

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
Specializarea Căi de Comunicații, Poduri și Tunele

Rezumatul tezei de doctorat

MIXTURI ASFALTICE ECOLOGICE CU ADAOS DE COMPUȘI OBȚINUȚI PRIN PRELUCRAREA DEȘEURILOR INDUSTRIALE

Doctorand

Ing. Cătălina Georgiana LIXANDRU

Conducător științific

Prof.univ.dr.ing. Mihai DICU

BUCUREȘTI
2019

CUPRINS

1. INTRODUCERE ÎN SUBIECTUL TEZEI	1
1.1. Necesitatea și actualitatea temei de cercetare	1
1.2. Obiectivele tezei de doctorat.....	1
1.3. Structura tezei de doctorat	1
PARTEA - SINTEZĂ DOCUMENTARĂ	
2. CONCEPTUL MIXTURILOR ASFALTICE CU DEȘEURI INDUSTRIALE	2
2.1. Noțiuni generale	2
2.2. Posibilități de utilizare a deșeurilor industriale în mixturi asfaltice ecologice..	2
2.2.1. Utilizarea agregatelor artificiale în mixturi asfaltice	2
2.2.1.1. Cercetare la nivel național	2
2.2.1.2. Cercetare la nivel mondial.....	3
2.2.2. Utilizarea pulberilor provenite din deșeuri industriale în mixturi asfaltice..	3
2.2.2.1. Cercetare la nivel național.....	3
2.2.2.2. Cercetare la nivel mondial.....	3
2.2.3. Utilizarea lianților bituminoși modificați cu deșeuri industriale și a bio- uleiului în mixturi asfaltice.....	3
2.2.3.1. Cercetare la nivel național	3
2.2.3.2. Cercetare la nivel mondial.....	4
2.2.3.3. Utilizarea bio-uleiului ca înlocuitor al liantului bituminos în mixturi asfaltice	4
2.2.4. Mixturi asfaltice reciclate	4
2.2.4.1. Cercetare la nivel național.....	4
2.2.4.2. Cercetare la nivel internațional	4
3. PROIECTAREA COMPOZIȚIILOR DE MIXTURĂ ASFALTICĂ CU DEȘEURI INDUSTRIALE.....	5
3.1. Elaborarea dozajelor mixturilor asfaltice.....	5
3.2. Metode de proiectare a compoziției mixturilor asfaltice	5
3.2.1. Metoda suprafeței specifice.....	5
3.2.2. Metoda volumului de goluri	5
3.2.3. Metoda Laboratorului Central de Cercetări Rutiere din Bruxelles.....	6
3.2.4. Metoda Asphalt Institute	6
3.2.5. Metoda Kraemer	6

3.2.6. Metoda de determinare a dozajului de liant pentru mixturi asfaltice executate la rece	6
3.2.7. Metoda Marshall.....	6
3.2.8. Metoda volumetrică.....	6
4. EVALUĂRI EFECTUATE CU SCOPUL UTILIZĂRII UNOR DEȘEURI INDUSTRIALE ÎN MIXTURI ASFALTICE.....	7
4.1. Deșeuri industriale utilizate în compoziția mixturilor asfaltice.....	7
4.2. Zgurile metalurgice	7
4.3. Cenușa de termocentrală	7
4.4. Sulfatul de calciu	7
4.5. Șlamul uzinelor sodice	7
PARTEA A II-A - STUDIU EXPERIMENTAL DE LABORATOR	
5. STUDII ȘI CERCETĂRI EFECTUATE ÎN LABORATOR.....	8
5.1. Studii de laborator asupra materialelor utilizate în partea experimentală.....	8
5.1.1. Evaluare asupra pulberilor minerale provenite din deșeuri industriale	8
5.1.1.1. Rezultate obținute în urma studiilor de laborator asupra pulberilor	9
din deșeuri industriale	9
5.1.1.2. Interpretare rezultate și concluzii parțiale	10
5.2. Înlocuirea agregatelor naturale cu agregate din zgură în compoziția mixturilor asfaltice	10
5.2.1. Proiectare în laborator a dozajului de mixtură asfaltică ecologică din strat de bază cu utilizarea agregatelor artificiale.....	11
5.2.2. Studii de laborator - înlocuire agregate naturale cu agregate artificiale în procent din agregat total	11
5.2.2.1. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale	11
5.3. Proiectarea compoziției martor de mixtură asfaltică în strat de legătură.....	12
5.3.1. Studii de laborator –înlocuire agregate naturale cu agregate artificiale în procent din agregat total	12
5.3.1.1. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale	12
5.4. Utilizarea filerelor din deșeuri industriale în compoziția mixturii asfaltice AB cu agregate artificiale din zgură.....	13
22,4	
5.4.1. Înlocuirea pulberilor din deșeuri industriale în compoziția mixturii asfaltice AB 22,4	14
5.4.1.1. Rezultate obținute în urma studiilor de laborator asupra mixturii asfaltice ecologice cu agregate artificiale și filere din deșeuri industriale	14
5.4.1.2. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale pentru utilizare agregate artificiale și filere din deșeuri industriale în strat de bază.....	14
5.4.2. Studii complexe de laborator pe dozaj optim cu deșeuri industriale.....	15

5.4.2.1. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale	16
5.5. Proiectare mixtură asfaltică tip BA 16 din strat de uzură cu filer din șlam	17
5.5.1. Studii de laborator asupra agregatelor din compoziția mixturii asfaltice ...	17
5.5.2. Încercări în regim dinamic asupra dozajului martor optim	17
5.5.3. Proiectare dozaj BA 16 cu filere din deșeuri industriale	18
5.5.4. Încercări de laborator pe dozajele proiectate BA 16 cu filere din deșeuri industriale	18
5.5.4.1. Interpretare rezultate și concluzii parțiale	19
5.5.5. Proiectare dozaj BA 16 cu 75 % filer din șlam	20
5.5.6. Studii de laborator asupra dozajului BA 16 cu 75 % filer din șlam	20
5.5.7. Încercări dinamice pe mixtura asfaltică BA 16 cu filer din șlam	21
5.5.7.1. Interpretare rezultate și concluzii parțiale	23
6. INTERPRETARE FENOMENOLOGICĂ A COMPORTAMENTULUI MIXTURILOR ASFALTICE CU DEȘEURI INDUSTRIALE	24
6.1. Analiză comportamentală asupra filerelor evaluate.....	24
6.2. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de legătură	26
6.3. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de bază.....	27
6.4. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de uzură	31
7. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE	35
DE CERCETARE	35
7.1. Concluzii	35
7.2. Contribuții personale	38
7.3. Direcții viitoare de cercetare.....	39
BIBLIOGRAFIE	

Notă: Teza de doctorat prezentată în acest rezumat conține 7 capitole, 185 pagini, 143 figuri, 22 tabele, 14 relații matematice și 148 referințe bibliografice.

1. INTRODUCERE ÎN SUBIECTUL TEZEI

1.1. Necesitatea și actualitatea temei de cercetare

Având în vedere tendința de dezvoltare rapidă a rețelelor naționale de drumuri, se impune stabilirea unor principii de utilizare a deșeurilor industriale în proiectarea dozajelor de mixtură asfaltică. Intensa exploatare industrială a resurselor și degradarea continuă a mediului provocată de criza ecologică au condus la o soluție, și anume dezvoltarea durabilă - care are ca scop principal preservarea calității mediului înconjurător. (United Nations - General Assembly, 1987)

1.2. Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivul principal al tezei de doctorat constă în realizarea unor compoziții de mixtură asfaltică ecologice cu rezultate din punctul de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice care se încadrează în cerințele și limitele impuse în normativele în vigoare și care, în același timp, să contribuie la reintroducerea în uz a deșeurilor industriale, dar și să susțină mediul înconjurător. Obiectivele secundare ale acestei lucrări sunt reprezentate de studiul privind evaluarea posibilităților de înlocuire a agregatelor naturale cu agregate artificiale, precum și posibilitatea de înlocuire a fillerului de calcar cu pulberi din deșeurile industriale, înlocuind în compozițiile mixturilor asfaltice în diferite dozaje și diverse amestecuri cu scopul de a urmări cât mai optim influența acestora asupra comportamentului și proprietăților mixturilor asfaltice.

1.3. Structura tezei de doctorat

Capitolul 1 prezintă introducerea în subiectul tezei de doctorat, necesitatea și actualitatea temei de cercetare, enunțarea obiectivelor și o prezentare succintă a structurii tezei de doctorat.

Prima parte a tezei de doctorat reprezintă sinteza documentară efectuată, aceasta începe cu cel de-al doilea capitol care dezvoltă conceptul mixturilor asfaltice cu deșeurile industriale, analizând, pe rând, fiecare component din dozajul mixturii asfaltice clasice.

Capitolul 3 explicitează elaborarea dozajelor și modalitățile de proiectare a dozajelor de mixtură asfaltică în funcție de mai multe metode recunoscute și studiate la nivel mondial.

Capitolul 4 detaliază deșeurile industriale care urmează să fie utilizate în compoziția unor mixturi asfaltice în partea a 2-a a tezei de doctorat, în partea de studii de laborator.

Capitolul 5 reprezintă contribuția personală efectuată prin cercetare de laborator, începând cu analiza individuală asupra materialelor noi studiate din punctul de vedere al compoziției chimice, al caracteristicilor fizico-mecanice, apoi urmărindu-se înlocuirea totală sau parțială atât a agregatelor naturale, cât și a fillerului de calcar cu materiale provenite din prelucrarea deșeurilor industriale. Aceste evaluări au fost efectuate în mai multe laboratoare din București.

Capitolul 6 dezvoltă interpretarea fenomenologică a comportamentului mixturilor asfaltice cu deșeurile industriale urmărind rezultatele demonstrate în capitolul anterior.

În capitolul 7 sunt enumerate concluziile aferente întregului studiu de cercetare, urmate de precizări în care sunt expuse contribuțiile personale și aplicabilitatea lor, limitele cercetării și posibilele direcții ulterioare de cercetare. În final, teza de doctorat se încheie prin enumerarea tuturor referințelor bibliografice necesare efectuării acestui studiu de cercetare.

PARTEA 1 – SINTEZĂ DOCUMENTARĂ

2. CONCEPTUL MIXTURILOR ASFALTICE CU DEȘEURI INDUSTRIALE

2.1. Noțiuni generale

Utilizarea deșeurilor sau a materialelor secundare în locul materialelor naturale poate avea beneficii mari, cum ar fi cele economice și de mediu. Consumul de energie poate fi redus prin reutilizarea subproduselor în locul materialelor naturale. Riscurile asupra mediului pot fi reduse prin utilizarea de subproduse în loc de stocare a acestora. (Mehmet Saltan, et al., 2013)

2.2. Posibilități de utilizare a deșeurilor industriale în mixturi asfaltice ecologice

Ultimii ani au condus la elaborarea unui nou concept privind abordarea deșeurilor industriale bazându-se pe „încetarea statutului de deșeu”. Acest criteriu denumit „end of waste criteria” se bazează pe principiile ecologiei industriale și este promovat prin „Strategia tematică privind prevenirea și reciclarea deșeurilor” adoptat în anul 2007 de Comisia Europeană. Acest criteriu urmărește de fapt reducerea utilizării iraționale a resurselor, a nivelului poluării și a depozitelor de deșeuri și reprezintă un sistem bazat pe multidisciplinaritate care conduce la evaluarea complexului integrat om-sistem natural și concluzionează că deșeurile obținute dintr-o industrie pot deveni intrări ca materii prime pentru alte concluzii. (8th World Congress and Expo on Recycling, 2018)

2.2.1. Utilizarea agregatelor artificiale în mixturi asfaltice

În literatura de specialitate, pe plan național cât și internațional, se menționează mai multe soluții ce pot fi utilizate cu scopul de a îmbunătăți performanțele mixturilor asfaltice care au în compoziție diverse adaosuri de natură ecologică obținute prin reciclarea deșeurilor industriale.

2.2.1.1. Cercetare la nivel național

În România s-au efectuat studii pentru toate tipurile existente de zguri însă cererea de astfel de agregate la noi în țară rămâne încă mică, interesul este în special pentru granulometrie mică, sort 1.6/8, care reprezintă de asemenea o cantitate scăzută în structura rutieră. Încercările efectuate au demonstrat că pot fi utilizate agregatele din zguri pentru sortul 4/8 într-un procent de 25% într-o mixtură asfaltică. Prin acest studiu efectuat s-a demonstrat că se poate îmbunătăți cantitatea agregatelor din zgură de la 10% până la aproximativ 55-60%. (Diaconu Elena & Lazăr Ștefan Marian, 2009)

Programul de cercetare intitulat „Tehnologie integrată de preparare a mixturilor asfaltice compozite ecologice cu adaos de compuși obținuți prin prelucrarea deșeurilor industriale, pentru realizarea de structuri rutiere performante”(ecoasfalt)” a condus studiul către evaluarea posibilității de înlocuire a agregatelor naturale cu agregate din zgură într-un strat de bază, respectiv o mixtură asfaltică de tip AB 22,4. Analiza asupra caracteristicilor determinate ne demonstrează că cele mai bune rezultate s-au obținut în momentul în care s-a înlocuit cu agregate din zgură doar sortul 4/8 de agregate naturale (reprezentând 18 % din totalul agregatelor), iar situația cea mai defavorabilă a fost obținută în cazul înlocuirii tuturor sorturilor de agregate (ceea ce reprezintă 65 % din agregatul total utilizat la realizarea mixturii asfaltice). (CCMMM, et al., 2014)

2.2.1.2. Cercetare la nivel mondial

În Croația s-a studiat, la Universitatea din Zagreb, de către cercetătorii Praveen Mathew, Leni Stephen, Jaleen George, posibilitatea utilizării zgurilor siderurgice în producția mixturilor asfaltice, iar în urma numeroaselor încercări de laborator efectuate pe astfel de mixturi (comparație între proprietățile fizice pe agregate naturale și cele obținute din zgură; proprietăți fizico-mecanice ale mixturilor asfaltice cu zguri, comparativ cu cele clasice; fângășuire, rezistența la derapaj și textura suprafeței mixturilor asfaltice) și s-a concluzionat că zgurile utilizate în acest studiu pot înlocui cu succes agregatele naturale, precum și că evaluarea zgurilor au ca rezultate geometrice, fizice, mecanice și proprietăți mecanice care satisfac caracteristicile necesare pentru utilizarea lor în mixturile asfaltice. (Praveen Mathew, 2013)

2.2.2. Utilizarea pulberilor provenite din deșeuri industriale în mixturi asfaltice

2.2.2.1. Cercetare la nivel național

În România, Paul Marc a studiat în cadrul tezei de doctorat utilizarea cenușii de termocentrală în mixturi asfaltice și a ajuns la concluzia că stabilitatea Marshall determinată pentru temperaturi mai mari ca temperatura de testare cu 10°C, respectiv 20°C, datorită conductivității și căldurii specifice superioare pentru mixtura asfaltică ce conține în amestec un procent semnificativ de cenușă (7.5%, 10.0%) scade cu aproximativ 5% față de 30% pentru mixtura ce conține în amestec filer de calcar (Paul Marc, 2011)

2.2.2.2. Cercetare la nivel mondial

Henning a investigat efectul cenușii de clasa C asupra proprietăților mixturii asfaltice. El a concluzionat că prin adăugarea de 4% cenușă de termocentrală în masa mixturii asfaltice rezultă o stabilitate ridicată, dar cu volum de goluri scăzut. Henning a declarat, de asemenea, ca și antecedentii săi cercetători, că cenușa conduce la o stabilitate mai mare după ce proba a fost imersată în apă. (Henning N.E., 1974)

2.2.3. Utilizarea lianților bituminoși modificați cu deșeuri industriale și a bio-uleiului în mixturi asfaltice

2.2.3.1. Cercetare la nivel național

Carmen Răcănel și Adrian Burlacu au studiat comportarea la oboseală a mixturilor asfaltice cu bitum modificat cu polimeri. Modulul de rigiditate obținut este un modul ridicat cu o valoare de 9300 MPa. Rezistența la oboseală a mixturilor asfaltice studiate pune în evidență faptul că trebuie corelată temperatura de lucru din laborator cu temperatura atmosferică, în situ. La temperaturi mai mari, deformația specifică atinsă pentru un milion de cicluri de încărcare este mai mare: la o creștere a temperaturii cu 10°C corespunde o creștere a deformației specifice cu aproape 280 %, ceea ce este de mare importanță în dimensionarea structurilor rutiere. (Adrian Burlacu & Carmen Răcănel, 2014)

2.2.3.2. Cercetare la nivel mondial

Tehnologia mixturilor asfaltice cu adaos de cauciuc a fost dezvoltată într-un moment când termenul *sustenabilitate* era departe de a fi un subiect atât de dezvoltat și utilizat. Cu toate acestea, este o tehnologie care susține mediul, care a demonstrat în timp că oferă performanțe mecanice foarte bune în toate condițiile climatice, care durează mai mult comparativ cu mixturile asfaltice convenționale și nu solocită mai puțină întreținere. Nu în ultimul rând, proiectarea mixturii asfaltice care conține soluții ecologice reciclate permite reducerea zgomotului și optimizarea acustică. (Antunes I., Way G., Sausa J., Kaloush K., 2006)

2.2.3.3. Utilizarea bio-uleiului ca înlocuitor al liantului bituminos în mixturi asfaltice

Conform noilor tehnologii avansate, trebuie să se ia în considerare și înlocuirea totală sau parțială a bitumului cu bio-uleiuri.

Impactul economic al înlocuirii bitumului rutier cu bio-ulei este extrem de important, luând în considerare că înlocuirea a 25 % bitum cu bio-ulei, la prețul curent de producție al mixturii asfaltice, va rezulta în salvarea economică directă cu 5 %. Dacă reducerea malaxării și a temperaturii de compactare vor fi contabilizate, oportunitatea economică în utilizarea acestei tehnologii este mai mare. (Elvira Johana Ferreira Perlata, 2013)

2.2.4. Mixturi asfaltice reciclate

Datorită necesității promovării modurilor de transport sustenabil în vederea realizării unui mediu propice dezvoltării economice și sociale, este necesară definirea și evaluarea sustenabilității transportului rutier. Indicatorii de mediu sunt instrumente sau metode folosite pentru a reflecta, a măsura și a evalua sustenabilitatea transportului. (Joumand R. & Gudmundsson H., 2010)

2.2.4.1. Cercetare la nivel național

Procesul tehnologic de reciclare a mixturilor asfaltice constă în utilizarea integrală a materialului rezultat prin frezare, mărunțire și amestecare cu cantitățile necesare de liant și agregate naturale. Materialul obținut este apoi așternut și compactat în mod corespunzător.

Stratul asfaltic realizat prin acest procedeu trebuie să îndeplinească condițiile de calitate a mixturilor asfaltice noi, și anume lucrabilitate, compactitate, stabilitate mecanică și insensibilitate la apă (Florescu, 2010).

2.2.4.2. Cercetare la nivel internațional

Cercetările asupra reciclării mixturilor asfaltice au condus la apariția unei tehnici inovatoare, numită reciclare totală, care reutilizează 100 % RAP în mixturile asfaltice reciclate.

Această nouă tehnologie utilizează aditivi cu scopul de a îmbunătăți performanțele, în particular poate utiliza și o combinație a unui rejuvenator cu un reactivator. (Martin ZAUMANIS, 2014)

3. PROIECTAREA COMPOZIȚIILOR DE MIXTURĂ ASFALTICĂ CU DEȘEURI INDUSTRIALE

3.1. Elaborarea dozajelor mixturilor asfaltice

Elaborarea dozajelor pentru mixturile asfaltice reprezintă un ansamblu de operații efectuate cu scopul stabilirii proporțiilor adecvate între materialele care le alcătuiesc, astfel încât, în final, să conducă la caracteristici fizico-mecanice specifice tipului de mixtură asfaltică studiat. (***) SR 4032-1, 2001) (Răcănel Carmen & Adrian Burlacu, 2016)

a. Agregatele

Agregatele naturale pot fi de carieră, concasate sau pietrișuri pot fi din cele mai variate cariere, funcție de zona de aprovizionare și de cerința de execuție a drumului. În același timp se pot utiliza și agregatele artificiale, cele mai frecvent întâlnite fiind agregatele provenite din deșeurile industriale ale uzinelor siderurgice.

b. Filerul

Filerul are rolul să mărească vâscozitatea liantului de consistență scăzută; astfel dacă filerul este dozat în mod corespunzător, se poate utiliza o cantitate mai mare de liant bituminos cu scopul de a mări coeziunea și impermeabilitatea fără să apară posibilitatea ca mixtura să devină instabilă sau să apară bitum la suprafața mixturii.

c. Bitumul

Cel mai importat rol în realizarea unei mixturi asfaltice îl deține liantul hidrocarbonat, adică bitumul. Compoziția acestuia este foarte complexă, iar calitatea lui influențează calitatea mixturilor asfaltice cât și calitatea și durabilitatea structurilor rutiere.

