȘI GHIDURI

4.1. Standarde în domeniul betonului ecologic rutier

4.2. Ghiduri specifice

4.3. Aplicații ale betoanelor rutiere

4.3.1 Reglementări tehnice aplicabile betoanelor rutiere

4.3.2 Criterii tehnice și normative privind betonul ecologic rutier

4.4. Stadiul actual al cercetărilor cu privire la betonul ecologic rutier

CAPITOLUL 5 – CARACTERIZAREA BETONULUI ECOLOGIC RUTIER

5.1. Proiectarea compoziției betonului rutier ecologic

5.2. Densitatea

5.3 Încercări mecanice.

5.2.1 Rezistența la compresiune

5.3.2 Rezistența la întindere prin încovoiere

5.3.3 Rezistența la întindere prin despicare

5.4 Încercări de durabilitate

5.4 Încercări de permeabilitate



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



CAPITOLUL 6 – EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ

- 6.1 Scopul și obiectivul studiului
- 6.2 Aplicarea ECV la betonul rutier
- 6.3 Limitele sistemului analizat
- 6.4 Rezultate la evaluarea impactului ciclului de viață
 - 6.4.1. Profil de mediu- Rețeta A0 – beton rutier, rețetă de control
 - 6.4.2. Profil de mediu- Rețeta A3 – beton rutier, 30% silice
 - 6.4.3. Profil de mediu- Rețeta A6 – beton rutier, 30% cenușă de termocentrală
 - 6.4.3. Comparatie A0 – A3 – A6
- 6.5. Concluzii și recomandări

CAPITOLUL 7 – CONCLUZII FINALE

- 7.1. Concluzii generale
- 7.2. Contribuții personale
- 7.3. Propuneri de valorificare a cercetărilor

BIBLIOGRAFIE



CAPITOLUL 1. – INTRODUCERE

Structurile rutiere sunt supuse în mod constant unui cumul de factori care le influențează negativ durabilitatea și performanța funcțională. Traficul intens – în special cel greu – în combinație cu variațiile climatice (îngheț-dezghet, precipitații abundente, temperaturi extreme) și cu particularitățile hidrogeologice ale terenului de fundare generează solicitări repetate și neuniforme asupra pavajului. Aceste solicitări, amplificate de lipsa unor lucrări de întreținere adecvate, conduc în timp la pierderea capacității portante a structurii rutiere. Astfel, infrastructura rutieră ajunge într-o stare avansată de uzură, punând în pericol siguranța circulației și generând costuri ridicate pentru reparații ulterioare.

Pentru a preveni atingerea unui nivel critic de degradare, se impune adoptarea unui program riguros de monitorizare, întreținere periodică și, acolo unde este cazul, reabilitare structurală. Scopul acestor intervenții este menținerea sau chiar îmbunătățirea capacității portante și funcționale a drumurilor, astfel încât acestea să poată prelua în condiții de siguranță traficul actual, dar și pe cel prognozat în viitorul apropiat.

În acest context, utilizarea materialelor durabile și sustenabile devine o necesitate. Betoanele moderne, utilizate pentru structuri rutiere rigide, pot fi produse cu agregate locale, ceea ce contribuie atât la reducerea costurilor de transport, cât și la scăderea amprente de carbon. În plus, integrarea materialelor reciclate sau ecologice în compoziția betonului permite reducerea consumului energetic total față de soluțiile bituminoase tradiționale. Studiile de specialitate demonstrează că aceste tipuri de betoane pot atinge performanțe mecanice superioare și o rezistență sporită la acțiunea factorilor de mediu.

Implementarea structurilor rutiere rigide din beton, realizate cu agregate naturale provenite din surse locale, reprezintă o soluție tehnico-economică eficientă, mai ales în cazul drumurilor industriale sau celor cu un trafic greu susținut. Aceste structuri asigură o durabilitate crescută,



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



necesită intervenții minime de întreținere pe durata ciclului de viață și oferă o alternativă sustenabilă față de infrastructurile tradiționale asfaltice.

Prin urmare, în condițiile actuale ale schimbărilor climatice, presiunii traficului rutier și nevoii de optimizare a costurilor, soluțiile de infrastructură rutieră trebuie regândite în direcția sustenabilității, rezilienței și eficienței pe termen lung..

1.1 Obiectivul tezei de doctorat

Conform cerințelor directivei europene DC 2008/98/CE [1], care reglementează regimul deșeurilor, producătorii acestora au obligația reciclării și valorificării lor, prin utilizarea celor mai bune tehnici disponibile în materie, cu efecte minime asupra factorilor de mediu și a sănătății umane. În directiva cadru DC2008/98/CE [1] privind deșeurile, reciclarea ocupă un loc principal în ierarhia proceselor, fiind situată înaintea depozitării și a incinerării.

Așadar, având în vedere considerentele de ordin legislativ [1] menționate anterior, se poate aprecia că preocuparea pentru obținerea betoanelor ecologice vine să completeze necesitățile la nivel național, cu privire la existența celor mai bune tehnici de valorificare a unor asemenea tipuri de deșeuri.

Ținând seama de această necesitate la nivel național, cât și global, am considerat că există o oportunitate în zona cercetării propuse, pentru a veni în sprijinul celor care caută soluții pentru îndeplinirea indicatorilor trasați de directiva mai sus amintită, de reciclare și valorificare a deșeurilor.

Tema de cercetare „Betoane ecologice utilizate în tehnica rutieră” își are fundamentul în provocările stringente cu care se confruntă societatea contemporană, în contextul unei dezvoltări accelerate, al urbanizării continue și al presiunii tot mai mari asupra resurselor naturale. Evoluția tehnologică rapidă, alături de impactul schimbărilor climatice, impune domeniului construcțiilor rutiere adaptarea la noi cerințe ce vizează atât performanța tehnică, cât și sustenabilitatea ecologică și eficiența economică. În paralel, cererea tot mai mare pentru infrastructură rutieră modernă, fiabilă și durabilă, determină necesitatea de a adopta soluții constructive inovatoare, cu impact redus asupra mediului.

O parte din betoanele de ciment uzuale au fost studiate prin prisma încorporării în compoziția lor a diverselor materiale, funcție de scopul dorit. Astfel, dacă se urmărește să se



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



consume în scopuri ecologice o serie de materiale, în special deșeuri, betonul care se obține se poate utiliza într-un domeniu mai restrâns, funcție de caracteristicile fizico-mecanice rezultate.

Dacă însă se urmărește îmbunătățirea proprietăților betonului prin folosirea diverselor adaosuri, atunci se pot obține betoane cu o arie de utilizare extinsă. Utilizarea adaosurilor în beton s-a dezvoltat nu numai din cerințe economice și ecologice, ci și datorită faptului că acestea îmbunătățesc proprietățile betonului.

În zilele noastre, datorită stilului de viață modern, progresele înregistrate în industrie și tehnologie au condus la o creștere importantă a cantității și a tipurilor de deșeuri. Problema acumulării deșeurilor de la an la an este o problemă regăsită peste tot în lume. Aceste deșeuri industriale sunt subproduse, zgură, cenușă zburătoare, praf de ciment, praf de cărămidă, nămol, sticlă, anvelope etc.

Infrastructura rutieră a cunoscut o expansiune remarcabilă în ultimele decenii, însă acest proces de extindere și modernizare vine cu un cost ridicat asupra mediului. De la consumul semnificativ de resurse neregenerabile până la emisiile de gaze cu efect de seră asociate producției de materiale convenționale (cum ar fi cimentul), impactul ecologic al construcțiilor rutiere nu mai poate fi ignorat. De asemenea, activitățile de construire și întreținere ale drumurilor – fie ele urbane, naționale sau industriale – contribuie la defrișări, fragmentarea habitatelor naturale și poluarea solului și apelor, în special din cauza materialelor de construcție tradiționale.

În acest context, cercetarea și implementarea betoanelor ecologice capătă o relevanță deosebită. Acestea sunt concepute pe baza unor rețete care includ materiale reciclate sau regenerabile – cum ar fi zgura, cenușa volantă, agregatele reciclate sau alte reziduuri industriale – cu scopul de a reduce consumul de resurse naturale virgine și a limita impactul negativ asupra mediului. Totodată, betoanele ecologice pot avea o amprentă de carbon semnificativ mai redusă față de betonul convențional, contribuind astfel la eforturile globale de reducere a emisiilor de CO₂ și la combaterea efectelor schimbărilor climatice.

Un alt aspect important care motivează această temă de cercetare este potențialul economic al soluțiilor ecologice. Utilizarea materialelor reciclate conduce la o reducere a costurilor de producție și de transport, iar durabilitatea îmbunătățită a acestor betoane se traduce printr-o diminuare considerabilă a cheltuielilor de întreținere și reparație pe termen lung. Astfel, proiectele



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



de infrastructură rutieră pot deveni nu doar mai eficiente din punct de vedere financiar, ci și mai sustenabile în exploatare.

Din punct de vedere social, adoptarea acestor soluții contribuie la un mediu mai curat și mai sănătos, atât pentru comunitățile aflate în proximitatea șantierelor de construcții, cât și pentru utilizatorii finali ai drumurilor. În plus, dezvoltarea unor tehnologii ecologice în domeniul construcțiilor rutiere poate stimula inovarea, cercetarea aplicată și transferul de know-how către administrațiile locale, antreprenori și proiectanți.

Prin urmare, alegerea temei privind utilizarea betoanelor ecologice în tehnica rutieră este motivată de complexitatea beneficiilor pe care aceste materiale le oferă. Nu este vorba doar despre înlocuirea unui material de construcție, ci despre o schimbare de paradigmă în ceea ce privește modul în care proiectăm, construim și întreținem infrastructura rutieră. Prin cercetare riguroasă și prin analiza performanței acestor materiale în condiții reale de exploatare, se pot identifica soluții care să răspundă simultan cerințelor de sustenabilitate, eficiență economică și reziliență structurală.

Obiectivul general al acestei teze constă în analiza aprofundată a impactului utilizării betonului ecologic în construcțiile rutiere, cu accent pe performanțele sale tehnice și implicațiile asupra mediului înconjurător. Scopul este de a evalua în ce măsură acest tip de material poate reprezenta o alternativă sustenabilă la soluțiile convenționale utilizate în infrastructura rutieră, contribuind totodată la reducerea amprentei ecologice a lucrărilor de construcție și întreținere.

Pentru atingerea acestui obiectiv general, cercetarea va urmări o serie de obiective specifice, structurate astfel:

1. **Fundamentarea teoretică a conceptului de beton ecologic** - Acest obiectiv urmărește definirea clară a betonului ecologic și identificarea principalelor sale caracteristici, avantaje și limitări. Se va analiza rolul său în contextul infrastructurii rutiere moderne, cu accent pe contribuția la sustenabilitate, eficiență energetică și utilizarea resurselor alternative.
2. **Analiza literaturii de specialitate privind dezvoltarea și aplicabilitatea betonului ecologic în tehnica rutieră** - În cadrul acestui obiectiv, se va realiza o revizuire critică și sistematică a studiilor și cercetărilor existente pe tema betoanelor ecologice. Vor fi evidențiate tendințele actuale în domeniu, provocările întâmpinate în procesul de



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



implementare și eventualele lacune care necesită cercetări suplimentare, în special în ceea ce privește aplicabilitatea practică în proiecte rutiere.

3. **Evaluarea compoziției, proprietăților mecanice și durabilității betonului ecologic** -

Acest obiectiv urmărește investigarea detaliată a compoziției betoanelor ecologice, incluzând materiale alternative precum agregatele reciclate, cenușa volantă sau alte subproduse industriale. Se vor analiza performanțele mecanice (rezistența la compresie, flexibilitate, comportamentul la solicitări dinamice) și durabilitatea în condiții de exploatare rutieră. Totodată, se va examina impactul asupra mediului, cu accent pe reducerea emisiilor de CO₂ și conservarea resurselor naturale.

Prin atingerea acestor obiective, cercetarea își propune să contribuie la consolidarea cunoștințelor privind utilizarea materialelor ecologice în infrastructura rutieră și să ofere un suport tehnico-științific pentru adoptarea acestora în practică, în conformitate cu cerințele actuale de sustenabilitate și eficiență în domeniul construcțiilor.

1.2. Organizarea tezei

Pentru atingerea obiectivelor propuse, prezenta teză de doctorat este organizată într-un mod logic, coerent și riguros, astfel încât să faciliteze o înțelegere profundă și aplicată a modului în care betoanele ecologice pot fi utilizate în tehnica rutieră, în concordanță cu cerințele de protecție a mediului și de dezvoltare durabilă. Lucrarea este structurată în șapte capitole principale, fiecare având rolul de a dezvolta treptat dimensiunile teoretice, experimentale și aplicative ale temei cercetate.

Capitolul 1 reprezintă partea introductivă, în care sunt prezentate tematica generală a lucrării, justificarea alegerii subiectului, precum și obiectivele principale ale cercetării.

Capitolul 2 tratează noțiunile generale privind betonul ecologic utilizat în infrastructura rutieră. Se definește conceptul de beton rutier ecologic și este analizat stadiul actual al cercetării în domeniu. De asemenea, sunt prezentate și analizate componentele utilizate în realizarea acestui tip de material: cimentul, agregatele și adaosurile minerale, apa - ca element de omogenizare, aditivii chimici, deșeurile industriale reutilizabile în compoziția betonului.

Capitolul 3 prezintă programul experimental al lucrării, având ca obiectiv proiectarea și testarea compozițiilor de beton ecologic rutier. Sunt detaliate metodele de obținere a probelor,



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



precum și tipurile de amestecuri analizate, în care s-au utilizat agregate de carieră, silice ultrafină și cenușă de termocentrală în proporții variabile ca înlocuitori parțiali ai cimentului.

Capitolul 4 analizează cadrul normativ și reglementările tehnice relevante pentru utilizarea betonului ecologic rutier. Sunt prezentate standardele naționale și internaționale în vigoare și cerințele ce trebuie respectate pentru a asigura conformitatea, siguranța și durabilitatea structurilor realizate cu astfel de materiale. În plus, se face o trecere în revistă a celor mai recente studii de cercetare privind performanțele acestor betoane în aplicații rutiere.

Capitolul 5 este dedicat analizei detaliate a comportamentului fizico-mecanic și a performanțelor de durabilitate ale compozițiilor de beton rutier ecologic studiate în cadrul programului experimental. Această etapă a cercetării este esențială pentru validarea ipotezelor privind viabilitatea utilizării betonului ecologic în infrastructura rutieră, prin raportare la parametri tehnici standardizați și la cerințele de performanță specifice lucrărilor de drumuri.

În prima parte a capitolului sunt prezentate metodele de testare a caracteristicilor fizico-mecanice ale betonului, menite să ofere o imagine clară asupra capacității materialului de a rezista la solicitările mecanice tipice infrastructurilor rutiere. Aceste metode includ:

- **Determinarea densității betonului întărit** – Această proprietate influențează direct rezistența și comportamentul la solicitări dinamice. Se determină masa volumică a probelor în conformitate cu standardele în vigoare, evaluând gradul de compactare și calitatea execuției.
- **Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere** – Această încercare evidențiază capacitatea betonului de a rezista la forțele de tracțiune care apar în stratul superior al plăcii de beton sub acțiunea traficului. Se utilizează metode standardizate, cum ar fi testarea la trei puncte, pe epruvete prismatice.
- **Determinarea rezistenței la compresiune** – Reprezintă una dintre cele mai importante caracteristici mecanice ale betonului. Testele se realizează pe cuburi sau cilindri conform normelor europene, oferind date relevante privind clasa de rezistență a materialului.
- **Determinarea rezistenței la întindere prin despicare** – Acest test oferă informații suplimentare despre comportamentul la fisurare și coeziunea internă a materialului, parametri critici în contextul expunerii la cicluri de solicitări repetate.

A doua parte a capitolului este concentrată pe evaluarea caracteristicilor de durabilitate ale betonului rutier ecologic. Aceste teste sunt indispensabile pentru înțelegerea comportamentului



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



materialului în condiții de exploatare reale, mai ales în contextul variabilității climatice și al expunerii la factori agresivi de mediu. Metodele incluse sunt:

- **Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet** – Se analizează capacitatea betonului de a rezista ciclurilor repetate de îngheț și dezghet, cu sau fără prezența sărurilor de degivrare, simulând condițiile severe de iarnă. Rezultatele obținute oferă o estimare clară a duratei de viață a materialului în medii climatice aspre.
- **Determinarea caracteristicilor de permeabilitate** – Această proprietate reflectă gradul în care betonul permite pătrunderea apei sau a altor substanțe agresive (cloruri, sulfati etc.), având un impact direct asupra riscului de coroziune a armăturii și a degradării premature. Se utilizează metode precum testul la penetrare de apă sub presiune sau testul la absorbție capilară.

Prin coroborarea datelor obținute din aceste încercări, se urmărește validarea comportamentului betonului ecologic în termeni comparabili sau superiori față de betoanele convenționale, oferind astfel o bază solidă pentru adoptarea acestor materiale în construcțiile rutiere moderne.

Capitolul 6 include o analiză ecologică detaliată a impactului utilizării betonului ecologic în infrastructura rutieră. Studiul are ca scop evaluarea potențialului acestor materiale de a reduce emisiile de carbon, de a valorifica deșeurile industriale și de a conserva resursele naturale. Rezultatele obținute oferă o imagine de ansamblu asupra contribuției betonului ecologic la atingerea obiectivelor climatice și de sustenabilitate.

Capitolul 7 prezintă concluziile generale ale cercetării și subliniază contribuțiile științifice și aplicative proprii rezultate din această lucrare. Sunt formulate recomandări privind utilizarea betoanelor ecologice în infrastructura rutieră, pe baza datelor experimentale și a analizei critice realizate pe parcursul tezei.

