

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT
***“CONTRIBUȚII LA CERCETAREA MIXTURILOR ASFALTICE
PE CRITERII DE PERFORMANȚĂ”***

Conducător de doctorat
Prof. Univ. Dr. Ing. Carmen Răcănel

Doctorand
Ing. Roxana-Daniela Ungureanu (căs. Dermengiu)

2025

1. INTRODUCERE. Necesitatea și oportunitatea privind tema tezei de doctorat

Lucrarea de doctorat abordează problematica proiectării pe criterii de performanță a mixturilor asfaltice, un domeniu aflat în plin proces de armonizare a normativelor românești (AND 605) cu standardele europene (SR EN 13108-5). În contextul exigențelor crescânde privind durabilitatea și sustenabilitatea infrastructurii rutiere, teza evidențiază nevoia urgentă de a fundamenta tehnic și științific metode de caracterizare avansată, capabile să simuleze condițiile reale de trafic și climat din România.

Obiectivele specifice ale lucrării de doctorat sunt:

1. **Analiza prevederilor tehnice din AND 605 și SR EN 13108-5**, cu identificarea limitărilor actuale în evaluarea performanței mixturilor asfaltice în raport cu solicitările reale din trafic și cu variațiile de mediu (temperatură, umiditate, îmbătrânire).
2. **Studierea influenței tipului de bitum (simplu și modificat cu polimeri)** asupra comportamentului mecanic și termic al mixturilor asfaltice, cu aplicarea unor metode de testare de ultimă generație (TSRST, UTST, TCT, RT, UCTST).
3. **Evaluarea performanței mixturilor asfaltice la temperaturi scăzute**, utilizând metode reologice și structurale (BBR, DSR, Fraass, TSRST) pentru a determina temperatura critică de fisurare și comportamentul la contracție termică împiedicată.
4. **Investigarea efectului îmbătrânirii accelerate asupra liantului bituminos și a mixturilor**, prin aplicarea procedurii RTFOT, cu evaluarea impactului asupra parametrilor de rigiditate și temperatură de fisurare.
5. **Stabilirea de corelații între proprietățile fizico-mecanice și performanța mixturilor asfaltice**, în vederea formulării unor modele de predicție a comportamentului rutier pe baza rezultatelor de laborator.
6. **Formularea unor propuneri tehnice concrete pentru actualizarea cerințelor de performanță în normativul AND 605**, în special introducerea temperaturii de rupere TSRST ca parametru de selecție a mixturilor în funcție de clasa tehnică a drumului.

Lucrarea este structurată în șapte capitole majore, grupate în două părți distincte – o sinteză documentară care fundamentează teoretic și normativ tema cercetării și un studiu experimental, care validează în mod aplicat ipotezele formulate.

- **Capitolul 1 – Introducere. Necesitatea și oportunitatea temei:** evidențiază contextul actual al cercetării în domeniul mixturilor asfaltice, relevanța temei în cadrul infrastructurii rutiere moderne și argumentele privind direcția de cercetare aleasă.

Partea I: Sinteza documentară

- **Capitolul 2** prezintă noțiunea de performanță în contextul mixturilor asfaltice și definește caracteristicile cheie (materiale, compactare, condiții de mediu și de încărcare).
- **Capitolul 3** aprofundează analiza constituenților mixturii asfaltice, cu accent pe influența agregatelor, filerului, bitumului și modificatorilor asupra performanței mixturii asfaltice.
- **Capitolul 4** descrie principalele caracteristici fizico-mecanice folosite în evaluarea performanței: modul de rigiditate, rezistența la deformări permanente și la fisurare la temperaturi scăzute, completate de metode de încercare specifice și influența fiecărui component.