3.2. Metode de proiectare a compoziției mixturilor asfaltice

Numeroși cercetători s-au ocupat de-a lungul timpului cu determinarea unei metode optime de proiectare a dozajelor de mixtură asfaltică. Proiectarea unei astfel de dozaje presupune alegerea unui amestec optim de agregate, bitum și filer pentru a obține o stabilitate și durabilitate cât mai mare a mixturii asfaltice proiectate. Un dozaj bine proiectat al mixturii asfaltice și un grad de compactare corespunzător conduc la o comportare bună pe întreaga perioadă de exploatare.

3.2.1. Metoda suprafeței specifice

Această metodă a fost elaborată de cercetătorul M. Duriez în Franța și ține cont de faptul că liantul bituminos trebuie să anrobeze toate granulele agregatului asigurând aglomerarea lor astfel încât, în final, să realizeze cel mai bun grad de compactare a mixturii puse în operă și cel mai bun nivel de omogenitate în condițiile existente pe șantier. (Duriez M. & Arrambide J., 1962) (Craus J. & Ishai I., 1977) (Richard C. Meininger, 2004)

3.2.2. Metoda volumului de goluri

Metoda consideră că dacă se ajunge la dozarea incorectă a procentelor de agregate, liantul bituminos va umple golurile existente în masa mixturii asfaltice, astfel încât după compactare va

rămâne un volum de goluri denumit volum de goluri remanent, în valoare de 3...5 %. Acesta scade și va ajunge la valori între 1,0 ... 2,0 % după câțiva ani de exploatare, datorită efectului produs de trafic.

3.2.3. *Metoda Laboratorului Central de Cercetări Rutiere din Bruxelles*

Metoda consideră că procentul de liant este influențat într-o importantă măsură de următorii factori: cantitatea de filer utilizată, procentul de goluri al filerului, cantitatea de nisip și de caracteristicile de suprafață ale granulelor de nisip (rotunde și netede, colțuroase și rugoase).

3.2.4. *Metoda Asphalt Institute*

Această procedură este concentrată în cinci etape principale, utilizând un soft special: selectează sau determină datele de intrare, selectează suprafața și materialele de bază care ulterior se adaugă în datele de intrare, determină grosimea maximă a stratului rutier, apoi se adaugă în datele de intrare, evaluează fezabilitatea construcției pe etape și pregătește planul de construcție, efectuează o analiză economică a modelelor alternative și selectează cea mai bună compoziție și proiectare a compoziției. (Nicolas J. & Garber and Lester A. Hoel, 1988)

3.2.5. *Metoda Kraemer*

Această metodă constă în determinarea procentului de liant ținând cont de necesarul specific de liant pentru agregatul propus. Necesarul specific pentru anrobarea unui sort de agregate este în funcție de grosimea optimă a filmului de liant bituminos, dar și de suprafața specifică a granulelor aceluși sort.

3.2.6. *Metoda de determinare a dozajului de liant pentru mixturi asfaltice executate la rece*

Calculul necesarului de liant are la bază exact aceleași principii ca în cazul mixturilor asfaltice preparate la cald; se poate utiliza oricare din metodele menționate mai sus. (Gheorghe Lucaci, et al., 2000)

3.2.7. *Metoda Marshall*

În mod uzual, proiectarea prin metoda Marshall constă în 3 pași de bază: selecția agregatelor; selecția liantului bituminos; determinarea conținutului optim de liant bituminos. (McAsphalt Industries Limited, 2012)

3.2.8. *Metoda volumetrică*

Metoda de lucru constă în propunerea a minim 2 curbe granulometrice și estimarea unui dozaj inițial de liant bituminos. Se realizează mixturile asfaltice pentru fiecare amestec și se confecționează probe cilindrice la girocompactator la nivelul de compactare N_{max} . (Carmen Răcănel & Adrian Burlacu, 2016) (Răcănel Carmen, 2004)

4. EVALUĂRI EFECTUATE CU SCOPUL UTILIZĂRII UNOR DEȘEURI INDUSTRIALE ÎN MIXTURI ASFALTICE

4.1. Deșeuri industriale utilizate în compoziția mixturilor asfaltice

Acest capitol din teza de doctorat este destinat unui studiu de laborator privind selectarea, obținerea și stabilirea tehnicilor de caracterizare specifică (fizico-chimică și mecanică) a unor deșeuri industriale în vederea utilizării acestora ca înlocuitor de agregate minerale și înlocuitor de filer. Partea experimentală presupune evaluarea unor materiale cunoscute, dar și a unor materiale mai puțin uzuale în proiectarea dozajelor de mixtură asfaltică și în construcția de drumuri.

4.2. Zgurile metalurgice

Procesarea zgurilor de uzină metalurgică feroasă aduce beneficii din punct de vedere al protecției mediului înconjurător, comunitar sau agricol, cât și din punct de vedere tehnic. Zgurile de uzină metalurgică feroasă, fiind materiale netoxice, dar având proprietăți fizico-mecanice asemănătoare rocilor, sunt o alternativă viabilă, în anumite aplicații chiar mai valoroase decât variantele naturale pentru domeniul construcțiilor. (DSU România, 2015)

4.3. Cenușa de termocentrală

Cenușile de termocentrală sunt unanim catalogate drept deșeuri industriale cu impact ecologic sever, cu atât mai mult cu cât eliminarea lor de pe fluxurile de producere a energiei electrice pe baza arderii cărbunilor de pământ are loc masiv, pe arii geografice restrânse și adesea chiar punctuale, dacă zona de generare este raportată la scara unui areal natural mai larg.

4.4. Sulfatul de calciu

Sulfatul de calciu este format prin reacția chimică dintre filerul de calcar (CaCO_3) și dioxidul de sulf (SO_2) gazos generat la arderea cărbunelui energetic. În urma analizelor chimice pot fi evidențiate urme de cenușă precum și alte elemente chimice. La temperaturi de peste 1450°C sulfatul de calciu se descompune în oxid de calciu (CaO) și dioxid de sulf (SO_2). Sulfatul de calciu este incompatibil cu acizii, diazometan, fosfor, aluminiu și agenții de oxidare puternici. (Decizia Consiliului Concurenței nr. 308, 2004)

4.5. Șlamul uzinelor sodice

Din procesul de fabricație al sodei rezultă șlam (leșie finală), care este evacuat și supus unei decantări primare în batalele de șlam (numite și iazuri de decantare). Șlamul este colectat în cuva de șlam uzinală. Aici are loc decantarea șlamului, iar apa limpezită (limpedele de batal) primită de sistemele de evacuare de la sondele inverse și sistemele de drenaj se evacuează în bazinele de retenție după care se descarcă prin canalul de evacuare ape convențional curate. (Agenția pentru Protecția Mediului Vâlcea, 2012) (Consiliul concurenței, 2004)

PARTEA 2 – STUDIU EXPERIMENTAL DE LABORATOR

5. STUDII ȘI CERCETĂRI EFECTUATE ÎN LABORATOR

5.1. Studii de laborator asupra materialelor utilizate în partea experimentală

Cunoașterea structurii mineralogice și petrografice are o deosebită importanță pentru alegerea corectă și corespunzătoare a agregatelor minerale care intră în alcătuirea mixturilor asfaltice pentru diverse lucrări de construcții rutiere precum autostrăzi, drumuri naționale, județene, locale sau comunale, cu scopul realizării unor lucrări de calitate.

În cadrul acestui studiu din cadrul Programului de Cercetare al tezei de doctorat s-au luat în considerare agregatele calcaroase, acestea fiind înlocuite cu agregate artificiale provenite din zgură de furnal.

5.1.1. Evaluare asupra pulberilor minerale provenite din deșeuri industriale

Cu scopul de a obține o mixtură asfaltică ecologică cu o compoziție cât mai bogată în deșeuri industriale s-au făcut studii de cercetare asupra mai multor pulberi minerale care se pot utiliza ca material de umplutură în compoziția acesteia. (Cătălina Lixandru, et al., 2018) (Cătălina Lixandru, et al., 2018) Această etapă experimentală constă în efectuarea unui studiu de cercetare asupra a 5 tipuri de filere și anume:

- cenușă de termocentrală;
- cenușă de termocentrală îmbunătățită cu adaos de 10% var;
- șlam obținut în urma proceselor de prelucrare ale uzinelor sodice;
- filer din sulfat de calciu generat la arderea cărbunelui energetic;
- filerul uzual utilizat în România, respectiv filerul de calcar (Figura 1).



Figura 1. Filere studiate

1- filer de calcar; 2- filer din șlam; 3 - filer din cenușă de termocentrală; 4 - filer din sulfat de calciu

Mai departe, studiul de cercetare asupra posibilităților de utilizare a deșeurilor industriale în compoziția mixturilor asfaltice a urmărit înlocuirea parametrului filer cu materialele precizate și considerate deșeuri industriale, în mai multe doze care însă pot fi utilizate cu succes în proiectarea dozajelor de mixtură asfaltică ca material de adaos. Astfel, s-au făcut evaluări pe filere privind granulometria, masa volumică, umiditatea, solubilitatea, porozitatea filerului uscat, evaluarea particulelor fine nocive și încercarea bilă-inel, acestea fiind evaluate în mai multe doze în amestec cu filerul martor (filerul de calcar).

5.1.1.1. Rezultate obținute în urma studiilor de laborator asupra pulberilor din deșeuri industriale

În această etapă de cercetare s-au evaluat cele 5 tipuri de pulberi minerale ce pot fi utilizate ca material de adaos în compoziția mixturilor asfaltice: primul filer analizat este filerul de calcar uzual întâlnit în compoziția mixturilor asfaltice din România, studiul a continuat cu evaluarea șlamului provenit de la uzinele sodice, a sulfatului de calciu, a unei cenuși de termocentrală și cenușă de termocentrală cu 10 % adaos de var (pulberi care provin de la centrala termică). (Cătălina Lixandru, et al., 2018 ROMCEN Asociația Profesională a Producătorilor și Utilizatorilor de Cenușă din România)

Studiul de laborator a început cu o serie de investigații privind morfologia și compoziția pulberii din filer de calcar prin tehnica microscopiei electronice de baleaj (Scanning Electron Microscopy – SEM) asociată cu analiza EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) (Figura 2).

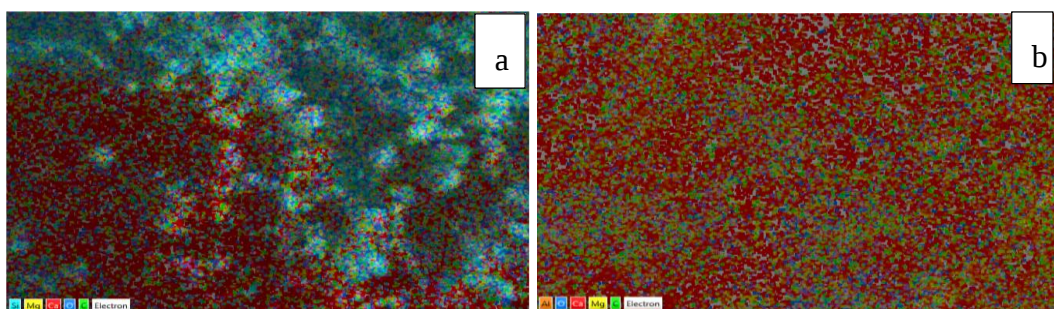


Figura 2. Analiza EDX pentru distribuția elementelor din pulberea de calcar (a) și din șlam (b)

Datorită faptului că nu este cunoscută comportarea pulberilor din deșeuri industriale provenite de la uzinele sodice, s-a considerat necesară evaluarea acestora în mai multe dozaje (20%, 50%, 75%, 100% amestecuri cu filer de calcar). În continuare s-au efectuat încercări de laborator precum cernerea în curent de aer, masa volumică, solubilitatea, porozitatea, valoarea de albastru de metilen și diferența bilă-inel cu scopul de a determina caracteristicile fizico-mecanice pe toate amestecurile menționate. O parte dintre acestea sunt prezentate în figurile 3-6.

Influența bilă-inel în funcție de tipul filerului este prezentată în Figura 3. Această caracteristică demonstrează rigiditatea mare a masticului bituminos obținut în urma utilizării filerelor din deșeu industrial, însă prezintă posibilitate de utilizare a acestora în combinație cu filerul martor de aproximativ 50%. În plus față de aceste determinări, s-a cercetat și evoluția fineții de măcinare Blaine iar rezultatele obținute conduc filerul din sulfat de calciu la comportamentul cel mai diferit de filerul de calcar, acesta demonstrând posibilitate de utilizare de aproximativ 50%, însă celelalte deșeuri industriale pot fi utilizate 100% din punct de vedere al acestei caracteristici.

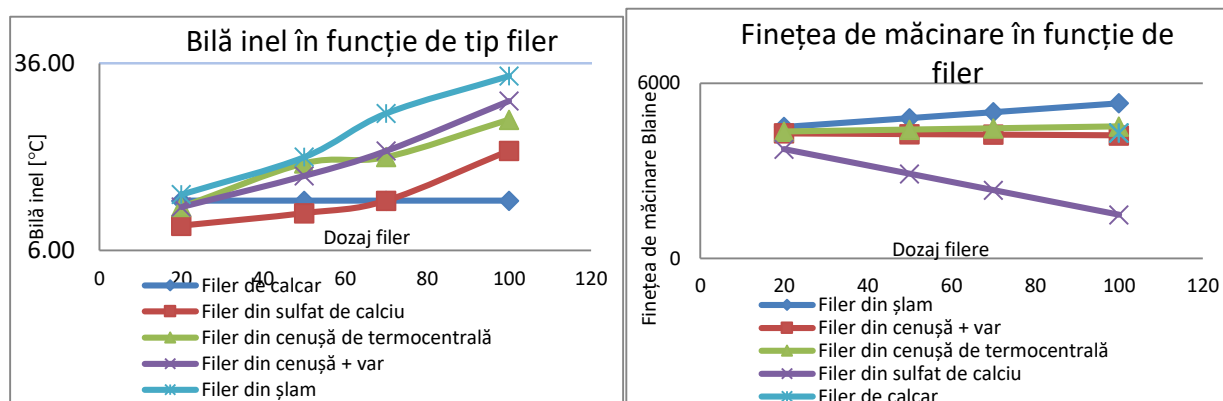


Figura 3. Evaluare caracteristici pulberi din deșeuri industriale

Cu scopul de a înțelege cât mai corect comportamentul filerelor din deșeuri industriale s-a reprezentat grafic variația porozității în funcție de finețea de măcinare precum și variația diferenței bilă-inel cu finețea de măcinare Blaine în Figura 4.

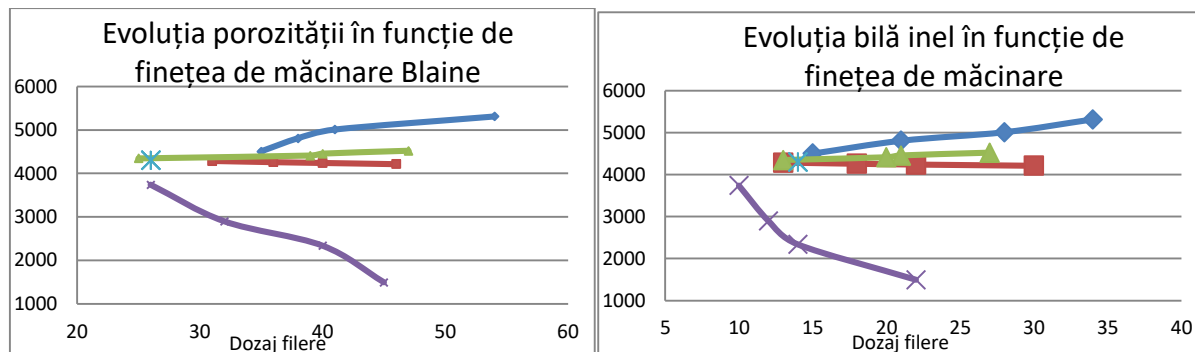


Figura 4. Evaluare caracteristici pulberi din deșeuri industriale

5.1.1.2. Interpretare rezultate și concluzii parțiale

După finalizarea acestei etape de studiu asupra tuturor amestecurilor de pulberi din deșeuri industriale și ținând cont de toate aspectele demonstrate de acestea prin încercările efectuate, precum și privind în ansamblu la posibilitatea utilizării lor pe scară largă, s-a continuat cercetarea asupra compozițiilor de mixturi asfaltice precizate anterior în urma cercetărilor de laborator, cu înlocuirea filerului de calcar cu două tipuri de filer din cele studiate și anume: filer de cenușă și filer din sulfat de calciu.

Filerul din cenușă de termocentrală a fost selectat deoarece a demonstrat calitățile cele mai apropiate de filerul de calcar, iar filerul din sulfat de calciu datorită faptului că are proprietățile cele mai deosebite din ansamblul celor 5 filere studiate. Privind din aceeași perspectivă, și anume optimizarea utilizării acestor tipuri de filere, s-a constatat că utilizarea filerului din șlam ar fi oportună într-o mixtură asfaltică din strat de uzură datorită faptului că se urmărește influența acestuia asupra condițiilor climatice, în special la temperaturi joase.

Datorită faptului că acesta este o lucrare de cercetare s-a evaluat utilizarea 100% a filerelor din deșeu industrial care a fost propusă cu scopul utilizării unei cantități mai mare de deșeuri industriale în compoziția mixturilor asfaltice, dar și utilizarea 50% propusă în urma evaluării caracteristicilor demonstrate de pulberile analizate anterior prin studii de laborator.

5.2. Înlocuirea agregatelor naturale cu agregate din zgură în compoziția mixturilor asfaltice

În cadrul acestui capitol am dezvoltat posibilitatea de înlocuire a agregatelor naturale cu agregate artificiale în proiectarea a două tipuri de doze de mixtură asfaltică, respectiv un strat de legătură și un strat de bază. (Cătălina Lixandru, et al., 2015)

Studiul de cercetare a început cu o compoziție de mixtură asfaltică din stratul de bază AB 22,4. Înlocuirea agregatelor naturale cu agregate artificiale din zgură se realizează printr-o metodă de proiectare a compoziției de mixtură asfaltică care presupune înlocuirea agregatelor naturale cu agregate artificiale în procente din cantitatea totală a agregatului din compoziția mixturii asfaltice.

5.2.1. *Proiectare în laborator a dozajului de mixtură asfaltică ecologică din strat de bază cu utilizarea agregatelor artificiale*

Studiul s-a realizat pe un număr de 7 dozaje de mixtură asfaltică AB 22,4. Astfel, plecând de la compoziția martor, s-au înlocuit în proporție de 20, 40, 50, 60, 80, 100% din toate sorturile de agregate naturale cu zgură de furnal, notate după cum urmează: (Cătălina Lixandru, et al., 2015)

- Dozaj 1 – dozaj martor (0% agregate din zgură);
- Dozaj 2 – înlocuire 20% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 3 – înlocuire 40% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 4 – înlocuire 50% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 5 – înlocuire 60% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 6 – înlocuire 80% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 7 – înlocuire 100% toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură.

5.2.2. *Studii de laborator - înlocuire agregate naturale cu agregate artificiale în procent din agregat total*

În urma proiectării acestui tip de mixtură asfaltică s-au efectuat mai multe încercări de laborator, precum determinarea densității maxime, determinarea densității aparente, a volumului de goluri, a caracteristicilor Marshall, a modului de rigiditate, stabilitatea la apă și absorbția de apă. Rezultatele obținute în funcție de dozajul de zgură din compoziția mixturii asfaltice se pot urmări în graficele corespunzătoare acestora, prezentate în teza de doctorat.

5.2.2.1. *Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale*

Evaluarea rezultatelor obținute în urma efectuării studiului asupra acestui tip de compoziție de compoziție asfaltică se poate realiza în urma prezentării grafice a rezultatelor determinate; astfel se poate afirma că în urma înlocuirii agregatelor naturale cu agregatele artificiale obținute din zgură de furnal poate fi pusă în practică, așa cum a fost demonstrat, pentru o înlocuire în procent de maximum 50-60 % din cantitatea totală de agregate folosită.

