

METODE SUSTENABILE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A CARACTERISTICILOR REOLOGICE ALE MIXTURILOR ASFALTICE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Civilă și Instalații

autor ing. Anda Ligia BELC (căs. ROTUNDU)

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Liviu Adrian CIUTINA

luna Februarie anul 2022

Teza de doctorat „Metode sustenabile de îmbunătățire a caracteristicilor reologice ale mixturilor asfaltice” a fost elaborată pe baza studiilor și cercetărilor efectuate în cadrul laboratoarelor Facultății de Construcții din Timișoara și a Institutului de Cercetări pentru Energii Regenerabile al Universității Politehnică din Timișoara, în perioada 2017-2021. Specializările efectuate printr-o bursă Erasmus (Egletons, ianuarie - aprilie 2019) și printr-o bursă Fulbright (anul universitar 2019-2020) au oferit prilejul unei documentări suplimentare și participarea la programe de cercetare noi. De asemenea, ele au permis compararea și îmbunătățirea interpretării rezultatelor obținute în cercetările proprii.

Teza de doctorat este structurată în cinci capitole, extinse pe 242 pagini și cuprinde 107 figuri, 66 tabele și 185 titluri bibliografice.

Obiectivul principal al tezei de doctorat constă în identificarea posibilităților de producere, în condițiile concrete ale României, a unor mixturi asfaltice la temperaturi mai reduse (numite în continuare mixturi asfaltice călduțe - WMA), în comparație cu mixturile asfaltice clasice (numite mixturi asfaltice la cald - HMA). În acest sens, au fost efectuate încercări privind stabilirea dozajului optim pentru o mixtura asfaltică călduță în vederea utilizării acesteia pentru un strat de uzură, evaluarea performanțelor de laborator ale mixturilor asfaltice preparate la temperaturi reduse și la temperaturi clasice, studiul efectelor aditivilor utilizați (aditiv chimic, aditivi organici și zeolit sintetic) asupra caracteristicilor mecanice ale mixturilor asfaltice călduțe, studiul comportării bitumului la adăugarea aditivilor, respectiv evaluarea impactului asupra mediului a mixturii asfaltice călduțe.

Primul capitol al tezei prezintă sintetizarea studiilor bibliografice efectuate cu privire la stadiul cunoașterii pe plan mondial a producerii mixturilor asfaltice călduțe și la stabilirea necesității implementării unor astfel de tehnologii pornind de la conceptul general al dezvoltării durabile.

Conceptul de dezvoltare durabilă (sustenabilitate) desemnează totalitatea formelor și metodelor de dezvoltare socio-economică care se axează în primul rând pe asigurarea unui echilibru între aspectele sociale, economice și ecologice și elementele capitalului natural. Cea mai cunoscută definiție a dezvoltării durabile este cu siguranță cea dată de Comisia Mondială pentru Mediu și Dezvoltare (WCED) în raportul „Viitorul nostru comun”, cunoscut și sub numele de Raportul Brundtland: „dezvoltarea durabilă este dezvoltarea care urmărește satisfacerea nevoilor prezentului, fără a compromite posibilitatea generațiilor viitoare de a-și satisface propriile nevoi” [1]. Dezvoltarea durabilă nu se concentrează doar pe mediul înconjurător, ci cuprinde trei piloni: dezvoltare economică, dezvoltare socială și protecția mediului înconjurător. Rezultă că, în toate situațiile, este recomandată adoptarea unor soluții tehnico-economice care să permită interferența celor trei piloni ai dezvoltării durabile.

Mixturile asfaltice clasice (la cald) se prepară prin încălzirea materialelor componente (agregate și bitum) la temperaturi de 160...180 °C, ceea ce conduce la consumuri importante de combustibili și la emisii de gaze în atmosferă pe toată durata fabricării, transportului și punerii în operă, dar și la pericolul producerii unor accidente de muncă. Pentru eliminarea acestor deficiențe au fost concepute mixturi asfaltice la rece preparate la temperatura mediului ambiant folosind ca liant derivați ai bitumului (de regulă emulsii bituminoase cationice). Din păcate mixturile asfaltice la rece au performanțe mecanice inferioare celor la cald și nu se pot utiliza de regulă pentru realizarea îmbrăcămintei bituminoase.