Partea a II-a: Studiu experimental

- **Capitolul 5** prezintă programul de cercetare de laborator, organizat pe etape de analiză a performanței materialelor componente, a influenței mediului și a traficului asupra comportamentului mixturilor asfaltice, precum și o analiză aplicată a conformității față de cerințele din normativul AND 605.
- **Capitolul 6** detaliază o modelare experimentală aplicată – studiul de caz – pentru analiza comportamentului la temperaturi scăzute. Sunt investigate prin încercări dinamice influențele bitumului, ale îmbătrânirii și ale condițiilor ambientale, folosind metode precum Fraass, BBR TSRST, UTST, RT, TCT și UCTST.
- **Capitolul 7** reunește concluziile finale, evidențiază contribuțiile originale ale cercetării, activitatea de diseminare și propune direcții viitoare pentru aprofundarea temei.

Bibliografia consultată cu scopul elaborării tezei de doctorat este prezentată la finalul lucrării și cuprinde un număr de 129 referințe bibliografice.

2. Descrierea noțiunii de performanță în cercetarea mixturilor asfaltice utilizate la drumuri

Capitolul 2 oferă o analiză detaliată a conceptului de **performanță** în contextul mixturilor asfaltice utilizate în infrastructura rutieră, subliniind atât abordările teoretice, cât și evoluția normativă și practică la nivel național și internațional.

Definirea performanței și relevanța sa în ingineria rutieră

La nivel global, peste 90% din mixturile asfaltice sunt folosite pentru construcția și reabilitarea drumurilor. Din această perspectivă, performanța mixturilor asfaltice este esențială pentru asigurarea durabilității, sustenabilității și siguranței infrastructurii. Aceasta este determinată de o multitudine de factori: compoziția materialelor, condițiile de punere în operă, solicitările din trafic și condițiile climatice.

Performanța este în mod tradițional evaluată prin caracteristici fizico-mecanice, obținute în laborator, însă abordarea modernă impune simularea condițiilor reale prin încercări accelerate, care permit alegerea rețetei optime. Accentul cade pe **corelarea între caracteristicile materialelor și comportamentul în exploatare**.

Factori determinanți ai performanței mixturilor asfaltice

a) Materialele

Componentele de bază – agregatele, filerul și bitumul – joacă roluri critice. Agregatele reprezintă până la 96% din amestec și influențează direct stabilitatea și compactabilitatea. Filerul contribuie la întărirea liantului și la umplerea spațiilor dintre agregate. Bitumul, liantul principal, poate fi simplu sau modificat, în funcție de cerințele de rezistență, durabilitate și comportament termic.

b) Aditivi și fibre

Pentru îmbunătățirea performanțelor, se folosesc aditivi și fibre (celuloză, poliester, minerale), care sporesc rezistența la oboseală, fisurare și orniere, crescând astfel durabilitatea și eficiența mixturilor.

c) Compactarea

Compactarea influențează în mod direct performanța, densitatea și impermeabilitatea mixturii. Este afectată de caracteristicile agregatelor, vâscozitatea bitumului, temperatura în timpul punerii

în operă și grosimea stratului rutier. Se utilizează diverse metode de laborator pentru simularea condițiilor din teren (compactare giratorie, prin impact, etc.).

d) Condițiile de mediu

Temperatura și umiditatea influențează vâscozitatea liantului și comportamentul general al mixturii. La temperaturi ridicate scade rigiditatea, cresc riscurile de deformații plastice (ornieraj), iar la temperaturi scăzute crește riscul de fisurare. Studiile citate arată o scădere semnificativă a rigidității pe măsură ce temperatura crește.

e) Condiții de încărcare

Traficul rutier, în special traficul greu, contribuie la apariția deformațiilor și a fisurilor. Rata de degradare este influențată de frecvența și intensitatea încărcării. S-a constatat că viteza vehiculului, presiunea la contact și temperatura au un impact major asupra performanței structurale.

Evaluarea pe criterii de performanță – cercetare și reglementări

Evaluarea modernă a mixturilor se face pe baza unor indicatori de performanță: rezistența la fisurare, rigiditate, rezistență la ornieraj, etc. La nivel internațional, standardele precum JTG H20-2007 (China) și cercetări recente propun modele de evaluare ce corelează datele de producție cu performanțele în exploatare.