Volumul de goluri, luat ca influență a deșeurilor industriale din zgură în alcătuirea scheletului mineral, prezintă valori mai ridicate cu creșterea dozajului de agregate artificiale din zgură utilizat în compoziția mixturii asfaltice. Stabilitatea Marshall prezintă sporire semnificativă comparativ cu stabilitatea mixturii asfaltice clasice. Indicele de curgere prezintă valori ușor mărite pentru utilizarea agregatelor artificiale din zgură, valori comparate cu rezultatele obținute pe mixtura asfaltică martor.

Sensibilitatea la apă prezintă sporire pentru toate dozajele de mixtură asfaltică ce are în compoziție agregate artificiale din zgură față de cea determinată pe dozajul optim cu agregate calcareoase, acest fapt se datorează porozității mari prezentată de agregatele artificiale din zgură, comparativ cu agregatele naturale studiate. În cazul în care se dorește utilizarea unui dozaj mai mare de agregate artificiale din zgură în compoziția mixturii asfaltice se pot aduce anumite îmbunătățiri asupra performanțelor compoziției precum sporirea dozajului liantului bituminos și/sau îmbunătățirea calităților acestuia prin adăugarea unui agent de adezivitate și astfel evaluarea

proprietăților mixturii asfaltice analizate se va îmbunătăți, conducând la încadrarea corespunzătoare în cerințele și limitele impuse în normativele în vigoare.

În schimb, dacă se analizează evoluția mixturii asfaltice în cazul utilizării agregatelor artificiale din zgură comparativ cu utilizarea agregatelor calcaroase, evaluând și comparând rezultatele obținute pentru stabilitatea Marshall, se poate observa o îmbunătățire adusă de agregatele din zgură. O altă îmbunătățire este adusă și din punctul de vedere al modulului de rigiditate, unde se poate observa că utilizarea agregatelor artificiale din zgură sporește rigiditatea compozițiilor de mixtură asfaltică comparativ cu cele în care s-au utilizat agregatele calcaroase.

5.3. Proiectarea compoziției mator de mixtură asfaltică în strat de legătură

În această etapă de cercetare, studiul s-a realizat pe un număr de 7 dozaje de mixtură asfaltică BAD 22,4. Astfel, plecând de la compoziția mator, s-au înlocuit în proporție de 20, 40, 50, 60, 80, 100 % din toate sorturile de agregate naturale cu zgură de furnal, notate astfel:

- Dozaj 1 – compoziția mator (0 % agregate din zgură în mixtură);
- Dozaj 2 – înlocuire 20 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 3 – înlocuire 40 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 4 – înlocuire 50 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 5 – înlocuire 60 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 6 – înlocuire 80 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură;
- Dozaj 7 – înlocuire 100 % toate sorturile de agregate naturale cu agregate din zgură.

5.3.1. Studii de laborator –înlocuire agregate naturale cu agregate artificiale în procent din agregat total

În urma proiectării acestui tip de mixtură asfaltică s-a efectuat un studiu de laborator realizat prin mai multe încercări, precum: determinarea densității maxime, determinarea densității aparente, a volumului de goluri, a caracteristicilor Marshall, a modulului de rigiditate și stabilitatea la apă.

Rezultatele obținute în funcție de dozajul de zgură din compoziția mixturii asfaltice se pot urmări în graficele corespunzătoare acestora, prezentate și analizate în teza de doctorat.

5.3.1.1. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale

Ca și în cazul mixturii asfaltice AB 22,4 dacă se evaluează compoziția de mixtură asfaltică mator cu dozajele în care s-au înlocuit toate sorturile peste 4 mm de agregate naturale cu agregate artificiale din zgură se poate constata necesitatea sporirii dozajului de liant bituminos.

Analiza asupra determinării volumului de goluri prezintă o sporire semnificativă comparativ cu rezultatul demonstrat de structura compoziției mator studiate. Se poate concluziona că scheletul mineral influențează foarte mult performanțele mixturilor asfaltice studiate, obținându-se rezultatele optime pentru mixtura asfaltică BAD 22,4 mator, deoarece aceasta a prezentat un schelet mineral mai rezistent datorită volumului de goluri mai mic, însă utilizarea agregatelor artificiale din zgură conduc la un schelet mineral cu un volum de goluri mai ridicat.

Scheletul mineral rezistent a condus la îmbunătățirea stabilității Marshall cu dozajul de agregate din zgură utilizat pentru toate dozajele de zgură adăugate în compoziția de mixtură asfaltică, dozajele studiate încadrându-se în aceeași categorie de valori (S_{min10} și S_{max15}).

Diferențe apar la variația indicelui de curgere ca și imagine a deformabilității mixturii asfaltice, care crește proporțional cu dozajul de zgură din mixtură până la utilizarea 50% agregate artificiale până la valoarea maximă de 37 % comparativ cu rezultatul stabilității pe dozajul martor, apoi descrește, însă valoarea obținută pe dozajul cu utilizare 100 % agregate artificiale prezintă tot creștere până la valoarea de 13 % față de dozajul martor. Modulul de rigiditate prezintă, de asemenea, o îmbunătățire semnificativă pentru utilizarea tuturor dozajelor de agregate artificiale.

În urma evaluării rezultatelor determinate în urma încercărilor de laborator, se poate preciza că agregatele artificiale din zgură de furnal pot înlocui agregate naturale în compoziția unui dozaj de mixtură asfaltică din strat de legătură BAD 22,4, este foarte important de urmărit dozajul în care acestea sunt adăugate, rezultatele experimentale conducând la un dozaj maxim de 40...50 % din totalul de agregate utilizat.

5.4. Utilizarea filerelor din deșeuri industriale în compoziția mixturii asfaltice AB 22,4 cu agregate artificiale din zgură

Ținându-se cont de rezultatele obținute în urma determinărilor pe filere, am putut stabili că pentru un procent de 50 % de filer de calcar înlocuit cu orice tip de filer studiat ar putea conduce la rezultate acceptabile din punctul de vedere al încadrării în standardele în vigoare.

Dozajul de mixtură asfaltică în care s-a înlocuit pe rând fiecare sort de agregate naturale cu agregate artificiale din zgură nu va mai fi luat în considerare în continuarea studiului experimental al tezei de doctorat, datorită faptului că se consideră că într-o stație de mixtură asfaltică este o soluție inefficientă și mult mai costisitoare prin sporirea spațiilor de depozitare cât și numărul benzilor colectoare până la 100 % (adică dublarea numărului acestora).

Acest aspect a fost analizat și evaluat în urma parcurgerii studiului documentar asupra programului de cercetare intitulat „Tehnologie integrată de preparare a mixturilor asfaltice compozite ecologice cu adaos de compuși obținuți prin prelucrarea deșeurilor industriale, pentru realizarea de structuri rutiere performante”(ecoasfalt)”, situație în care rezultatele optime au fost stabilite prin înlocuirea agregatelor naturale de carieră cu agregate din zgură de furnal care conduc la obținerea unei compoziții de mixtură asfaltică pentru stratul de bază cu caracteristici îmbunătățite. Aceste rezultate au fost obținute dacă procentul de zgură din agregatul total nu depășește 30 %, iar sorturile înlocuite sunt 4/8, respectiv combinația sorturilor 4/8 și 8/16.

În această situație a fost gândită și utilitatea soluției propuse de utilizare la scară largă (nu doar în studii și cercetări în laborator) fapt care implică utilizarea acestor două dozaje, fiind mult mai utile și benefice datorită faptului că se va înlocui un sort sau maximum două de agregate naturale cu agregate din zgură, caz în care sunt suficiente cel mult 2 benzi colectoare în plus și maxim 2 spații de depozitare a deșeurilor industriale pe sorturi în stațiile de producție a mixturilor asfaltice.

Din această cauză se vor lua în considerare 2 dozaje de mixtură asfaltică (înlocuirea sortului 4/8 și înlocuirea sorturilor 4/8 + 8/16 de agregate naturale cu agregate artificiale din zgură de furnal), bineînțeles, comparându-se viitoarele rezultate ale încercărilor asupra acestora cu proprietățile obținute de dozajul martor a mixturii asfaltice AB 22.4, conform datelor prezentate în sinteza documentară, studii la nivel național asupra agregatelor artificiale. (CCMMM, et al., 2014)

5.4.1. *Înlocuirea pulberilor din deșeuri industriale în compoziția mixturii asfaltice AB 22,4*

Studiul experimental pentru această etapă a fost efectuat pe 10 dozaje de mixtură asfaltică ecologică, numerotate după cum urmează:

- Dozaj 1 – compoziția martor (100 % agregate de carieră + 100 % filer de calcar);
- Dozaj 2 – sort 4/8 agregate din zgură și 100 % filer de calcar;
- Dozaj 3 – sort 4/8 agregate din zgură și 100 % filer din cenușă de termocentrală;
- Dozaj 4 – sort 4/8 agregate din zgură și 50 % filer de calcar + 50 % filer din cenușă;
- Dozaj 5 – sort 4/8 agregate din zgură și 100 % filer din sulfat de calciu;
- Dozaj 6 – sort 4/8 agregate din zgură și 50 % filer din sulfat de calciu + 50 % filer de calcar;
- Dozaj 7 – sort 4/8 și 8/16 agregate din zgură și 100 % filer de calcar;
- Dozaj 8 – sort 4/8 și 8/16 agregate din zgură și 100 % filer din cenușă de termocentrală;
- Dozaj 9 – sort 4/8 și 8/16 agregate din zgură și 50 % filer de calcar + 50 % filer din cenușă;
- Dozaj 10 – sort 4/8 și 8/16 agregate din zgură și 100 % filer din sulfat de calciu;
- Dozaj 11 – sort 4/8 și 8/16 agregate din zgură și 50 % filer din sulfat de calciu + 50 % filer de calcar.

5.4.1.1. *Rezultate obținute în urma studiilor de laborator asupra mixturii asfaltice ecologice cu agregate artificiale și filere din deșeuri industriale*

Proiectarea acestor compoziții a fost efectuată cu scopul de a se evalua caracteristicile fizico-mecanice ale mixturilor asfaltice precum densitate aparentă, densitate maximă, absorbție de apă, caracteristici Marshall și volum de goluri, urmărind posibilitatea înlocuirii parțiale sau totale a filerului de calcar cu filerele precizate. Teza de doctorat prezintă rezultatele obținute în urma încercărilor de laborator pe mixtura asfaltică AB 22,4 cu sort 4/8 agregate din zgură și pe cea cu înlocuirea a două sorturi de zgură 4/8 respectiv 8/16 în compoziția cărora se utilizează 50 %, respectiv 100 % filer din cenușă de termocentrală cât și filer din sulfat de calciu.

5.4.1.2. *Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale pentru utilizare agregate artificiale și filere din deșeuri industriale în strat de bază*

Analizând densitatea aparentă a mixturii asfaltice AB22,4, confecționate în diverse variante de utilizare a combinațiilor de agregate naturale cu agregate din zgură precum și combinații de filere provenite din deșeuri industriale cu filerul de calcar, probe confecționate în laborator prin Programul de Cercetare al Tezei de Doctorat și evaluând prin comparație rezultatele densităților aparente cu rezultatul demonstrat pentru masa volumică a dozajului martor, nu s-au putut observa diferențe notabile ale valorilor obținute pentru mixtura asfaltică ecologică AB22,4, astfel că, în această situație, nu se pot emite restricții de utilizare a acestora.

Evaluând densitatea maximă a mixturilor asfaltice AB22,4, folosind datele experimentale detaliate anterior în mod individual, în variantele studiate în teza de doctorat prin raportare la solubilitatea variantelor de filere din deșeu industrial și filerul din calcar, s-au constatat unele anomalii comportamentale în cazul solubilității filerului din sulfat de calciu, care se poate raporta la o densitate maximă a mixturii ecologice ușor redusă față de mixtura asfaltică martor.

Analiza comparativă a stabilității structurale Marshall a mixturii asfaltice AB22,4 în dozajele predeterminate în cadrul Programului de Cercetare al Tezei de Doctorat cu variațiile

stabilite la cercetarea caracteristicilor masticului bituminos funcție de variația conținutului de filer din deșeu industrial, se pun în evidență interpretări precum: pentru mixtura asfaltică martor cu 100 % filer de calcar se obține diferența bilă inel de 14°C pe masticul bituminos și stabilitate Marshall de 12,63 kN, iar mixtura asfaltică cu 100 % filer din sulfat de calciu obține diferența bilă inel de 22°C (deci un mastic mai rigid) și stabilitate Marshall de 9,37 kN, stabilitate structurală mai redusă ca mixtura martor, ceea ce înseamnă o posibilă rezistență la fenomenul de oboseală mai redusă în cazul mixturii AB22,4 cu filer din sulfat de calciu și agregate artificiale din zgură sort 4/8.

În continuare, analiza comparativă a absorbției de apă în diversele variante de mixturi asfaltice AB22,4 care au în componență materiale din depozite de deșeuri industriale, analizate în cadrul Tezei de Doctorat, pune în evidență rezultate comparabile cu cele determinate pe mixtura asfaltică martor, însă cu diferențe identificate prin raportare la influența umidității.

În ceea ce privește interpretarea datelor legate de volumul de goluri determinat pe mixtura asfaltică AB22,4, se pot face unele interpretări prin corelare cu rezultate obținute pe filerul din deșeu industrial asupra porozității. Astfel, la mixtura asfaltică martor s-a obținut un volum de goluri de 5,15%, la o porozitate a filerului de calcar de 26%, iar la mixtura ecologică AB22,4 cu înlocuirea sorturilor de agregate naturale cu agregate de zgură 4/8 și 8/16 și filer din cenușă de termocentrală 100% cu porozitate 47%, volumul de goluri determinat în laborator este de 9,54%.

5.4.2. Studii complexe de laborator pe dozaj optim cu deșeuri industriale

Această etapă implică studii de laborator precum încercările în regim dinamic asupra compoziției optime de mixtură asfaltică AB 22,4 în care s-a înlocuit atât o parte din agregatele naturale (sortul 4/8), cât și înlocuirea parțială a filerului de calcar cu fier din sulfat de calciu (în procent de 50 %), încercări efectuate așa cum este precizat în normativul AND 605:2016.

Continuarea studiului de cercetare a presupus evaluarea din punctul de vedere al încercărilor dinamice pe dozajul AB 22,4 optim obținut comparând bineînțelesele cu proprietățile demonstrate de dozajul martor AB 22,4 precum și evaluându-se toate rezultatele determinate din punctul de vedere al condițiilor impuse în normativele în vigoare.

În Tabelul 1 se pot urmări determinările efectuate atât pe dozajul martor, cât și pe dozajul în care s-a înlocuit un sort de agregate naturale (4/8) cu agregate din zgură și care conține în compoziție un adaos de 50 % din cantitatea filerului de calcar o pulbere provenită din deșeuri industriale (sulfat de calciu).

Tabel 1. Încercări dinamice asupra mixturii asfaltice AB 22,4

Denumirea încercării	AB 22,4 martor	AB 22,4 cu sort 4/8 din zgură și 50% filer din sulfat de calciu	Condiții tehnice AND 605:2016	
Clasă tehnică drum			I-II	III-IV
Categorie tehnică stradă			I	II-III
1. Caracteristici pe cilindrii confectionați cu presa giratorie				
1.1 Volum de goluri, la 120 girații [%]	5,15	7,92	maxim 9	maxim 10

1.2 Rezistența la deformații permanente (fluaj dinamic)				
Deformația la 40°C, 200kPa și 10 000 impulsuri [$\mu\text{m/m}$]	5 528	2 227	maxim 20 000	maxim 30 000
Viteza de deformație la 40°C, 200 kPa și 10 000 impulsuri [$\mu\text{m/m/ciclu}$]	0,032	0,08	maxim 2	maxim 3
1.3 Modulul de rigiditate la 20°C, 124 ms [MPa]	5 785	5 671	minim 6 000	minim 5 600
1.4 Rezistența la oboseală probe cilindrice solicitate la întindere indirectă: număr minim de cicluri până la fisurare la 15°C	415 000	430 000	500 000	400 000
2. Rezistența la oboseală, epruvete trapezoidale [$\epsilon^6 \cdot 10^{-6}$]	130	165	minim 150	minim 100

5.4.2.1. Interpretarea rezultatelor și concluzii parțiale

Rezultatele obținute în urma determinării volumului de goluri la 120 rotații pentru dozajul martor AB 22,4 se încadrează în condiția tehnică impusă pentru clasa tehnică I-II a drumului, iar în cazul compoziției de mixtură asfaltică în care s-a înlocuit sortul 4/8 a agregatelor naturale cu agregate din zgură și înlocuirea filerului de calcar în proporție de 50% cu filer din sulfat de calciu conduce la încadrarea în clasa tehnică III-IV a drumului.

Rezistența la deformații permanente prin evaluarea fenomenului de fluaj dinamic a condus la o deformație la 40°C de 5500 $\mu\text{m/m}$ pentru dozajul martor și de 2227 $\mu\text{m/m}$ pentru dozajul cu deșeuri industriale în compoziție. Deformația determinată pe dozajul cu deșeuri industriale este de 2,5 ori mai mică comparativ cu deformația pe dozajul martor. Diferența dintre dozajul martor și dozajul cu deșeuri industriale studiată este de 2,5 ori mai mică în cazul compoziției martor, pentru viteza la deformație la 40°C, 200 kPa și 10 000 de impulsuri. Viteza la deformație la 40°C prezintă o încadrare în clasa tehnică I-II cu valoarea 2 $\mu\text{m/m/ciclu}$ maxim, iar pentru încadrarea în clasa tehnică III-IV cu valoarea 3 $\mu\text{m/m/ciclu}$ maxim. În cazul celor 2 tipuri de mixtură studiată s-a obținut valoarea 0,55 $\mu\text{m/m/ciclu}$ pentru dozajul martor și 0,08 $\mu\text{m/m/ciclu}$ pentru dozajul cu deșeuri industriale.

În urma rezultatelor obținute se poate preciza că din punctul de vedere al deformațiilor permanente mixtura asfaltică AB 22,4 cu sort 4/8 cu agregate din zgură și filer din sulfat de calciu 50% are un comportament foarte bun, încadrându-se corespunzător în condițiile tehnice pentru clasa tehnică de drum I-II, demonstrând similitudini cu proprietățile compoziției martor din punctul de vedere al acestei caracteristici.

Rezultatele obținute pentru evaluarea modulului de rigiditate au condus pentru ambele dozaje de mixtură asfaltică la încadrarea în clasa tehnică de drum III-IV datorită valorii de minim impuse și anume 5600 MPa, iar clasa tehnică de drum I-II începe cu valoarea de minim 6000 MPa, însă ambele valori determinate pentru aceste dozaje studiate se situează sub aceasta limită.

Comportarea dozajului de mixtură asfaltică ecologică cu deșeuri industriale în compoziție prezintă o diminuare cu 2 procente comparativ cu dozajul martor, această diminuare fiind nesemnificativă.

Rezistența la oboseală pe probe cilindrice solicitate la întindere indirectă se încadrează în clasa tehnică de drum III-IV pentru ambele dozaje datorită faptului că acestea au valori cuprinse sub 500 000 de cicluri până la fisurare, însă valoarea determinată pentru dozajul cu deșeuri industriale prezintă o sporire a rezistenței la oboseală cu 1,03 % mai mult pentru determinarea pe probe cilindrice, iar pentru determinarea rezistenței pe probe trapezoidale se poate preciza că rezistența la oboseală pentru mixtura martor este mai mică cu 1,26 % comparativ cu mixtură asfaltică cu sort de 4/8 agregate din zgură și 50 % filer din sulfat de calciu.

Toate rezultatele determinate pe acest tip de mixtură asfaltică conduc la concluzia că se poate lua în considerare o rezistență foarte bună la fenomenul la oboseală ceea ce se poate traduce ca o rezistență în timp la solicitări cu vehicule grele izolate pe drumurile de exploatare, comunale și agricole.

5.5. Proiectare mixtură asfaltică tip BA 16 din strat de uzură cu filer din șlam

S-a luat în considerare studiul asupra acestui tip de mixtură asfaltică datorită faptului că s-au efectuat studii de cercetare cu privire la posibilitatea de utilizare a mai multor tipuri de filere și s-a constatat că șlamul uzinelor sodice, prezintă posibilitatea de a aduce îmbunătățiri considerabile acestui tip de strat rutier din compoziția unei structuri rutiere.

Stabilirea compoziției mixturii asfaltice BA 16 a fost realizată prin evaluarea mai multor procente de bitum în compoziția mixturii asfaltice, cu scopul de a obține dozajul optim de liant bituminos necesar în funcție de tipul de mixtură asfaltică și ținând cont de agregatele utilizate.