Tema cercetării va fi abordată într-un mod riguros, fundamentat științific și ancorat în realitățile actuale ale domeniului construcțiilor rutiere, cu accent pe sustenabilitate și inovație tehnologică. Investigația se va baza pe cele mai recente rezultate din literatura de specialitate, reflectând tendințele moderne și direcțiile de dezvoltare promovate la nivel internațional în ceea ce privește utilizarea materialelor ecologice în infrastructura de transport.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Un accent deosebit va fi pus pe analiza utilizării materialelor alternative, precum cenușa de termocentrală și silica ultrafină, în calitate de substituenți parțiali ai cimentului în compozițiile de beton rutier. Aceste materiale secundare, provenite în principal din procese industriale, prezintă avantaje considerabile din punct de vedere ecologic, contribuind la diminuarea amprente de carbon, reducerea consumului de resurse naturale primare și valorificarea eficientă a deșeurilor. Astfel, integrarea lor în structura betonului rutier ecologic poate constitui o soluție viabilă atât pentru protejarea mediului înconjurător, cât și pentru îmbunătățirea performanțelor tehnologice ale materialelor obținute.

În cadrul cercetării, se va analiza impactul acestor materiale asupra proprietăților fizico-mecanice ale betonului rutier. Un obiectiv important va fi acela de a identifica măsura în care substituirea parțială a cimentului influențează parametri esențiali precum densitatea, rezistența la compresiune, rezistența la întindere prin încovoiere sau rezistența la îngheț-dezghet. Se va examina, de asemenea, posibilitatea obținerii unor betoane mai ușoare, cu textură îmbunătățită, care să permită o reducere a greutății structurale a elementelor din beton utilizate în infrastructura rutieră, fără a compromite performanțele tehnice și durabilitatea.

Prin caracterul aplicativ și inovativ al demersului propus, lucrarea își propune să aducă contribuții relevante la dezvoltarea unei noi generații de betoane ecologice, adaptate cerințelor actuale ale industriei construcțiilor. Obiectivul este ca această cercetare să constituie nu doar o bază solidă de analiză științifică, ci și un punct de plecare pentru investigații viitoare, orientate către extinderea utilizării materialelor sustenabile în infrastructura rutieră.

În esență, studiul urmărește să răspundă nevoilor tot mai stringente ale unei societăți aflate într-un proces accelerat de transformare, în care sustenabilitatea și reziliența devin repere esențiale în proiectarea și execuția infrastructurilor moderne de transport.



CAPITOLUL 2. – BETONUL RUTIER ECOLOGIC

2.5 Compoziția betonului ecologic

Betonul ecologic se produce înlocuind cimentul tradițional cu produse auxiliare obținute din deșeuri industriale precum cenușa de furnal, zgura, cenușa de termocentrală, silicea ultrafină și/sau praful de cuarț. Această metodă de înclocuire a unor aditivi poluanți cu produse reciclabile reduce semnificativ volumul emisiilor de gaze cu efect de seră și poate îmbunătăți proprietățile fizico-mecanice ale betonului (Maraveas, 2020); Shupta și colab 2022).

O altă metodă de obținere a betonului ecologic implică substituirea agregatelor convenționale cu materiale vegetale sau reciclate, cum ar fi lemnul, zidăria, betonul vechi, plasticul sau sticla (Singh, și colab., 2023). Ca și în cazul deșeurilor industriale, utilizarea acestor agregate reciclate contribuie într-un mod decisiv la conservarea resurselor naturale și reduce cantitatea de deșeuri care ajung în depozitele de gunoi. Se elimină astfel totodată unele procese tehnologice necesare extracției și prelucrării agregatelor naturale, iar deșeurile agricole, care se descompun biologic, pot fi incinerate și transformate într-o pulbere fină utilizabilă în construcții.

Pornind de la aceste elemente de referință pentru betonul rutier ecologic, în cadrul acestui capitol se vor supune atenției caracteristicile specifice betonului rutier ecologic și materialele care pot intra în compoziția acestuia. Astfel vor abordate succesiv particularitățile componentelor esențiale, respectiv cimentul, în particular tipul CEM II/A-S 52,5 R produs de HOLCIM România S.A în fabrica de la Câmpulung Muscel apa, care facilitează omogenizarea amestecului, agregatele și adaosurile (în speță silicea ultrafină și cenușa de termocentrală). Cu referire la aditivi, o atenție sporită va fi acordată aditivului Master Rheobuild 572 și antrenorului de aer Master Air 9060, precum și deșeurilor care pot fi incorporate în compoziția produsului finit pentru obținerea unui ciment ecologic pretabil pentru utilizarea în construcțiile rutiere.

Studiile recente efectuate asupra betoanelor rutiere convenționale au examinat integrarea diferitelor adaosuri, în funcție de scopul vizat al produsului finit (Maghfouri și colab., 2021; Singh



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



și colab., 2023). Astfel s-a observat faptul că, atunci când scopul este ecologic și implică utilizarea deșeurilor ca adaosuri, betonul rutier rezultat este adecvat pentru aplicații mai limitate, datorită caracteristicilor sale fizico-mecanice specifice. Pe de altă parte, când scopul de utilizare vizează îmbunătățirea proprietăților betonului rutier prin adăugarea anumitor adaosuri, rezultatul poate fi concretizat în obținerea unor betoane cu o gamă mai largă de aplicații. Un lucru este cert și anume că, adăugarea adaosurilor la betonul rutier nu doar că răspunde cerințelor economice și ecologice, ci și îmbunătățește proprietățile materialelor.

În secțiunile anterioare am observat că, în contextul economic și social actual caracterizat de evoluții rapide în tehnologie și industrie, s-a înregistrat o creștere semnificativă a cantității și diversității deșeurilor industriale utilizate în prepararea betonului. Astfel, în prezent, în compoziția betonului ecologic se regăsesc componente precum zgura, cenușa, praful de ciment, praful de cărămidă, nămolul, sticla, anvelopele și multe alte materiale care în lipsa unei astfel de utilizări ar fi constituit deșeuri nocive pentru mediul înconjurător.

În cadrul subsecțiunilor următoare vom acorda o atenție sporită elementelor componente care stau la baza obținerii betonului ecologic în scopul îmbunătățirii calității betonului, având drept scop utilizarea în diverse aplicații/construcții rutiere.

2.5.6. Deșeuri

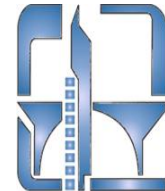
În contextul dezvoltării durabile și al creșterii preocupărilor ecologice, studiul betoanelor rutiere a inclus evaluarea utilizării diverselor adaosuri reciclate pentru a îmbunătăți caracteristicile acestora (Li și colab., 2021)

Prin incorporarea deșeurilor industriale, cum ar fi zgura, cenușa zburătoare, praful de ciment, cărămida, nămolul, sticla și anvelopele uzate, s-au explorat modalități de a reduce impactul ecologic al construcțiilor rutiere (Jahanbakhsh și colab., 2020).

Potrivit studiilor de specialitate, aceste adaosuri nu numai că oferă o utilizare valoroasă a deșeurilor, ci și îmbunătățesc proprietățile fizico-mecanice ale betonului, extinzând astfel domeniul său de aplicare. În plus, utilizarea acestor materiale reciclate contribuie la optimizarea resurselor și la reducerea costurilor, însoțind cerințele economice cu cele ecologice (Gulzar și colab., 2023).



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Utilizarea deșeurilor în obținerea betoanelor ecologice poate fi abordată prin reciclarea materialelor reziduale din diverse industrii, precum zgura de oțel, cenușa zburătoare, și resturile de sticlă, ca substituenți parțiali ai cimentului sau agregatelor în amestecurile de beton. Această practică reduce consumul de resurse naturale și minimizează cantitatea de deșeuri depozitate în gropile de gunoi.

Integrarea deșeurilor în producția de beton contribuie la reducerea emisiilor de CO₂, oferind în același timp o soluție sustenabilă și cost-eficientă pentru construcții. Această abordare necesită o analiză atentă a compatibilității chimice și fizice a deșeurilor cu materialele tradiționale, asigurând că proprietățile betonului final îndeplinesc standardele necesare pentru aplicarea dorită.

Ca parte a prezentului studiu privind obținerea betoanelor rutiere ecologice, s-a evaluat utilizarea deșeurilor reciclabile ca substituenți parțiali ai cimentului, în proporții cuprinse între 10% și 30%. Aceste deșeuri au fost incorporate în diverse amestecuri de beton. Materia primă folosită în aceste compoziții provine de la producători locali sau distribuitori autorizați de materiale de construcții. S-a optat pentru o abordare integrată care a inclus și utilizarea unor materiale convenționale prezentate anterior (agregate, ciment, pietriș, balast și nisip) pentru prepararea rețetelor de beton rutier ecologic.

Ca o concluzie la elementele prezentate se poate reține faptul că utilizarea deșeurilor în obținerea betonului ecologic poate reprezenta o strategie inovatoare și eficientă care contribuie la reducerea impactului asupra mediului. După cum am observat prin fundamentarea pe studiile de specialitate în domeniu, prin substituirea parțială a materialelor convenționale cu deșeuri reciclabile, se diminuează consumul de resurse naturale finite și se minimizează depozitarea deșeurilor, transformând pasivul ecologic într-un activ de construcție.

Am observat deci că folosirea betonului rutier ecologic sprijină economia circulară, crește durabilitatea structurilor și reduce costurile materialelor. Astfel, betonul ecologic devine nu doar o soluție sustenabilă, ci și o necesitate în contextul actual al schimbărilor climatice și al presiunilor asupra resurselor naturale.



CAPITOLUL 3. – PROGRAMUL EXPERIMENTAL

Structurile rutiere sunt supuse în mod constant unui cumul de factori care le influențează negativ durabilitatea și performanța funcțională. Traficul intens – în special cel greu – în combinație cu variațiile climatice (îngheț-dezghet, precipitații abundente, temperaturi extreme) și cu particularitățile hidrogeologice ale terenului de fundare generează solicitări repetate și neuniforme asupra pavajului. Aceste solicitări, amplificate de lipsa unor lucrări de întreținere adecvate, conduc în timp la pierderea capacității portante a structurii rutiere. Astfel, infrastructura rutieră ajunge într-o stare avansată de uzură, punând în pericol siguranța circulației și generând costuri ridicate pentru reparații ulterioare.

Pentru a preveni atingerea unui nivel critic de degradare, se impune adoptarea unui program riguros de monitorizare, întreținere periodică și, acolo unde este cazul, reabilitare structurală. Scopul acestor intervenții este menținerea sau chiar îmbunătățirea capacității portante și funcționale a drumurilor, astfel încât acestea să poată prelua în condiții de siguranță traficul actual, dar și pe cel prognozat în viitorul apropiat.

În acest context, utilizarea materialelor durabile și sustenabile devine o necesitate. Betoanele moderne, utilizate pentru structuri rutiere rigide, pot fi produse cu agregate locale, ceea ce contribuie atât la reducerea costurilor de transport, cât și la scăderea amprente de carbon. În plus, integrarea materialelor reciclate sau ecologice în compoziția betonului permite reducerea consumului energetic total față de soluțiile bituminoase tradiționale. Studiile de specialitate demonstrează că aceste tipuri de betoane pot atinge performanțe mecanice superioare și o rezistență sporită la acțiunea factorilor de mediu.

Implementarea structurilor rutiere rigide din beton, realizate cu agregate naturale provenite din surse locale, reprezintă o soluție tehnico-economică eficientă, mai ales în cazul drumurilor industriale sau celor cu un trafic greu susținut. Aceste structuri asigură o durabilitate crescută,



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



necesită intervenții minime de întreținere pe durata ciclului de viață și oferă o alternativă sustenabilă față de infrastructurile tradiționale asfaltice.

Prin urmare, în condițiile actuale ale schimbărilor climatice, presiunii traficului rutier și nevoii de optimizare a costurilor, soluțiile de infrastructură rutieră trebuie regândite în direcția sustenabilității, rezilienței și eficienței pe termen lung..

3.1 Materii prime ce au fost folosite în compoziția betonului rutier

O parte din betoanele rutiere uzuale au fost studiate prin prisma încorporării în compoziție a diverselor adaosuri, funcție de scopul dorit. Astfel, dacă se urmărește să se consume în scopuri ecologice o serie de adaosuri, în special deșeuri, betonul rutier care rezultă se poate utiliza într-un domeniu mai restrâns, funcție de caracteristicile fizico-mecanice rezultate.

Dacă însă se urmărește îmbunătățirea proprietăților betonului rutier prin folosirea anumitor tipuri de adaosuri, atunci se pot obține betoane cu o arie de utilizare extinsă. Utilizarea adaosurilor în betonul rutier s-a dezvoltat nu numai din cerințe economice și ecologice, ci și datorită faptului că acestea pot îmbunătăți proprietățile betonului.

În zilele noastre, datorită stilului de viață modern, progresele înregistrate în industrie și tehnologie au condus la o creștere importantă a cantității și a tipurilor de deșeuri. Aceste deșeuri industriale sunt:

- zgură,
- cenușă zburătoare,
- praf de ciment,
- praf de cărămidă,
- nămol,
- sticlă,
- anvelope etc.

În cadrul tezei de doctorat se vor analiza amestecuri și caracteristici ale betonului rutier ecologic cu deșeuri reciclabile [3].

Deșeurile reciclabile folosite vor înlocui cimentul în proporție de 10 - 30 % [22].

În compozițiile ce vor fi studiate, constituenții utilizați sunt procurați de la producători locali sau distribuitori autorizați de materiale pentru construcții.



3.2 Încercări mecanice

În contextul abordării temei referitoare la betoanele ecologice utilizate în tehnica rutieră din perspectiva dezvoltării sustenabile, efectuarea încercărilor mecanice pentru testarea caracteristicilor fizico-mecanice ale betonului rutier ecologic poate fi considerată o etapă esențială pentru asigurarea durabilității și eficienței acestuia în infrastructura modernă. Metodele de testare utilizate au un caracter divers și sunt concepute pentru a evalua modul în care deșeurile reciclate, utilizate ca substituenți ai materialelor tradiționale, influențează proprietățile betonului.

Încercările mecanice ale betonului întărit se realizează cu ajutorul unei prese de testat compresiune, reprezentată imagistic în Figura 3.1. Principiul general al metodei constă în determinarea forței prin aplicarea unei forțe uniforme pe epruvete cubice sau pe fragmente de prisme în scopul determinării rezistenței betonului întărit.

Întrucât încercările mecanice includ mai multe tipuri de teste și determinări, capitolul de față va supune atenției principalele metode de testare a caracteristicilor fizico – mecanice ale betonului rutier ecologic.

Pentru aceasta se va proceda succesiv la determinarea densității, a rezistenței la întindere prin încovoiere, a rezistenței la compresiune și a rezistenței la întindere prin despicare.

3.2.1. Determinarea densității

Din secțiunile anterioare am reținut că betonul ecologic se diferențiază de betonul clasic prin utilizarea deșeurilor reciclate ca substituenți parțiali ai materialelor convenționale. În categoria deșeurilor reciclate se regăsesc ca substituenți zgura, cenușa zburătoare, și alte materiale industriale reziduale. Aceste adaosuri pot influența caracteristicile fizice și mecanice ale betonului, inclusiv densitatea sa.

În general, un beton mai dens produce o rezistență mai mare la compresiune și un volum mai mic de goluri. Majoritatea testelor de densitate din studiile de specialitate investigează densitatea betonului sub spectrul efectului produs de raportul nisip-ciment, al raportului apă-ciment și al raportului de diluție asupra prelucrabilității, densității și rezistenței la compresiune.

Densitatea este deci indicatorul direct al masivității și compactității betonului. Definiția densității este dată de masa unității de volum, de obicei exprimată în kilograme pe metru cub



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



(kg/m³). În contextul betonului rutier ecologic, determinarea densității ajută la identificarea gradului de porozitate și a calității compactării, fiind un factor decisiv în determinarea durabilității și rezistenței materialului. Metodele de testare a densității betonului ecologic includ o serie de proceduri standard, adaptate special pentru a evalua specificitățile unice ale betonului care include materiale reciclate.

Din metodele enumerate putem deduce că testarea propriu-zisă a densității betonului ecologic implică fie măsurarea densității prin înlocuirea unui volum prestabilit de apă, fie prin calcularea volumului betonului pe baza nivelului de deplasare a apei ori prin determinarea gravimetrică a densității pe baza Legii lui Arhimede.

Este importantă această etapă deoarece includerea materialelor reciclate în betonul rutier poate genera variații în densitatea materialului final. Potrivit cercetărilor în domeniu, materialele mai ușoare comparativ cu agregatele tradiționale, precum cenușa zburătoare sau zgura pot reduce densitatea betonului. Pe de altă parte, materialele mai grele, cum ar fi anumite tipuri de zgură care au la bază materiale feroase pot crește densitatea betonului. Toate aceste variații trebuie monitorizate atent pentru a asigura că betonul îndeplinește specificațiile tehnice necesare pentru aplicarea în proiecte de infrastructură.

Densitatea redusă a betonului ecologic nu doar că reduce greutatea structurii, dar poate contribui și la îmbunătățirea proprietăților de izolare termică și acustică ale betonului. În plus, betonul cu o densitate optimizată poate oferi avantaje în termeni de manevrabilitate și costuri de transport. Testarea densității este deci esențială în faza de control al calității atunci când se aduce în discuție producția de beton ecologic.

Rezultatele obținute oferă informații extrem de importante pentru ajustarea compoziției mixturii de beton, asigurându-se astfel că toate materialele reciclate sunt utilizate eficient, fără a compromite integritatea structurală a betonului.

3.2.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

Rezistența la întindere a betonului este definită ca fiind capacitatea materialului de a rezista la forțele care tind să-l întindă sau să-l despartă. Aceasta este o caracteristică importantă a betonului, deoarece betonul este un material puternic în compresiune dar relativ slab în tensiune.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Rezistența la întindere este evaluată cu scopul de a determina comportamentul betonului sub sarcini de tracțiune, care pot cauza fisurarea materialului. Această proprietate este considerată de o importanță deosebită în proiectarea elementelor structurale care sunt susceptibile la încărcări de încovoiere sau de tracțiune.

Rezistența la întindere a betonului este reglementată prin diverse standarde internaționale. Unul dintre cele mai relevante standarde în acest sens este Standardul EN 14651:2005 în care se specifică metodele de măsurare a rezistenței la tracțiune prin încovoiere pentru betonul armat cu fibre metalice, concentrându-se pe caracteristicile mecanice ale betonului în condiții controlate de testare. Tabelul 3.1 prezintă rezistența la întindere a betonului în funcție de principalele clase.