În scopul îmbinării avantajelor celor două tehnologii în ultimii ani au fost concepute pe plan mondial mixturile asfaltice călduțe. Acestea sunt preparate și puse în operă la temperaturi semnificativ mai reduse decât cele clasice (temperaturi de preparare de cca 120...150 °C și temperaturi de punere în operă de 100...130 °C), sporirea lucrabilității necesare punerii în operă în bune condiții fiind dată de aditivi speciali (aditivi chimici și aditivi organici) sau zeoliți. Literatura de specialitate arată că aplicarea acestor tehnologii poate conduce la reducerea emisiilor de gaze cu 10...50%, respectiv diminuarea consumurilor de combustibili cu 11...35% [2].

Conform European Asphalt Pavement Association [3], tehnologiile pentru producerea mixturilor asfaltice călduțe se pot clasifica astfel:

- tehnologii de spumare a bitumului;
- tehnologii pe bază de aditivi organici;
- tehnologii pe bază de aditivi chimici.

În literatura de specialitate sunt menționate mai multe tehnologii de spumare a bitumului [2–7]. Aceste tehnologii urmăresc reducerea vâscozității liantului în timpul preparării și punerii în operă a mixturii asfaltice. Există mai multe metode de introducere a unor cantități mici de apă în bitumul fierbinte. La contactul lor, apa se transformă în vapori, mărește volumul bitumului și îi reduce vâscozitatea pentru o anumită perioadă de timp, și anume până la răcirea amestecului când spuma formată dispăre, iar bitumul reia caracteristicile unui bitum obișnuit.

Aditivii organici sunt adăugați direct în bitum sau sunt introduși la nivelul malaxorului pentru reducerea vâscozității liantului. Aditivii organici trebuie aleși astfel încât temperatura lor de topire să fie mai mare decât temperaturile la care se așteaptă să ajungă stratul rutier în exploatare în scopul unei bune comportări a acestuia la deformații permanente și o susceptibilitate mai redusă la temperaturi scăzute [8,9].

Aditivii chimici nu modifică vâscozitatea bitumului, în schimb ei acționează ca substanțe tensioactive, reglând și reducând tensiunile la interfața dintre agregate și bitum, la temperaturi de 90...140°C, fiind astfel posibilă omogenizarea liantului cu agregatele și compactarea mixturii asfaltice la temperaturi mai mici decât cele obișnuite [2,3,5].

Avantajele rezultate prin aplicarea tehnologiilor de fabricare și punere în operă ale mixturilor asfaltice călduțe [2,3,10,11] pot fi sintetizate astfel:

- îmbunătățirea condițiilor de muncă pentru muncitori datorită reducerii emisiilor de fum;
- reducerea emisiilor de gaze nocive cum sunt gaze cu efect de seră;
- îmbrăcămintele bituminoase pot fi puse în operă la temperaturi mai reduse, rezultând o mărire a perioadei recomandate pentru realizarea lucrărilor de asfaltare;
- mixturile asfaltice călduțe pot fi transportate pe distanțe mai mari;
- compactarea este mai ușoară ca urmare a lucrabilității mai bune;
- stratul bituminos se poate da mai repede în circulație;
- posibilitatea de a adăuga cantități mari de mixtură asfaltică recuperată (reciclată);
- reducerea energiei totale consumate pentru realizarea stratului bituminos.

În Europa, pe baza rezultatelor de laborator și de teren centralizate pe o durată de max. 4 ani, mixturile asfaltice călduțe au demonstrat performanțe egale sau chiar mai bune decât mixturile asfaltice la cald [12–15]. În SUA au fost certificate performanțe similare între cele

doă tipuri de mixturi asfaltice după doi ani de utilizare [6,8,16]. Performanța în timp a acestor mixturi asfaltice este încă insuficient studiată datorită lipsei datelor pe termen lung de pe teren [11]. Rezultatele cercetărilor publicate până în prezent, conduc la concluzia că pentru obținerea unor mixturi asfaltice călduțe corespunzătoare este necesar să se acorde o atenție sporită asigurării unor anumite caracteristici ale acestora, în principal: sensibilitate la apă, rigiditate și rezistență la deformații permanente.

Din studiul literaturii de specialitate rezultă concluzia că una dintre preocupările actuale de bază ale cercetătorilor din sectorul rutier, din întreaga lume, este legată de găsirea unor soluții viabile pentru reducerea temperaturilor de preparare și punere în operă a mixturilor asfaltice la cald.

Studiul materialelor componente ale mixturii asfaltice (Capitolul 2) a urmărit, pe de o parte, determinarea caracteristicilor materialelor de bază - agregate naturale, filer și bitum cu care s-a intenționat să se lucreze la conceperea de mixturi asfaltice călduțe și verificarea conformității acestora în raport cu normele tehnice în vigoare pentru mixturile asfaltice la cald, respectiv, pe de altă parte, verificarea influenței pe care o au diferiții aditivi folosiți asupra caracteristicilor bitumului pur considerat.