Modelul CAM, microscopia electronică, sistemele automate de fotogrammetrie și senzorii WIM sunt instrumente moderne care oferă o imagine detaliată asupra comportamentului mixturilor.

Reglementări tehnice în România

În România, evaluarea mixturilor asfaltice este reglementată de **normativul AND 605** și de **seria de standarde SR EN 13108**, care stabilesc condițiile tehnice pentru materialele componente, metodele de testare și criteriile de acceptare. Sunt prevăzute tabele detaliate pentru agregate, filer, bitum și pentru mixtura finală, incluzând testele dinamice relevante (modul de rigiditate, rezistența la fluaj, oboseală etc.).

Tipurile de mixturi utilizate sunt clasificate în funcție de strat (uzură, legătură, bază) și sunt actualizate constant, ultima actualizare a normativului fiind în 2023. A fost introdus anrobatul bituminos cu asfalt recuperat și a fost eliminat betonul asfaltic rugos, indicând o tendință de optimizare a compoziției pe baza performanței.

Concluzii și sinteză comparativă

Performanța mixturilor asfaltice este o funcție complexă a mai multor parametri interdependenți: materiale, compoziție, metodă de compactare, condiții de mediu și solicitări mecanice. Evoluția normativelor (naționale și europene) reflectă această complexitate, trecând de la cerințe empirice la specificații bazate pe performanță.

Tendința actuală este de a folosi rețete optimizate prin testare în laborator, integrate cu simulări avansate ale comportamentului în condiții reale. Scopul este dezvoltarea unor mixturi asfaltice mai rezistente, mai durabile și mai sustenabile, adaptate condițiilor din România, dar compatibile cu cerințele internaționale.

3. Analiza constituenților mixturii asfaltice în vederea stabilirii nivelului de performanță

Capitolul 3 investighează, pe baze experimentale și bibliografice, influența fiecărui constituent (agregate, filler, liant, modificatori) asupra performanței mixturii asfaltice proiectate în laborator. Scopul este fundamentarea criteriilor de selecție și dozare a materialelor astfel încât rețeta aleasă să îndeplinească exigențele de rezistență, durabilitate și sustenabilitate impuse de normele europene și de condițiile rutiere din România.

Constituirea performanței – viziune generală

Performanța mixturii asfaltice rezultă din interacțiunea triadei:

1. Agregat – formează scheletul de rezistență;
2. Liant (bitum) – asigură coeziunea și rezistența la apă;
3. Interfața bitum–agregat – determină sensibilitatea la apă și rezistența la oboseală.

Pentru fiecare componentă se stabilesc parametri-cheie măsurabili în laborator, apoi se corelează cu tipurile de degradări dominante (ornieraj, fisurare termică, oboseală).

Agregatele – scheletul mecanic

- Compoziția granulometrică se evaluează prin cernere; forma curbei (log. d-% treceri) controlează compactabilitatea și volumul de goluri.
- Coeficientul de neuniformitate ($U_n = d_{60}/d_{10}$) servește la cuantificarea distribuției granulelor; U_n optim evită segregarea și asigură densitate ridicată.
- Forma și textura: particulele poliedrice conferă unghi de frecare intern mare; granulele lamelare/aciculare sunt indezirabile - provoacă fisurări sub trafic.

- Rezistența la fragmentare (LA, micro-Deval) indică durabilitatea sub uzură și impact.
- Volumul de goluri influențează simultan impermeabilitatea, rezistența la îngheț-dezghet, sensibilitatea la oboseală și deformății permanente.
- Curățenia agregatului (conținut de impurități < limitele SR EN 933) este esențială pentru adezivitate.