În pofida avansării tehnologiei, trebuie însă menționat că nici astăzi testele utilizate pentru a determina rezistența la întindere a betonului nu reușesc să simuleze perfect condițiile de tensiune uniformă ale unui element întins centric. Astfel rezultatele se exprimă în valori diferite de la rezistența reală la întinderea pură. Această variație subliniază de altfel limitările metodologiilor actuale de testare în replicarea stării naturale de tensiune a betonului în utilizările practice.

Testările pentru determinarea rezistenței la tracțiune prin încovoiere contribuie la optimizarea designului și a materialelor folosite în construcții, permițând inginerilor să proiecteze structuri mai durabile și eficiente din punct de vedere al costurilor. Prin astfel de măsuri de testare, industria construcțiilor beneficiază de o înțelegere mai profundă și de o implementare eficientă a tehnologiilor moderne, crescând astfel siguranța și durabilitatea infrastructurilor moderne.

3.2.3. Determinarea rezistenței la compresiune

Determinarea rezistenței la compresiune a betonului este procesul tehnic prin care se măsoară capacitatea betonului de a rezista la forțele de compresiune. Aceasta se realizează prin aplicarea unei forțe de compresiune pe epruvete standardizate de beton, până când materialul cedează sau se fracturează. Rezultatele acestui test sunt cruciale pentru evaluarea calității betonului și pentru confirmarea conformității acestuia cu specificațiile de proiect și standardele de construcție.

Testarea rezistenței la compresiune a betonului este reglementată prin Standardul ASTM C39/C39M. Acesta descrie metodele specifice pentru testarea epruvetelor cilindrice de beton, subliniind cum trebuie aplicate încărcările compresive până la punctul de cedare al materialului.



Standardul specifică procedurile de pregătire a probelor, condițiile de testare și metodele de calcul necesare pentru a asigura rezultate consistente și precise, fiind larg recunoscut și utilizat în industria construcțiilor pentru evaluarea calității și performanței materialelor de beton.

În contextul sustenabilității și al dezideratului de obținere a betonului ecologic, determinarea rezistenței la compresiune contribuie la înțelegerea profundă a proprietăților mecanice ale betonului. De asemenea, aceste încercări și teste mecanice ajută la dezvoltarea unor mixturi mai eficiente și ecologice, capabile să reducă impactul nociv asupra mediului prin utilizarea optimizată a resurselor și prin reducerea deșeurilor.

3.3 Metode de testare a caracteristicilor de durabilitate a betonului rutier ecologic

Capitolele anterioare au subliniat faptul că, în contextul dezvoltării sustenabile și al necesității reducerii impactului negativ asupra mediului, industria construcțiilor a început să acorde o atenție sporită utilizării materialelor ecologice. Astfel am observat că, un domeniu de interes major în acest sens este betonul rutier ecologic. Acesta este un material ce își propune să ofere durabilitate și performanță ridicată, concomitent cu reducerea emisiilor de dioxid de carbon și a consumului de resurse naturale.

Întrucât obținerea betonului rutier ecologic implică utilizarea de materiale reciclate, aditivi inovatori și procese de producție optimizate din punct de vedere energetic, aceste materiale aduc modificări nu doar asupra performanțelor ecologice ale materialului, dar pot influența și caracteristicile sale mecanice și de durabilitate. Prin urmare, intervine nevoia de testare și evaluare riguroasă a caracteristicilor betonului obținut, tocmai pentru a se asigura un nivel optim de performanță a infrastructurii rutiere.

Pe parcursul acestui capitol, vom evidenția importanța adoptării unor metode de testare riguroase și eficiente, care să reflecte fidel comportamentul betonului ecologic în condiții reale de exploatare. Scopul final al acestui capitol este de a furniza informații concrete și practice, în vederea îmbunătățirii continue a materialelor utilizate și a promovării unor practici mai sustenabile în construcții.



3.4 Evaluarea ciclului de viață

3.4.2 Obiectiv și caracteristici

Metodologia ECV se caracterizează prin:

- Cuprinderea întregului ciclu de viață al produsului (de la extracția resurselor până la eliminarea deșeurilor);
- Abordarea cantitativă, bazată pe inventarierea fluxurilor de materiale și energie;
- Standardizare internațională, conform SR EN ISO 14040:2007 Management de mediu. Evaluarea ciclului de viață. Principii și cadru și SR EN ISO 14044:2007 Management de mediu. Evaluarea ciclului de viață. Cerințe și linii directoare;
- Transparență și reproductibilitate în definirea ipotezelor și a limitelor sistemului;
- Utilizarea categoriilor de impact (ex. schimbări climatice, epuizarea resurselor, toxicitate etc.) pentru evaluare complexă.

Prin aceste caracteristici, metodologia ECV asigură o evaluare riguroasă și cuprinzătoare a performanței de mediu, permițând identificarea etapelor critice din ciclul de viață al unui produs. Această abordare sistematică și standardizată facilitează comparabilitatea între produse și procese, sprijinind luarea unor decizii informate și obiective. În plus, integrarea categoriilor de impact permite o înțelegere mai profundă a implicațiilor ecologice, economice și sociale, contribuind astfel la dezvoltarea unor soluții mai durabile și responsabile.

ECV este aplicabil într-o gamă largă de domenii industriale și de cercetare, inclusiv

- Industria construcțiilor și a materialelor de construcție – pentru evaluarea impactului betonului, cimentului, oțelului, lemnului etc.
- Industria alimentară – pentru analiza lanțurilor de aprovizionare și ambalajelor.
- Transport și energie – pentru comparații între surse de energie (e.g. energie regenerabilă vs. fosilă).
- Politici publice și etichetare ecologică – etichete precum Ecolabel sau Declarații de Mediu pentru Produse (EPD).

Ca instrument științific și analitic, pentru a fundamenta decizii informate și sustenabile, evaluarea ciclului de viață poate fi utilizată în următoarele scopuri



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



- pentru a compara impactul de mediu al unui produs cu un produs de referință sau cu un standard;
- pentru îmbunătățirea, proiectarea sau compararea produselor și serviciilor (de exemplu în implementarea programelor de eco-etichetare);
- ca instrument suport în adoptarea strategiilor de dezvoltare;
- pentru a conștientiza companiile în privința efectelor pe care le produc asupra mediului (prin serviciile sau produsele lor) și pentru a le indica acțiunile ce trebuie să le întreprindă în scopul diminuării sau eliminării efectelor negative pe care le produc asupra mediului;
- de către autorități, în vederea adoptării politicilor din domeniul managementului deșeurilor, politicii energetice, etc;
- în stabilirea măsurilor ce trebuie adoptate în privința protecției mediului, alături de alte instrumente ale managementului de mediu precum analiza fluxurilor materiale, evaluarea impactului asupra mediului, evaluarea riscului de mediu, auditul de mediu;
- în sprijinul eco-designului, eco-etichetării, sistemelor de management de mediu;
- pentru a evita migrarea problemelor de mediu de la o regiune la alta, de la o etapă a ciclului de viață la alta.

În industria construcțiilor, utilizarea ECV oferă o perspectivă detaliată asupra impactului de mediu asociat fiecărei etape din ciclul de viață al materialelor de construcție, de la extracția resurselor naturale până la demolare și gestionarea deșeurilor. Această abordare permite identificarea materialelor cu impact redus asupra mediului și optimizarea proceselor de producție pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, a consumului de energie și a generării de deșeuri.



CAPITOLUL 4 – STANDARDE ȘI GHIDURI

În contextul actual al schimbărilor climatice și al presiunilor tot mai mari pentru protejarea mediului înconjurător, standardele și ghidurile aplicabile betonului ecologic în infrastructura rutieră joacă un rol esențial. Organizații precum Concrete Sustainability Council dezvoltă sisteme de certificare care evaluează lanțul de producție și impactul social și de mediu al betonului. În Europa, conformarea cu Regulamentul CPR și standardele CEN/TC 154 garantează că agregatele reciclate respectă performanțele necesare pentru construcții rutiere

Un prim aspect reglementat îl reprezintă utilizarea materialelor reciclate în compoziția betonului. Agregatele rezultate din demolări sunt din ce în ce mai acceptate la nivel internațional: articole precum “Current Insight on Eco-Friendly Concrete: A Review” detaliază procesele de sortare și valorificare a deșeurilor de construcții, în special agregatele reciclate (RCA), subliniind avantajele și limitările tehnice ale acestora. De asemenea, inițiative ca **ISO/DIS 18985:2024 - Recycled aggregates for concrete** propun standardizare globală pentru calitatea și aplicarea agregatelor reciclate

Un alt element central al ghidurilor constă în reducerea emisiilor de carbon generate în fazele de producție și punere în operă. Studiile asupra ”Green Concrete for a Circular Economy” evidențiază înlocuirea unei părți din ciment cu substanțe auxiliare (zgura de furnal, cenusă zburătoare, fumul de silice, metacaolin), reducând emisiile CO₂ cu până la 22-60 % în diverse rețete de beton.

În plus, standardele europene *SR EN 197-1:2011 - Ciment Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale* stabilesc specificații pentru cimenturi cu profil redus de carbon. Pe lângă compoziția materialului, standardele vizează și tehnicile de construcție durabile. Ghiduri precum *ISO/DTS 21056 - Recycled aggregate concrete — Additional provisions and guidance for specification, performance, production and execution* (în curs de



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



finalizare) introduc cerințe suplimentare privind calitatea producției și execuției betonului cu agregate reciclate, asigurând controlul infrastructural pe șantier .

Performanța și durabilitatea betonului ecologic rămân criterii fundamentale. Articole precum “Structural Concrete from 100% Recycled Aggregates” arată că betonul cu 100 % agregate reciclate poate atinge rezistențe satisfăcătoare, însă are provocări legate de permeabilitate, prindere și durabilitate la cicluri îngheț-dezghet – aceste aspecte fiind reglementate prin standarde ca *EN 933-1:2012; Tests for Geometrical Properties of Aggregates: Part 1. Determination of Particle Size Distribution. Sieving Method.*

De asemenea, proiectele de beton ecologic sunt supuse evaluărilor de impact asupra mediului și pot primi certificări recunoscute, precum *ISO 14001:2015 - Sistem Managementul Calității* sau certificările emise de Concrete Sustainability Council. Evaluările ciclului de viață compară betonul tradițional cu cel ecologic, demonstrând reduceri de 30-35 % ale impactului asupra mediului cum ar fi în studiile publicate în literatura de specialitate.

Ghidurile moderne stimulează inovația tehnologică, încurajând cercetarea și dezvoltarea unor soluții noi care să îmbunătățească atât performanța tehnică, cât și impactul ecologic al betonului. De la lianți alternativi până la procese digitale de monitorizare a emisiilor în timpul execuției, industria se află într-o continuă evoluție. Standardele se adaptează constant pentru a integra aceste progrese și pentru a susține un cadru coerent de aplicare.



CAPITOLUL 5 – CARACTERIZAREA BETONULUI ECOLOGIC RUTIER

Abordarea temei referitoare la betonul rutier ecologic nu implică doar o simplă incursiune în evoluția materialelor de construcție, ci și o reflecție asupra necesității de a răspunde provocărilor de mediu cu soluții inovatoare și sustenabile. Acest capitol își propune să exploreze metodele experimentale esențiale pentru dezvoltarea și evaluarea betonului rutier ecologic, subliniind importanța integrării principiilor de sustenabilitate în designul și testarea materialelor de construcție. Acest demers este crucial, în contextul în care industria construcțiilor caută să reducă emisiile de carbon și să îmbunătățească eficiența resurselor, răspunzând astfel nu doar cerințelor economice, dar și celor ecologice.

Prima componentă a acestui capitol, vizează descrierea etapei de proiectare a compoziției betonului rutier ecologic. Astel prima secțiune se va concentra pe strategiile de formulare a mixturilor de beton care au scopul de a respecta pe de o parte standardele tehnice pentru infrastructura rutieră, iar pe de altă parte urmăresc să minimizeze impactul asupra mediului. Acest subcapitol va aduce deci în discuție aspectele referitoare la selecția materialelor, inclusiv cimenturile cu emisii reduse de carbon și agregatele reciclate, pentru a observa modul în care aditivii ecologici pot optimiza performanțele mixturilor.

Următoarea secțiune, va aduce în discuție o serie de aspecte specifice referitoare la încercările mecanice pe betonul rutier ecologic. În această secțiune se vor detalia procedurile și metodologiile prin care se testează rezistența și flexibilitatea acestui tip de beton și se vor explora diversele încercări standardizate utilizate pentru a evalua capacitatea betonului de a suporta sarcini grele și de a rezista în condiții de trafic intens. Nu în ultimul rând, vor fi supuse atenției o serie de elemente esențiale în asigurarea durabilității și fiabilității drumurilor.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



În final, ultimul subcapitol va discuta despre încercările de durabilitate. Aici se va adânci discuția despre modul în care betonul rutier ecologic este testat pentru a rezista factorilor de degradare pe termen lung, cum ar fi ciclurile de îngheț-dezghet, atacul chimic și eroziunea. În acest sens, se vor examina inclusiv tehnicile și testele specifice pentru a măsura capacitatea betonului de a-și menține proprietățile în ciuda expunerii prelungite la condiții meteorologice severe și utilizare intensă.

Prin îmbinarea acestor trei componente (proiectarea compoziției betonului rutier ecologic, încercările mecanice pe betonul rutier ecologic și încercările de durabilitate) acest capitol va urmări să ofere o perspectivă cuprinzătoare asupra complexității și importanței dezvoltării betonului rutier ecologic, subliniind totodată rolul esențial al cercetării și inovației în promovarea practicilor de construcție durabile și responsabile. Această secțiune din teza de doctorat nu se dorește a fi doar o contribuție la literatura de specialitate, ci și un ghid practic pentru ingineri, proiectanți și decidenți în domeniul construcțiilor rutiere, oferind informații actuale, ancorate în literatura de specialitate.

5.1. Proiectarea compoziției betonului rutier ecologic

Pentru a realiza proiectarea compoziției betonului rutier ecologic, a fost necesară formularea variantelor de rețete care urmau să fie supuse testării, cu scopul de a identifica cele mai eficiente combinații de materiale. Compoziția a avut în vedere **agregatul de balastieră de 0-22,5 mm**, pe baza căruia s-au stabilit mai multe rețete, fiecare conținând diferite combinații și proporții de ciment, silice ultrafină și cenușă de termocentrală.

Pentru fiecare rețetă s-a realizat o probă martor în care s-a utilizat doar ciment și agregate de balastieră de dimensiuni 0-22,5 mm, fără adaosuri suplimentare. Proba martor a servit drept bază de comparație pentru celelalte variante.

În total s-au creat **9 grupe de rețete** în care s-au inclus aditivi ecologici. Pentru fiecare variantă, s-a adăugat silice ultrafină în proporții variate, respectiv 10%, 20% și 30%, componentă care a înlocuit o parte din ciment. Similar, s-au elaborat și rețetele cu adaos de cenușă de termocentrală în aceleași proporții. Aceste variante de rețete au fost concepute cu scopul de a evalua impactul fiecărui tip de aditiv asupra proprietăților betonului. Rețetele se prezintă astfel:



1 __ Rețete GRUPA 1 - (A) – BCR (330 Kg/mc)

- **BCRM (A0)** – proba martor, beton rutier cu agregate de **balastieră** 0 – 22,5 mm și conținut de ciment **330 kg/m³**
- **BCRS (A1)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și silice ultrafină în procentaj de 10% ca adaos înlocuitor de ciment
- **BCRS (A2)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și silice ultrafină în procentaj de 20% ca adaos înlocuitor de ciment
- **BCRS (A3)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și silice ultrafină în procentaj de 30% ca adaos înlocuitor de ciment
- **BCRC (A4)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și cenușă de termocentrală în procentaj de 10% ca adaos înlocuitor de ciment
- **BCRC (A5)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și cenușă de termocentrală în procentaj de 20% ca adaos înlocuitor de ciment
- **BCRC (A6)** – beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și cenușă de termocentrală în procentaj de 30% ca adaos înlocuitor de ciment

Prin etapa de proiectare a compoziției betonului rutier ecologic se realizează o optimizare riguroasă a materialului, având ca scop principal asigurarea unei durabilități ridicate și a unei performanțe superioare în condiții reale de exploatare. Această fază implică selectarea și dozarea atentă a materialelor componente, inclusiv a aditivilor ecologici, precum silicea ultrafină și cenușa de termocentrală, care contribuie nu doar la reducerea impactului asupra mediului, ci și la îmbunătățirea proprietăților fizico-chimice ale betonului.

Utilizarea silicei ultrafine și a cenușii de termocentrală, materiale cu caracteristici pozitive asupra rezistenței mecanice și a durabilității, ne permite să obținem un beton rutier ecologic ce poate face față cu succes traficului intens și diverselor solicitări climatice, precum variații de temperatură, umiditate sau agresivitate chimică. În acest sens, a fost acordată o atenție specială optimizării proporțiilor acestor aditivi, în vederea echilibrării parametrilor de rezistență, durabilitate și sustenabilitate.

Pentru validarea compozițiilor propuse, au fost realizate pentru fiecare dintre cele 9 grupe de rețete un set complet de epruvete sub formă de prismă și cub, care au fost supuse unor teste riguroase de caracterizare (Figura 5.1 și 5.2). Aceste încercări au inclus determinarea rezistenței la compresiune, a rezistenței la îngheț-dezgheț, precum și evaluarea permeabilității și a altor proprietăți relevante, pentru a verifica conformitatea și eficiența betonului obținut în condiții de utilizare reală.