Încercările de laborator au fost efectuate în cadrul Laboratorului de geotehnică și căi de comunicație terestre al Departamentului Căi de Comunicație, Fundații și Cadastru din cadrul Facultății de Construcții din Timișoara.

Agregatele naturale utilizate provin dintr-un zăcământ de diorit, cu rocă extrem de compactă și rezistențe mecanice mari. Încercările de laborator specifice agregatelor naturale pentru drumuri au scos în evidență rezistențe mari la fragmentare și la uzură și o prelucrare corespunzătoare prin concasare și sortare (granulozitate, forma granulelor). Încercările efectuate au condus la concluzia că nisipurile și criblurile investigate corespund pentru a fi folosite la prepararea mixturilor asfaltice.

Filerul analizat a fost unul clasic, de calcar, cu granulozitatea corespunzătoare cerințelor impuse pentru a fi folosit la prepararea mixturilor asfaltice.

Bitumul este un liant hidrocarbonat care datorită ușurinței cu care poate fi folosit și a principalelor lui proprietăți, în special legate de: adezivitate, plasticitate, ductilitate, insolubilitate în apă și inerție la numeroși agenți chimici, a cunoscut o dezvoltare importantă în domeniile rutier și industrial [17–20]. Comportarea acestuia este diferită funcție de condițiile de solicitare și de temperatură [21–23]. Astfel, bitumul se deformează diferit pentru temperaturi normale ale mediului ambiant și pentru încărcări provenite din trafic extrem de variate ca mărime și frecvență de aplicare [24,25]. În aceste condiții, bitumul influențează hotărâtor proprietățile mixturilor asfaltice. Astfel, mixturile asfaltice care se deformează ușor sunt predispuse la făgășuire, iar cele care sunt prea rigide sunt susceptibile la oboseală și fisurare.

Prin încercările specifice efectuate: penetrație, punct de înmuiere inel și bilă, ductilitate, s-a demonstrat că liantul luat în considerare este un bitum 50/70, corespunzător pentru realizarea unor betoane asfaltice pentru stratul de uzură în zone climaterice calde, incluziv pentru regiunea Banat. De asemenea, verificarea adezivității bitumului la agregatele naturale considerate, prin metoda de încercare calitativă cu spectrofotometrul, a condus la concluzia că liantul are o adezivitate foarte bună la granulele de agregat.

În plus față de încercările clasice pe bitum au mai fost efectuate: investigarea comportării bitumului la temperaturi scăzute prin determinarea modulului de rigiditate la încovoiere cu ajutorul reometrului cu bară de încovoiere (BBR – Bending Beam Rheometer) și analiza susceptibilității lianților la temperaturi ridicate prin determinarea modulului complex de forfecare și a unghiului de fază cu ajutorul reometrului cu forfecare dinamică (DSR – Dynamic Shear Rheometer).

Partea a doua a investigațiilor referitoare la amestecurile de bitum cu diverși aditivi (aditiv chimic în dozaj de 0,5 % din bitum, zeolit în dozaj de 5,5 % din bitum, ceară moale în

dozaj de 1,5 % din bitum și ceară clasică în dozaj de 1,5 și 3,0 % din bitum) a urmărit identificarea modului în care caracteristicile bitumului pur sunt afectate de introducerea aditivilor. Au rezultat șase seturi de încercări pe bitum pur, respectiv bitum pur + aditivii susmenționați.

Amestecurile de bitum considerate sunt următoarele: bitum pur, bitum cu 3 % ceară sintetică clasică din masa bitumului (B+3%W1), bitum cu 1,5 % ceară sintetică clasică din masa bitumului (B+1,5%W1), bitum cu 1,5 % ceară mai moale din masa bitumului (B+1,5%W2), bitum cu 0,5 % aditiv chimic din masa bitumului (B+0,5%C), respectiv bitum cu 5,5 % zeolit sintetic din masa bitumului (B+5,5%Z).

Prin refacerea încercărilor specifice pe bitum și aditivi s-a constatat că ceara clasică influențează cel mai mult caracteristicile bitumului pur. Astfel, la adăugarea aditivului organic clasic în procent de 3 % rezultă durificarea cea mai accentuată a bitumului, ceea ce conduce la valori neconforme unui bitum 50/70, pentru penetrația la 25 °C, punctul de înmuiere și indicele de penetrație. Dacă ceara sintetică se adaugă în proporție de doar 1,5 % atunci indicele de penetrație se încadrează în limita admisă, totuși fără ca penetrația și punctul de înmuiere să fie similare bitumului inițial.