Concluzie: Agregatele trebuie selectate astfel încât să ofere schelet continuu, interblocare bună și rezistență la uzură, menținând totodată un volum de goluri compatibil cu cantitatea de liant disponibilă.

Filerul

- Rol dual: (i) completează curba granulometrică umplând micro-golurile; (ii) reacționează cu bitumul formând masticul.
- Influențe critice: finețea, mineralogia și reactivitatea chimică (pH) afectează vâscozitatea masticului, susceptibilitatea la temperatură și rezistența la umiditate.
- Raport filer/bitum – prag funcțional: la raport < 1 vâscozitatea crește moderat; peste 1 se formează sistem de densitate maximă (Rigden) ce rigidizează amestecul.
- Cercetările arată că filerul de var hidratat rigidizează cel mai eficient, dar îmbunătățește și rezistența la fisurare termică; filerul foarte fin crește necesarul de bitum.
- Utilizarea filerelor alternative (cenușă volantă, pudră de marmură, zgură granulată) poate reduce costurile și amprenta de CO₂, cu condiția controlului granulometric și chimic.

Concluzie: Optimizarea conținutului și tipului de filer este decisivă pentru echilibrul rigiditate–durabilitate al mixturii.

Bitumul – liant vâscoelastic

Proprietăți fundamentale

- Penetrație, punct de înmuiere, IP: descriu consistența și susceptibilitatea termică; valori IP între –1 și +0,7 oferă performanță echilibrată.
- Punct Fraass indică temperatura limită de fisurare la rece.
- Ductilitatea reflectă capacitatea de deformare la tracțiune – critică în zone reci și la rosturi.

Reologie

- Bitumul este material vâscoelastic: răspuns elastic instantaneu + elastic întârziat + componentă vâscoasă (curba fluaj).

- Structuri coloidale SOL / GEL / SOL-GEL (raport SARA) determină modul de curgere; conținutul de asfaltene crește vâscozitatea și reduce susceptibilitatea termică.

Modificatori și adaosuri

- Polimerii SBS (cea mai răspândită familie) cresc elasticitatea și rezistența la orniere; doza optimă depinde de penetrația bitumului de bază.
- Fibrele (celuloză, poliester, bazalt) aduc armare tridimensională, îmbunătățind oboseala și fisurarea la rece.
- Agenți pentru îmbunătățirea adezivității > 80 % la agregate hidrofile.
- Efectele vizate: rigidizare controlată la cald, elasticizare la rece, durată de viață extinsă fără penalizare a lucrabilității.

Proceduri de evaluare (pre-2015 → post-2015)

- Tranziția de la SR 174 (empiric) la AND 605 + SR EN 13108 a introdus încercări complexe (Rigiditate, Fluaj dinamic, TSRST, BBR) pentru simularea condițiilor reale (trafic, temperatură, umiditate).
- Liantul se caracterizează în paralel pe traseul proaspăt → RTFOT → PAV pentru a estima sensibilitatea la îmbătrânire.
- Corelarea rezultatelor de laborator cu sectoare pilot 1:1 validează modelele de predicție.

Sinteză și implicații pentru proiectarea rețetei optime

1. Agregate: alegere pe criterii de formă, curățenie și rezistență, asigurând un volum de goluri compatibil cu conținutul de liant.
2. Filer: dozare astfel încât raportul filer/bitum să maximizeze densitatea masticului fără a induce fragilitate.
3. Bitum: selectat după indicele de penetrație și modificatori pentru climatul și traficul vizat.
4. Testare de performanță: aplicarea setului complet de încercări dinamice și termice pentru calibrare; rezultatele se integrează în modelele de viață la oboseală și deformări permanente.

Rezultat așteptat: obținerea unei mixturi echilibrate – rigid la cald, flexibil la rece, rezistent la umiditate și îmbătrânire – capabil să satisfacă standardele europene și să prelungească durata de serviciu a drumurilor din România.