5.5.1. Studii de laborator asupra agregatelor din compoziția mixturii asfaltice

În cadrul Programului de Cercetare al Tezei de Doctorat s-a încercat și analiza comportamentală a mixturilor asfaltice ecologice din strat de uzură, utilizabile la drumuri de clasă tehnică de drum III-IV, la categorii tehnice de stradă II-III, la drumuri de exploatare, comunale, vicinale sau agricole.

S-au efectuat determinări în regim static cu scopul de a prezenta caracteristicile fizico-mecanice ale acestui tip de mixtură asfaltică cu scopul de a determina dozajul optim de liant bituminos.

5.5.2. Încercări în regim dinamic asupra dozajului martor optim

Mai mult, compoziția de mixtură asfaltică BA 16 a fost evaluată prin mai multe încercări în regim dinamic conform AND 605:2016 și s-au obținut următoarele rezultate, prezentate în Tabelul 2.

Tabel 2. Încercări în regim dinamic pe mixtura mator BA 16

Denumirea încercării	Dozajul mator	Condiții tehnice AND 605:2016	
Clasă tehnică drum		I-II	III-IV
Categorie tehnică stradă		I	II-III
1. Caracteristici pe plăci			
Viteza de deformare la orieraj la 60°C, maxim [mm/1000cicluri]	0,11	0,3	0,5
Adâncimea fâgașului, maxim [%]	4,56	5,0	7,0
Modul de rigiditate la 20°C, 124ms, [MPa]	5772	4200	4000
2. Caracteristici pe cilindrii confecționați cu presa giratorie			
Volum de goluri la 80 rotații [%]	4,6	5,0	6,0
Rezistența la deformații permanente (fluaj dinamic)			
- deformația la 50°C, 300 kPa și 10000 impulsuri, μm/m, max.	10785	20000	30000
- viteza de deformație la 50°C, 300 kPa și 10000 impulsuri [mm/m/ciclu] max.	0,05	1,0	2,0
Determinarea sensibilității la apă (ITSR) [%]	87	60	90

5.5.3. Proiectare dozaj BA 16 cu filere din deșeuri industriale

Ținând cont de faptul că studiul din etapa anterioară a presupus și înlocuirea filerului de calcar atât în cantitate totală, cât și parțială, în această etapă de studiu se vor face înlocuiri ale filerului mator în compoziția de mixtură asfaltică BA 16 cu 5,8% bitum, după cum urmează:

- Dozaj 1 - BA 16 cu 100 % filer de calcar;
- Dozaj 2 - BA 16 cu 100 % filer din șlam;
- Dozaj 3 - BA 16 cu 50 % filerul de calcar + 50 % filer din șlam;
- Dozaj 4 - BA 16 cu 100 % filer din cenușă de termocentrală;
- Dozaj 5 - BA 16 cu 50 % filerul de calcar + 50 % filer din cenușă de termocentrală;
- Dozaj 6 - BA 16 cu 100 % filer din sulfat de calciu;
- Dozaj 7 - BA 16 cu 50 % filerul de calcar + 50 % filer din sulfat de calciu.

5.5.4. Încercări de laborator pe dozajele proiectate BA 16 cu filere din deșeuri industriale

Asupra celor 6 compoziții proiectate de mixtură tip BA 16 cu diferite tipuri și dozaje de filer s-au făcut determinări precum: masa volumică aparentă, determinarea densității maxime, absorbția de apă, caracteristicile Marshall, volumul de goluri și modulul de rigiditate, conform prevederilor din normativul AND 605:2016, detaliate în teza de doctorat.

5.5.4.1. Interpretare rezultate și concluzii parțiale

Toate dozajele proiectate au obținut rezultate similare pentru determinarea masei volumice aparente; mai mult, acestea manifestă aceeași evoluție și anume pentru înlocuirea 100 % a filerului martor cu oricare din filerile studiate, masa volumică aparentă are valoare mai mică comparativ cu valoarea obținută de dozajul în care s-a înlocuit doar 50 % din cantitatea de filer.

Absorbția de apă a demonstrat valori foarte mici în cazul utilizării combinației de filer de calcar în dozaj de 50 % cu celelalte filerile studiate în dozaj de 50 %, valorile obținute pentru înlocuirea totală a filerului cu deșeurile industriale prezentate sunt foarte clar sporite. Din acest punct de vedere, filerul din sulfat de calciu a prezentat valori foarte mari și anume 7,34 % pentru înlocuirea 100 % și 5,72 % pentru înlocuirea 50 % (valori peste limita maximă impusă de 5 %) pentru ambele înlocuiri efectuate. Cenușa de termocentrală adăugată în mixtura asfaltică în procent total a prezentat valoarea 5,80 %, depășind ușor limita maximă de 5 % conform AND 605:2016. În plus, înlocuirea cu 50 % filer din cenușă de termocentrală sau filer din șlam a condus la valori de 1,11, respectiv 1,03 % absorbție de apă, limita minimă impusă fiind de 1,5 %.

Stabilitatea Marshall în cazul mixturii asfaltice cu filer din șlam a prezentat valori foarte bune, ce se încadrează în limitele impuse în normative, mixtura cu filer din cenușă de termocentrală utilizată în dozaj 100 % a obținut valoarea de 14,98 kN, valoarea maximă admisă fiind de 13 kN, însă în momentul utilizării a 50 % cenușă de termocentrală s-a obținut valoarea de 12,82 kN. Utilizarea sulfatului de calciu în totalitate în compoziția mixturii asfaltice a condus la o valoare a stabilității Marshall mai mică decât limita minimă impusă, obținând 5,60 kN comparativ cu minim 6,5 kN impus în normativ.

Utilizarea filerului din sulfat de calciu a prezentat un volum de goluri foarte mărit față de limita impusă de maxim 6 %, utilizarea 100 % a condus la valoarea 13,20 %, iar utilizarea 50 % a obținut valoarea 8,62 %. Mixtura asfaltică ce are în compoziție filer din cenușă de termocentrală a prezentat valori ale volumului de goluri foarte bune, care se înscriu în limita impusă în vigoare. În cazul utilizării filerului din șlam a condus la o valoare de 7,80 % pentru utilizarea 100 % a acestuia, iar pentru utilizarea a 50 % a condus la rezultatul de 1,45 % volum de goluri prezent în compoziția amestecului bituminos.

Determinarea modulului de rigiditate nu a prezentat valori sub limita minimă impusă pentru niciun filer utilizat, în niciuna din combinațiile studiate. Se poate observa foarte clar faptul că în cazul utilizării filerului din cenușă de termocentrală, rigiditatea mixturii asfaltice este îmbunătățită, aceeași comportare a prezentat și utilizarea a 50 % filerului din sulfat de calciu, comparativ cu rezultatul determinat pe dozajul martor.

Așa cum am precizat și în urma interpretării rezultatelor obținute prin încercările în regim static, în urma studiului efectuat pe toate tipurile de filere analizate, filerul din cenușă de termocentrală a obținut valori foarte bune chiar și pentru mixtura asfaltică din stratul de uzură.

În urma evaluării rezultatelor obținute în această etapă asupra filerului din sulfat de calciu, se poate preciza că acesta poate fi utilizat pentru un procent de maximum 50 % în amestecurile bituminoase de tip BA 16, însă în următoarea etapă de cercetare în laborator se urmărește evaluarea performanțelor mixturilor asfaltice care să conțină 75 % filer din șlam cu 25 % filer din calcar cu scopul de a utiliza o cantitate mai mare de deșeu industrial în compoziția mixturii asfaltică.

5.5.5. Proiectare dozaj BA 16 cu 75 % filer din șlam

Filerul din șlam a obținut valori foarte bune pentru utilizarea în amestec de 50 % cu filerul de calcar, însă pentru folosirea acestuia în dozaj 100 % rezultatele determinate sunt peste limitele maxime impuse în vigoare, astfel am considerat necesar de evaluat și combinația de 75 % filer din șlam și 25 % filer de calcar.

Preliminar studiilor prin încercări complexe a fost nevoie să se evalueze din punctul de vedere al determinărilor în regim static mixtura asfaltică BA 16 cu filer obținut din amestec de 75 % filer din șlam și 25 % filer de calcar.

5.5.6. Studii de laborator asupra dozajului BA 16 cu 75 % filer din șlam

Se va ține cont de dozajul martor a mixturii asfaltice BA 16, cât și de cele două dozaje pentru care s-au determinat caracteristicile fizico-mecanice din punctul de vedere al determinărilor în regim static pentru înlocuirea cu 50 % respectiv 100 % filerul din șlam, urmărindu-se evaluarea posibilității de înlocuire cu un dozaj de 75 %.

Variația masei volumice aparente cu tipul de filer utilizat în compoziția mixturii asfaltice este reprezentată în Figura 5. Masa volumică aparentă determinată pe compoziția de mixtură asfaltică cu 100 % filer din șlam conduce la o diminuare cu 4,12 % comparativ cu cea a dozajului martor, în timp ce utilizarea a 50 % conduce la o sporire cu 1,03 % iar utilizarea 75 % conduce la sporirea cu 2,97 % comparativ cu rezultatul obținut pe dozajul martor de mixtură asfaltică BA 16.

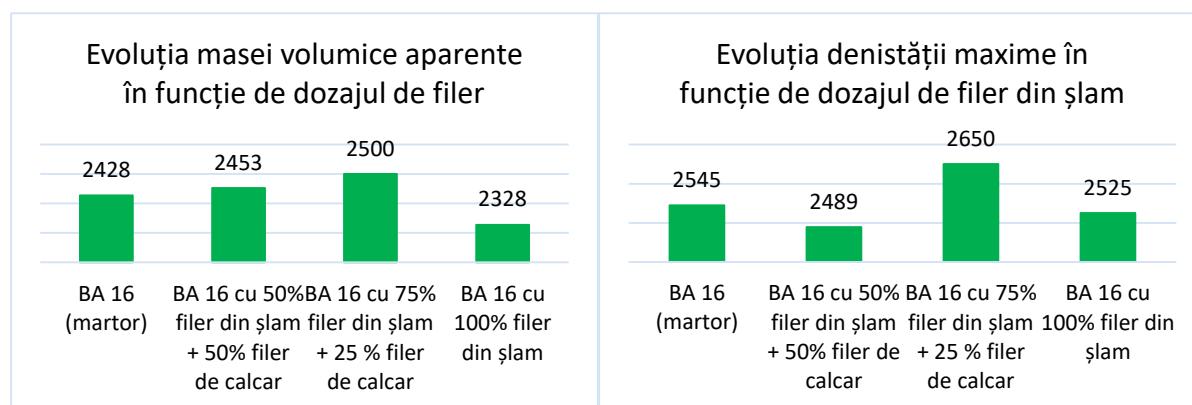


Figura 5. Masa volumică aparentă și densitatea maximă – BA 16 cu 4 procente de filer din șlam

Determinarea absorbției de apă pe cilindrii Marshall de mixtură asfaltică a condus la rezultatele prezentate în Figura 6.

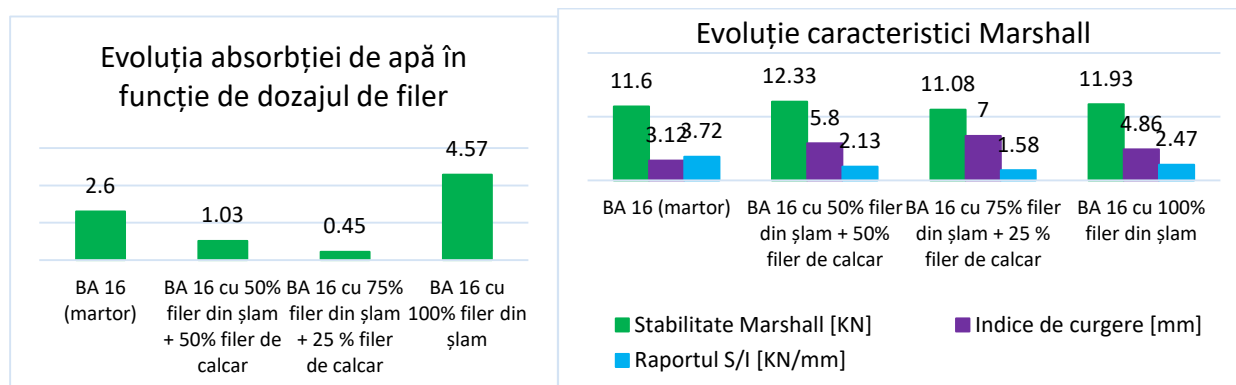


Figura 6. Absorbția de apă și caracteristici Marshall – BA 16 cu 4 procente de filer din șlam

Evaluarea absorbției de apă în cazul utilizării a 100 % filerului din șlam conduce la o sporire de aproximativ 43 % comparativ cu dozajul martor, în timp ce utilizarea 75 % filer din șlam prezintă o diminuare cu 82,7 %, iar utilizarea 50 % filer din șlam conduce la diminuare cu 60 % comparativ cu absorbția de apă determinată pe dozajul martor. Analiza caracteristicilor Marshall ne demonstrează că în cazul evaluării stabilității Marshall utilizarea 50 % respectiv 100 % conduc la o îmbunătățire a acestei proprietăți, însă utilizarea 75 % conduce la o ușoară diminuare, aproximativ 4,5 % față de stabilitatea obținută pe dozajul martor.

Volumul de goluri determinat pentru compoziția mixturii asfaltice cu 75 % filer din șlam este prezentat în Figura 7, comparativ cu rezultatele determinate și pentru celelalte dozaje.

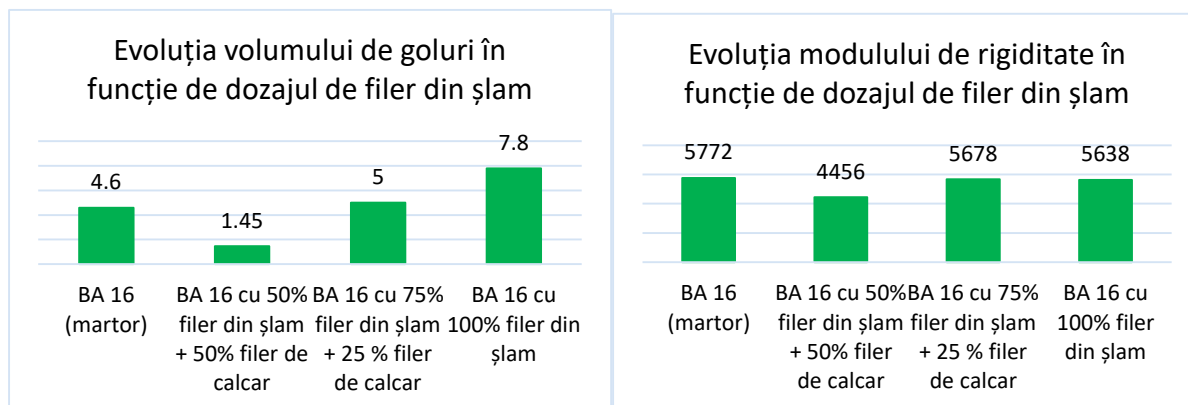


Figura 7. Volumul de goluri și a modulului de rigiditate – BA 16 cu 4 procente de filer din șlam

Volumul de goluri prezintă o diminuare semnificativă (68,5 %) în cazul 50 % filerului din șlam, în timp ce atât utilizarea dozajelor de 75 % cât și 100 % conduc la sporiri ale volumului de goluri cu 23 %, respectiv 41 %. Din punctul de vedere al evaluării modulului de rigiditate a mixturii asfaltice se poate preciza faptul că utilizarea 50 % a filerului din șlam prezintă o diminuare a acestuia cu aproximativ 22 %, utilizarea 75 respectiv 100 % prezintă valori mult mai apropiate de cea a dozajului martor, micșorarea caracteristicii analizate fiind maxim 2%.

5.5.7. Încercări dinamice pe mixtura asfaltică BA 16 cu filer din șlam

În continuare s-au făcut determinări prin încercări complexe de laborator asupra mixturii asfaltice tip BA 16 cu filer de calcar 25 % și filer din șlam 75 %, conform tabel 3.

Tabel 3. Rezultatele încercărilor complexe efectuate pe BA 16 cu filer din șlam

Denumirea încercării	Dozajul martor BA 16	BA 16 50% filer din șlam	BA 16 75% filer din șlam	BA 16 100% filer din șlam	Condiții tehnice AND 605:2016
1. Caracteristici pe plăci Clasa tehnică drum III-IV					
Viteza de deformare la ornieraj [mm/1000cicluri]	0,11	0,35	0,96	0,45	max. 0,5
Adâncimea făgașului [%]	4,56	5,60	17,50	6,62	max. 7,0
2. Caracteristici pe cilindrii confecționați cu presa giratorie Clasa tehnică drum III-IV					
Modul de rigiditate la 20°C, 124ms [MPa]	5772	5638	5678	4456	min. 4 000
Procent de goluri la 80 rotații, [%]	4,6	5,6	10,8	14,2	-
Rezistența la deformări permanente (fluaj dinamic) – deformarea la 50°C, 300 kPa și 10000 impulsuri [mm/m] – viteza de deformare la 50°C, 300 kPa și 10000 impulsuri [mm/m/ciclu]	10785	10725	10680	9890	max. 30 000
	0,05	0,10	0,40	0,30	max. 2

În plus, față de cerințele impuse în Normativul AND 605:2016 cu privire la caracteristicile fizico-mecanice ale amestecurilor asfaltice asupra straturilor de uzură, s-a evaluat și rezistența la oboseală a dozajului de amestură asfaltică BA 16, comparând rezultatele determinate pe dozajul martor cu rezultatul obținut de dozajele care au fillerul de calcar înlocuit cu filler provenit din deșeuri industriale în diferite dozaje. Reprezentarea grafică a rezultatelor obținute pentru valorile medii ale duratei de viață la oboseală în funcție de valoarea deformării inițiale impuse probelor este reprezentată utilizând o scară bilogaritmă. Utilizând aceste rezultate, se determină deformarea specifică ϵ_6 corespunzătoare unui nivel de încărcare de 10^6 cicluri. Reprezentarea grafică pentru această determinare este redată în Figura 8.

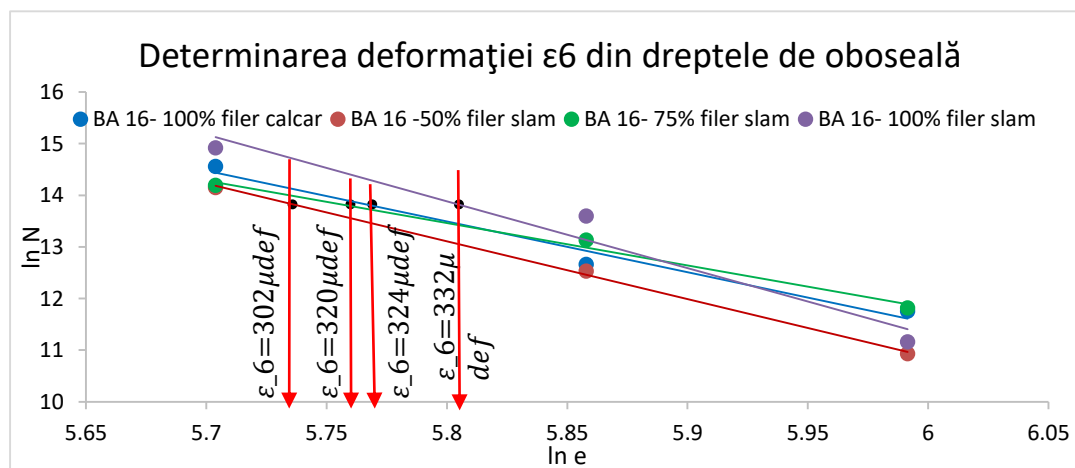


Figura 8. Determinarea ϵ_6 din diagrama $\ln N - \epsilon$

Centralizarea ecuațiilor dreptelor de oboseală studiate este prezentată în Tabelul 4.

Tabel 4. Ecuațiile dreptelor de oboseală obținute pe BA 16 cu filere din deșeuri industriale

Tip mixtură	Tip grafic	Ecuația dreptei	A0	A1	ϵ_6
BA 16- 100% filer de calcar	ln N- ϵ	$y = -9,8174x + 70,432$	-9,8174	70,432	324
BA 16-50% filer din șlam	ln N- ϵ	$y = -11,187x + 77,987$	-11,187	7,987	320
BA 16-75% filer din șlam	ln N- ϵ	$y = -8,2163x + 61,118$	-8,2163	61,118	302
BA 16- 100% filer din șlam	ln N- ϵ	$y = -12,948x + 88,98$	-12,948	88,98	332

5.5.7.1. Interpretare rezultate și concluzii parțiale

Din punctul de vedere al încercărilor în regim dinamic efectuate, se poate observa foarte clar faptul că încercarea la ornieraj este foarte influențată de tipul și dozajul filerului utilizat, acesta având o influență semnificativă asupra proprietăților demonstrate. Mixtura din stratul de uzură a obținut valori care nu se încadrează în limitele impuse pentru utilizarea filerului din șlam în dozaj de 75 %, aceasta a demonstrat o valoare aproape dublată comparativ cu limita maximă impusă în normativ. Utilizarea 50 % respectiv utilizarea 100 % a filerului din șlam au condus la o viteză de deformare corespunzătoare la ornieraj, încadrându-se în limita impusă.