Cele mai apropiate rezultate de ale bitumului pur au fost obținute în cazul utilizării aditivului chimic, în timp ce zeolitul și ceara moale conduce la afectarea în mică măsură a caracteristicilor inițiale. Practic, caracteristicile obținute în urma introducerii aditivilor corespund unui bitum 50/70.

De asemenea, în cazul încercărilor BBR și DSR, ca și în cazul încercărilor clasice pe bitum, s-a constatat o durificare a bitumului odată cu adăugarea cerii în special la adăugarea cerii clasice și în mod deosebit în situația unui dozaj ridicat de 3 %, precum și păstrarea aceluiași proprietăți în cazul amestecului cu zeolit sintetic sau aditiv chimic.

Testarea în laborator a susceptibilității la temperaturi scăzute cu aparatul BBR a lianților și masticurilor bituminoase a permis evidențierea faptului că aditivii considerați pentru a fi utilizați la prepararea unor mixturi asfaltice călduțe nu conduc la modificări semnificative ale reologiei bitumului pur, chiar dacă se observă mici influențe ale prezenței acestora în amestecuri.

Alura și valorile obținute pentru curbele modulului de rigiditate și ale pantei m (panta curbei de rigiditate în raport cu timpul) sunt apropiate pentru toți lianții testați. Se remarcă faptul că valorile pantei m sunt foarte apropiate în cazul amestecurilor de bitum, iar în cazul bitumului pur valorile sunt mai mari. Valorile mai mici indică faptul că folosirea aditivilor respectivi conduce la o capacitate mai redusă a bitumurilor obținute de a elibera tensiunile termice acumulate la temperaturi reduse.

Temperatura limită admisă pentru un anumit bitum luat în analiză reprezintă temperatura cea mai mare, cea mai defavorabilă, dintre temperatura aferentă unui modul de rigiditate la încovoiere la 60s de 300 MPa și temperatura aferentă unei pante m la 60 s de 0,30. Pentru majoritatea probelor studiate, temperatura limită admisă a rezultat în funcție de valoarea limită a modulului de rigiditate, și se poate deduce astfel că acesta controlează, în principal, dezvoltarea tensiunilor termice. Un bitum mai consistent conduce la tensiuni mai mari, în raport cu un bitum de consistență mai redusă, fără a conta valoarea pantei m . Totuși, pentru valori apropiate ale modulului de rigiditate, panta m poate juca un rol important în dezvoltarea tensiunilor acumulate la temperaturi scăzute.

Temperatura limită admisă este ușor mai mare în cazul bitumului cu ceară, decât în celelalte cazuri, concluzia fiind că aceasta îl face mai susceptibil la temperaturi reduse. Același aspect este evidențiat și în cazul amestecurilor de mastic bituminos.

Aditivul chimic este cel care are un impact mai mic asupra caracteristicilor bitumului, în timp ce ceara clasică conduce la cele mai importante modificări. Ceara este responsabilă pentru o creștere notabilă a punctului de înmuiere și a temperaturii limită, în comparație cu

ceilalți aditivi studiați.

În cazul masticurilor bituminoase testate rezultatele obținute conduc concluzii similare ca și în cazul lianților. Totuși se remarcă o creștere importantă a rigidității, modulul de rigiditate la încovoiere fiind de 2,5...3,0 ori mai mare în cazul masticurilor bituminoase decât în cazul lianților. În ceea ce privește valorile pantei m se constată că sunt foarte apropiate de cele obținute pe amestecurile de bitum. În aceste condiții, este de remarcat o creștere considerabilă a temperaturii limită admise odată cu adăugarea filerului în amestec în toate cazurile, rezultând că acesta conduce la o susceptibilitate mai mare la temperatură a masticului bituminos în raport cu liantul folosit.

Aceste rezultate sunt confirmate și de literatura de specialitate care arată că masticul bituminos conduce la creșterea rigidității și a stabilității mixturilor asfaltice la temperaturi ridicate. Prin urmare, creșterea punctului de înmuiere înel și bilă, respectiv a temperaturii limită (determinată cu încercarea BBR), pentru toți lianții considerați, prin introducerea filerului, confirmă o comportare mai bună la temperaturi ridicate ale masticului, în raport cu bitumul. Ceara clasică evidențiază o creștere a punctului de înmuiere înel și bilă de până la 93,6 °C (pentru dozajul cu 3 %), în timp ce pentru ceilalți aditivi și bitumul pur punctul de înmuiere înel și bilă ajunge la 56...59 °C, fapt care poate pune în evidență o susceptibilitate ridicată la fisurare a unor astfel de amestecuri.