4. Caracteristici fizico-mecanice folosite în evaluarea performanțelor mixturii asfaltice pentru drumuri

Modulul de elasticitate, modulul de rigiditate și modulul complex

Evaluarea mixturilor asfaltice se bazează pe modulul de elasticitate, modulul de rigiditate și modulul complex. Modulul de elasticitate (E), sau modulul lui Young, este o constantă ce exprimă raportul dintre tensiunea aplicată și deformația rezultată într-un material elastic. Formula elaborată de L. Francken evidențiază că acest modul depinde de proporțiile agregatelor, bitumului și golurilor în mixtură.

Modulul de rigiditate exprimă comportamentul mixturilor în fața solicitărilor mecanice, depinzând de factori precum compoziția mixturii, gradul de compactare, temperatura și frecvența sarcinii. Testele arată că rigiditatea scade odată cu creșterea temperaturii și că un grad de compactare mai mare crește rigiditatea.

Modulul complex (E^*) descrie comportamentul vâscoelastic al mixturilor și include o componentă elastică (E') și una vâscoasă (E''). Reprezentările grafice prin diagramele Black și Cole-Cole permit o înțelegere detaliată a relației dintre aceste componente și condițiile de temperatură și trafic.

Evaluarea deformațiilor permanente ale mixturilor asfaltice

Deformațiile permanente sunt consecința comportamentului vâscoelastic și plastic al mixturilor asfaltice. Ele apar sub forma făgașelor pe urma roților, cauzate de trafic greu, temperaturi înalte, compactare insuficientă sau rețete de mixturi necorespunzătoare.

Se disting trei tipuri de deformații:

- Uzură – determinată de textura pneurilor și de stratul de uzură;
- Fluaj – rezultat al solicitărilor peste limita de stabilitate structurală;
- Deformații structurale – rezultate din subdimensionarea structurii rutiere.

Testele de laborator relevante sunt:

- Încercarea la compresiune ciclică (fluaj dinamic) – evaluează deformația acumulată în timp;
- Încercarea la ornieraj (wheel tracking) – măsoară adâncimea făgașelor sub sarcini repetate.

Factori cheie în prevenirea ornierajului sunt: conținutul optim de liant, volumul de goluri (ideal $\approx 3\%$), natura și forma agregatelor. Agregatele unghiulare, cu textură rugoasă, sporesc interblocarea și rezistența la deformare.

Rezistența la fisurare din oboseală și la temperaturi scăzute

Fisurarea din oboseală apare sub efectul ciclurilor de sarcini la temperaturi moderate. Ea este influențată de conținutul și tipul de bitum, volumul de goluri, tipul de agregate și metodele de compactare. O mixtură cu mai mult bitum și un volum redus de goluri prezintă o rezistență superioară la fisurare datorită distribuției uniforme a eforturilor.

Testele de laborator utilizate includ:

- Încercări de încovoiere în două, trei și patru puncte;
- Încercarea SCB pentru propagarea fisurilor;
- Încercări IDT pentru întindere indirectă.

Rezistența la temperaturi scăzute este esențială în prevenirea fisurării termice. Aceasta este testată prin metode precum UTST, TSRST, TCT, RT și UCTST. Liantul joacă un rol esențial, bitumurile moi și modificatorii polimerici îmbunătățind performanța mixturii.

De asemenea, fisurarea termică poate fi directă (sub -30°C) sau prin oboseală termică. Ea este influențată de rigiditatea și relaxarea liantului, coeficientul de dilatare termică și interacțiunea cu agregatele. Agregatele cu formă unghiulară și suprafață rugoasă oferă o mai bună aderență și reduc riscul de fisurare.

5. Programul de cercetare de laborator: evaluarea performanței mixturilor asfaltice

Programul de cercetare a fost conceput în conformitate cu normativul românesc AND 605-2016 și standardele europene SR EN 13108-5, concentrându-se pe evaluarea comportamentului mixturilor asfaltice în raport cu solicitările reale din trafic și condițiile climatice specifice României. Activitatea experimentală s-a desfășurat într-un laborator acreditat RENAR și a inclus încercări fizico-mecanice și reologice, pe epruvete realizate cu echipamente moderne.