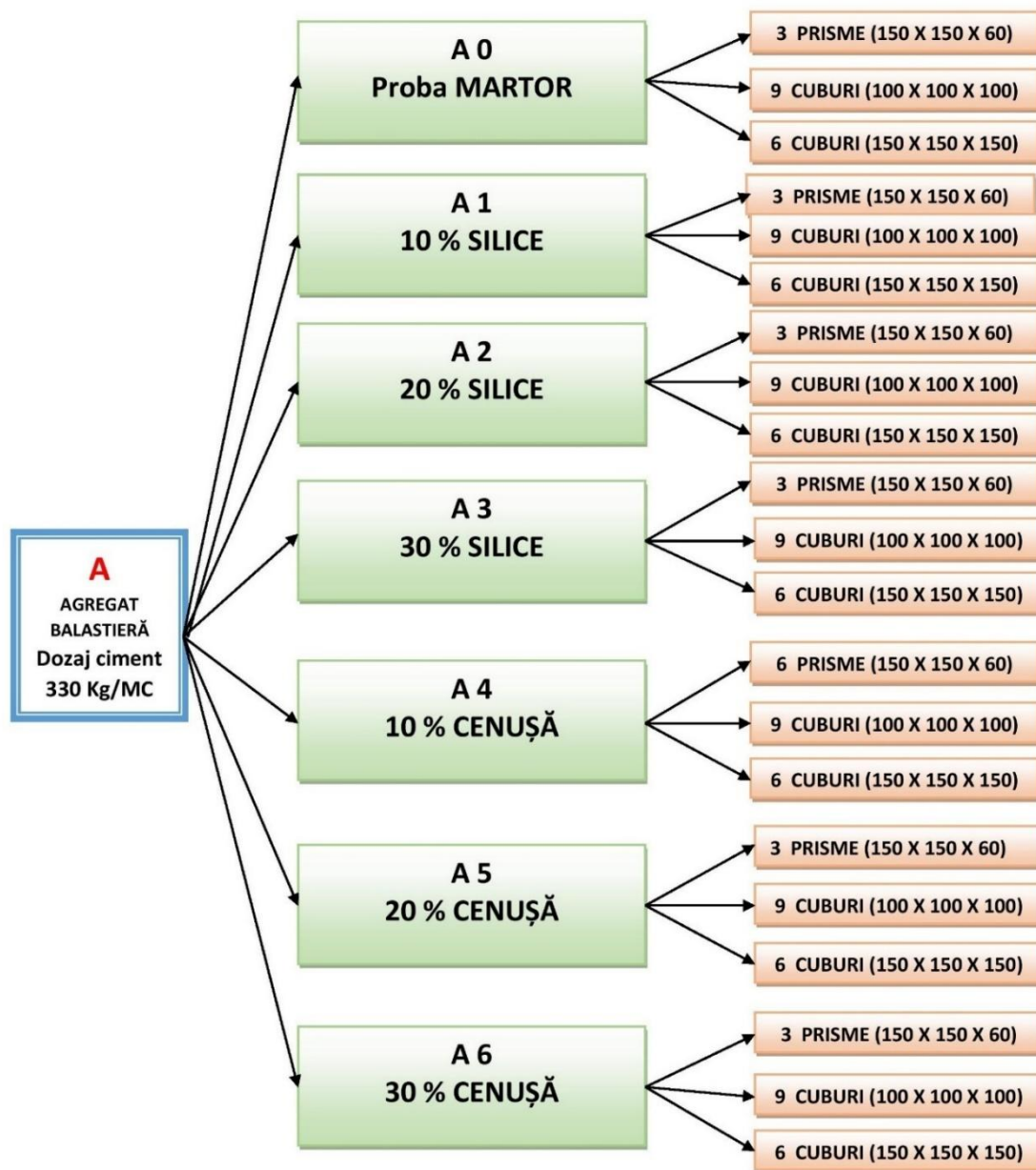


Figura 5.1 Tipuri de epruvete utilizate pentru caracterizarea mecanică și durabilitate.

După turnarea probelor, acestea au fost păstrate conform standardului SREN:12390-2, 2009, timp de 24 de ore la temperatura de 20 ± 2 °C. După 24 de ore au fost decofrate și au fost păstrate 3 zile în apă, apoi au fost păstrate la temperatura de 20 ± 2 °C până la încercare. Testele au fost efectuate la 28 zile și au fost testate câte 3 epruvete pentru fiecare amestec în parte, conform standardelor în vigoare.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Pe baza componentelor specificate — agregate de dimensiuni 0–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm și 16–22,5 mm, ciment, apă, aditivi, silice ultrafină și cenușă de termocentrală — au fost elaborate grupele de rețete de beton, exemplificate în tabelele următoare.

Tabelul 5.1 – Grupa 1 (A) – BCR (330 kg/mc) – beton rutier cu agregate de balastieră 0-22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/mc

Component	BCRM (A 0)	BCRS (A 1)	BCRS (A 2)	BCRS (A 3)	BCRC (A 4)	BCRC (A 5)	BCRC (A 6)
Agregat 0-4 mm [kg/m ³]	564	564	564	564	564	564	564
Agregat 4-8 mm [kg/m ³]	328	328	328	328	328	328	328
Agregat 8-16 mm [kg/m ³]	322	322	322	322	3222	322	322
Agregat 16-22,5 mm [kg/m ³]	326	326	326	326	326	326	326
Ciment ROMCIM CEM II 52,5 R [kg/m ³]	330	297	264	231	297	264	231
Apă [l/m ³] (Raport A/C = 0,4)	132	132	132	132	132	132	132
Aditiv Plastifiant Master Build Rheobuild 572 [l/m ³] În procentaj de 1,1 % din cantitatea cimentului	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
Antrenor Aer Master Build Air 9060 [l/m ³] În procentaj de 0,5% din cantitatea cimentului	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Silice ultrafină	—	În procentaj de 10% din cantitatea cimentului 33	În procentaj de 20% din cantitatea cimentului 66	În procentaj de 30% din cantitatea cimentului 99	—	—	—
Cenușă de termocentrală	—	—	—	—	În procentaj de 10% din cantitatea cimentului 33	În procentaj de 20% din cantitatea cimentului 66	În procentaj de 30% din cantitatea cimentului 99



5.2. Densitatea

După stabilirea rețetelor teoretice, s-au pregătit amestecurile corespunzătoare în laborator, respectând proporțiile specificate în rețetele prezentate anterior. Probele de beton obținute au fost turnate în forme și lăsate să se întărească pentru realizarea încercărilor mecanice

Valorile obținute pentru densitatea aparentă a probelor la 28 de zile de la turnare au fost înregistrate și comparate pentru fiecare din cele 6 probe, care reflectă cele 3 tipuri de rețete și anume: rețete cu conținut de ciment de 330 kg/m³, rețete cu conținut de ciment de 360 kg/m³, respectiv rețete cu conținut de ciment în proporție de 380 kg/m³. Rezultatele obținute au fost sintetizate în Tabelul 5.10.

S-au analizat astfel rețetele cu un conținut de ciment de 330 kg/m³, unde s-a observat influența aditivilor ecologici precum silica ultrafină și cenușa de termocentrală asupra densității aparente. Ulterior s-au evaluat rețetele cu un conținut de ciment de 360 kg/m³, care au fost evaluate pentru a identifica variabilitatea densității în funcție de aceleași aditivi ecologici. În al treilea rând, rețetele cu un conținut mai ridicat de ciment, de 380 kg/m³, au fost examinate pentru a înțelege modul în care influențează creșterea cantității de ciment densitatea aparentă și modul în care aditivii contribuie la modificarea acesteia.

Analiza densității aparente a contribuit la identificarea celor mai eficiente combinații de materiale din punct de vedere al densității, un indicator important al durabilității și performanței betonului rutier ecologic.

Tabel 5.10 - Valorile densității aparente după 28 zile

Nr. Crt.	Denumire rețetă	Determinarea densității aparente ρ_a [Kg/cm ³]
GRUPA 1 – (A) - BCR (330 Kg/mc) - beton rutier cu agregate concasate de carieră 0 – 22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/m³		
1.	BCRM(A0)	2237,72
2.	BCRS (A1)	2224,65
3.	BCRS (A2)	2213,80
4.	BCRS (A3)	2203,72
5.	BCRC (A4)	2227,15
6.	BCRC (A5)	2211,82
7.	BCRC (A6)	2198,81



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Din analiza datelor obținute se observă că densitatea aparentă scade odată cu creșterea procentajului de aditivi ecologici, atât pentru silica ultrafină cât și pentru cenușa de termocentrală. Probele martor prezintă cea mai mare densitate aparentă, indicând că substituirea cimentului cu aditivi reduce gradul de compactibilitate al materialului.

Observăm totodată că în cazul probelor cu conținut de ciment de 330 kg/m^3 scăderea densității nu este foarte abruptă, fapt ce arată că adaosurile nu compromit semnificativ integritatea structurală a betonului. În cazul rețetelor cu conținut de ciment de 360 kg/m^3 , valorile densității sunt în general mai mari decât cele ante-menționate, ceea ce era de așteptat datorită conținutului mai mare de ciment. Însă tendința de scădere a densității cu creșterea procentului de aditivi este similară, indicând și aici faptul că aditivii influențează nivelul de compactitate, dar betonul rămâne relativ dens și robust.

Pentru ultima categorie de probe, valorile densității aparente arată faptul că aditivii ecologici, deși reduc densitatea betonului, nu compromit semnificativ structura materialului. Rețetele cu conținuturi mai mari de ciment au în general densități mai mari, dar impactul aditivilor este consistent: reduc densitatea pe măsură ce procentajul lor crește. Aceasta indică o posibilă îmbunătățire a lucrabilității și reducerea porozității, aspecte esențiale pentru durabilitatea și performanța pe termen lung a betonului rutier ecologic. De altfel testele ulterioare de rezistență la compresiune și alte proprietăți mecanice vor oferi o imagine mai completă a performanței acestor compoziții.

5.3 Încercări mecanice

Dacă primul pas a constat în determinarea densității, cel de-al doilea pas a constat în realizarea propriu-zisă a încercărilor mecanice pe betonul rutier ecologic, prin evaluarea rezistențelor mecanice, respectiv a rezistenței la compresiune, a rezistenței la întindere prin încovoiere și a rezistenței la întindere prin despicare.

Rezistențele mecanice ale betonului au fost stabilite prin efectuarea unor încercări de scurtă durată, asigurându-se astfel că evaluarea performanțelor materialului este rapidă și eficientă. Pentru a obține un rezultat reprezentativ și fiabil, s-a considerat că valoarea finală a rezistenței betonului este media aritmetică a valorilor obținute din trei încercări separate.



Această abordare liniară ajută la minimizarea erorilor experimentale și la obținerea unor date consistente și precise, reflectând mai corect comportamentul real al betonului în condiții de utilizare practică.

Astfel, fiecare serie de probe a fost supusă acelorași condiții de testare, iar rezultatele au fost combinate pentru a furniza o măsură medie a rezistenței, care poate fi utilizată pentru a evalua performanța și durabilitatea betonului în construcțiile rutiere. Tabelul 5.11 prezintă încercările uzuale pentru beton luate ca element de referință pentru acest studiu. Acest proces a fost documentat vizual în Figura 5.12 și 5.13, care ilustrează modul de aplicare a forței asupra cuburilor de beton.

Tabel 5.11 – Încercări uzuale pentru beton

Tipul rezistenței	Forma probei	Tipul solicitării	Simbol
Rezistența la compresiune	Cub	Compresiune monoaxială	$f_c (R_c)$
Rezistența la întindere	Prismă	Încovoiere	$f_{ti} (R_{ti})$
	Fragment de prismă	Întindere prin despicare	$f_{td} (R_{td})$

5.2.1 Rezistența la compresiune

Rezistența la compresiune s-a determinat conform SR-EN:12390-3/2009 pe baza următoarei relații:

$$f_c (RC) = F_c / A$$

unde:

F_c – este forța maximă

A – este aria suprafeței perpendiculară pe direcția de încărcare

Pentru determinarea rezistenței betonului, cuburile au fost supuse încercărilor de compresiune cu ajutorul unei prese hidraulice. Această încercare s-a realizat aplicând forța perpendicular pe direcția de turnare a betonului, asigurându-se astfel o evaluare corectă a capacității materialului de a rezista la forțele de compresiune. Procedura a fost efectuată conform standardului SR-EN:12390-3/2009 care specifică metodologiile precise pentru testarea betonului.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



În cadrul acestei încercări, probele cubice au fost plasate în presa hidraulică, iar forța a fost aplicată treptat până la punctul de cedare al materialului, măsurându-se forța maximă suportată.

Pentru fiecare tip de încercare mecanică, s-au realizat trei probe, iar valoarea finală a rezistenței a fost considerată media aritmetică a celor trei rezultate. Această abordare statistică urmărește reducerea erorilor experimentale și creșterea acurateții datelor, oferind o reprezentare fidelă a comportamentului materialului. Toate epruvetele au fost testate în condiții identice, în mediu controlat, iar echipamentele utilizate au fost etalonate conform normelor în vigoare.

Valorile rezistențelor la compresiune a betoanelor rutiere ecologice studiate după perioada de maturare de 28 de zile sunt prezentate în tabelul 5. 12.

Tabel nr. 5.12 - Valorile rezistenței la compresiune după 28 zile

Nr. Crt.	Denumire rețetă	Proba examinată	(f _c) [N/mm ²]
Grupa 1 – (A) - BCR (330 Kg/mc) - beton rutier cu <i>agregate de balastieră</i> 0 – 22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/m³			
1.	BCRM (A0)	A 0.1	60,51
		A 0.2	52,52
		A 0.3	49,50
2.	BCRS (A1)	A 1.1	49,28
		A 1.2	43,86
		A 1.3	44,35
3.	BCRS (A2)	A 2.1	43,91
		A 2.2	43,58
		A 2.3	42,49
4.	BCRS (A3)	A 3.1	40,03
		A 3.2	40,44
		A 3.3	40,09
5.	BCRC (A4)	A 4.1	50,73
		A 4.2	49,89
		A 4.3	48,93
6.	BCRC (A5)	A 5.1	46,76
		A 5.2	45,34
		A 5.3	44,73
7.	BCRC (A6)	A 6.1	41,38
		A 6.2	40,39
		A 6.3	44,04



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Pe baza valorilor obținute pentru rezistențele mecanice la compresiune ale betonului rutier observăm faptul că pentru rețeta 1 (D) cu un conținut de ciment de 330 kg/mc, valorile medii ale rezistenței la compresiune arată o tendință de scădere pe măsură ce procentul de aditivi crește. Proba martor, fără aditivi, a avut o rezistență medie de 58,56 N/mm².

Pe de altă parte, adăugarea de 10%, 20% și 30% silice ultrafină a redus rezistența la 51,88 N/mm², 49,32 N/mm² și respectiv 46,55 N/mm². Similar, substituirea cimentului cu 10%, 20% și 30% cenușă de termocentrală a dus la valori medii ale rezistenței de 56,73 N/mm², 54,75 N/mm² și 50,22 N/mm². Aceste date indică faptul că, deși substituirea cu cenușă de termocentrală este mai avantajoasă decât cea cu silice ultrafină, ambele aditivi reduc rezistența mecanică pe măsură ce procentul lor crește.

În cazul rețetei 2 (E) cu un conținut de ciment de 360 kg/mc, se observă o rezistență medie la compresiune mai ridicată comparativ cu rețeta 1. Proba martor a înregistrat o rezistență medie de 60,32 N/mm². Adăugarea de silice ultrafină a avut un impact mai redus asupra rezistenței, valorile fiind de 53,48 N/mm², 50,89 N/mm² și 48,03 N/mm² pentru 10%, 20% și respectiv 30% silice. Rezistențele pentru adăugarea de cenușă de termocentrală au fost de 58,21 N/mm², 55,79 N/mm² și 52,08 N/mm².

Se poate observa deci o mai bună compatibilitate între betonul de 360 kg/mc ciment și aditivii ecologici, aceste probe menținând o rezistență ridicată în comparație cu cele aferente rețetei cu 330 kg/mc.

Pentru rețeta 3 (F), cu un conținut și mai mare de ciment, de 380 kg/mc, rezultatele indică o rezistență mecanică și mai bună. Proba martor a avut o rezistență medie de 65,48 N/mm². Substituirea cimentului cu silice ultrafină a dus la valori de 59,07 N/mm², 57,54 N/mm² și 50,11 N/mm² pentru 10%, 20% și 30% silice. Adăugarea de cenușă de termocentrală a menținut valori ridicate ale rezistenței: 61,41 N/mm², 58,32 N/mm² și 54,69 N/mm². Comparativ cu celelalte rețete, betonul cu 380 kg/mc ciment și aditivi a prezentat cele mai mici scăderi ale rezistenței, sugerând o rezistență structurală foarte bună chiar și cu aditivi.

Rezultatele obținute pe rețeta 4 (G) și rețeta 5 (H), ambele cu un conținut de 380 kg/mc ciment și diferiți aditivi, arată că substituirea cu zgură de oțelărie și silice ultrafină sau cenușă de termocentrală poate afecta diferit rezistența. Rezultatele pentru rețeta G indică o rezistență de 59,07



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



N/mm² pentru proba martor, iar pentru aditivi, valorile variază între 46,89 N/mm² și 55,97 N/mm², arătând fluctuații semnificative în funcție de proporțiile aditivilor.

În cazul rețetei H, proba martor a avut o rezistență medie de 61,41 N/mm², iar aditivii au generat valori între 50,31 N/mm² și 60,64 N/mm², sugerând o mai bună stabilitate a rezultatelor cu cenușă de termocentrală.

Pentru rețeta 6 (I) în care s-au utilizat 380 kg/mc ciment, zgură de oțelărie și cenușă de termocentrală, observăm că proba martor (I0) a prezentat o rezistență medie de 55,04 N/mm². Substituirea cimentului cu 10% cenușă a dus la valori între 48,24 N/mm² și 53,97 N/mm², indicând un impact similar asupra rezistenței ca și în rețetele anterioare cu cenușă de termocentrală.

În concluzie, analizând toate aceste date, se poate observa că adăugarea de aditivi ecologici reduce rezistența mecanică a betonului rutier, dar în grade variate, în funcție de tipul și proporția aditivilor și de conținutul de ciment. Betonul cu un conținut mai ridicat de ciment (380 kg/mc) prezintă o rezistență mai bună chiar și cu aditivi, comparativ cu betonul cu conținuturi mai scăzute de ciment (330 kg/mc și 360 kg/mc).