Evaluarea rezultatelor obținute pentru adâncimea făgașului determinat la fenomenul de ornieraj ne demonstrează că utilizarea 75 % filerului din șlam este cel mai defavorabil dozaj evaluat. Modulul de rigiditate prezintă valori foarte bune comparativ cu limitele impuse în vigoare. Cel mai mic procent de goluri evaluat pe compozițiile de mixtura asfaltică a fost obținut pentru utilizarea a 50 % filerului din șlam, însă utilizarea 75 % a filerului din șlam conduce la rezultat asemănător cu cel demonstrat de dozajul martor, iar utilizarea 100 % a filerului din șlam conduce la un volum de goluri sporit.

Evaluarea rezultatelor la deformări permanente prin fluaj dinamic prezintă o deformare aproximativ egală între utilizarea 100 % a filerului de calcar cu utilizarea 50 % și chiar 75 % a filerului din șlam, în timp ce utilizarea 100 % conduce la o diminuare a deformăției cu 8,3 %. În plus, viteza de deformare a demonstrat valori foarte bune pentru toate dozajele de mixtură asfaltică cu șlam studiate. Rezultatele obținute pentru valorile duratei de viață la oboseală în funcție de valoarea deformăției inițiale impuse conduc la realizarea dreptelor de oboseală, determinând deformăția specifică ϵ_6 , corespunzătoare unui nivel de încărcare de 106 cicluri. Rezultatele astfel obținute pentru durata de viață la oboseală se încadrează în categoria ϵ_6 -310, conducând astfel la performanțe foarte bune demonstrate pentru toate tipurile și dozajele de filer analizate.

6. INTERPRETARE FENOMENOLOGICĂ A COMPORTAMENTULUI MIXTURILOR ASFALTICE CU DEȘEURI INDUSTRIALE

Comentariile și interpretările finale ale Programului Experimental al Tezei de Doctorat, se referă la analize comparative pe categorii distincte de încercări de laborator, cu scopul unor analize fenomenologice ale comportării materialelor cât și ale mixturilor asfaltice ecologice, prin raportare la caracteristicile materialelor martor, dar și la dozaje martor de mixtură asfaltică realizate în conformitate cu condițiile respectării reglementărilor tehnice în vigoare la drumuri.

6.1. Analiză comportamentală asupra filerelor evaluate

Analiza comparativă a amestecurilor de pulberi sub formă de filere între filerul de calcar (considerat de bază, întrucât este utilizat în mod uzual la confecționarea mixturilor asfaltice) și filere provenite din deșeuri industriale se poate face, tot prin paralelism între rezultatele determinate ale încercărilor de laborator, efectuate în cadrul tezei, pentru determinarea caracteristicilor asupra acestor pulberi obținute din depozite de deșeuri industriale, în vederea utilizării lor în cadrul mixturilor asfaltice ecologice.

Cercetarea începe de la investigarea analizei de compoziție EDX a filerului de calcar (filer martor) și a filerului din șlam (Figura 9) în care sunt reprezentate toate elementele componente ale acestor pulberi. Această determinare prezintă grafic elemente din compoziția pulberilor analizate cu valorile lor, prin raportare la același tip de analiză.

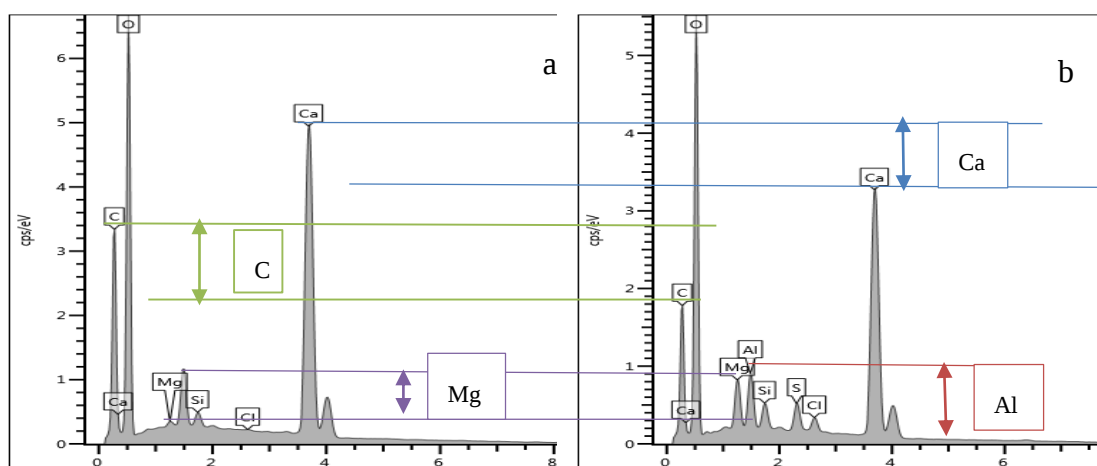


Figura 9. Analiza comparativă EDX a pulberii din filer de calcar (a) și din filer din șlam (b)

Din aceste diagrame reprezentate succesiv pentru un studiu comparativ, se poate constata diferența de componenți structurali în șlam, față de filerul de bază din calcar, respectiv un procent mai redus de Ca și C cu aproximativ 1/3 la filer din șlam față de filerul de calcar și apariția suplimentară la filerul din șlam a componentei de Al, ceea ce poate conduce la concluzia că liantul bituminos are o afinitate mai redusă față de filerul din șlam. Componenta suplimentară de Al are un rol mai de grabă asupra creșterii consistenței în masticul bituminos, deci practic ne așteptăm la o creștere de rigiditate structurală prin apariția unui schelet mineral suplimentar în masticul bituminos.

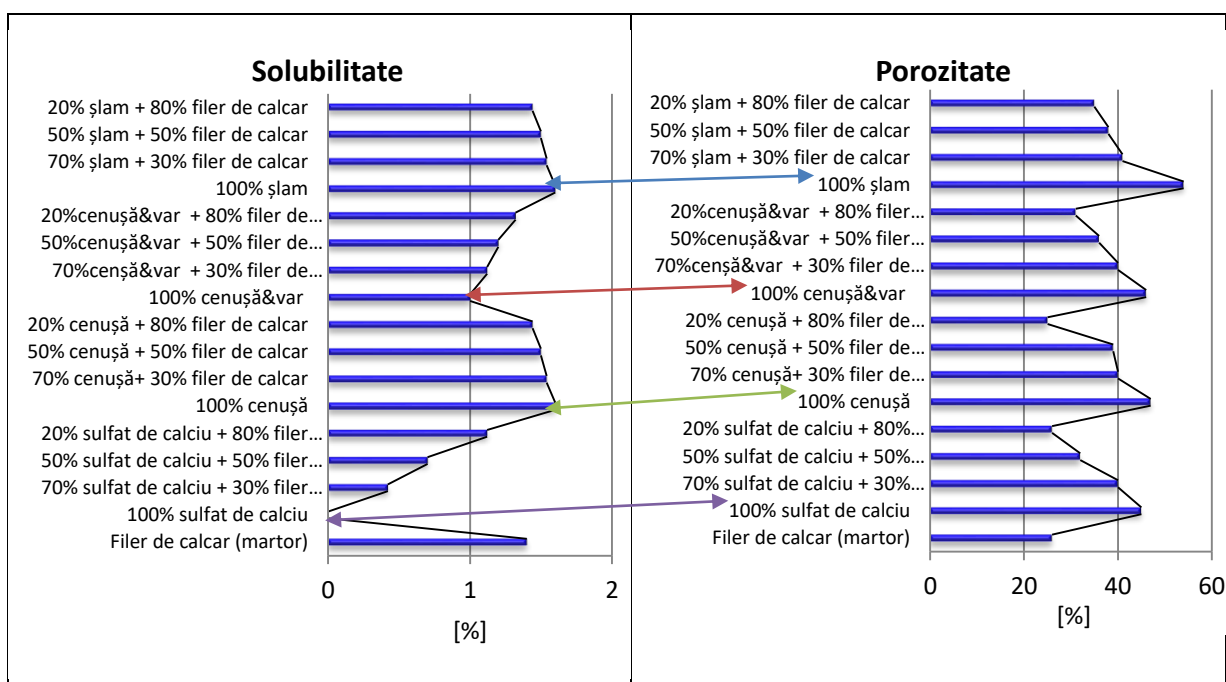


Figura 10. Evaluarea solubilității cu porozitatea filerelor

Analiza asupra comportamentului parametrului bilă inel a demonstrat diferență de temperatură de circa 3 ori mai mare la utilizarea 100% șlam, 100% cenușă de termocentrală și de circa 2 ori la 100% sulfat de calciu comparativ cu caracteristica demonstrată de filerul uzual de calcar.

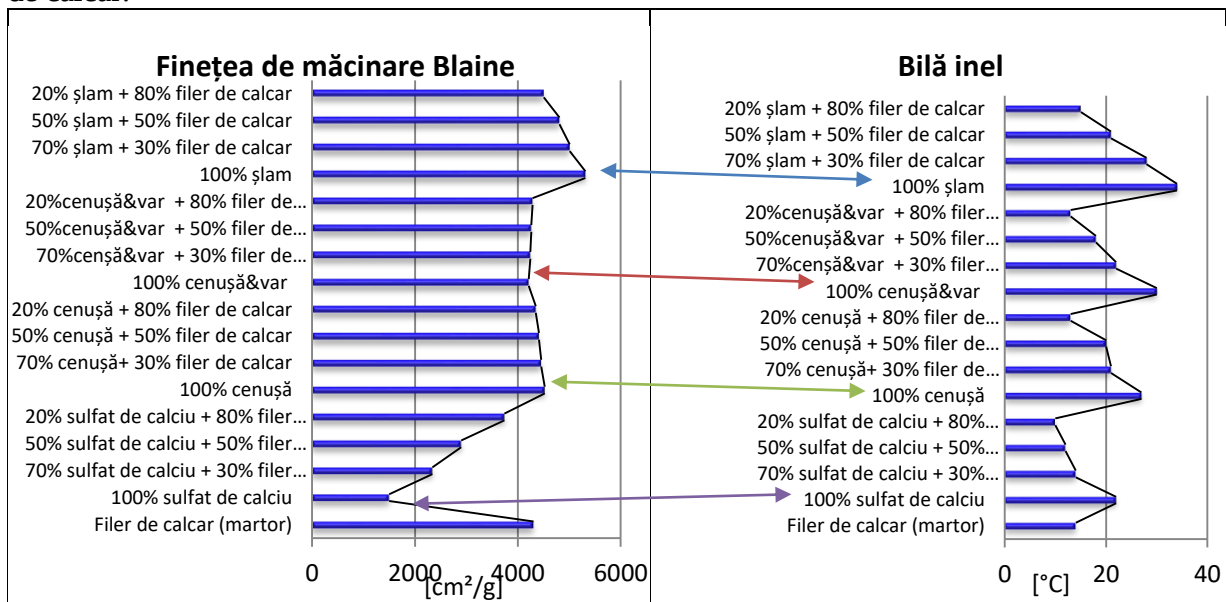


Figura 11. Evaluarea particulelor fine nocive cu încercarea bilă inel

Finețea de măcinare (figura 11) prezintă similitudine între rezultatul obținut pe filerul martor în comparație cu filerile din deșeuri industriale, excepție făcând filerul de sulfat de calciu, care prezintă o suprafață specifică mai fină, posibil să conducă la o consistență foarte bună a masticului.

6.2. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de legătură

Mai departe, evaluarea comportamentală a studiilor de laborator asupra unui dozaj optim de mixtură asfaltică BAD 22,4 în cadrul căreia s-au înlocuit agregatele calcaroase cu agregate artificiale din zgură, a condus la următoarele rezultate, prezentate în graficele din figurile 12 și 13.

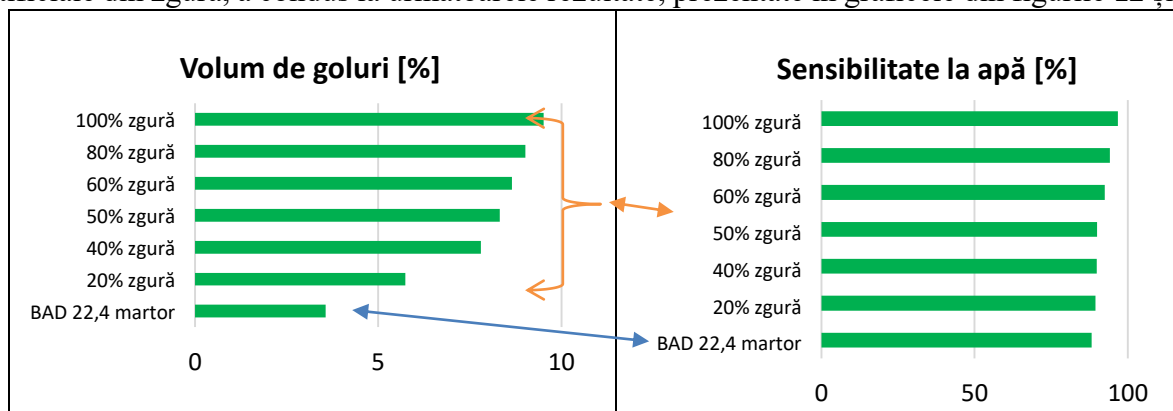


Figura 12. Evaluarea moulului de rigiditate în funcție de densitatea aparentă

Se constată creșterea volumului de goluri cu sporirea dozajului de agregate din zgură această caracteristică este datorată porozității demonstrate de agregatele artificiale din zgură. Cu scopul de a determina efectul saturației și a imersiei accelerate în apă s-a efectuat analiza comparativă a sensibilității la apă a mixturii asfaltice BAD 22,4 pe mixtura asfaltică ecologică BAD 22,4 cu diferitele dozaje de agregate artificiale.

Interpretarea rezultatelor determinate în laborator în urma încercării Marshall demonstrează o stabilitate structurală Marshall foarte bună, utilizarea agregatelor artificiale din zgură conducând la sporirea acestei proprietăți cu sporirea dozajului de agregate din zgură în compoziția mixturii asfaltice.

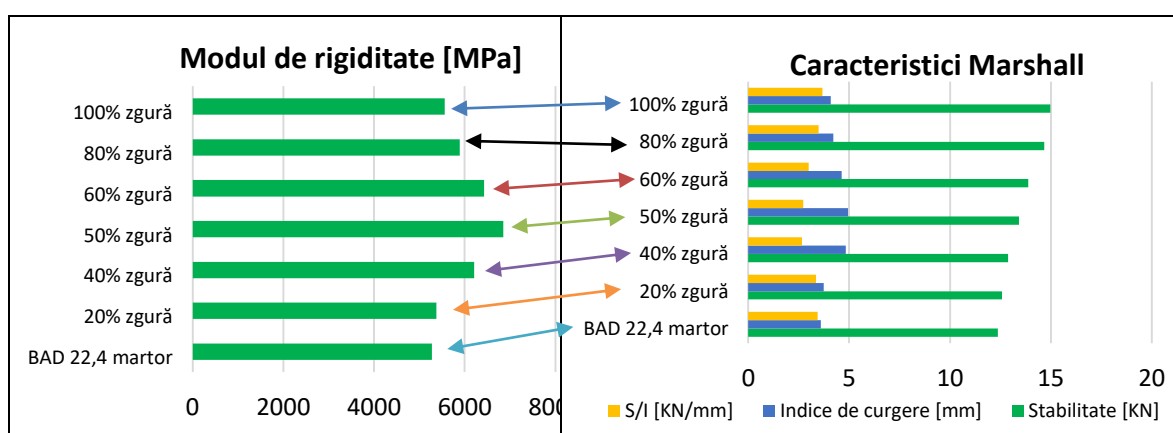


Figura 13. Evaluarea moulului de rigiditate în funcție de caracteristicile Marshall

Analiza comparativă asupra moulului de rigiditate determinat pe dozajele studiate cu agregate din zgură de furnal comparativ cu dozajul în care s-a utilizat strict agregat natural conduce la demonstrarea unei rigidități sporite pentru toate înlocuirile efectuate. Chiar și utilizarea 100% a agregatelor artificiale conduce la sporirea rigidității mixturii asfaltice cu circa 5 % comparativ cu rezultatul determinat pe dozajul martor.

6.3. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de bază

În etapa de cercetare alocată în Programul de Cercetare al Tezei de Doctorat pentru analiza caracteristicilor mixturilor asfaltice AB22,4 cu diverse tipuri de filere din deșeu industrial, prin comparație cu cele ale unei mixturi asfaltice martor AB22,4 cu filer de calcar, s-au obținut următoarele rezultate ale încercărilor de laborator.

Analizând densitatea aparentă cât și densitatea maximă a mixturii asfaltice AB22,4 confecționate în diverse variante de utilizare a combinațiilor de agregate naturale cu agregate artificiale din zgură, precum și combinații de filere din deșeu industrial și filer de calcar, confecționări de probe realizate în laborator în cadrul Programului de Cercetare al Tezei de Doctorat și evaluând prin comparație rezultatele densităților aparente cu rezultatele prezentate la masa volumică a diverselor variante de filer, nu s-au putut observa diferențe notabile ale valorilor obținute pentru densitatea aparentă a mixturii asfaltice AB22,4. În această situație, nu se pot emite restricții de utilizare a mixturilor asfaltice ecologice AB22,4 (de ecologizare a zonelor de depozitare a deșeurilor industriale), ceea ce încurajează posibilitatea utilizării acestor deșeuri industriale.

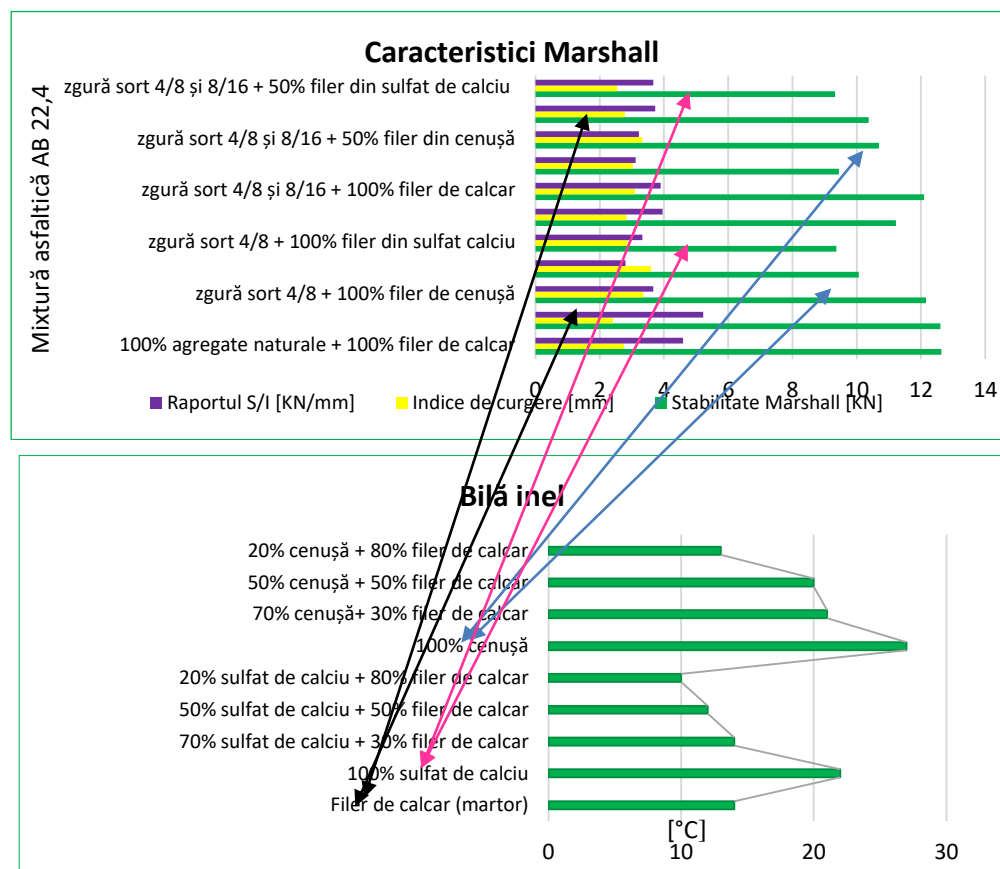


Figura 14. Evoluția caracteristicilor Marshall AB 22,4 în funcție de încercarea bilă inel

Analiza comparativă a stabilității structurale Marshall a mixturii asfaltice AB22,4 în dozele predeterminate în cadrul Programului de Cercetare al Tezei de Doctorat, cu variațiile stabilite la cercetarea caracteristicilor masticului bituminos funcție de variația conținutului de filer deșeu, pun în evidență următoarele interpretări: mixtura asfaltică martor, cu 100% filer de calciu obține o diferență de temperatură bilă inel de 14°C pe masticul bituminos și stabilitate Marshall de 12,63 KN, iar mixtura cu 100% filer din sulfat de calciu obține Bilă Inel 22°C (un mastic mai

rigid) și stabilitate Marshall de 9,37 kN (stabilitate mai redusă ca în cazul dozajului martor), ceea ce înseamnă o posibilă rezistență la oboseală mai redusă în cazul mixturii AB22,4 filer din sulfat de calciu și agregat din zgură sort 4/8. În acest caz, se recomandă utilizarea soluției de mixtură asfaltică ecologică AB22,4, a se folosi în strat de bază AB 22,4, la drumuri de clasă tehnică 4 și 5, respectiv la drumuri comunale, vicinale și agricole.