Rezultatele obținute prin încercarea DSR pe bitumuri și masticuri converg spre aceleași concluzii și anume că ceara clasică, cu atât mai mult cu cât dozajul este mai mare, conduce la afectarea caracteristicilor bitumulului pur. Alți aditivi, inclusiv ceara mai moale, au o comportare asemănătoare cu a liantului inițial.

Studiul mixturilor asfaltice (Capitolul 3) a vizat compararea caracteristicilor obținute în laborator pentru mixturi asfaltice călduțe preparate/compactate la diverse temperaturi (140/120, 120/120, 120/100 °C) folosind aditivii: ceară, ceară moale, aditiv chimic, zeolit, cu caracteristicile rezultate pentru același tip de mixtură asfaltică produsă la cald. A fost considerat un dozaj de beton asfaltic pentru stratul de uzură cu dimensiunea maximă a agregatelor de 16 mm, utilizat pe scară largă în tehnica rutieră din România.

În cadrul studiului au fost determinate și comparate caracteristicile unui beton asfaltic BA 16, cu un dozaj proiectat și verificat prin încercări de laborator, în următoarele condiții: la cald (notat HMA), la temperaturi reduse fără aditivi (notat HMA_LT), cu adaos de 3 % ceară din masa bitumulului (WMA_3%W1), cu adaos de 1,5 % ceară din masa bitumulului (WMA_1,5%W1), cu 1,5 % ceară mai moale din masa bitumulului (WMA_1,5%W2), cu 0,5 % aditiv chimic din masa bitumulului (WMA_0,5%C) și cu 0,3 % zeolit sintetic din masa mixturii asfaltice (WMA_0,3%Z). Dozajul de bitum considerat a fost de 5,2 % din mixtura asfaltică. Procentele folosite pentru aditivi și zeolit sintetic au fost o recomandare de către furnizori.

Etaplele cercetării efectuate au urmărit, în principal: prepararea de epruvete cilindrice de tip Marshall, cu presa giratorie și a epruvetelor paralelipipedice cu compactorul cu placă, determinarea caracteristicilor fizico-mecanice obținute pe probele de mixtură asfaltică și interpretarea rezultatelor prin raportarea lor la valorile recomandate de normativul românesc în vigoare pentru un beton asfaltic BA 16 produs la cald.

Pentru toate tipurile de mixturi asfaltice considerate, s-au determinat densitatea aparentă, absorbția de apă, volumul de goluri, stabilitatea și indicele de fluaj Marshall, modulul de rigiditate, rezistența la deformații permanente (fluajul dinamic), sensibilitatea la apă și rezistența la formarea fâgașelor.

Pentru realizarea încercărilor de laborator descrise au fost preparate în total un număr de 114 epruvete Marshall, 213 epruvete cu presa giratorie și 14 epruvete cu compactorul cu impact.

Toate mixturile asfaltice călduțe prezintă valori net superioare față de mixtura asfaltică fără aditivi la temperaturi reduse pentru densitatea aparentă și foarte apropiate de valoarea

întâlnită în cazul mixturii asfaltice etalon. Este de remarcat faptul că obținerea unui volum de goluri de 3...5 % se realizează pentru un lucru mecanic de compactare mai mic decât în cazul mixturii asfaltice preparată la cald, ceea ce demonstrează o lucrabilitate foarte bună a mixturilor asfaltice cu aditivi pentru reducerea temperaturilor de lucru.

Rezultatele obținute pe epruvete tip Marshall de stabilitate și fluaj au condus la concluzia că aditivii folosiți permit obținerea unor caracteristici, în general, echivalente mixturii asfaltice preparate și compactate la cald, cu o ușoară creștere a indicelui de fluaj peste valoarea obținută pentru HMA, în cazul folosirii aditivilor de tip ceară și a preparării mixturii asfaltice la 140 °C.