Rezultatele obținute arată de asemenea că substituirea cimentului cu cenușă de termocentrală este mai puțin dăunătoare decât substituirea cu silice ultrafină și că zgura de oțelărie poate influența rezultatele de laborator moderat, valorile probelor în acest caz fiind variate.

5.3.2 Rezistența la întindere prin încovoiere

Rezistența la întindere prin încovoiere s-a determinat prin intermediul prismelor simplu rezemate supuse la încovoiere prin aplicarea unei forțe concentrate la mijlocul deschiderii, pe baza normativului SR-EN:12390-5/2009. Forța de rupere s-a aplicat perpendicular pe direcția de turnare a betonului, iar ruperea s-a produs în secțiunea de moment încovoiator maxim, despiciând în două epruveta. Valoarea rezistenței la întindere prin încovoiere s-a determinat cu relația:

Analiza valorilor rezistenței la întindere prin încovoiere după 28 de zile pentru betonul rutier ecologic cu diferite conținuturi de ciment și aditivi ecologici oferă perspective importante asupra performanței materialelor utilizate.

Astfel din rezultatele obținute se observă că rețetele cu cel mai ridicat conținut de ciment (380 kg/mc) oferă cele mai mari valori ale rezistenței la încovoiere, chiar și atunci când sunt



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



adăugați aditivi ecologici. Betonul cu 360 kg/mc ciment prezintă o rezistență intermediară, în timp ce cel cu 330 kg/mc a înregistrat cele mai mici valori ale rezistenței la încovoiere.

Am observat de asemeni că aditivii ecologici, în special silicea ultrafină, tind să reducă rezistența la încovoiere pe măsură ce procentul acestora crește la nivelul rețetei de beton. Cenușa de termocentrală, deși are de asemeni un impact de reducere a rezistenței asupra betonului, impactul în cauză este mai mic comparativ cu cel din cazul probelor cu silice ultrafină.

Aceste rezultate arată că pentru optimizarea compoziției betonului rutier ecologic, este necesar să se mențină performanțe mecanice ridicate, iar proporțiile de aditivi ecologici trebuie să fie controlate atent, astfel încât să nu afecteze rezistența betonului.

Tabel nr. 5.13 - Valorile rezistenței la întindere prin încovoiere după 28 zile

Nr.Crt	Denumire rețetă	Proba examinată	Încovoiere (f_{ti}) [N/mm²]		
			P [N]	P_{med} [N]	f_{ti} [N/mm²]
Grupa 1 – (A) - BCR (330 Kg/mc) - beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/m3					
1.	BCRM (A0)	A 0.1	33900	30833,33	4,11
		A 0.2	29100		
		A 0.3	29500		
2.	BCRS (A1)	A 1.1	31100	29433,33	3,92
		A 1.2	29200		
		A 1.3	28000		
3.	BCRS (A2)	A 2.1	30300	28233,33	3,76
		A 2.2	27100		
		A 2.3	27300		
4.	BCRS (A3)	A 3.1	25000	24000	3,20
		A 3.2	23900		
		A 3.3	23100		
5.	BCRC (A4)	A 4.1	30000	28533,33	3,80
		A 4.2	28600		
		A 4.3	27000		
6.	BCRC (A5)	A 5.1	24500	26766,67	3,56
		A 5.2	27800		
		A 5.3	28000		
7.	BCRC (A6)	A 6.1	27200	25700	3,42
		A 6.2	22000		
		A 6.3	27900		



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Analizând rezultatele obținute, se observă tendințe clare și aspecte tehnice importante pentru aplicarea practică în construcția drumurilor.

Pentru betonul rutier cu agregate de balastieră și conținut de ciment de 330 kg/m^3 (Grupa A), proba martor BCRM (A0) a înregistrat o rezistență la încovoiere de $4,11 \text{ N/mm}^2$. Introducerea silicei ultrafine ca înlocuitor parțial al cimentului a determinat o scădere progresivă a rezistenței odată cu creșterea procentajului de substituție. La 10% silice ultrafină, rezistența a scăzut la $3,92 \text{ N/mm}^2$, reprezentând o reducere de aproximativ 4,6%. Această scădere devine mai pronunțată la 20% ($3,76 \text{ N/mm}^2$) și dramatică la 30% ($3,20 \text{ N/mm}^2$), unde se înregistrează o pierdere de peste 22% din rezistența inițială.

Cenușa de termocentrală prezintă un comportament similar, dar cu scăderi mai moderate în primele două trepte de substituție. La 10% cenușă de termocentrală, rezistența scade la $3,80 \text{ N/mm}^2$, iar la 20% ajunge la $3,56 \text{ N/mm}^2$. Substituția de 30% determină o rezistență de $3,42 \text{ N/mm}^2$, reprezentând o reducere de aproximativ 17% față de martorul de referință.

Creșterea conținutului de ciment la 360 kg/m^3 (Grupa B) determină o îmbunătățire semnificativă a performanțelor generale. Proba martor BCRM (B0) atinge $4,86 \text{ N/mm}^2$, o creștere de aproximativ 18% față de grupa precedentă. Silice ultrafina continuă să prezinte o tendință de scădere a rezistenței, dar cu variații mai mici la procentajele intermediare. Remarcabil este comportamentul cenușii de termocentrală la 10%, care menține performanțe foarte apropiate de martorul de referință ($4,79 \text{ N/mm}^2$), sugerând o compatibilitate excelentă la acest nivel de substituție.

La conținutul maxim de ciment de 380 kg/m^3 (Grupa C), proba martor atinge cea mai mare rezistență din seria cu agregate de balastieră - $5,11 \text{ N/mm}^2$. Totuși, se observă că silice ultrafina la 30% determină o scădere dramatică la $3,26 \text{ N/mm}^2$, o pierdere de peste 36% din rezistența inițială. Cenușa de termocentrală demonstrează o stabilitate superioară, menținând performanțe acceptabile până la 20% substituție ($4,75 \text{ N/mm}^2$).

Trecerea de la agregatele de balastieră la cele concasate de carieră determină o îmbunătățire substanțială a performanțelor mecanice. Pentru conținutul de ciment de 330 kg/m^3 (Grupa D), proba martor BCRM (D0) înregistrează $5,09 \text{ N/mm}^2$, o creștere de aproximativ 24% față de echivalentul cu agregate de balastieră. Această îmbunătățire reflectă rugozitatea superioară și forma angulară a agregatelor concasate, care asigură o aderentă mai bună în matricea de ciment.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Silice ultrafină prezintă comportament îmbunătățit cu agregatele concasate, menținând performanțe ridicate până la 20% substituție. La 10%, rezistența se menține la 4,92 N/mm², foarte aproape de martorul de referință. Cenușa de termocentrală demonstrează o stabilitate remarcabilă, cu rezultate consistente în toate trei treptele de substituție, variind între 4,45 și 4,61 N/mm².

La 360 kg/m³ ciment (Grupa E), agregatele concasate determină o stabilizare a performanțelor la aproximativ 4,0 N/mm² pentru toate variantele testate. Această consistență sugerează că la acest nivel de dozaj, tipul de adaos devine mai puțin influent asupra rezistenței finale, agregatele de calitate superioară compensând eventualele deficiențe ale adaosurilor.

Conținutul maxim de ciment de 380 kg/m³ (Grupa F) produce rezultate excepționale, cu proba martor atingând 5,85 N/mm². Silice ultrafină menține performanțe foarte bune la toate nivelurile de substituție, variind între 4,81 și 5,56 N/mm². Cenușa de termocentrală demonstrează o excelentă compatibilitate, cu rezultate între 4,76 și 5,14 N/mm².

Introducerea zgurii de oțelărie ca înlocuitor parțial al agregatelor naturale aduce o nouă dimensiune în studiu. Grupa G utilizează silice ultrafină la 10% și zgură de oțelărie în diferite proporții și granulometrii. Rezultatele variază între 4,12 și 5,56 N/mm², demonstrând că zgura de oțelărie poate fi integrată cu succes în compoziția betonului rutier.

Substituția agregatelor din fracția 4-8 mm cu zgură de oțelărie (G1-G3) produce rezultate promițătoare, cu performanțe între 4,77 și 5,13 N/mm². Remarcabil este faptul că substituția completă (100%) în această fracție determină chiar o ușoară îmbunătățire a rezistenței față de substituția parțială, sugerând o compatibilitate excelentă a zgurii de oțelărie în granulometriile fine.

Pentru fracțiile mai mari (8-16 mm și 16-22,5 mm), zgura de oțelărie menține performanțe acceptabile, deși cu valori ușor mai scăzute față de fracțiile fine. Acest comportament poate fi explicat prin caracteristicile fizice ale zgurii de oțelărie, care este mai eficientă în granulometriile mici unde poate contribui la umplerea golurilor din structura betonului.

Grupa H, care combină cenușa de termocentrală cu zgura de oțelărie, demonstrează o sinergie pozitivă între cele două materiale secundare. Rezultatele variază între 4,33 și 5,14 N/mm², confirmând fezabilitatea utilizării simultane a acestor materiale industriale de recuperare.

Analiza rezultatelor relevă că agregatele concasate de carieră oferă performanțe superioare față de cele de balastieră, justificând investiția suplimentară în procesarea acestora pentru aplicații



rutiere de înaltă responsabilitate. Cenușa de termocentrală demonstrează o compatibilitate superioară față de silice ultrafină, în special la niveluri de substituție de până la 20%.

Zgura de oțelărie se dovedește a fi un material promițător pentru economia circulară în construcția drumurilor, oferind performanțe comparabile cu agregatele naturale în anumite condiții de utilizare. Combinarea diferitelor materiale secundare poate duce la optimizarea performanțelor și reducerea impactului asupra mediului.

Pentru aplicații practice, se recomandă utilizarea cenușii de termocentrală până la 20% din masa cimentului, agregatele concasate pentru proiectele de înaltă importanță, și integrarea zgurii de oțelărie în fracțiunile fine pentru maximizarea beneficiilor tehnice și economice.

5.3.3 Rezistența la întindere prin despicare

Rezistența la întindere prin despicare s-a determinat utilizându-se prisme de beton, conform normativului SR-EN:12390-6/2010. Testarea s-a realizat cu ajutorul unei prese hidraulice, cu ajutorul căreia s-a aplicat o forță de rupere perpendicular pe direcția de turnare a betonului. Această forță a fost aplicată progresiv până când epruveta a cedat prin despicare, fenomenul având loc de-a lungul unei secțiuni centrale, unde tensiunea de întindere a fost maximă.

Determinarea rezistenței la întindere prin despicare s-a realizat prin calcularea mediei valorilor obținute din trei testări distincte, asigurându-se astfel precizia și fiabilitatea rezultatelor obținute.

Modul de aplicare a forței și cedarea probelor sunt ilustrate în detaliu în Figura 5.33, iar valorile obținute pentru rezistența la întindere prin despicare după 28 de zile de maturare sunt sintetizate în Tabelul 5.14 și Figurile 5.34-5.43. Comparând rezultatele obținute între cele trei rețete de beton, se observă că un conținut mai ridicat de ciment duce la o creștere a rezistenței la întindere prin despicare, ceea ce este esențial pentru durabilitatea și performanța pe termen lung a betonului rutier.

De asemenea, se observă că silicea ultrafină tinde să reducă rezistența la întindere, mai ales la rețetele cu conținuturi mai mici de ciment. În contrast, cenușa de termocentrală, deși afectează și ea rezistența, o face într-un mod mai puțin sever, menținând o performanță mecanică mai stabilă.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Aceste rezultate confirmă faptul că, la un conținut ridicat de ciment, cenușa de termocentrală poate fi utilizată eficient fără a compromite semnificativ rezistența la întindere prin despicare.

Tabel nr.5.14 - Valorile rezistenței la întindere prin despicare după 28 zile

Nr. Crt.	Denumire rețetă	Proba examinată	Despicare (f_{td}) [N/mm ²]			
			(f_{td}) [N/mm ²]	(f_{td}) _{probă} [N/mm ²]	(f_{td}) _{mediu} [N/mm ²]	
Grupa 1 – (A) - BCR (330 Kg/mc) - beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/m3						
1	BCRM (A0)	A 0.1		2,68	2,55	2,76
				2,42		
		A 0.2		2,67	2,73	
				2,79		
		A 0.3		2,97	2,99	
				3,01		
2	BCRS (A1)	A 1.1		2,70	2,64	2,68
				2,59		
		A 1.2		2,97	2,82	
				2,67		
		A 1.3		2,67	2,57	
				2,46		
3	BCRS (A2)	A 2.1		2,60	2,50	2,45
				2,40		
		A 2.2		2,25	2,38	
				2,51		
		A 2.3		2,22	2,46	
				2,69		
4	BCRS (A3)	A 3.1		2,03	2,13	2,22
				2,23		
		A 3.2		2,32	2,29	
				2,27		
		A 3.3		2,43	2,25	
				2,06		
5	BCRC (A4)	A 4.1		2,57	2,58	2,67
				2,59		
		A 4.2		2,70	2,65	
				2,60		
		A 4.3		2,75	2,78	
				2,81		
		A 5.1		2,57	2,58	



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Nr. Crt.	Denumire rețetă	Proba examinată	Despicare (f_{td}) [N/mm ²]		
			(f_{td}) [N/mm ²]	(f_{td}) _{probă} [N/mm ²]	(f_{td}) _{mediu} [N/mm ²]
6	BCRC (A5)	A 5.2	2	2,60	2,58
				2,60	
				2,67	
		A 5.3		2,51	
			2	2,54	
	BCRC (A6)	A 6.1		2,46	2,41
				2,49	
		A 6.2		2,36	
				2,26	
		A 6.3		2,48	
				2,44	
				2,40	

Analizând rezultatele testelor de rezistență la întindere prin despicare pentru diferitele tipuri de beton rutier, se observă tendințe clare și semnificative în comportamentul materialelor testate.

Pentru grupa 1 (BCR 330 kg/m³) cu agregate de balastieră, proba martor BCRM (A0) a înregistrat o rezistență medie de 2,76 N/mm², stabilind linia de bază pentru comparații. Introducerea silicei ultrafine ca înlocuitor parțial al cimentului a generat rezultate contradictorii cu performanțele în funcție de procentajul utilizat. BCRS (A1) cu 10% silice a prezentat o rezistență de 2,68 N/mm², ușor inferioară martorului, în timp ce BCRS (A2) cu 20% silice a scăzut la 2,45 N/mm², iar BCRS (A3) cu 30% silice a ajuns la 2,22 N/mm². Această tendință descendentă sugerează că silica ultrafină în concentrații mari poate compromite rezistența la întindere pentru această doză de ciment. În contrast, cenușa de termocentrală a demonstrat un comportament diferit: BCRC (A4) cu 10% cenușă a atins 2,67 N/mm², aproape egalând martorul, BCRC (A5) cu 20% cenușă a menținut 2,58 N/mm², iar BCRC (A6) cu 30% cenușă a scăzut la 2,41 N/mm².

Creșterea conținutului de ciment la 360 kg/m³ în grupa 2 a îmbunătățit semnificativ performanțele generale. Proba martor BCRM (B0) a atins 3,35 N/mm², reprezentând o creștere de aproximativ 21% față de grupa anterioară. Silica ultrafină a continuat să prezinte o tendință descendentă: BCRS (B1) cu 10% a înregistrat 3,03 N/mm², BCRS (B2) cu 20% a scăzut la 2,80 N/mm², iar BCRS (B3) cu 30% a ajuns la 2,43 N/mm². Cenușa de termocentrală a menținut performanțe mai stabile: BCRC (B4) cu 10% a atins 2,93 N/mm², BCRC (B5) cu 20% a înregistrat 2,83 N/mm², iar BCRC (B6) cu 30% a scăzut la 2,45 N/mm².



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Grupa 3 cu 380 kg/m³ ciment a demonstrat cel mai înalt nivel de performanță pentru agregatele de balastieră. Proba martor BCRM (C0) a atins 3,86 N/mm², confirmând relația directă între conținutul de ciment și rezistența la întindere. Remarcabil, BCRS (C1) cu 10% silice ultrafină a depășit martorul, atingând 3,80 N/mm², sugerând că la această doză superioară de ciment, silica ultrafină poate contribui pozitiv la rezistență. BCRS (C2) cu 20% silice a menținut 3,74 N/mm², încă foarte aproape de martor, în timp ce BCRS (C3) cu 30% silice a scăzut la 3,63 N/mm². Cenușa de termocentrală a prezentat rezultate consistente bune: BCRC (C4) cu 10% a atins 3,76 N/mm², BCRC (C5) cu 20% a înregistrat 3,67 N/mm², iar BCRC (C6) cu 30% a menținut 3,55 N/mm².

Tranziția către agregatele concasate de carieră în grupa 4 (330 kg/m³ ciment) a adus îmbunătățiri substanțiale ale performanțelor. Proba martor BCRM (D0) a atins 4,16 N/mm², reprezentând o creștere de 51% față de echivalentul cu agregate de balastieră. Această îmbunătățire semnificativă confirmă superioritatea agregatelor concasate în ceea ce privește rezistența la întindere. BCRS (D1) cu 10% silice a menținut 3,93 N/mm², în timp ce creșterea procentajului de silice la 20% în BCRS (D2) a scăzut rezistența la 3,11 N/mm², iar BCRS (D3) cu 30% silice a ajuns la 2,87 N/mm². Cenușa de termocentrală a prezentat rezultate mai variate: BCRC (D4) cu 10% a atins 3,12 N/mm², BCRC (D5) cu 20% a înregistrat 3,08 N/mm², iar BCRC (D6) cu 30% a scăzut dramatic la 2,52 N/mm².