Pentru mixtura asfaltică cu utilizarea 100% a filerului din cenușă de termocentrală se obține Bilă Inel de 27°C (un mastic rigid) și stabilitate Marshall de 12,16 kN în condițiile utilizării sortului 4/8 din zgură, foarte apropiată de valoarea stabilității structurale a mixturii asfaltice martor de 12,63 kN, ceea ce recomandă utilizarea acestei variante de dozaj cu cenușă de termocentrală și sort 4/8 agregate din zgură, ca înlocuire a unei compoziții clasice (martor) de mixtură asfaltică.

În continuare, analiza comparativă a absorbției de apă în diversele variante de mixturi asfaltice AB22,4 care au în componență materiale din deșeuri industriale, analizate în cadrul Tezei de Doctorat, pune în evidență rezultate comparabile cu mixtura asfaltică martor, cu diferențe identificate prin raportare la influența tipului de filer asupra umidității, respectiv sensibilitatea tipului de filer luat spre analiză.

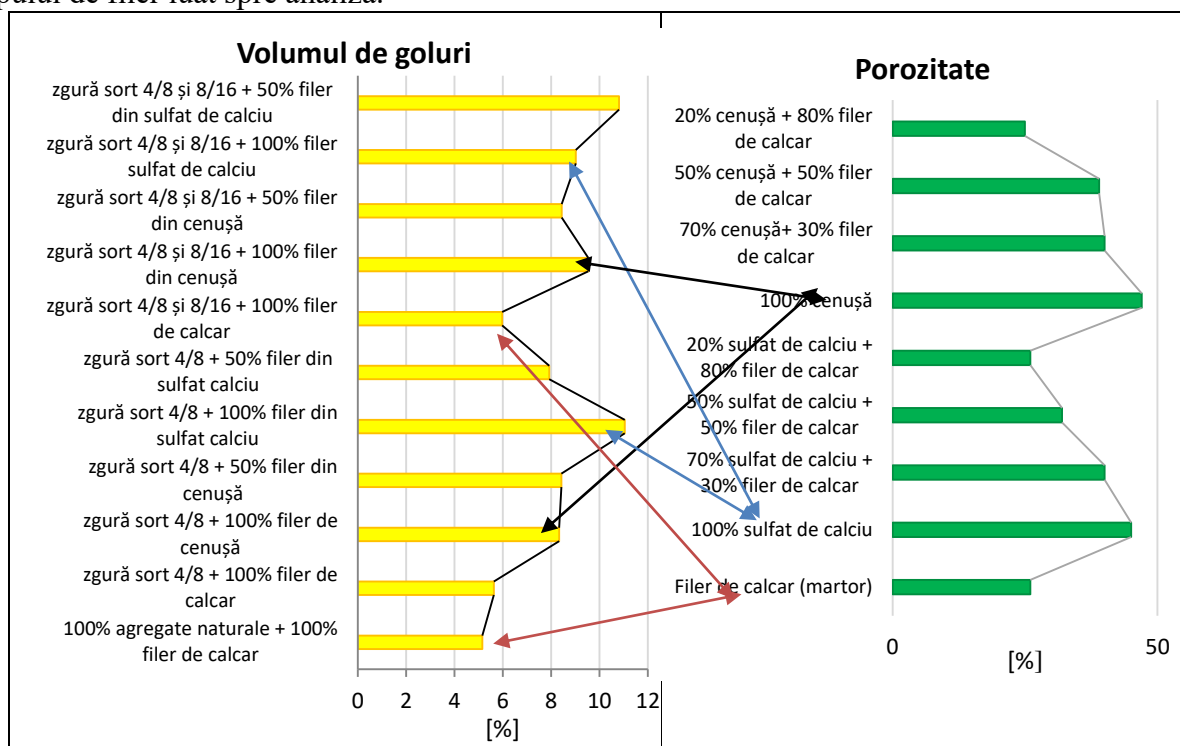


Figura 15. Evoluția volumului de goluri în funcție de porozitatea filerelor

În ceea ce privește interpretarea rezultatelor legate de volumul de goluri determinat în mixtura asfaltică AB22,4, se pot face unele interpretări prin corelare cu rezultate obținute pe filerile din deșeu industrial cu privire la evaluarea porozității filerului uscat. Astfel, mixtura asfaltică martor AB22,4 a obținut un volum de goluri de 5,15%, la o porozitate a filerului de calcar de 26%, iar mixtura asfaltică cu deșeuri industriale (sorturile 4/8 și 8/16 din agregate artificiale din zgură și filer din cenușă de termocentrală 100%) a demonstrat porozitate a filerului din cenușă de termocentrală de 47% și un volumul de goluri determinat în laborator asupra dozajului de mixtură asfaltică de 9,54%.

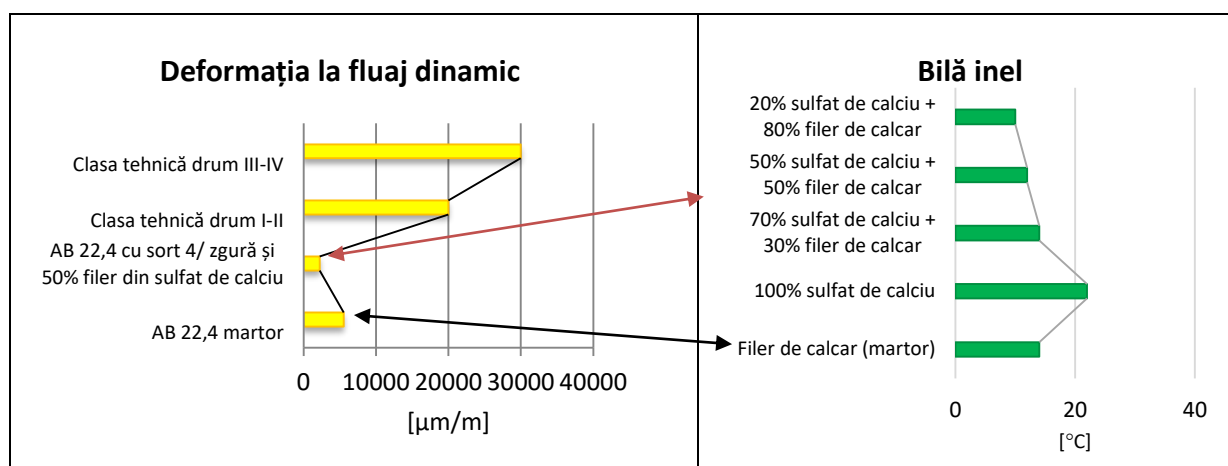


Figura 16. Evoluția deformației la fluaj dinamic asupra determinării bilă inel

Evaluarea privind deformația la fluaj dinamic asupra mixturii asfaltice ecologice AB 22,4 care are în compoziție deșeuri industriale prin sortul 4/8 agregate din zgură și 50% filer din sulfat de calciu demonstrează o deformație la fluaj dinamic îmbunătățită comparativ cu dozajul AB 22,4 martor.

Această proprietate conduce la determinarea influenței caracteristicilor fizico-mecanice obținute pe filerul din sulfat de calciu, care demonstrează o rigiditate sporită față de filerul de calcar însă ține cont și de prezența agregatelor artificiale din zgură de furnal în dozaj de 18% ceea ce conduce la obținerea unei caracteristici foarte bune din punct de vedere al deformațiilor permanente prin fluaj dinamic.

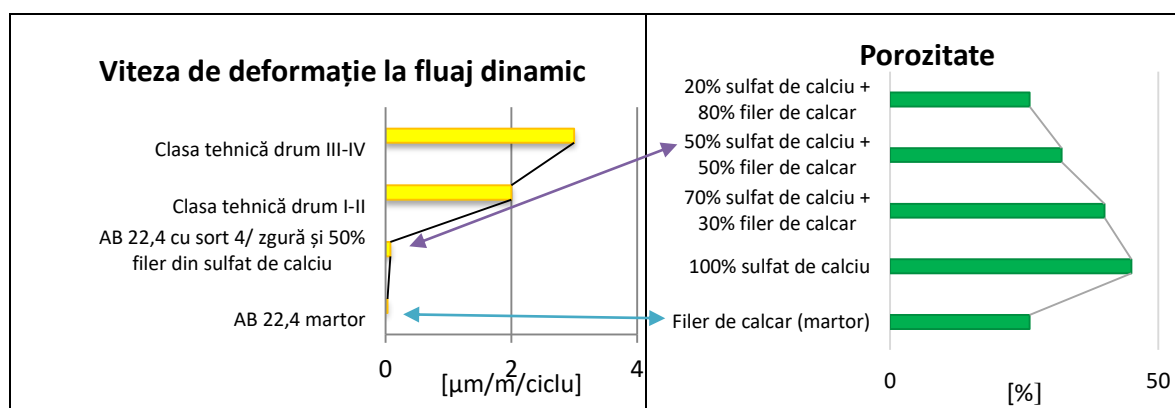


Figura 17. Evoluția vitezei de deformație în funcție de porozitatea filerelor

Din punct de vedere al deformațiilor permanente prin fluaj dinamic se demonstrează că utilizarea deșeurilor industriale în compoziția mixturii asfaltice conduce la îmbunătățirea deformației obținute pe probele realizate și evaluate în laborator, în timp ce viteza de deformație prezintă caracteristică foarte bună comparativ cu limitele maxime impuse în normativele în vigoare, însă ușor sporită față de viteza de deformație pe dozajul martor.

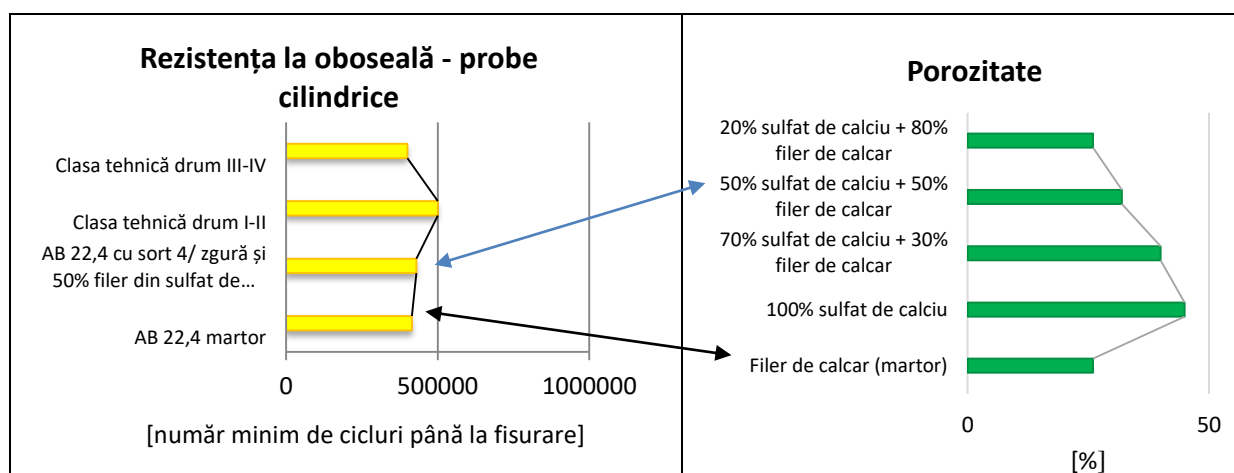


Figura 18. Evoluția rezistenței la oboseală pe probe cilindrice în funcție de porozitatea filerelor

Din rezultatul demonstrat de rezistența la oboseală determinată pe probe cilindrice confecționate în laborator se poate constata că la un procent de 50% filer din șlam și utilizarea sortului 4/8 agregate artificiale din zgură în mixtura asfaltică ecologică AB 22,4 poate fi utilizată pentru realizarea stratului de bază pentru drumuri de clasă tehnică III-IV cât și pentru categoria tehnică de stradă II-III. Porozitatea ușor sporită demonstrată de filerul din sulfat de calciu dar și de porozitatea demonstrată de agregatele artificiale din zgură au condus la un amestec bituminos cu o rezistență la oboseală îmbunătățită determinată pe probe cilindrice.

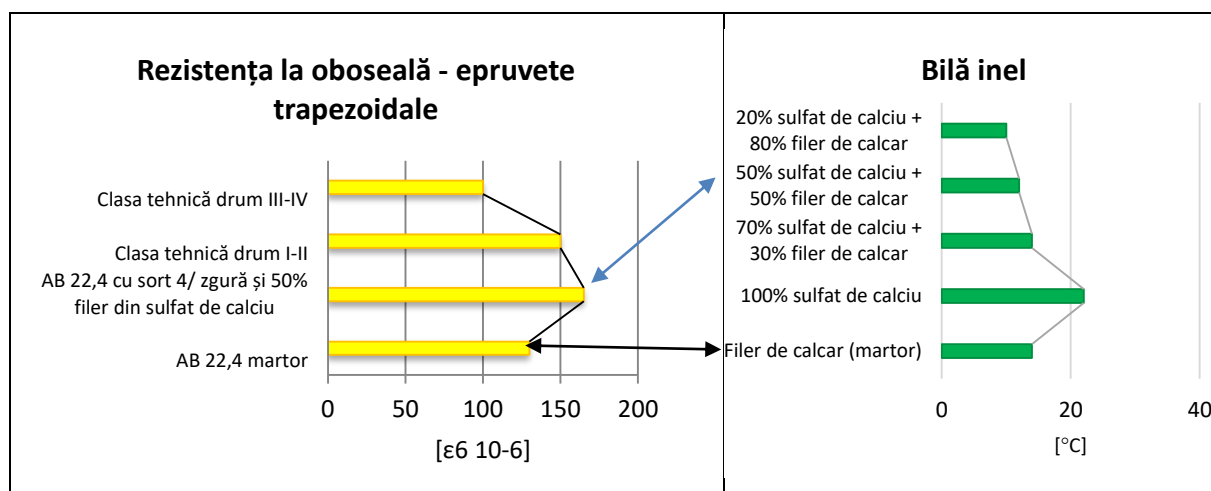


Figura 19. Evoluția rezistenței la oboselă pe probe trapezoidale în funcție de încercarea bilă inel

Din rezultatele demonstrate în urma încercărilor de laborator aferente încercărilor complexe de laborator de drumuri, prin instrumentarea prevederilor Normativului AND 605, se poate constata că la un procent de 50% filer din sulfat de calciu în mixtura asfaltică ecologică AB22,4, care conține și agregate de zgură, poate fi utilizată la drumuri de categorie III sau IV pentru strat de bază.

Astfel s-a demonstrat că utilizarea deșeurilor industriale în compoziția mixturii asfaltice ecologice conduce la posibilitatea de utilizare a acestora și pe drumuri de clasă tehnică I-II în straturi de bază.

6.4. Analiză comportamentală asupra posibilității de înlocuire a deșeurilor industriale în strat de uzură

Încercările de laborator pe dozajele proiectate BA 16 cu filere din deșeuri industriale conduc la rezultatele determinate în laborator, iar acestea pot fi exprimate după cum urmează:

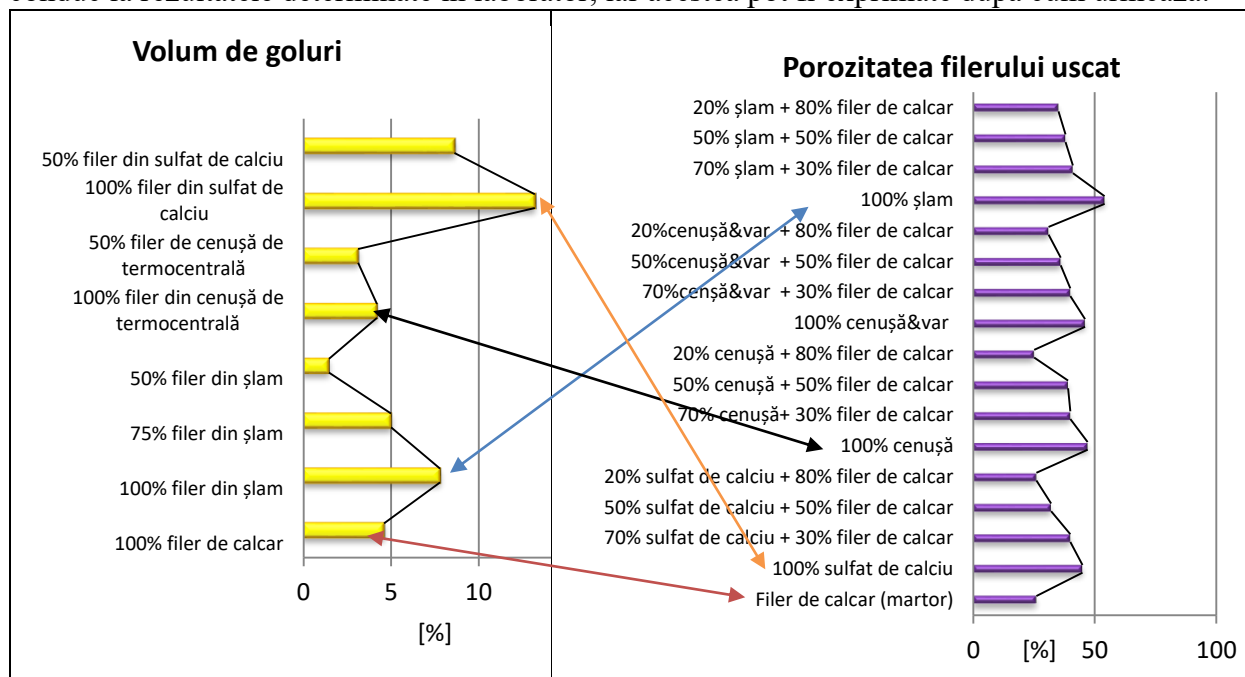


Figura 20. Evoluția volumului de goluri BA 16 în funcție de porozitatea filerelor

Interpretarea rezultatelor determinate pentru volumul de goluri din mixturile asfaltice ținând cont de comportarea individuală a filerelor menționate pentru stabilirea porozității filerului uscat. Astfel, se poate observa că filerul din sulfat de calciu a obținut valori foarte mari față de cea a dozajului martor, acest aspect este dictat și de calitatea filerului din sulfat de calciu prezentată pentru porozitate, unde a condus la diferență de circa 2 ori mai mare comparativ cu porozitatea filerului de calcar.

Utilizarea filerului din șlam în totalitate a condus la un volum de goluri sporit, demonstrând o valoare de circa 1,5 ori mai mare față de volumul de goluri din dozajul martor. Din punct de vedere al acestei evaluări se recomandă utilizarea filerului de cenușă de termocentrală, în ambele dozaje analizate, cât și utilizarea în dozaj 50 respectiv 75% a filerului din șlam, pentru clasa tehnică de drum I-IV dar și categoria tehnică de stradă I-III.

Analiza comparativă a stabilității structurale Marshall a mixturii asfaltice BA 16 în dozajele predeterminate în cadrul Programului de Cercetare al Tezei de Doctorat, cu variațiile stabilite la cercetarea caracteristicilor masticului bituminos funcție de variația conținutului de filer din deșeu industrial, pun evidență următoarele interpretări.