Materiale utilizate

Au fost analizate mixturi asfaltice produse cu două tipuri de bitum:

- Bitum 50/70 (simplu)
- Bitum modificat cu polimeri (PMB 45/80-55)

Fiecare tip de mixtură a fost testat atât în stare proaspătă, cât și după îmbătrânire accelerată conform metodei RTFOT. Materialele au inclus agregate naturale concasate și filer mineral conform cerințelor tehnice.

Etapele cercetării experimentale

Etapa I – Evaluarea caracteristicilor materialelor componente:

- Determinarea granulozității și formeii agregatelor
- Analiza proprietăților liantului (penetrare, punct de înmuiere, elasticitate)

Etapa II – Evaluarea comportamentului mixturilor proaspete:

- Testarea gradului de compactare
- Determinarea rigidității și rezistenței la deformații permanente prin testele:
 - rigiditate
 - ornieraj
 - fluaj

Etapa III – Evaluarea influenței mediului și traficului:

- Simularea traficului și variațiilor de temperatură (0 °C, -10 °C, -20 °C)
- Încercări la fisurare la temperaturi scăzute: TSRST, Fraass, BBR

Metode de testare utilizate

Metode avansate:

- TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) – pentru determinarea temperaturii de fisurare
- BBR (Bending Beam Rheometer) – măsoară relaxarea tensiunilor în liant la temperaturi scăzute
- DSR (Dynamic Shear Rheometer) – analizează comportamentul reologic la temperaturi ridicate
- UTST și UCTST – teste de tracțiune uniaxială, pentru analiza rezistenței și a deformabilității

Metode tradiționale:

- Încercări Marshall – pentru evaluarea stabilității și fluajului mixturii
- Încercări de îmbătrânire RTFOT – pentru reproducerea modificărilor datorate proceselor de oxidare

Rezultate și interpretări

Rezultatele au evidențiat că:

- **Bitumul modificat (PMB)** conferă mixturilor o rigiditate crescută și o rezistență mai mare la deformare și fisurare, în special la temperaturi scăzute;
- **Îmbătrânirea** prin RTFOT reduce semnificativ capacitatea de relaxare a tensiunilor, crescând riscul de fisurare termică;
- **Performanța la ornieraj** este mai bună la mixturile cu bitum modificat, acestea având o adâncime a fâgașului mai mică după cicluri repetate de solicitare;
- S-au înregistrat corelații clare între **proprietățile fizico-mecanice** și **temperatura critică de fisurare**, ceea ce validează aplicabilitatea testelor TSRST și BBR în proiectarea pe criterii de performanță.

Concluzii intermediare

Activitatea experimentală din capitolul 5 a validat:

- Necesitatea utilizării testelor avansate pentru proiectarea mixturilor asfaltice;
- Importanța adaptării rețetelor la condițiile climatice locale;
- Eficiența bitumului modificat pentru drumurile cu solicitări ridicate;
- Posibilitatea includerii parametrului „temperatura de rupere TSRST” în normativul AND 605 ca criteriu tehnic de selecție a mixturilor.

6. Modelare experimentală aplicată: analiza comportamentului la temperaturi scăzute

Cercetarea a vizat investigarea comportamentului mixturilor asfaltice la temperaturi scăzute, folosind o abordare complexă și multidimensională care integrează metode avansate de testare. Scopul principal a fost determinarea performanței termice și mecanice a mixturilor, în special capacitatea lor de a rezista fisurării în condiții climatice severe.

Obiective și metodologie

Studiul a avut ca obiective:

- Evaluarea rezistenței la fisurare la temperaturi negative;
- Determinarea rigidității și capacității de relaxare a tensiunilor interne;
- Compararea performanțelor mixturilor cu bitum standard și modificat;

- Investigarea influenței îmbătrânirii accelerate asupra comportamentului la frig.