Grupa 5 cu 360 kg/m³ ciment și agregate concasate a demonstrat performanțe excepționale. Proba martor BCRM (E0) a atins 4,63 N/mm², confirmând efectul sinergic între conținutul crescut de ciment și agregatele superioare. BCRS (E1) cu 10% silice a menținut un nivel foarte înalt de 4,42 N/mm², BCRS (E2) cu 20% silice a atins 4,20 N/mm², iar BCRS (E3) cu 30% silice a scăzut la 3,99 N/mm². Cenușa de termocentrală a prezentat rezultate impresionante: BCRC (E4) cu 10% a egalat martorul cu 4,52 N/mm², BCRC (E5) cu 20% a înregistrat 4,32 N/mm², iar BCRC (E6) cu 30% a menținut 4,05 N/mm².

Grupa 6, reprezentând configurația optimă cu 380 kg/m³ ciment și agregate concasate, a atins cele mai înalte performanțe din studiu. Proba martor BCRM (F0) a înregistrat 5,28 N/mm², stabilind un nou standard. BCRS (F1) cu 10% silice a atins 5,05 N/mm², BCRS (F2) cu 20% silice a menținut 4,91 N/mm², iar BCRS (F3) cu 30% silice a înregistrat 4,85 N/mm². Cenușa de termocentrală a demonstrat rezultate foarte bune: BCRC (F4) cu 10% a atins 5,15 N/mm², chiar



depășind martorul, BCRC (F5) cu 20% a înregistrat 5,01 N/mm², iar BCRC (F6) cu 30% a scăzut la 4,90 N/mm².

Grupele 7, 8 și 9 au investigat efectul substituției agregate cu zgură de oțelărie în combinație cu adaosuri cimentoase. Grupa 7 cu silice ultrafină a prezentat rezultate promițătoare, cu BCRC (G1) atingând 4,61 N/mm² pentru substituția de 30% a fracțiunii 4-8mm cu zgură. Grupa 8 cu cenușă de termocentrală a demonstrat performanțe similare, cu BCRC (H1) înregistrând 4,91 N/mm² pentru aceeași substituție. Grupa 9, explorând substituții complete ale agregatului cu zgură, a prezentat rezultate variabile în funcție de procentajul de substituție.

Analiza globală relevă că agregatele concasate de carieră oferă performanțe superioare comparativ cu agregatele de balastieră, independent de conținutul de ciment. Creșterea conținutului de ciment de la 330 la 380 kg/m³ produce îmbunătățiri consistente ale rezistenței la întindere. Silica ultrafină prezintă un comportament optim la concentrații de 10%, cu performanțe care scad odată cu creșterea procentajului de substituție. Cenușa de termocentrală demonstrează o mai mare stabilitate la concentrații variate, menținând performanțe acceptabile chiar și la substituții de 30%. Zgura de oțelărie ca substitut al agregatelor naturale prezintă potențial pentru anumite aplicații, deși performanțele variază în funcție de fracțiunea substituită și procentajul utilizat.

5.4 Încercări de durabilitate

Pentru realizarea încercărilor de durabilitate (Figurile 5.43 și 5.44), s-a optat pentru înlocuirea parțială a cimentului utilizat în rețetele de beton rutier ecologic cu aditivi precum silice ultrafină și cenușă de termocentrală, în proporții variabile de 10%, 20% și 30%. De asemenea, a fost investigată substituirea agregatelor concasate de carieră din compoziția betonului cu zgură de oțelărie, provenită de la Combinatul Siderurgic din Galați, în proporții de 30%, 60% și 100%. Scopul acestor încercări a fost de a evalua impactul acestor substituiri asupra durabilității betonului rutier, analizând în mod specific proprietățile fizico-mecanice și comportamentul acestuia în condiții de solicitare pe termen lung.

La proiectarea compozițiilor de beton rutier ecologic, s-a urmărit în principal înlocuirea cimentului cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală în procentaje variabile, identificate ca rețetele D, E și F. În cazul rețetelor G, H și I s-a optat pentru substituirea cimentului doar cu cenușă de termocentrală în proporție de 10%. Totodată, s-a explorat înlocuirea agregatelor concasate de



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



carieră (în diferite dimensiuni) cu zgură de oțelărie, în diferite proporții, atât pentru rețetele G și H, cât și pentru rețeta I. S-a valorificat zgura de oțelărie sub formă granulată și măcinată, precum și sub formă de agregate concasate, solidificate la temperatura aerului din atmosferă.

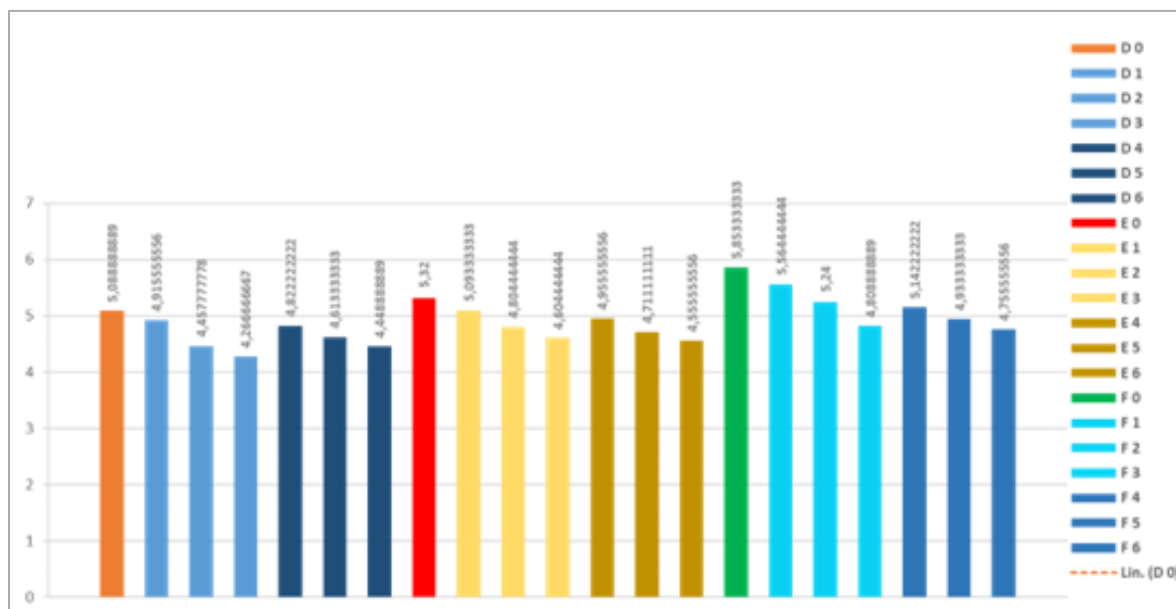
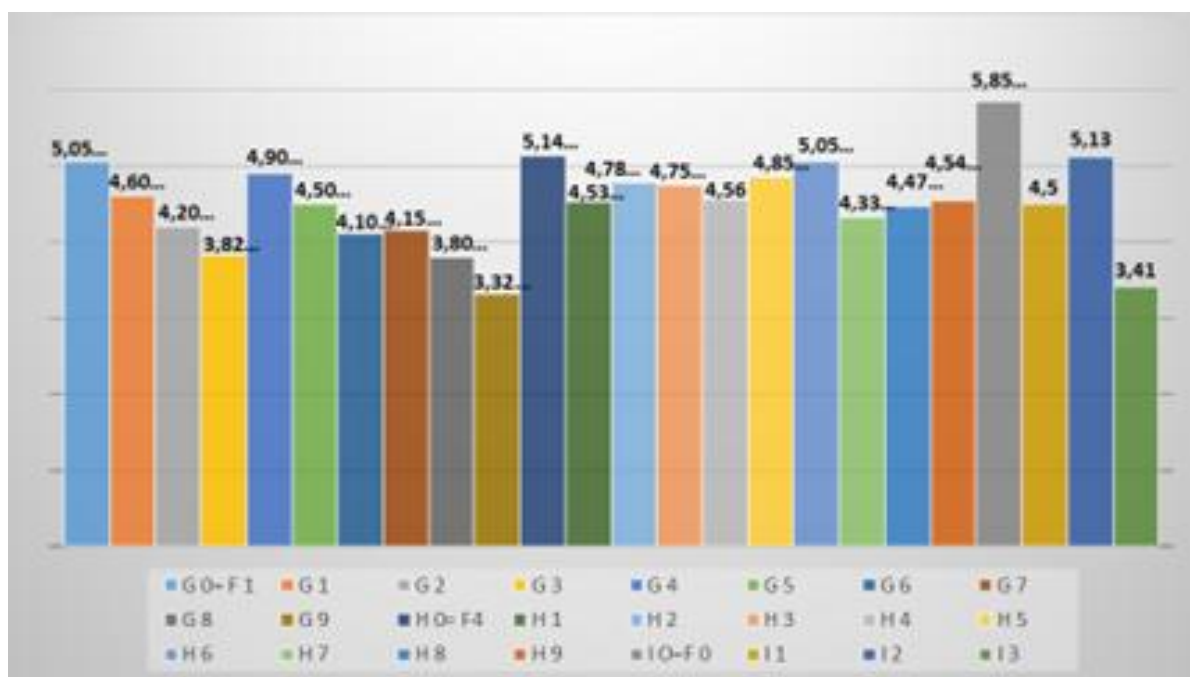


Figura 5.43 – Determinări de durabilitate pentru probele D, E și F cu agregate concasate de carieră și ciment substituit, cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală (procent 10/20/30%)





UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Figura 5.44 – Determinări de durabilitate pentru probele G, H și I cu agregate concasate de carieră și ciment substituit, cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală (procent 10/20/30%)

Rezultatele obținute pe probele D, E și F prezentate în Figura 5.43, arată că substituirea parțială a cimentului cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală poate fi realizată cu succes fără a compromite în mod semnificativ performanța betonului rutier, mai ales în rețetele cu procente mai mici de substituenți. Clasele de rezistență BcR 5.5 și BcR 5.0 demonstrează că aceste rețetele F0, F1, D0, E0, E1, F2 și F4 sunt capabile să ofere o durabilitate excelentă, chiar și cu adaosuri de materiale alternative. Totuși, pe măsură ce procentul de substituție crește, am observat că rezistența mecanică tinde să scadă, ducând la încadrări în clase de rezistență mai mici, cum ar fi BcR 4.5 și BcR 4.0 pentru probele D1, D4, D5, E2, E3, E4, D2, D3 și D6.

Analiza rezultatelor pe probele G, H și I (Figura 6.18) arată că de asemenea substituirea agregatelor concasate de carieră cu zgură de oțelărie, împreună cu substituirea parțială a cimentului cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală, poate avea un impact semnificativ asupra performanței mecanice a betonului rutier ecologic. Clasele de rezistență BcR 5.5 și BcR 5.0 indică faptul că aceste rețete pot oferi o durabilitate excelentă și o rezistență ridicată, făcându-le adecvate pentru utilizare în structuri rutiere unde sunt necesare performanțe mecanice ridicate.

Din încercările de durabilitate realizate am reținut că utilizarea zgurii de oțelărie în compoziția betonului rutier ecologic prezintă avantaje semnificative din punct de vedere ecologic, contribuind la reducerea impactului asupra mediului înconjurător și la conservarea resurselor naturale. Înlocuirea parțială a cimentului cu cenușă de termocentrală și silice ultrafină oferă beneficii suplimentare, precum scăderea permeabilității betonului și îmbunătățirea rezistenței la ciclurile de îngheț-dezgheț, ceea ce contribuie la realizarea unor structuri rutiere durabile și ecologice.

Analiza densităților probelor de beton rutier ecologic a evidențiat creșteri ale acestora comparativ cu probele martor, în special atunci când agregatele au fost substituite cu zgură de oțelărie. În cazul rețetelor D, E și F, unde cimentul a fost substituit cu cenușă de termocentrală, diferențele de densitate au variat între 2% și 4%, în timp ce substituirea cimentului cu silice ultrafină a condus la diferențe ușor mai scăzute, între 3,74% și 4,89%. Pentru rețetele G și H, unde



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



cimentul a fost substituit cu cenușă de termocentrală, creșterile densităților au fost între 0,98% și 2,55%, iar pentru substituirea cu silice ultrafină, creșterile au variat între 0,18% și 0,94%. În cazul rețetei I, substituirea cimentului cu cenușă de termocentrală a dus la creșteri ale densităților cuprinse între 1,37% și 7,28%, în funcție de procentul de substituire a agregatelor concasate cu zgură de oțelărie.

Un alt aspect observat în cadrul experimentelor a fost legat de influența adăugării de cenușă de termocentrală asupra lucrabilității betonului. Adaosul de cenușă a crescut absorbția de apă, determinând o vâscozitate mai mare a pasteii și, implicit, o lucrabilitate mai scăzută față de celelalte rețete. Cu toate acestea, rezistențele mecanice obținute, deși ușor mai mici decât cele ale probelor martor, s-au situat în limite acceptabile, indicând faptul că betonul rutier ecologic poate oferi performanțe comparabile cu betonul rutier clasic, chiar și în condițiile reducerii cantității de ciment.

Printre principalele avantaje ale utilizării cenușii zburătoare și silicei ultrafine ca substituiete ale cimentului am constatat îmbunătățirea proprietăților tehnologice ale betonului, reducerea permeabilității și creșterea rezistenței la ciclurile de îngheț-dezgheț. În plus, aceste materiale contribuie semnificativ la protecția mediului și la reducerea costurilor de producție, făcând din betonul rutier ecologic o soluție sustenabilă pentru construcțiile de infrastructură rutieră.

Aceste rezultate indică deci faptul că substituirea cimentului și a agregatelor naturale cu materiale alternative precum zgura de oțelărie, cenușa de termocentrală și silicea ultrafină poate duce la obținerea unor betoane rutiere cu proprietăți fizico-mecanice comparabile cu cele ale betonului rutier tradițional. Se poate conchide deci în încheierea acestui capitol experimental că utilizarea betonului rutier ecologic în construcțiile de drumuri, oferă avantaje economice considerabile. Pentru a cuantifica beneficiile pentru mediu, în cadrul capitolului următor se vor analiza în detaliu aspectele referitoare la impactul asupra mediului generat de utilizarea betonului rutier ecologic.

5.4 Încercări de permeabilitate

Permeabilitatea reprezintă capacitatea betonului de a permite trecerea fluidelor (lichide sau gaze) prin structura sa poroasă. Este o caracteristică esențială care influențează durabilitatea,



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



integritatea structurală și rezistența la coroziune a materialului. Un beton cu permeabilitate scăzută împiedică pătrunderea apei și a agenților corozivi, reducând riscul de coroziune a armăturii, fisurare sau degradare în timp, mai ales în medii umede, expuse la îngheț-dezgheț sau substanțe chimice agresive.

Determinarea permeabilității se face conform legii lui Darcy, care evaluează debitul de fluid ce trece prin beton, și este reglementată prin standarde precum ASTM C1202, care oferă o metodă rapidă de evaluare a rezistenței la penetrarea ionilor de clorură, folosind măsurători electrice.

Această proprietate este importantă nu doar pentru siguranța și eficiența structurii, ci și pentru sustenabilitatea construcțiilor, contribuind la reducerea reparațiilor și a costurilor de întreținere pe termen lung. În plus, este un criteriu de conformitate cu standardele din industrie și influențează alegerile de proiectare în funcție de mediul în care structura va fi amplasată.

Valorile obținute pentru coeficientul de permeabilitate al betonului rutier ecologic, determinate după 28 de zile de maturare, sunt sintetizate în Tabelul 5.15 și ilustrate grafic în Figurile 5.45–5.54.

Tabel nr. 5.15 - Valorile evaluării permeabilității

Nr. Crt.	Denumire rețetă	Proba examinată	Înălțimea de pătrundere a apei în epruvetele examinate [mm]
Grupa 1 – (A) - BCR (330 Kg/mc) - beton rutier cu agregate de balastieră 0 – 22,5 mm și conținut de ciment 330 kg/m3			
1.	BCRM (A0)	A 0.1	50
		A 0.2	45
		A 0.3	55
2.	BCRS (A1)	A 1.1	35
		A 1.2	30
		A 1.3	48
3.	BCRS (A2)	A 2.1	39
		A 2.2	41
		A 2.3	38
4.	BCRS (A3)	A 3.1	42
		A 3.2	41
		A 3.3	42



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Nr. Crt.	Denumire rețetă	Proba examinată	Înălțimea de pătrundere a apei în epruvetele examinate [mm]
5.	BCRC (A4)	A 4.1	47
		A 4.2	48
		A 4.3	48
6.	BCRC (A5)	A 5.1	55
		A 5.2	45
		A 5.3	55
7.	BCRC (A6)	A 6.1	60
		A 6.2	65
		A 6.3	60

Analizând rezultatele testelor de permeabilitate la apă pentru probele de beton rutier compactate cu valț (BCR), se observă o variabilitate semnificativă în comportamentul diferitelor formulări în funcție de tipul de agregate, conținutul de ciment și adaosurile utilizate.

În cazul betoanelor rutiere cu agregate de balastieră, se constată că probele martor (BCRM) prezintă valori ale înălțimii de pătrundere a apei relativ ridicate, cuprinse între 47-50 mm, independent de conținutul de ciment (330, 360 sau 380 kg/m³). Această observație sugerează că tipul de agregat de balastieră conferă o anumită porozitate caracteristică matricei betonului.

Introducerea silicei ultrafine ca înlocuitor parțial al cimentului generează efecte distincte în funcție de procentajul utilizat. Pentru concentrații de 10% silice ultrafină, se observă o reducere marcantă a permeabilității, cu valori ale pătrunderii apei între 37-38 mm, ceea ce indică o îmbunătățire a compacității structurii. Această tendință se menține și la concentrații de 20%, unde valorile oscilează între 38-41 mm. Interesant este faptul că la 30% silice ultrafină, permeabilitatea crește ușor, ajungând la valori de 41-45 mm, sugerând că există un prag optim de substituție dincolo de care efectele pozitive se diminuează.

Cenușa de termocentrală prezintă un comportament diferit comparativ cu silica ultrafină. La toate nivelurile de substituție (10%, 20% și 30%), valorile permeabilității sunt mai ridicate decât cele obținute cu silica ultrafină, variind între 40-62 mm. Această tendință indică o capacitate mai redusă a cenușii de termocentrală de a îmbunătăți compacitatea matricei cementoase în comparație cu silica ultrafină.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Tranziția către agregatele concasate de carieră aduce modificări notabile în comportamentul general al betonului. Probele martor cu agregate concasate prezintă valori ale permeabilității similare sau ușor mai mici decât cele cu agregate de balastieră, sugerând că forma angulară a agregatelor concasate contribuie la o mai bună îmbinare și compactare.