În ceea ce privește modulul de rigiditate, au fost obținute valori mai ridicate în cazul mixturilor asfaltice cu aditivi față de valoarea înregistrată pentru mixturile asfaltice la cald, în special dacă au fost folosiți aditivi de tipul ceară. Cele mai ridicate valori s-au înregistrat pentru betonul asfaltic preparat cu 3 % ceară dură și cel preparat cu 1,5 % ceară moale. Excepție de la această regulă face mixtura asfaltică cu zeolit sintetic pentru care modulul de rigiditate este aproximativ egal cu cel obținut pentru mixtura asfaltică la cald. Pe de altă parte, nu sunt sesizate diferențe foarte mari între valorile obținute pentru același tip de aditiv odată cu modificarea temperaturilor de preparare în intervalul 120...140 °C și de compactare în intervalul 100...120 °C, chiar dacă valorile modulilor descresc odată cu scăderea temperaturilor.

Pentru fluajul dinamic rezultatele obținute nu respectă o anumită regulă, acestea fiind destul de diferite atât considerând aditivii folosiți, cât și temperaturile utilizate la preparare și compactare. Se remarcă, totuși, o comportare mai bună a betonului asfaltic preparat cu ceară dură (dozaj de 1,5 și 3,0 %), în timp ce betonul asfaltic preparat cu ceară moale (dozaj 1,5 %) prezintă o comportare neconcordantă cu rezultatele obținute pe bitum și pe alte mixturi asfaltice călduțe. Betoanele asfaltice preparate cu aditiv chimic și zeolit au o comportare asemănătoare, iar valorile obținute sunt intermediare între cele obținute pe dozajele cu ceară clasică, respectiv moale. Trebuie remarcat faptul că toate rezultatele obținute se încadrează în limitele admise de normativul pentru mixturi asfaltice la cald, ceea ce justifică, și pentru acest criteriu faptul că aditivii utilizați permit prepararea unor mixturi asfaltice la temperaturi mai reduse decât cele obișnuite.

Susceptibilitatea la formarea făgașelor este ridicată în toate situațiile studiate, atât pentru mixtura asfaltică etalon, preparată la cald, cât și pentru betoanele asfaltice cu aditivi. Acest lucru este în concordanță cu încercările efectuate la nivel național și care demonstrează că pragul de 5 % din grosimea epruvetei la 10 000 treceri este greu de obținut chiar și pentru mixturile asfaltice stabilizate.

Sensibilitatea la apă a condus la rezultate extrem de favorabile pentru toate dozajele analizate, ceea ce demonstrează o bună adezivitate a bitumului la agregatele folosite. Rezultatele obținute sunt în concordanță cu determinările de adezivitate efectuate asupra bitumului și agregatelor folosite în cadrul cercetării.

O altă latură a cercetării prezentate în acest capitol se referă evidențierea modulului în care densitatea aparentă și caracteristicile dinamice de rigiditate și fluaj sunt afectate de creșterea energiei de compactare a epruvetelor de la 80, la 205 rotații. S-a constatat că, în special pentru mixturile asfaltice cu aditivi, creșterea energiei de compactare de peste 80 rotații nu conduce la o îmbunătățire evidentă a caracteristicilor fizice și nici a celor dinamice. Acest lucru demonstrează că mixturile asfaltice cu aditivi beneficiază de o lucrabilitate ridicată care le permite cea mai favorabilă compactare la un lucru mecanic redus, chiar sub 80 rotații. Pe de altă parte, lucrabilitatea extrem de ridicată care conduce la un volum de goluri redus, poate fi diminuată prin reducerea dozajului de liant, pe baza unor cercetări aprofundate. În acest sens, trebuie evitată anrobarea parțială a granulelor și sensibilitatea ridicată la apă. De asemenea, acest procedeu va conduce la o creștere a rigidității și la o comportare mai bună la deformații plastice.

În baza analizelor efectuate se poate aprecia că mixtura asfaltică caldă cu aditiv chimic, preparată la 120 °C oferă cele mai bune rezultate, comportarea fiind apreciată ca fiind foarte bună în cazul tuturor testelor efectuate.

Totalitatea rezultatelor obținute în urma prezentei cercetări conduc la formularea concluziei că, în special, aditivul chimic poate fi aplicat în condițiile României pentru producerea unor mixturi asfaltice calde. Pentru toți aditivii folosiți poate fi obținută reducerea temperaturii de preparare și compactare cu cca 40 °C. Astfel, cele mai bune rezultate obținute în laborator au rezultat pentru o temperatură de preparare și compactare de 120 °C.

Capitolul 4 prezintă o abordare diferită a analizelor care se pot efectua asupra mixturilor asfaltice, în general, și a celor calde, în special, conform metodologiei generale Superpave și a particularităților impuse de Departamentul Transporturilor din Oregon (ODOT), prin reglementările tehnice aplicate în acest stat american.