Au fost analizate două tipuri de mixturi: una cu bitum 50/70 și alta cu bitum modificat PMB 45/80-55. Încercările au fost efectuate atât pe epruvete neîmbătrânite, cât și îmbătrânite prin procedura RTFOT.

Metode de încercare utilizate

TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test)

Testul a simulat contractarea termică restricționată a mixturii. A permis măsurarea temperaturii de rupere și a tensiunilor interne generate de răcirea controlată. Epruvetele au fost răcite de la 20 °C la -30 °C cu o rată de 10°C/h. S-au determinat temperatura critică de fisurare (T_{cr}) și valoarea maximă a tensiunii.

Fraass – punctul de fragilitate al bitumului

Metodă clasică care stabilește temperatura minimă la care liantul rămâne flexibil.

BBR (Bending Beam Rheometer)

A măsurat capacitatea de relaxare a liantului la -12°C, -18°C și -24°C. Parametrii cheie: modulul de rigiditate (S) și rata de relaxare (m).

DSR (Dynamic Shear Rheometer)

A oferit informații asupra comportamentului reologic al bitumului, în special capacitatea de a rezista fisurării în regim vâscoelastic.

UTST (uniaxial tension stress test)

A evaluat rezistența mixturii la tracțiune axială la temperaturi scăzute, evidențiind influența îmbătrânirii asupra rezistenței.

Rezultate și interpretări

TSRST

Mixturile cu bitum modificat au prezentat o temperatură critică de fisurare semnificativ mai mică ($\approx -23,5^{\circ}\text{C}$) comparativ cu cele cu bitum simplu ($\approx -17,5^{\circ}\text{C}$), indicând o mai bună flexibilitate la frig. Tensiunea maximă la fisurare a fost mai mare pentru PMB, confirmând o capacitate mai bună de rezistență.

Fraass

Bitumul modificat a avut un punct de fragilitate inferior ($\approx -24^{\circ}\text{C}$), în timp ce bitumul 50/70 a fisurat la $\approx -17^{\circ}\text{C}$.

BBR

Rezultatele au indicat că liantul PMB îndeplinește criteriile de performanță pentru toate cele trei

temperaturi analizate, în timp ce bitumul 50/70 a depășit limitele la -24°C . După îmbătrânire, ambii lianți și-au pierdut din capacitatea de relaxare, dar PMB a păstrat o performanță mai bună.

DSR

Bitumul modificat a arătat o comportare vâscoelastică mai echilibrată, cu un unghi de fază mai apropiat de comportamentul ideal pentru drumuri solicitate.

UTST

Mixturile cu PMB au prezentat o rezistență crescută la tracțiune axială, menținându-și integritatea structurală chiar după îmbătrânire. Cele cu bitum standard au arătat o scădere bruscă a performanței.

Analiza comparativă și concluzii intermediare

- Mixturile cu **bitum modificat PMB** au demonstrat performanțe superioare la temperaturi scăzute, atât în termeni de **flexibilitate**, cât și de **rezistență mecanică**.
- **Îmbătrânirea accelerată** are un impact semnificativ asupra comportamentului la frig, însă PMB compensează mai bine aceste efecte.
- Introducerea testului **TSRST** ca metodă standard în normativul AND 605 este justificată, datorită relevanței sale în simularea comportamentului real al drumurilor.

Contribuții originale și implicații practice

- Teza propune un cadru de testare integrat, multidisciplinar, adaptat condițiilor climatice românești;
- Oferă **date concrete** pentru fundamentarea actualizării normativului AND 605;
- Recomandă **clasificarea mixturilor asfaltice** și în funcție de temperatura critică de fisurare, nu doar în funcție de fluaj și orniereaj.