Introducerea zgurii de oțelărie ca înlocuitor al agregatelor naturale generează efecte complexe asupra permeabilității. Pentru substituțiile moderate (30-60%) în diferitele fracții granulometrice (4-8 mm, 8-16 mm, 16-22,5 mm), se observă valori ale permeabilității cuprinse între 45-55 mm, comparabile sau ușor superioare probelor de referință. La substituții complete (100%) cu zgură de oțelărie, tendința generală este de creștere a permeabilității, cu valori ajungând la 53-58 mm.

Combinția dintre zgura de oțelărie și silica ultrafină (Grupa G) prezintă rezultate promițătoare, cu valori ale permeabilității relativ stabile între 45-57 mm. Această combinație pare să compenseze parțial efectele negative ale zgurii prin acțiunea pozitivă a silicei ultrafine asupra compacității matricei.

Asocierea zgurii de oțelărie cu cenușa de termocentrală (Grupa H) generează valori ale permeabilității între 47-59 mm, indicând o performanță intermediară. Cenușa de termocentrală nu reușește să compenseze complet efectele zgurii asupra permeabilității, dar menține valorile într-un interval acceptabil pentru aplicațiile rutiere.

Grupa finală (I), care combină diferite procente de zgură de oțelărie (30%, 60%, 100%) cu cenușă de termocentrală, confirmă tendința de creștere moderată a permeabilității odată cu creșterea procentului de zgură, cu valori finale între 48-51 mm.

Din perspectiva ingineriei rutiere, aceste rezultate sugerează că silica ultrafină reprezintă cel mai eficient adaos pentru reducerea permeabilității betoanelor rutiere, în timp ce zgura de oțelărie poate fi utilizată ca înlocuitor al agregatelor naturale în procente moderate, cu condiția asocierii cu adaosuri care să compenseze efectele asupra compacității. Cenușa de termocentrală, deși mai puțin eficientă decât silica ultrafină, rămâne o opțiune viabilă pentru îmbunătățirea sustenabilității mixurilor de beton rutier.



CAPITOLUL 6 – EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ

6.1 Scopul și obiectivul studiului

Industria construcțiilor reprezintă unul dintre cele mai mari sectoare economice la nivel global, având un impact semnificativ asupra mediului înconjurător, în principal din cauza consumului ridicat de resurse naturale și a emisiilor asociate cu producția materialelor de construcție. În acest context, identificarea unor soluții sustenabile pentru dezvoltarea infrastructurii devine o prioritate atât din punct de vedere ecologic, cât și economic.

Betonul rutier este un material esențial în realizarea drumurilor moderne, datorită rezistenței sale și durabilității în timp. Totuși, producerea cimentului – componenta principală a betonului – generează cantități semnificative de emisii de dioxid de carbon (CO_2), ceea ce impune necesitatea unor alternative mai prietenoase cu mediul. În acest sens, utilizarea materialelor secundare, precum zgura granulată de furnal, cenușa volantă sau fumul de silice, poate contribui la reducerea amprente ecologice a betonului, fără a compromite performanțele tehnice ale acestuia.

Scopul acestei lucrări este de a analiza și compara impactul de mediu al mai multor rețete de beton rutier, prin aplicarea metodologiei Evaluării Ciclului de Viață (ECV), cunoscut mai mult după denumirea lui în limba engleză – Life Cycle Assessment (LCA) . Studiul vizează cuantificarea impactului ecologic al rețetelor de beton în care se introduc diferite tipuri de materiale reciclate sau secundare, în comparație cu o rețetă de referință bazată exclusiv pe materiale convenționale. Astfel, se urmărește identificarea soluțiilor optime din punct de vedere al sustenabilității, în scopul promovării unei economii circulare în domeniul construcțiilor rutiere.

Lucrarea contribuie la dezvoltarea cunoștințelor legate de impactul ecologic al materialelor de construcții și propune un cadru metodologic ce poate fi utilizat în viitor pentru evaluarea altor tipuri de materiale sau structuri din domeniul ingineriei civile.



6.2 Aplicarea ECV la betonul rutier

„ECV are ca obiectiv identificarea și cuantificarea impacturilor asupra mediului generate de produse pe întregul lor ciclu de viață (de la extracția materiilor prime până la postutilizare).”
(Bârjoveanu, 2012)

Obiectivul principal al ECV este de a oferi o bază științifică pentru luarea deciziilor în vederea îmbunătățirii performanței de mediu a produselor sau serviciilor. Prin cuantificarea impacturilor asupra mediului într-un mod standardizat și transparent, ECV contribuie la:

- Optimizarea proceselor de producție și a designului de produs;
- Promovarea economiei circulare și a sustenabilității;
- Compararea alternativelor tehnologice sau materiale;
- Fundamentarea politicilor de mediu și etichetarea ecologică.

Astfel, ECV se dovedește a fi un instrument esențial în tranziția către practici economice mai sustenabile, oferind informații clare și cuantificabile despre impactul de mediu al produselor și serviciilor pe întregul lor ciclu de viață. Prin aplicarea sa, atât actorii industriali, cât și factorii de decizie politică pot identifica oportunități concrete de reducere a emisiilor, economisire a resurselor și minimizare a deșeurilor. Mai mult, această abordare facilitează comunicarea transparentă a performanței de mediu către consumatori, susținând în același timp inovația responsabilă și competitivitatea pe termen lung.

Pentru realizarea evaluării impactului asupra mediului, în prezenta lucrare au fost definite următoarele elemente de bază ale studiului ECV:

Obiectivul studiului: realizarea unui studiu complex de evaluare a ciclului de viață a materialelor de tip beton rutier cu scopul de a compara performanța de mediu a diverselor rețete de beton rutier, așa cum sunt ele descrise în capitolele precedente.

Unitatea funcțională a studiului este definită ca fiind 1 m³ de beton rutier

Limitele sistemului analizat cuprind următoarele procese: fluxurile și procesele care intervin în realizarea materialelor de tip beton rutier, în conformitate cu lista materialelor prezentate și a cantităților prezentate în tabelul de inventar. Așadar, acest studiu ECV este de tip Cradle to gate și ia în considerare doar faza de producție a materialelor de tip beton rutier.

Inventarul ciclului de viață. Fluxurile și procesele sunt definite luând în considerare rețetele specifice, procesele de background fiind preluate din baza de date Eco-invent v.3.3. Pentru ca



impacturile prezentate să fie cât mai obiective, au fost modelate, actualizate și definite procesele de ordin 1 care intervin în inventarul ciclului de viață: fluxul ciment a fost modelat luând în considerare intrările specifice pentru România (2024) cu privire la materiale, consumuri de energie și emisii poluant, fluxul de energie electrică și termică au fost de asemenea procesat luând în considerare intrările specifice pentru Romania (2024).

Metoda de evaluare a impactului ciclului de viață a fost aleasă ca Recipe 2016 care cuprinde 18 categorii de impact.

6.4 Rezultate la evaluarea impactului ciclului de viață

6.4.1. Profil de mediu- Rețeta A0 – beton rutier, rețetă de control

Figura 6.1 și Tabelul 6.3 prezintă valorile impactului de mediu asociate producerii a 1 m³ de beton rutier, conform rețetei A0. Analiza evidențiază că, pentru fiecare metru cub de beton produs, se generează aproximativ 231,3 kg echivalent CO₂ (în categoria schimbărilor climatice), se consumă 44,85 m³ de apă (reflectând impactul asupra resurselor hidrice), iar emisiile în categoria formării ozonului troposferic sunt echivalente cu 0,372 kg NO_x. Aceste date cuantificate oferă o imagine detaliată asupra presiunilor exercitate asupra mediului de către procesele implicate în fabricarea acestui tip de beton.

Figura 6.1 ilustrează contribuțiile relative ale fiecărui flux și proces inclus în inventarul ciclului de viață, subliniind faptul că producerea cimentului reprezintă, de departe, sursa principală de impact – cu ponderi ce variază între 2,5% și 98% din totalul impactului înregistrat, având o medie de aproximativ 80% în toate categoriile de impact analizate. Această constatare este aliniată cu literatura de specialitate și cu alte studii ECV similare dedicate sectorului betonului, unde cimentul este recunoscut drept componenta cu cel mai mare aport la amprenta de mediu, în special din cauza emisiilor mari de CO₂ asociate procesului de calcinare a clincherului și consumului energetic intens.

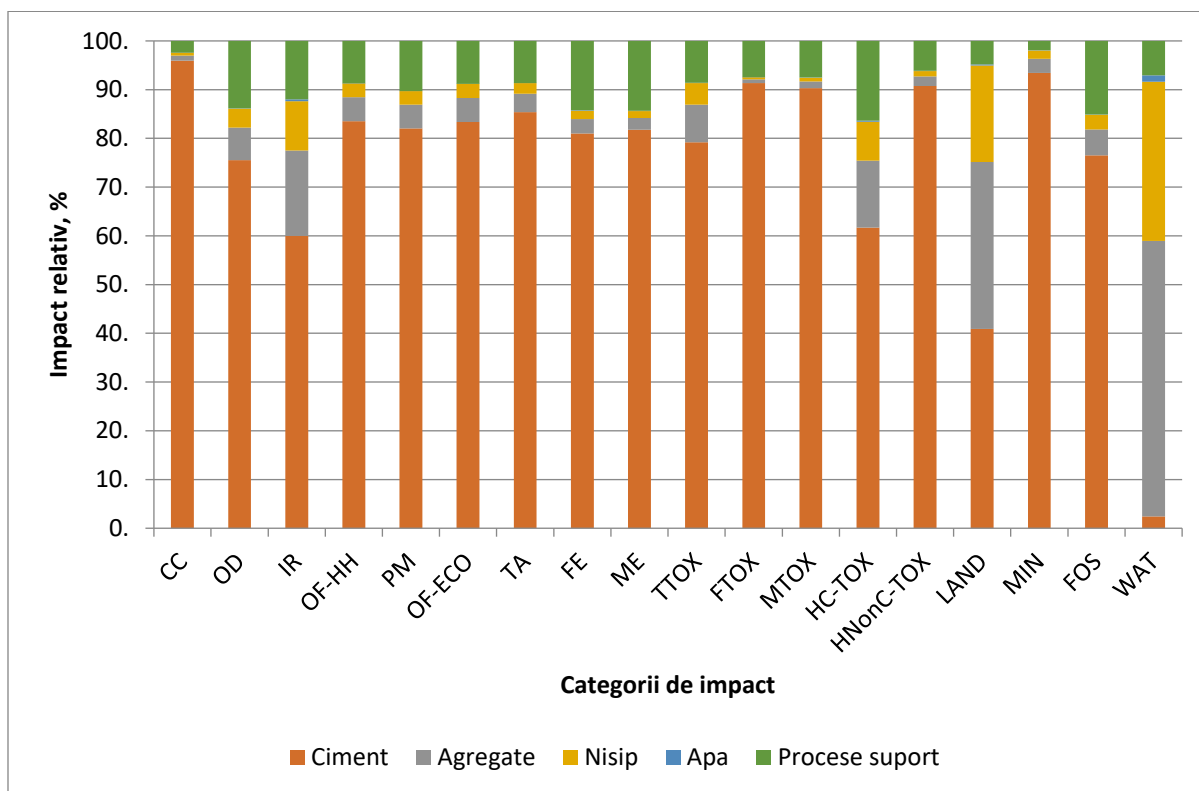


Figura 6.1. Profilul de mediu al rețetei A0

Materialele minerale precum nisipul și agregatele contribuie într-o măsură semnificativ mai redusă la impactul total, în timp ce procesele suport – care includ activitățile desfășurate în stația de betoane (consum de electricitate pentru dozare și amestecare, combustibili pentru manipulare, emisii directe de praf, pierderi de materiale și contribuția infrastructurii) – au o contribuție cuprinsă între 2% și 16%, cu o medie de 9% pe ansamblu.

Profilul de mediu rezultat nu doar că reflectă fidel realitatea procesului analizat, dar oferă și direcții clare pentru strategiile de optimizare ecologică. Având în vedere ponderea dominantă a cimentului în generarea impacturilor, este evident că măsurile de reducere a amprente de mediu trebuie concentrate în această zonă. Astfel, opțiunile eficiente includ fie reducerea cantității de ciment utilizat în rețetă (prin optimizarea dozajului), fie înlocuirea parțială a acestuia cu materiale cu impact redus, cum ar fi adaosuri minerale provenite din surse industriale (de exemplu, cenușă volantă, zgură granulată de furnal sau alte materiale reciclate). Aceste abordări nu doar că susțin obiectivele de decarbonizare și sustenabilitate, dar contribuie și la promovarea unei economii circulare în sectorul construcțiilor.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII
BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Tabelul 6.3. Valorile impactului de mediu al rețetei A0

Impact category	Unit	Total	Ciment	Agrega te	nisip	apa	Procese suport
Global warming	kg CO2 eq	231.30 91	221.99 16	2.3660 78	1.3672 83	0.0226 34	5.561497
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1.70E- 05	1.28E- 05	1.14E- 06	6.56E- 07	9.21E- 09	2.35E-06
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	9.9682 46	5.9808 91	1.7465 9	1.0093	0.0387 58	1.192707
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0.3683 8	0.3076 98	0.0181 18	0.0104 7	5.13E- 05	0.032042
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.1064 61	0.0873 76	0.0051 51	0.0029 76	2.86E- 05	0.010929
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0.3725 38	0.3105 7	0.0184 34	0.0106 52	5.25E- 05	0.032829
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0.3066 68	0.2618 8	0.0115 65	0.0066 83	7.21E- 05	0.026468
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.0216 4	0.0175 32	0.0006 41	0.0003 7	1.26E- 05	0.003084
Marine eutrophication	kg N eq	0.0015 68	0.0012 82	3.80E- 05	2.20E- 05	8.29E- 07	0.000225
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4- DCB	85.236 36	67.533 33	6.5367 95	3.7774 1	0.0539 78	7.334852
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4- DCB	0.3515 05	0.3210 69	0.0026 98	0.0015 59	4.48E- 05	0.026134
Marine ecotoxicity	kg 1,4- DCB	0.5334 43	0.4817 19	0.0073 36	0.0042 39	9.21E- 05	0.040056
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4- DCB	1.4274 36	0.8805 57	0.1964 55	0.1135 25	0.0033 2	0.23358
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4- DCB	10.957 56	9.9466 24	0.2129	0.1230 28	0.0021 85	0.67282
Land use	m2a crop eq	0.9593 33	0.3924 53	0.3286 09	0.1898 93	0.0021 94	0.046185
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.3480 94	0.3251 77	0.0102 01	0.0058 95	0.0001 23	0.006698
Fossil resource scarcity	kg oil eq	13.481 18	10.317 23	0.7122 23	0.4115 72	0.0049 49	2.035212
Water consumption	m3	44.853 98	1.0970 85	25.346 39	14.646 89	0.5911 28	3.172488

6.5. Concluzii și recomandări

Studiul realizat a demonstrat aplicabilitatea metodologiei de Evaluare a Ciclului de Viață (ECV) în analiza comparativă a mai multor rețete de beton rutier, cu scopul de a identifica soluții sustenabile pentru optimizarea compoziției acestora. Prin cuantificarea impacturilor de mediu



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



asociate fiecărei variante analizate, au fost evidențiate efectele diferitelor strategii de înlocuire a componentelor tradiționale cu materiale alternative, atât din perspectiva reducerii amprenteii ecologice, cât și din punct de vedere al fezabilității pentru implementare în practică inginerescă.

Aspecte semnificative rezultate din analiza comparativă

- **Înlocuirea cimentului cu silice:** Deși teoretic promițătoare, această strategie nu conduce în mod automat la o reducere a impactului total de mediu. Impacturile se redistribuie între categorii, unele (precum schimbările climatice) fiind reduse, dar altele (în special cele legate de toxicitate) cresc semnificativ. Aceasta sugerează că utilizarea silicei trebuie făcută cu discernământ, în funcție de contextul aplicației și al priorităților de mediu.
- **Creșterea cantității de ciment** în rețetă are un efect clar de creștere a impacturilor de mediu în toate categoriile, însă această creștere este relativ moderată. Totuși, având în vedere rolul major al cimentului în generarea de emisii de CO₂, este recomandabil ca rețetele să fie optimizate spre o dozare minimă acceptabilă din punct de vedere tehnic.
- **Înlocuirea agregatelor de balastieră cu agregate de carieră** determină o ușoară creștere a impacturilor (1,2 – 32%), în special în categoriile de impact asociate cu consumul energetic (radiații ionizante, apă). Această constatare evidențiază importanța unui model mai detaliat al fluxurilor de energie din cariere, dar și al tipului de echipamente utilizate, pentru o evaluare mai fidelă.
- **Utilizarea cenușii de termocentrală în locul cimentului** oferă beneficii clare și cuantificabile în toate categoriile de impact analizate. Beneficiile sunt direct proporționale cu cantitatea înlocuită, fiind cele mai evidente în categoriile de toxicitate și utilizare a terenului, datorită evitării depozitării deșeurilor industriale. În plus, această soluție este în perfectă concordanță cu principiile economiei circulare.
- **Substituirea agregatelor naturale cu zgură de oțelărie** aduce beneficii de mediu importante, în special în ceea ce privește toxicitatea și impactul asupra resurselor de apă. Integrarea zgurii în structura betonului imobilizează substanțele poluante care, altfel, ar fi putut ajunge în mediu prin levigare din depozitele de deșeuri.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Implicarea pentru practica inginerescă – soluții și recomandări

Rezultatele acestui studiu oferă informații esențiale pentru proiectarea ecologică a structurilor rutiere, dar și pentru alte aplicații ingineresti, inclusiv în domeniul **consolidării structurilor din zidărie**, acolo unde materialele ecologice devin tot mai relevante. Utilizarea betonului cu conținut redus de ciment, adaosuri industriale sau agregate reciclate poate contribui nu doar la scăderea amprente de carbon, ci și la obținerea unor soluții economice și sustenabile.