Studiile și cercetările desfășurate în cadrul bursei Fulbright pe durata unui an universitar au vizat aspecte teoretice de familiarizare cu prevederile metodologiei Superpave și a încercărilor efectuate conform normelor AASHTO, specifice S.U.A., participarea la activități didactice destinate masteranzilor și doctoranzilor, încercări de laborator specifice Asphalt Materials Performance Laboratory al Oregon State University și desfășurarea unei cercetări asupra unei mixturi asfaltice calde preparată cu aditiv chimic, care conține și mixtură asfaltică recuperată (RAP).

Administrația Federală a Autostrăzilor (Federal Highway Administration - FHWA) a alcătuit un grup de lucru de experți pentru dezvoltarea unui proces de proiectare optimizat al mixturii asfaltice (Balanced Mix Design - BMD) [26]. Grupul definește BMD ca „proiectarea mixturii asfaltice, utilizând teste de performanță pe epruvete condiționate corespunzător, care abordează multiple moduri de apariție a defecțiunilor, luând în considerare îmbătrânirea mixturii asfaltice, traficul, clima și tipul stratului (amplasarea stratului) în cadrul structurii rutiere”.

Abordarea BMD propusă de Oregon State University (OSU) în proiectul de cercetare SPR 801 [27] este proiectarea volumetrică cu verificarea performanței.

Studiul a urmărit scoaterea în evidență, pe lângă tendința de a găsi soluții de reducere a temperaturilor folosite la prepararea mixturilor asfaltice, a particularităților care stau la baza proiectării dozajelor mixturilor asfaltice în cele două zone geografice ale lumii. Pe de altă parte, s-a urmărit acumularea de cunoștințe teoretice și practice care pot crea premisele îmbunătățirii activității de concepere a dozajelor și de verificare a calității mixturilor asfaltice produse în România, inclusiv prin argumentarea posibilităților de introducere de noi tipuri de încercări în normele tehnice românești.

Pentru analiză a fost realizată o mixtură asfaltică caldă cu 30 % mixtură asfaltică recuperată și cu folosirea unui aditiv chimic utilizat frecvent în SUA.

Metodele de încercare care au fost utilizate în această parte a studiului sunt următoarele: încercarea Semi-Circular Bend (SCB) pentru determinarea rezistenței la fisurare și încercarea Hamburg Wheel Tracking (HWT) pentru determinarea rezistenței la deformații permanente (ornieraj).

Referitor la cercetarea desfășurată asupra preparării unei mixturi asfaltice calde cu aditiv chimic se remarcă următoarele particularități fundamentale în raport cu procedeul aplicat în țara noastră:

- determinarea granulozității scheletului mineral și a dozajului de liant a fost efectuată exclusiv pe baza proiectării volumetrică a mixturii asfaltice, pornind de la curba de densitate maximă, și anume curba lui Fuller și Thompson pentru $n = 0,45$. S-a optat pentru o granulozitate continuă a scheletului mineral, similară dozajelor studiate în România, cu dimensiunea maximă a granulelor de 12,5 mm față de 16 mm în România. De asemenea, scheletul mineral a inclus RAP în procent de 30 %, cu granula maximă