7. Concluzii finale, contribuții originale, diseminarea informațiilor și direcții viitoare de cercetare

Concluzii generale ale cercetării

Teza a urmărit evaluarea performanței mixturilor asfaltice printr-o abordare complexă, centrată pe determinarea unui indice de performanță ce permite selecția rețetelor optime în faza de proiectare în laborator. Scopul principal a fost de a corela caracteristicile fizico-mecanice cu comportamentul în exploatare al mixturilor asfaltice.

Analiza documentară a identificat principalele mecanisme de degradare ale îmbrăcăminților rutiere (făgașe, fisurare la oboseală și la temperaturi scăzute), iar studiul experimental a testat 5 tipuri de bitum din două surse și două tipuri de agregate, cu și fără adaosuri de polimeri.

Rezultate relevante din testările experimentale

- **Modulul de rigiditate** este influențat de consistența bitumului și de frecvența solicitării: este mai mare la solicitări de scurtă durată și temperaturi scăzute.
- **Bitumurile modificate** cu polimeri oferă o rigiditate inițială mai mică, dar o **vâscozitate mai ridicată**, stabilitate Marshall superioară și **performanțe mai bune la temperaturi negative**.
- **Agregatele din sursa Y**, deși mai puțin rezistente la uzură, au condus la o rigiditate crescută a mixturilor.
- **Deformațiile permanente** sunt mai mici la temperaturi scăzute (40 °C vs 50 °C – diferență de cca 27%).
- Mixturile cu **bitum 70/100 sau PMB** au rezistat la fisurare până la -33 °C...-37 °C, față de -25 °C...-26 °C pentru bitumul 50/70.

Propuneri pentru actualizarea normativului AND 605

- Introducerea testului **TSRST** și a temperaturii minime de fisurare (Trupere) ca **criterii de selecție** a mixturilor asfaltice.
- Pentru drumurile de clasa I/II: Trupere ≥ -25 °C
- Pentru drumurile de clasa III/IV: Trupere ≥ -20 °C
- Revizuirea metodelor de încercare, temperaturilor de referință și condițiilor de îmbătrânire impuse în AND 605.

Contribuții științifice originale

- **Calcularea unor indici de performanță** pentru fiecare caracteristică fizico-mecanică, integrați într-un sistem multicriterial de evaluare.
- **Utilizarea avansată și comparativă** în România a testelor TSRST, UTST, TCT, RT și UCTST pentru evaluarea mixturilor asfaltice.
- **Corelare reologică între bitum și mixtură**: legături directe între parametrii DSR/BBR și comportamentul TSRST, cu un model predictiv validat statistic ($R^2 = 0,84$).
- **Formularea unei propuneri concrete** pentru revizuirea normativului AND 605 privind comportamentul la temperaturi scăzute.

- **Implementarea echipamentului TSRST** și dezvoltarea de proceduri de testare standardizate în cadrul CESTRIN.

Diseminarea rezultatelor

Rezultatele au fost diseminate prin prezentări la conferințe și articole în reviste de profil. Printre cele mai relevante se numără participarea la:

- CETRA 2018, Zadar, Croația;
- Congresul Național de Drumuri și Poduri, Iași;
- Revista „Drumuri - Poduri”;
- Conferințe ale Școlii Doctorale UTCB.

Direcții viitoare de cercetare

1. **Evaluarea îmbătrânirii pe termen lung (PAV)** pentru corelarea cu comportamentul în teren;
2. **Testări pe sectoare experimentale de drum**, pentru validarea în condiții reale;
3. **Studiul mixturilor sustenabile** cu polimeri reciclați sau aditivi ecologici;
4. **Analiza combinată temperatură–umiditate**, relevantă pentru clima continentală;
5. **Metode alternative de îmbătrânire accelerată** mai apropiate de realitate;
6. **Integrarea parametrilor de laborator în dimensionarea rutieră**;
7. **Revizuirea completă a normativului AND 605** în acord cu practicile europene și rezultatele cercetării recente.