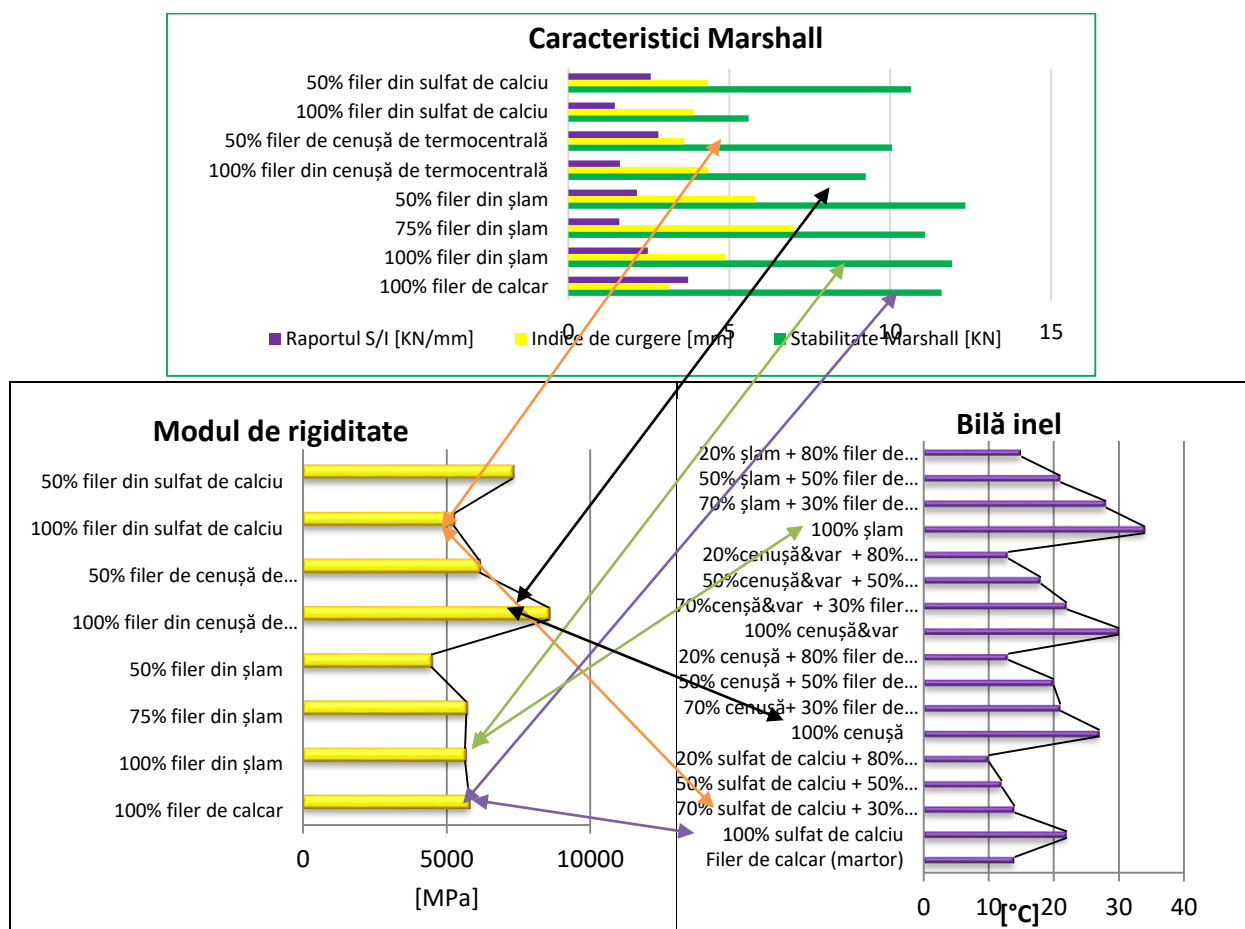


Figura 21. Evoluția caracteristicilor Marshall în funcție de modulul de rigiditate și bilă inel

În ceea ce privește cercetarea structurală a amestecurilor asfaltice ecologice tip BA 16 față de amestecul asfaltic BA16 martor, se pot face următoarele constatări: analiza modulului de rigiditate al amestecului asfaltic BA 16 martor cu 100% filler de calcar, are valoarea de bază de 5772 MPa la o valoare bilă inel a masticului bituminos de 14°C, la care s-a obținut valoarea stabilității Marshall de 11.6 KN. Prin comparație cu amestecul asfaltic BA 16 martor, amestecul asfaltic ecologic BA16, cu filler din șlam 100%, are modulul de rigiditate 5638 MPa (aproape de amestecul martor), la o valoare bilă inel de 34°C, care presupune o rigiditate mare conferită de masticul bituminos cu 100% filler din șlam și pentru care s-a obținut o valoare a stabilității Marshall de 11,93 KN, apropiată de amestecul asfaltic martor. Prin comparație cu amestecul asfaltic BA16 martor, amestecul asfaltic ecologic BA16, cu filler din cenușă de termocentrală 100%, are modulul de rigiditate de 8557 MPa, deci o valoare mare raportată la dozajul martor, la o valoare bilă inel de 27°C, conducând la o rigiditate mărită a masticului bituminos conferită de fillerul din cenușă de termocentrală și o valoare a stabilității Marshall de 9,24 KN, ceea ce presupune o stabilitate mai scăzută ca la proba martor.

Prin comparație cu amestecul asfaltic BA16 martor, amestecul asfaltic ecologic BA16, cu filler din sulfat de calciu, are modulul de rigiditate de 5236 KN, deci o valoare apropiată de dozajul martor, la o valoare bilă inel de 22°C, conducând la o rigiditate mărită a masticului bituminos conferită de fillerul din sulfat de calciu și o valoare a stabilității Marshall de 5,6 KN, ceea ce presupune o stabilitate mai scăzută comparativ cu proba martor, cauza fiind afinitatea mai mică a sulfatului de calciu la liantul bituminos, ceea ce presupune că este posibil ca o parte din constituenții fillerului de sulfat de calciu să lucreze pe poziția de agregat fin.

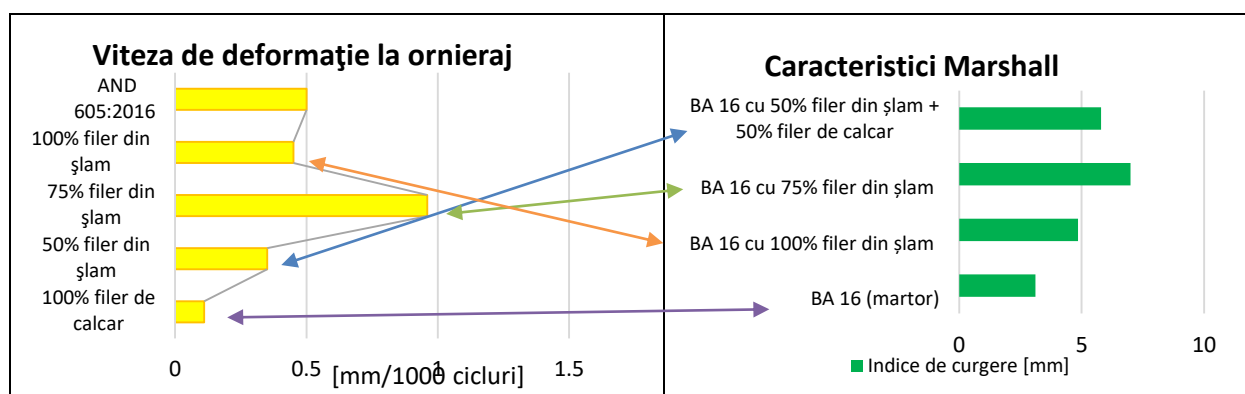


Figura 22. Evoluția vitezei de deformare cu caracteristicile Marshall

În continuare s-a evaluat rezistența la deformări permanente prin viteza de deformare la ornieraj, determinare care prezintă o creștere față de dozajul martor al mixturii asfaltice însă rezultatele bune se încadrează în cerințele impuse pentru evaluarea și utilizarea în dozaj 50 respectiv 100% a fierului din șlam.

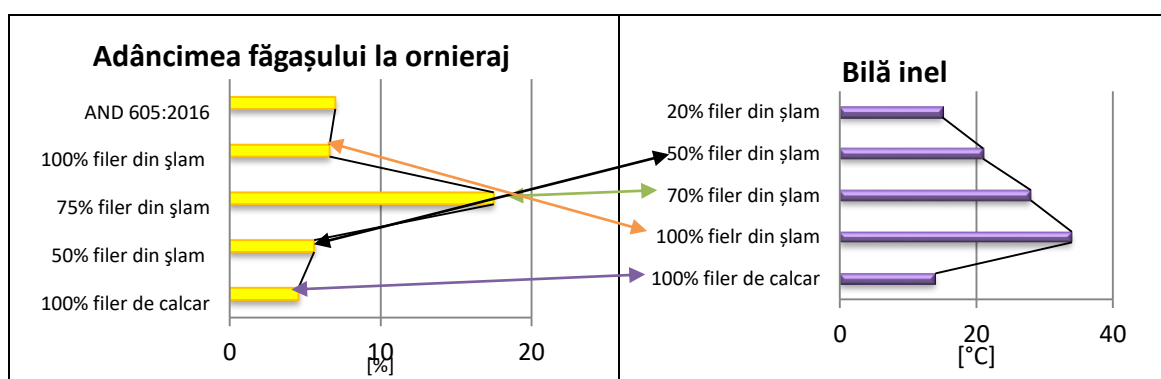


Figura 23. Evoluția adâncimii făgașului în funcție de încercarea bilă inel

Evaluarea adâncimii făgașului la ornieraj demonstrează comportare asemănătoare cu evaluarea vitezei de deformare. Și în acest caz, utilizarea 75% fier din șlam în compoziția mixturii asfaltice BA 16 conduce la sporire de aproximativ 3,5 ori față de mixtura asfaltică martor. Utilizarea dozajului de 50%, cât și utilizarea 100% a fierului din șlam prezintă rezultate bune, conducând la concluzia că acest tip de mixtură asfaltică poate fi utilizat într-un strat de uzură, pentru o clasă tehnică de drum III-IV și o categorie tehnică de stradă II-III.

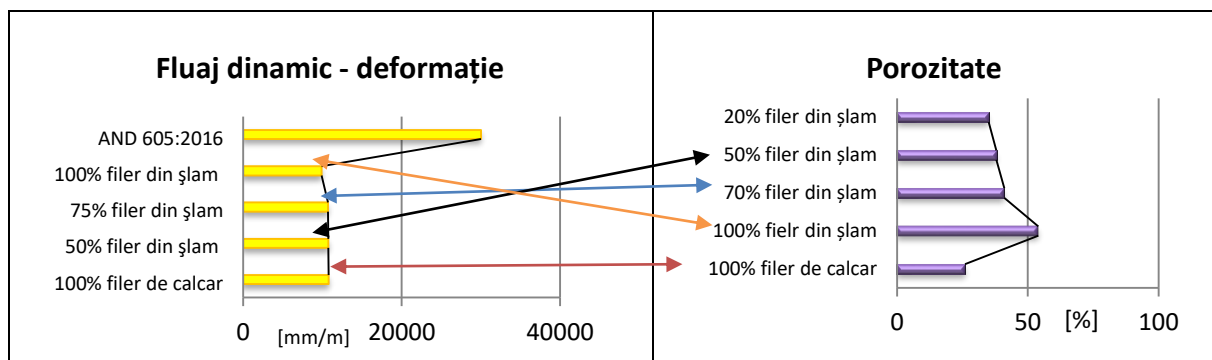


Figura 24. Evaluarea fluajului dinamic în funcție de porozitate filere

Analiza comparativă asupra caracteristicilor determinate pentru rezistența la deformații permanente prin fluajul dinamic respectiv evaluarea deformației determinate în laborator prezintă comportament foarte bun pentru toate dozajele de filer din șlam analizate, ceea ce conduce la posibilitatea de utilizare din punct de vedere al acestei caracteristici pentru drumuri categoria tehnică I-IV cât și pentru categoriile tehnice de străzi I-III.

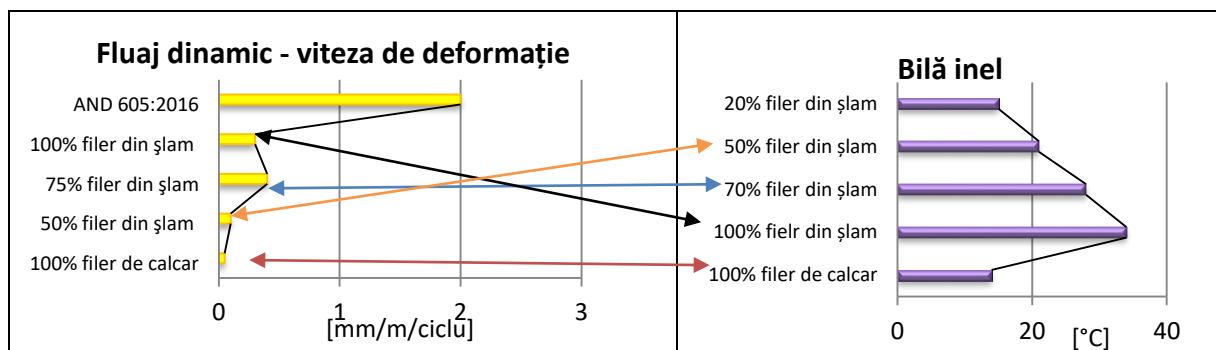


Figura 25. Evaluarea fluajului dinamic în funcție de încercarea bilă inel

Evaluarea vitezei de deformație a mixturilor asfaltice analizate conduce la rezultat foarte bun comparat cu limita maximă impusă în normativ pentru toate dozajele de mixtură asfaltică evaluate cu diferitele procente de filer din șlam înlocuit ceea ce presupune că masticul bituminos conduce la structură rigidă, însă capabilă să conducă la comportare bună prin demonstrarea proprietăților analizate în urma evaluărilor de laborator pentru determinarea deformațiilor permanente prin fluaj dinamic. În urma acestei determinări se poate preciza faptul că mixtura asfaltică BA 16 se poate utiliza în structurile rutiere cu înlocuirea filerului de calcar cu filer din șlam în dozaj 50, 75 cât și 100%.

Rezultatele obținute în urma încercărilor de laborator efectuate pentru determinarea rezistenței la oboseală pe probe trapezoidale demonstrează că utilizarea unui procent de 50% filer din șlam în adaos la 50% filerul din calcar în compoziția mixturii asfaltice ecologice BA 16 conduce la aproximativ aceeași comportare din punct de vedere al rezistenței la oboseală, însă, înlocuirea în dozaj mai mare precum 75% sau înlocuirea totală a filerului din deșeu industrial conduce la îmbunătățirea acestei caracteristici, ajungând până la dublarea valorii duratei de viață la oboseală în cazul utilizării 100% filerului din deșeu industrial. Determinarea deformației ϵ_6 din dreptele de oboseală conduce la valori mai mari de 300 $\mu\epsilon$ def ceea ce demonstrează performanțele îmbunătățite din punct de vedere al înlocuirii filerului de calcar cu dozajele de filer din deșeu industrial din șlam.

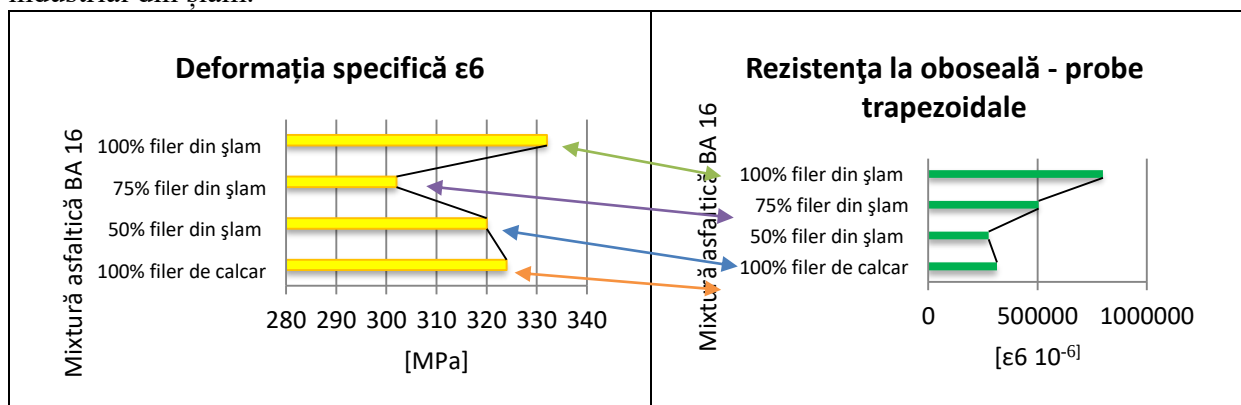


Figura 26. Evoluția deformației specifice ϵ_6 în funcție de rezistența la oboseală pe epruvete trapezoidale

7. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1. Concluzii

Studiile elaborate și datele obținute în cadrul lucrărilor experimentale sunt rezultate de interes pe plan național din punctul de vedere al construcției de rețele rutiere și vor constitui baza pentru activitățile de studiu și de cercetare în vederea dezvoltării sectorului de utilizare a deșeurilor industriale în compoziția mixturilor asfaltice.

Aceste studii completează eforturile specialiștilor din domenii de cercetare diferite de a răspunde cerințelor de protecție a mediului, prin găsirea de soluții de reciclare a deșeurilor industriale, care ocupă suprafețe de teren de depozitare însemnate, și care, prin prezența lor afectează elementele de bază ale activității acestui sector important pentru societate și anume protecția mediului, respectiv calitatea pământului natural, a apei și a aerului.

În acest context, sectorul de infrastructură de transport rutier a avut și are specialiști, care și-au concentrat atenția către această problemă, încercând abordarea și cercetarea în amănunt a utilizării de deșeuri industriale prin folosirea directă sau prin prelucrare a materialelor din depozitele de reziduu industrial în construcția de drumuri.

Ținând cont de toate informațiile studiate în cadrul tezei de doctorat, prin încercări de laborator atât în regim static, încercări complexe precum și de toate informațiile teoretice studiate și analizate în rapoartele de cercetare, se poate preciza la finalul programului de cercetare aferent tezei faptul că utilizarea deșeurilor industriale în compoziția amestecurilor bituminoase influențează într-un mod benefic mediul înconjurător cât și conservarea resurselor naturale care nu sunt regenerabile, acestea fiind în declin treptat.

Astfel, la nivel de detaliu al rezultatelor obținute în cadrul Programului de Cercetare al tezei de doctorat, se poate menționa ca rezultat obținut faptul că demonstrarea porozității mai ridicate a agregatelor din zgură de furnal față de agregatele naturale, poate fi recomandată prin evaluării ale dozajelor de mixtură asfaltică în cazul utilizării zgurii de furnal la un dozaj de peste 30 % din agregatele înlocuite, fiind necesară restabilirea procentului optim de bitum, pe baza studiilor de dozaje ale compoziției mixturilor asfaltice efectuate în laboratoare de specialitate.

Utilizarea agregatelor artificiale din zgură de furnal în compoziția mixturii asfaltice a demonstrat mai multe avantaje precum: stabilitate ridicată, rezistență la derapajul autovehiculelor, rezistență bună la uzură pneu-carosabil, iar la nivelul de utilizare al materialelor provenite din deșeuri industriale în componența mixturii asfaltice proiectate în laborator, s-au obținut rezultate notabile, precum rezistență la făgășuire, modul de rigiditate îmbunătățit, rezistență la oboseală sporită, rezistență la deformării permanente, rezistență mare la coeziune, în plus prezintă conductivitate electrică (ceea ce înseamnă că se pot aplica curenți electrici pe suprafața structurii rutiere care are în compoziție astfel de agregate cu scopul de a topi zăpada și gheața). Mai mult, utilizarea acestora se poate realiza cu lianți bituminoși uzuali datorită faptului că agregatele din zgură de furnal sunt compatibile cu aceștia.

În același timp, utilizarea agregatelor artificiale din zgură de furnal prezintă și dezavantaje precum: potențial mare de expansiune a volumului în prezența umidității, precum și faptul că necesită un dozaj sporit de liant bituminos (datorită structurii sale poroase).

Cercetările efectuate în cadrul părții experimentale a acestei teze de doctorat au condus la concluzia că mixturile asfaltice ecologice pentru stratul de bază de tipul AB 22,4 se pot confecționa utilizând zgură de furnal ca înlocuitor al agregatelor naturale în proporții diferite, cuprinse între 20 și 60%. S-a demonstrat că înlocuirea agregatelor calcaroase în compoziția mixturilor asfaltice cu agregate artificiale din zgură conduce la obținerea unor rezultate îmbunătățite din punct de vedere al stabilității Marshall și a modului de rigiditate evaluat.