Exemplu aplicabil: În lucrările de reabilitare a infrastructurii rutiere sau în proiecte de consolidare a zidăriilor cu centuri și diafragme din beton armat, rețele optimizate cu cenușă de termocentrală sau zgură pot fi utilizate ca alternativă durabilă, cu impact redus asupra mediului și cu beneficii structurale comparabile.

Limitări și precauții

- Validitatea rezultatelor este condiționată de calitatea datelor de inventar și de ipotezele de modelare. Procesarea incompletă a unor materiale sau surse poate introduce incertitudini în interpretarea rezultatelor.
- Impacturile sociale și economice ale utilizării acestor materiale secundare nu au fost incluse în această etapă, necesitând o analiză LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) completă.
- Trebuie asigurată compatibilitatea tehnică a materialelor alternative cu performanțele structurale cerute în domenii sensibile, precum infrastructura rutieră sau consolidarea seismică.

Concluzii generale

- ECV este un instrument valoros pentru optimizarea compoziției betonului din perspectiva performanței de mediu.
- Cimentul rămâne componenta cu cel mai ridicat impact ecologic; reducerea utilizării sale este esențială.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



- Materialele secundare precum cenușa de termocentrală și zgura de oțelărie au un potențial semnificativ de reducere a impacturilor, dacă sunt utilizate în condiții tehnice și de siguranță adecvate.
- Alegerea sursei agregatelor trebuie făcută în baza unei evaluări integrate a impactului energetic și ecologic al extracției și prelucrării.

Recomandări pentru practică și politici

- **Integrarea criteriilor de mediu** în normativele de proiectare a betonului, nu doar a celor de performanță mecanică.
- **Extinderea bazelor de date locale** pentru ECV, care să reflecte cu acuratețe condițiile specifice ale industriei din România.
- **Incurajarea prin politici publice și stimulente fiscale** a utilizării materialelor secundare în construcții, prin scheme de tip „green procurement”.
- **Colaborare interdisciplinară** între ingineri, cercetători și decidenți politici pentru implementarea scalabilă a soluțiilor de beton ecologic.



CAPITOLUL 7 – CONCLUZII FINALE

Încă din secțiunea introductivă am subliniat faptul că traficul intens, variațiile de climă și condițiile hidrogeologice, în combinație cu impactul continuu al traficului rutier, contribuie la degradarea treptată a structurilor rutiere. Am arătat că toate aceste structuri își pierd gradual capacitatea de a suporta sarcinile pentru care au fost inițial proiectate, ajungând până la un punct critic din perspectiva siguranței în utilizare. Pentru a contracara această deteriorare, este necesară realizarea sistematică a lucrărilor de întreținere sau reabilitare pentru a asigura că drumurile pot susține traficul prezent și pe cel viitor.

În construcția drumurilor se pot folosi rețete de beton în care se pot include materiale locale și ecologice. Astfel, pe baza literaturii de specialitate am arătat că folosirea acestor materiale implică un consum energetic redus în comparație cu opțiunile bazate pe bitum, scade costurile de producție și crește eficiența generală. Din aceste considerente, în demersul de cercetare prezent am pornit de la premisa că adoptarea structurilor rutiere rigide din beton, care folosesc agregate naturale locale, este o soluție cost-eficientă și reprezintă o alternativă practică pentru îmbunătățirea drumurilor locale și industriale.

Astfel scopul final al acestui capitol este acela de a sintetiza concluziile cercetării și de a nuanța contribuțiile personale aduse în plan aplicat sferei de cuprindere a betoanelor rutiere. Pe baza elementelor identificate pe parcursul cercetării se vor emite în final o serie de propuneri de valorificare a cercetărilor, care se doresc a se constitui drept punct de plecare pentru cercetările ulterioare în acest domeniu.

7.1. Concluzii generale

Utilizarea betonului ecologic în infrastructura rutieră reprezintă o abordare inovatoare și responsabilă față de mediul înconjurător, cu scopul de a reduce impactul negativ al industriei construcțiilor. Proiectul de față a evaluat în profunzime proprietățile fizice, mecanice și de



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IASI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



durabilitate ale betonului ecologic, cu un accent deosebit pe optimizarea compozițiilor și pe evaluarea performanței acestuia în condiții reale de exploatare.

Studiul a debutat cu o investigație detaliată a compozițiilor diverse de beton ecologic, utilizând aditivi precum cenușa zburătoare și silica ultrafină pentru a înlocui parțial cimentul tradițional. Rezultatele au indicat că, deși introducerea aditivilor ecologici reduce în general densitatea betonului, aceasta nu compromite în mod necesar proprietățile structurale esențiale. Mai mult, s-a observat că betonul cu un conținut mai mare de ciment își păstrează performanțele mecanice robuste chiar și cu procente crescute de aditivi. Aceste rezultate subliniază potențialul de a echilibra sustenabilitatea cu performanța structurală, ceea ce este crucial pentru aplicațiile în infrastructura rutieră.

Testele mecanice au relevat că betonul ecologic poate atinge sau chiar depăși rezistența betonului tradițional, în funcție de tipul și cantitatea de aditivi utilizați. Deși adăugarea de aditivi poate conduce la o scădere ușoară a rezistenței la compresiune, ajustările fine ale mixturii au permis obținerea unor rezultate care satisfac cerințele standardelor de construcție. Aceasta demonstrează capacitatea betonului ecologic de a funcționa eficient sub sarcini grele și de a rezista în condiții de trafic intens, un criteriu esențial pentru materialele utilizate în pavarea drumurilor.

Pe parcursul încercărilor efectuate, Betonul ecologic a arătat o durabilitate impresionantă în fața ciclurilor de îngheț-dezghet și a expunerii la agenți chimici agresivi, două dintre cele mai provocatoare teste pentru materialele de construcție rutieră. Aceste caracteristici indică o longevitate extinsă a drumurilor construite cu beton ecologic, reducând astfel nevoia de reparații frecvente și costurile asociate cu întreținerea. Astfel, s-a observat că betonul ecologic nu doar că susține obiectivele de durabilitate ecologică, dar oferă și avantaje economice substanțiale pe termen lung.

Adoptarea betonului ecologic în proiectele de infrastructură contribuie semnificativ la reducerea amprente de carbon a sectorului construcțiilor. Utilizarea materialelor reciclate și reducerea dependenței de resursele naturale finite sunt pași importanți către o industrie de construcții mai verde și mai sustenabilă. Pe lângă beneficiile directe ale diminuării poluării și conservării resurselor, am observat că betonul ecologic oferă totodată și o oportunitate însemnată de a educa și de a angaja comunitățile în practici de construcție responsabile.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI

FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII

BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



Cercetarea a demonstrat așadar că betonul ecologic reprezintă nu doar o alternativă viabilă, ci și o necesitate pentru un viitor sustenabil în construcții. Astfel se poate statua că eforturile continue de optimizare și inovare în acest domeniu sunt esențiale pentru realizarea obiectivelor globale de durabilitate și pentru asigurarea unei calități superioare în infrastructura rutieră pe care ne bazăm zilnic.

7.2. Contribuții personale

Una dintre principalele contribuții personale a vizat dezvoltarea unor rețete de beton ecologic care să contribuie la optimizarea soluțiilor de beton utilizate în infrastructura rutieră, prin modificarea compozițiilor în scopul obținerii unui beton rutier ecologic. Acest proces a implicat selectarea atentă a materialelor, ajustarea proporțiilor și testarea amestecurilor pentru a evalua proprietățile fizice și mecanice.

Pe parcursul demersului de cercetare am consultat sub îndrumarea profesorului meu colaborator literatura de specialitate, normativele în vigoare și documentațiile specifice și am colaborat strâns cu experți în materiale de construcții pentru a alege aditivii ecologici optimi, pretabili pentru construcțiile rutiere. Astfel am optat pentru a folosi ca aditivi ecologici cenușa zburătoare și silicea ultrafină, întrucât cele două componente sunt mai puțin dăunătoare pentru mediu comparativ cu cimentul Portland tradițional. De asemenea, am condus experimente de laborator pentru a determina impactul acestor aditivi asupra densității, rezistenței la compresiune, rezistenței la întindere și durabilității betonului, asigurându-mă în același timp că rezultatele obținute sunt relevante pentru aplicațiile practice.

Contribuția mea în sfera de cercetare a continuat cu planificarea și executarea testelor mecanice și de durabilitate. Am proiectat și supervizat experimente care au măsurat rezistența la compresiune, încovoiere și despicare, precum și reacția la cicluri de îngheț-dezghet și expunerea la substanțe chimice corozive. Prin gestionarea riguroasă a acestor teste, am putut obține date precise care au demonstrat că betonul ecologic poate îndeplini cerințele de performanță necesare pentru infrastructura rutieră durabilă. Aceste rezultate sunt vitale pentru validarea practică a betonului ecologic și pentru încurajarea adopției sale în proiecte de construcție reală.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IASI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



O altă contribuție importantă a vizat analiza datelor colectate și redactarea rapoartelor detaliate în care am documentat în detaliu toate rezultatele obținute. Am utilizat diverse instrumente software pentru a interpreta rezultatele experimentelor, asigurându-mă că interpretările sunt bazate pe analize robuste. Rapoartele pe care le-am redactat includ recomandări bazate pe dovezi care atestă optimizarea compozițiilor de beton ecologic, contribuind astfel la literatura științifică și la procesul de cunoaștere în domeniu.

Nu în ultimul rând, am participat activ la demersul de cercetare căutând alături de profesorul meu îndrumător oportunități reale pentru a disemina cercetările realizate în mediul științific și pentru obținerea de feedback valoros în scopul îmbunătățirii cercetărilor în acest domeniu.

Contribuțiile mele la acest proiect au urmărit să reflecte un angajament profund față de avansarea științei materialelor și susținerea unui viitor mai sustenabil în industria construcțiilor. Prin aceste eforturi, personal îmi doresc să inspir și să motivez și alți cercetători și practicieni să exploreze și să adopte soluții ecologice în fabricarea și utilizarea betonului rutier.

7.3. Propuneri de valorificare a cercetărilor

Cercetările realizate în domeniul betonului ecologic au deschis noi perspective pentru îmbunătățirea sustenabilității în construcțiile rutiere. Valorificarea rezultatelor acestor cercetări poate aduce contribuții semnificative la inovarea în construcții, la protecția mediului și la eficiența economică. În cele ce urmează, voi propune mai multe direcții prin care cercetările noastre pot fi integrate și valorificate în practicile industriale, academice și în politici publice.

Unul dintre cele mai impactante moduri de valorificare a cercetărilor noastre este prin contribuția la elaborarea sau revizuirea standardelor naționale și internaționale pentru betonul ecologic. Prin colaborarea cu organisme de standardizare, putem asigura că noile rezultate sunt integrate în specificațiile tehnice care ghidează producția de beton și construcțiile rutiere.

În acest sens se pot nota cu titlu de propuneri de valorificare a prezentei cercetări următoarele demersuri:

a) Formularea de ghiduri – acest demers poate implica crearea de ghiduri pentru utilizarea aditivilor ecologici în beton, care să includă proporții recomandate, metode de testare și evaluare a performanței;



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



b) Actualizarea normelor existente – un astfel de demers poate implica integrarea rezultatelor testelor de durabilitate și mecanice în normele existente pentru a reflecta potențialul și limitările betonului ecologic.

c) Implementarea soluției propuse în cadrul cercetării în diverse proiecte "Pilot" – un astfel de demers presupune valorificarea practică a cercetărilor prin implementarea rezultatelor în diverse proiecte pilot, care pot servi ca studii de caz pentru evaluarea practică a betonului ecologic sub diverse condiții de trafic și climatice.

Totodată, ca parte a demersului de valorificare a cercetărilor efectuate se pot reține următoarele propuneri:

a) Dezvoltarea unor parteneriate cu autoritățile locale – sub acest aspect se poate nota cu titlu de propunere, colaborarea cu autoritățile locale și naționale pentru a include betonul ecologic în proiecte de infrastructură rutieră, cum ar fi drumuri, poduri și parcuri;

b) Monitorizarea performanței – un astfel de demers poate presupune spre exemplu extinderea încercărilor efectuate în cadrul acestui studiu prin aplicarea rețetelor propuse și instalarea de senzori pe structurile obținute pentru realizarea de observații periodice; astfel se poate monitoriza comportamentul betonului ecologic în timp real și se pot acumula date valoroase pentru viitoare cercetări și optimizări.

c) Educație și formare în sensul utilizării materialelor ecologice în infrastructurile mari - diseminarea cunoștințelor acumulate este esențială pentru adoptarea pe scară largă a inovațiilor. Astfel, în opinia personală, educația și formarea inginerilor, constructorilor și decidenților în utilizarea betonului ecologic poate accelera adopția acestuia.

În sensul dezvoltării demersurilor de educație și formare publică în scopul utilizării materialelor ecologice în infrastructurile rutiere propunem următoarele demersuri:

☐ Inițierea unor programe de formare – un astfel de demers implică organizarea de workshopuri, seminarii și cursuri pentru profesioniștii din industria construcțiilor, concentrându-se pe avantajele și tehnicile de aplicare ale betonului ecologic.

☐ Realizarea de materiale educaționale – presupune dezvoltarea de materiale educaționale și module de e-learning care să fie accesibile pentru studenți și profesioniști interesați de construcții sustenabile.



UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII BETOANE ECOLOGICE UTILIZATE ÎN TEHNICA RUTIERĂ



□ Promovarea soluțiilor identificate în cadrul studiului – militarea pentru betonul ecologic și promovarea unor astfel de soluții poate influența politicile publice și poate stimula cererea de materiale de construcție sustenabile. De altfel este foarte importantă colaborarea cu organizații de mediu, asociații industriale și entități guvernamentale pentru a se promova utilizarea betonului ecologic, promovându-se astfel de soluții în mediul de afaceri.

Nu în ultimul rând, considerăm de o importanță majoră continuarea cercetărilor, în scopul îmbunătățirii continue a soluțiilor pentru betonul rutier ecologic. Colaborările între universități, institute de cercetare și companii din industria construcțiilor pot avea drept rezultat inovații notabile în acest domeniu.

Prin urmare, așa cum am observat în cadrul acestui studiu, betonul rutier ecologic reprezintă o soluție inovatoare viabilă pentru viitorul construcțiilor, în contextul în care nevoia de protejare a mediului înconjurător a devenit o problemă tot mai stringentă a societății moderne. Identificarea unor soluții optime atât din punct de vedere al rezistenței și al durabilității cât și din punct de vedere al impactului asupra mediului înconjurător este imperios necesară pentru asigurarea unui climat sustenabil pentru generațiile următoare.

Valorificarea cercetărilor privind betonul ecologic are potențialul de a transforma industria construcțiilor, oferind soluții inovatoare care sunt atât performante, cât și respectuoase față de mediu. Prin implementarea strategică a acestor propuneri se poate înlesni tranziția către practici de construcție mai sustenabile și poate contribui semnificativ la obiectivele globale de dezvoltare durabilă.



BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- ASRO. (2001). SR EN 667:2001 – Agregate naturale și piatră prelucrată pentru lucrări de drumuri. Condiții tehnice de calitate. București: Asociația de Standardizare din România.
- Babor, D. T., Isopescu, D. N., Petrescu, T. C., & Covatariu, D. (2021). Low-Permeability Ecological Concrete Mix, By Means of Employing Several Active Admixtures. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section, 67(3), 23-34
- Barbu, A. M. (2022). Dezvoltarea durabilă a infrastructurii rutiere prin utilizarea betonului autoreparator pentru reducerea impactului negativ asupra mediului. In *Lucrările conferinței de cercetare în construcții, economia construcțiilor, urbanism și amenajarea teritoriului* (pp. 15-26). INCUB URBAN-INCERC
- Blaj A.L. (2006). Contribuții cu privire la depozitarea și neutralizarea reziduurilor menajere- Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara.
- Căpățână C., Racoreanu C. (2003), Deșeuri; Editura Matrix Rom, Bucuresti.
- Heidelberg. (2021). Agregate – Manual de utilizare (p. 5). București. Referință la standard: BS EN 12620:2013 – Agregate pentru beton.
- Nicula, L. M., Manea, D. L., Simedru, D., Cadar, O., Ardelean, I., & Dragomir, M. L. (2023). The Advantages on Using GGBS and ACBFS Aggregate to Obtain an Ecological Road Concrete. *Coatings*, 13(8), 1368
- Pantiru, A., **Luca, B. I.**, & Barbuta, M. (2023). Experimental Study of Mixture Proportions and Fresh Properties of Concrete with Fly Ash and Silica Fume as a Replacement for Cement for 3D Printing. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(9), 1647–1653.
- Parlamentul European & Consiliul Uniunii Europene. (2008). Directiva 2008/98/CE privind deșeurile și de abrogare a anumitor directive. *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene*, L 312, 3–30.
- Parlamentul României. (1995). Legea nr. 137/1995 privind protecția mediului. *Monitorul Oficial al României, Partea I*, nr. 304 din 30 decembrie 1995, cu modificările și completările ulterioare.
- Sococol, I., Mihai, P., Petrescu, T., & **Luca, B.** (2022). The effects of Architectural-Structural Non-Conformance of the reinforced concrete frame buildings in the preliminary seismic design Stage (State of the Art). *Buletinul Institutului Politehnic "Gheorghe Asachi" Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură*, 68(3), 41–64. â
- Sococol, I., Mihai, P., Petrescu, T.-C., Nedeff, F., Nedeff, V., Agop, M., & **Luca, B.-I.** (2022). Numerical Study Regarding the Seismic Response of a Moment-Resisting (MR) Reinforced Concrete (RC) Frame Structure with Reduced Cross-Sections of the RC Slabs. *Buildings*, 12(10), 1525.
- Toader, T.N. (2023). Stabilirea specificației betonului de ciment proaspăt și întărit conform SR EN 206-1. Ediția a 2-a revizuită și actualizată. UTPRESS, Cluj-Napoca, ISBN 978-606-737-632-6