Din sinteza documentară se poate afirma că înlocuirea agregatelor de carieră cu agregate artificiale din zgură de furnal conduce la obținerea unei mixturi asfaltice pentru stratul de bază cu caracteristici îmbunătățite atât timp cât procentul de zgură din totalul de agregate nu depășește dozajul de 30%, iar sorturile înlocuite sunt în principal 4/8 și 8/16. (CCMMM, et al., 2014)

Studiile efectuate au demonstrat că înlocuirea agregatelor naturale cu agregate din zgură de furnal în cadrul unei compoziții de mixtură asfaltică din strat de legătură BAD 22,4 prin înlocuirea agregatelor naturale în procent predeterminat prin studii de laborator (așa cum s-a prezentat în conținutul tezei de doctorat) din agregatul total, analize efectuate prin încercări complexe de laborator, în funcție de sorturile existente în compoziția mixturii, au condus la rezultate foarte bune pentru înlocuirea a maximum 40-50 % cu agregate artificiale. Aceste dozaje de mixtură asfaltică au condus la proprietăți îmbunătățite ale modului de rigiditate prin utilizarea acestui tip de deșeu industrial. Se recomandă ca în majoritatea specificațiilor tehnice la utilizarea de materiale cu adaosuri de materiale reciclate din deșeuri industriale să se prevadă acoperirea acestora cu un strat asfaltic clasic de uzură (mixtură asfaltică doar cu agregate naturale), recomandat în normativele de drumuri în vigoare. În acest mod, se acoperă cerințele legate de uzura la contact direct pneu-carosabil la acțiunea traficului rutier.

Concluzia principală care rezultă din acest program de cercetare din teza de doctorat susține că înlocuirea parțială a agregatelor minerale de carieră cu zguri siderurgice influențează considerabil caracteristicile fizico-mecanice ale mixturii asfaltice. Este în primul rând esențial ca mixtura asfaltică să aibă dozaje bine stabilite la analiza compoziției proiectate în laborator, care să conducă la un material cu comportare satisfăcătoare în timp, respectiv să îndeplinească condiții de respectare a duratei normate de funcționare, stabilită la proiectarea lucrării de drum. Având în vedere disponibilitatea zgurilor care sunt stocate în halde în mai multe zone din țara noastră, acestea se pot reutiliza în proporții predeterminate de studiile de laborator, în cadrul structurilor rutiere, atât în zona straturilor din materiale granulare ale fundației drumului (situație destul de des întâlnită), dar și în cadrul mixturilor asfaltice pentru straturi de bază sau de legătură pentru drumuri de clasă tehnică III-IV sau pentru categorii tehnice de străzi II-III.

De asemenea, s-a demonstrat în repetate rânduri faptul că adăugarea anumitor materiale provenite din deșeuri industriale poate aduce beneficii și asupra calității mixturii asfaltice (a se observa comportamentul adăugării cenușii de termocentrală ca înlocuitor al filerului uzual de calcar care a condus la rigidizarea mixturii asfaltice, oferindu-i acesteia proprietăți care pot fi comparate cu utilizarea polimerilor/elastomerilor în compoziția amestecului bituminos).

Mai mult, s-a demonstrat că utilizarea filerului din șlam poate fi realizată pentru un procent de 50, respectiv 100 % în compoziția mixturii asfaltice, însă la utilizarea în dozaj de 75 % trebuie să se țină cont de faptul că indicele de curgere Marshall are o valoare determinată prin studiile de laborator aferente tezei de doctorat de 7 mm, mult mai mare comparativ cu

limita impusă de 4 mm. Plecând de la acest rezultat putem să anticipăm rezultatele slabe obținute prin încercarea la orieraj care nu se încadrează în limitele impuse în vigoare pentru acest tip de dozaj de mixtură asfaltică cu filer din deșeu industrial. În acest caz, recomandarea făcută în urma evaluării rezultatelor cercetării din teza de doctorat, este de a se folosi acest tip de filer în stratul de bază a structurilor rutiere, în cazul drumurilor de categorie tehnică 4 și 5, însă nu se recomandă utilizarea în stratul de uzură datorită faptului că acesta poate provoca probleme la apariția deformațiilor permanente.

În același timp a fost prezentată și posibilitatea de utilizare a filerului din sulfat de calciu sau a filerului din cenușă de temocentrală, iar pentru ambele filere s-au demonstrat utilitatea și rezultatele bune pentru înlocuirea a 50 % a filerului de calcar în dozajul mixturii asfaltice AB 22,4.

Mai mult, utilizarea filerului din șlam în compoziția unui strat de uzură precum BA 16 în mai multe dozaje a demonstrat că acesta poate înlocui cu succes filerul de calcar pentru drumurile de clasă tehnică 4 și 5, dar trebuie să se țină cont de dozajul optim care poate fi înlocuit în funcție de rezultatele demonstrate în Programul de Cercetare al Tezei de Doctorat.

Utilizarea materialelor provenite din deșeuri industriale introduse în compoziția mixturilor asfaltice va diminua sau chiar va elimina probleme de poluare produse de deșeuri prin stocare, depozitare și prelucrare pe termen mai lung și astfel, va fi eliminată și necesitatea depozitelor existente de multă vreme în vecinătatea obiectivelor industriale producătoare de deșeuri industriale.

Materialele naturale sunt epuizabile în natură, cantitatea acestora este în declin treptat, chiar și costul de extragere a materialelor naturale este în creștere. Din această cauză, așa cum a fost demonstrat atât prin cercetările teoretice prezentate prima parte a tezei de doctorat prin sinteza documentară dar și prin studiile experimentale prezentate în cea de-a doua parte, ne poate conduce la concluzia că există materiale provenite din deșeuri industriale care reprezintă o oportunitate din acest punct de vedere în realizarea de mixturi asfaltice, denumite în teză mixturi asfaltice ecologice, prin simplul fapt că în mod direct acest tip de mixtură asfaltică, conduce la ecologizarea zonelor de depozitate, prin diminuare cantitativă sau chiar prin eliminarea acestora.

Formele mai puțin precizate ale impactului haldelor abandonate asupra celorlalți factori de mediu, mai grave decât cele manifestate usual, sunt reprezentate de modificarea compoziției și a calității solurilor din vecinătatea haldelor, ca urmare a depunerilor de particule de cenușă; de infiltrații în subsolul de ape de hidrotransport cu înaltă încărcătură nocivă din halde, datorită unor drenaje imperfecte sau a unor fisuri în chiuveta haldelor; de poluarea apelor freatice cu infiltrații din halde; de afectarea lanțului trofic, începând de la acumularea de metale grele în plante și până la afectarea sănătății umane; de radioactivitatea cenușilor depozitate în halde.

7.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale aduse de autoare în domeniul infrastructurii rutiere sunt:

- contribuția semnificativă a tezei de doctorat o reprezintă evidențierea posibilității de utilizare a materialelor provenite din deșeuri industriale la realizarea compozițiilor de mixtură asfaltică;
- studii la nivel de cercetare documentară asupra conceptului mixturilor asfaltice care au în compoziție deșeuri industriale;
- evaluări efectuate atât pe plan național, cât și mondial din punctul de vedere al posibilităților de utilizare a diverse materiale provenite din deșeuri industriale în compoziția mixturilor asfaltice;
- analiză metode de proiectare a dozajelor de mixturi asfaltice la nivel internațional;
- studii experimentale de laborator asupra caracteristicilor fizico-mecanice a 3 tipuri de agregate;
- evaluări prin analiză chimică și evidențierea caracteristicilor fizico-mecanice asupra pulberilor minerale provenite din deșeuri industriale analizate;
- evaluarea, în premieră națională, prin micrografii SEM și analize EDX a compoziției chimice și a proprietăților fizico-mecanice ale deșeurilor industriale provenite de la uzina sodică și introducerea acestora ca material de umplere în locul filerului, prin înlocuire parțială sau totală;
- proiectarea a 7 dozaje de mixtură asfaltică AB 22,4 cu înlocuirea agregatelor naturale pe sorturi cu agregate artificiale din zgură și evaluarea acestora;
- evaluare din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice prin încercări în regim static asupra acestora, determinarea și stabilirea unui dozaj optim;
- determinări în regim dinamic asupra dozajului optim cu AB 22,4 cu agregate din zgură și filer din sulfat de calciu;
- proiectarea a 7 dozaje de mixtură asfaltică din strat de legătură BAD 22,5 cu înlocuirea agregatelor naturale în procente din cantitatea totală de agregate și evaluarea prin încercări în regim static conform AND 605:2016;
- analiza asupra 17 dozaje de amestecuri de pulberi de filer enunțate în diverse dozaje și amestecuri cu filerul de calcar și evaluarea acestora din punctul de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice;
- utilizând dozajul optim stabilit AB 22,4 cu utilizarea agregatelor din zgură, s-a continuat cu înlocuirea filerului de calcar cu pulberi provenite din deșeuri industriale, în totalitate sau 50%;
- realizarea unui studiu privind evaluarea acestor dozaje noi obținute prin încercări în regim static a condus la obținerea unei noi compoziții optime de AB 22,4 care conține atât agregate artificiale, cât și filer din deșeuri industriale în dozaje optime;
- realizarea unui studiu din punctul de vedere al determinărilor în regim dinamic asupra compoziției optime AB 22,4 cu agregate din zgură și filer din sulfat de calciu;
- proiectarea unei compoziții de mixtură asfaltică BA 16, denumit dozaj martor pentru evaluarea performanțelor la mixturi asfaltice cu conținut de deșeuri industriale;
- utilizarea compoziției BA 16 optime în care s-a înlocuit filerul de calcar cu 50%, respectiv 100% filer din sulfat de calciu, filer din șlam și cu filer din cenușă de termocentrală;
- analiza influenței tipului de filer, precum și a dozajelor stabilite în stratul de uzură ce a condus la evaluarea unei noi compoziții de mixtură de tip BA 16 cu 75% filer din sulfat de calciu cu stabilirea comportării mixturii asfaltice prin efectuare determinări în regim static cât și dinamic asupra compoziției BA 16 cu 75% filer din sulfat de calciu;
- evaluarea duratei de viață la oboseală pe mixtura BA 16 cu filer din șlam în diferite dozaje și evaluarea performanțelor dobândite în urma obținerii deformației specifice pe dozajele studiate;

- corelare între toate caracteristicile obținute în urma determinărilor de laborator efectuate pe mixturile asfaltice studiate prin studiile de performanță între dozajele martor și cele cu deșeuri industriale;
- prezentare dozaje optime obținute pentru stratul de bază, de legătură cât și pentru stratul de uzură care au în compoziție adaosuri din deșeuri industriale, posibil a fi utilizate la drumuri cu clasă tehnică III și IV sau străzi de categorie tehnică II-III, drumuri de categorie tehnică inferioară, respectiv și la tehnici de ranforsare a drumurilor de pământ, drumuri comunale și agricole.

7.3. Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile pentru cercetări viitoare referitoare la posibilitatea de utilizare a deșeurilor industriale analizate în compoziția mixturilor asfaltice evaluate propuse de autoare sunt următoarele:

- principala direcție viitoare de cercetare o reprezintă cercetarea asupra diverșilor compuși obținuți prin prelucrarea deșeurilor industriale care pot fi utilizați în structuri rutiere;
- evaluarea continuă a modului în care fiecare element constitutiv influențează comportamentul și proprietățile compoziției de mixtură asfaltică din care fac parte;
- realizarea unor sectoare experimentale utilizând mixturile asfaltice concepute pentru care s-au obținut cele mai bune caracteristici fizico-mecanice și urmărirea acestora în timp;
- îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice pentru mixturile asfaltice studiate prin utilizarea unor bitumuri modificate – posibilitatea de utilizare a unor aditivi/elastomeri/plastomeri;
- continuarea și extinderea studiilor privind utilizarea acestor tipuri de deșeuri industriale în compoziția mixturilor asfaltice, în special la fenomenul de deformății permanente și la rezistența din oboseală prin considerarea unei varietăți mai ample de dozaje de mixturi asfaltice pentru toate straturile unei structuri rutiere;
- continuarea cercetărilor privind în perspectivă către utilizarea de materiale noi ce apar în domeniu și pot fi introduse în compoziția structurilor rutiere.

BIBLIOGRAFIE

- [1] *** SR EN 1304, 2003. "Agregate pentru amestecuri bituminoase", București: Asociația de Standardizare din România.
- [2] *** SR 4032-1, 2001. "Lucrări de drumuri. Terminologie", București: Asociația de Standardizare din România.
- [3] 8th World Congress and Expo on Recycling, 2018. "Recycling conference series". [Interactiv] Available at: <https://recycling.conferenceseries.com/>
- [4] Adrian Burlacu, Carmen Răcănel, 2014. "Reducing costs of infrastructure works using new technologies". Split, Croatia, Tiskara Zelina, pp. 189-195.
- [5] Agenția pentru Protecția Mediului Vâlcea, 2012. "Autorizație integrată de mediu Nr. 68/12.09.2012", Ministerul Mediului și Schimbărilor Climatice. Agenția Națională pentru Protecția Mediului.
- [6] Andrei Bogdan, Voinitchi Constantin, Dicu Mihai, 2011. "Condiționarea cenușii în vederea depozitării conforme cu cerințele de mediu și a postutilizării în infrastructuri rutiere", București: CET Govora.
- [7] Angelo Benedetti, Todd Casey și alții, 2008. "Basic Asphalt Recycling Manual." USA: Asphalt Recycling and Reclaiming Association ARRA.
- [8] Antunes I., Way G., Sausa J., Kaloush K., 2006. "The successful world wide use of asphalt rubber", 16th Convegno Nazionale SIIV, Cosenza.
- [9] Carmen Răcănel, Adrian Burlacu, 2016. "Materiale compozite pentru straturi rutiere. Alcătuire și particularități: mixturi asfaltice. Îndrumător pentru lucrări de laborator". ed. 1, București: Conspress (U.T.C.B.).
- [10] Carmen Răcănel, Dicu Mihai, Lazăr Ștefan, Burlacu Adrian, 2012. "Mixturi asfaltice cu agregate calcaroase pentru stratul de bază". Revista de Drumuri și Poduri nr. 109, Volumul ISSN 1222-4235, p. 178.
- [11] Carmen Răcănel, Mihai Lazăr, Claudia Petcu, 2017. "Asphalt mixtures with blast furnace slag performances using WARM MIX technology". 17th Geo Conference – „International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM Albena, 29 june – 05 july, Volumul 17, pp. 43-50.
- [12] Cătălina Lixandru, 2015. "Proiectul Programului de Cercetare Științifică". București: Universitatea Tehnică de Construcții București.
- [13] Cătălina Lixandru, Mihai Dicu, Bogdan Andrei, 2018 ROMCEN Asociația Profesională a Producătorilor și Utilizatorilor de Cenușă din România. "Efectul utilizării cenușii de termocentrală ca alternativă a fillerului de calcar din mixtura asfaltică". a 3-a Conferință Internațională ROMCEN. Producerea și utilizarea cenușii de termocentrală în construcții, 11 mai.
- [14] Cătălina Lixandru, Mihai Dicu, Carmen Răcănel, Adrian Burlacu, 2015. "Ecological solutions applied to hot mix asphalt". Romanian Journal of Transport Infrastructure, pp. 45-55.

- [15] Cătălina Lixandru, Mihai Dicu, Carmen Răcănel, Adrian Burlacu, 2015. *"Soluții ecologice aplicate mixturilor asfaltice la cald"* Conferința Științifică Internațională Cercetare, Administrare Rutieră, "CAR 2015", 9-11 iulie, pp. 329-339.
- [16] Cătălina Lixandru, Mihai Dicu, Georgeta Grîsîc, Bogdan Andrei, 2018. *"Înlocuirea filerului de calcar cu filer din șlamurile uzinelor sodice în mixtura asfaltică ecologică"*. Al XV-lea Congres Național de Drumuri și Poduri, Issue Mediu și schimbări climatice.
- [17] Cătălina Lixandru, Mihai Dicu, Georgeta Grîsîc, Bogdan Andrei, 2018. *"Utilizarea deșeurilor industriale ca înlocuitor al filerului utilizat uzual în mixturile asfaltice"*. Al XV-lea Congres Național de Drumuri și Poduri, Issue Mediu și schimbări climatice.
- [18] CCMMM, CESTRIN, UPT & UTCB, 2014. *"Tehnologie integrată de preparare a mixturilor asfaltice compozite ecologice cu adaos de compuși obținuți prin prelucrarea deșeurilor industriale, pentru realizarea de structuri rutiere performante (ECOASFALT)"*, București: CCMMM.
- [19] Consiliul concurenței, 2004. *"Decizia Consiliului Concurenței Nr. 308/15.11.2004 privind autorizarea ajutorului de stat pentru S.C. Uzinele Sodice Govora S.A."* Râmnicu Vâlcea, Monitorul Oficial Al României.
- [20] Craus J., Ishai I., 1977. *"A method for the determination of the surface area of fine aggregate in bituminous mixtures"*. Journal of testing and evaluation, Vol. 5(4), pp. 284-291.
- [21] Diaconu Elena, Lazăr Ștefan Marian, 2009. *"Valorificarea zgurii de oțelărie în îmbrăcămințile rutiere cilindrate la cald"*. Simpozion Științific Cercetare, Administrare Rutieră, pp. 53-59.
- [22] Duriez M. & Arrambide J., 1962. *"Nouveau traite de materiaux de construction"*. Tomes 1, 2, 3, Paris.
- [23] Elvira Johana Ferreira Perlata, 2013. *"Micro-Analysis of pysicalchemical interaction between the components of asphalt mixture with rubber"*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- [24] Henning N.E., 1974. *"Evaluation of lignite fly ash as a mineral filler in asphaltic concrete"*, St. Paul, Minn: Twin City Testing and Engineering Laboratory. Report No. 2.
- [25] Hugo M. Silva, Joel R. Oliveira, Carlos M. Jesus, 2010. *"Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?"*, University of Minho, Department of Civil Engineering.
- [26] Joumand R., Gudmundsson H., 2010. *"Indicators of environmental sustainability in transport. An interdisciplinary approach to methods"*, France: Institut national de recherche sur les transports et leur securite - INRETS.
- [27] Martin Zaubanis, 2014. *"100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis"*. Resources, Conservation and Recycling, pp. 92 (2014) 230-245.
- [28] McAsphalt Industries Limited, 2012. *"Basic Asphalt Materials Mixture Design and Testing"*, Toronto: MCA Technical Buletin.
- [29] Mehmet Saltan, Betul Oksuz, Volkan Emere Uz, 2013. *"Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt"*. Isparta, Turkey, pp. 271-277.
- [30] Nicolas J., Garber, Lester A. Hoel, 1988. *"Flexible Pavement Design Using The Asphalt Institute Method"*, West Publishers.

- [31] PIARC, 2002. "Word Road Association Mondiale de la Route". [Interactiv] Available at: <http://www.piarc.org/en/publications/technical-reports/?catalog-topic=general&catalog-size=general&catalog-sort=date&catalog-offset=0>
- [32] Praveen Mathew, 2013. "Steel slag ingredient for concrete pavement". International Journal of Innovative Research and Science, Engineering and Technology, pp. Volume 2, Issue 3, India.
- [33] Prof. Dr. Enric Vasquez et al, 2012. "Progress in recycling in the built environment RILEM TC 217-PRE", Springer.
- [34] Răcănel Carmen, 2004. "Proiectarea modernă a rețetei mixturii asfaltice". ISBN 973-685-817-0 ed. București: Matrix Rom .
- [35] Răcănel Carmen, Adrian Burlacu, 2016. "Materiale compozite pentru straturi rutiere – Alcătuire și particularități": Mixturi asfaltice. ISBN 978-973-100-420-4 ed. București: Conspres.
- [36] Răcănel Carmen, Burlacu Adrian, 2016. "Ecological asphalt mixtures with blast furnace slag". 16th Geo Conference – International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM Albena, 30 june – 06 july, Volumul II, pp. 33-40.
- [37] Richard C. Meininger, 2004. "Effects of aggregates and mineral filler on asphalt mixtures performance". Philadelphia: ASTM Publication Code Number 04-011470-08.
- [38] Rosner John, Chehovits James, Morris Gene, 1982. "Fly ash as a mineral filler and anti-strip agent for asphalt concrete". Proceedings of the Sixt International Ash Utilization Symposium, Department of Energy, Volume 1, Washington D.C. .
- [39] United Nations - General Assembly, 1987. "Developement and International Economic Co-operation: Environment. Report of the World Commission on Environment and Development. Our common future", United Nations - General Assembly.
- [40] Vandecasteelee C., van der Sloot H., 2011. "Sustainable management of waste in construction", Waste management, p. 31.