- de 12,5 mm și un conținut de bitum de 5,02 % din RAP;
- comparând scheletul mineral cu unul similar proiectat în România rezultă că nu există diferențe semnificative între fracțiunile folosite, exceptând fracțiunile de părți fine: fracțiunea sub 0,125 mm este mai mare cu cca 25 % pentru dozajul proiectat în România, în timp ce fracțiunea 0,125...2,000 mm este mai mare cu cca 25 % pentru dozajul proiectat în SUA. De asemenea, se poate observa faptul că procentul de granule grosiere este asemănător: 67 % pentru dozajul proiectat în SUA și cca 71 % pentru cel proiectat în România;
 - impunând volumul de goluri pentru etapa de proiectare, a rezultat un dozaj optim de bitum calculat pe baza criteriului volumetric de 5,6 %, față de 5,7 % considerat inițial pentru dozajele proiectate în România. În conformitate cu proiectarea volumetrică a mixturii asfaltice, valoarea volumului de goluri din scheletul mineral (VMA) se încadrează în intervalul de 13,5...17,0 impus pentru mixturile cu dimensiunea nominală maximă a granulelor de 12,5 mm, conform procesului standard de verificare a proiectării mixturii. Valoarea volumului de goluri umplute cu bitum (VFA) este, de asemenea, în intervalul de 65...75, cerut pentru mixturile asfaltice de nivel 4 în Oregon. Raportul fier-bitum este în limitele cerute de ODOT, între 0,8...1,6;
 - pentru verificarea performanțelor mixturii asfaltice prin încercări de laborator au fost adoptate două dozaje suplimentare de liant, și anume au fost folosite dozaje de bitum de 5,1, 5,6 și 6,1 %, raportate la masa mixturii asfaltice. Spre comparație, în cercetările prezentate în capitolele anterioare dozajele de liant au fost de 4,8, 5,2, 5,7 și 6,1 % bitum;
 - pentru cele trei dozaje de bitum au fost preparate epruvete cilindrice cu presa giratorie cu diametrul de 150 mm, la o înălțime de 130 mm pentru studierea rezistenței la fisurare și la o înălțime de 62 mm pentru studierea susceptibilității la deformații plastice. Epruvetele au fost pregătite corespunzător specificului fiecărei încercări. Se remarcă faptul că pentru încercări se folosesc epruvete preparate cu presa giratorie cu diametrul de 150 mm și la o grosime corespunzătoare fiecărei încercări, prelucrate apoi prin tăiere. Spre comparație, în România au fost folosite mai multe tipuri de epruvete: epruvete Marshall preparate prin baterie, epruvete cilindrice preparate cu presa giratorie cu diametrul de 100 mm, dar la 50, 80, 120 și 205 rotații, respectiv plăci pentru determinarea sensibilității mixturilor la deformații plastice;
 - pentru cele trei dozaje de bitum s-a urmărit calibrarea proiectării volumetrică cu o serie de încercări de laborator prin care se analizează performanțele obținute de deformabilitate, și anume: determinarea rezistenței la fisurare și determinarea susceptibilității la dezvoltarea de deformații plastice (ornieraj). Spre deosebire de aceste determinări, dozajele investigate în capitolul 3 au presupus determinarea unor caracteristici mecanice diferite: stabilitatea Marshall, sensibilitatea la apă, modulul de rigiditate, fluajul dinamic și ornierajul;
 - interpretarea rezultatelor de laborator obținute pe mixtura asfaltică cu RAP și a utilizării proiectării optimizate a dozajului a demonstrat că este necesară o reducere a dozajului de liant în raport cu proiectarea volumetrică de la 5,6, la 5,3 %. În capitolul precedent, pentru încercările efectuate în România, s-a ajuns la concluzia că este necesară reducerea dozajului de liant de la 5,7, la 5,2 % și chiar mai mult pentru încercarea la deformații plastice;
 - referitor la dozajul optim de bitum, comparând rezultatele obținute în SUA și în România, se constată că pentru două betoane asfaltice cu granulozitate cvasi-identică se obțin și dozaje de liant identice, chiar dacă încercările de determinare a performanțelor fizico-mecanice sunt diferite.

Pe baza celor două studii efectuate în România și în Oregon pe mixturi asfaltice rezultă faptul că indiferent de procedeu de stabilire a granulozității scheletului mineral respectiv prin

metoda suprafeței specifice sau prin respectarea cerințelor Superpave referitoare la granulozitate, se ajunge la necesitatea reducerii dozajului de bitum proiectat inițial, ca urmare a calibrării acestuia prin încercări de laborator standardizate, chiar dacă acestea diferă cvasitotal în România față de Oregon. Reducerea cea mai accentuată a dozajului de liant proiectat inițial este impusă în ambele situații de încercarea la orniaraj.

În ceea ce privește încercare pentru determinarea rezistenței la fisurare, care nu este specifică României, se remarcă faptul că un dozaj de liant mai ridicat decât cel proiectat pe criteriul volumetric poate fi favorabil, dar nu poate fi acceptat din considerentul pericolului dezvoltării de deformații plastice. Totuși, mixturile asfaltice călduțe, preparate cu aditiv chimic, prezintă o rezistență la fisurare mai bună decât a mixturilor asfaltice realizate la cald, cu același dozaj de bitum. Această concluzie rezultă din analiza lucrabilității mai bune pentru mixtura asfalică cu aditiv chimic, care permite obținerea unei densități mai ridicate, cu beneficii asociate acestei performanțe, pe termen lung.

Analiza grafică de optimizare a rezultatelor încercărilor de laborator efectuată prin intermediul graficului de proiectare eficientă a dozajului, evidențiază sugestiv modul de analiză a activității de proiectare pentru dozajului unei mixturi asfaltice.

Ultima parte a studiului (Capitolul 5) este axată pe analiza de impact asupra mediului pentru evaluarea comparativă a etapei de producție pentru o mixtură asfalică clasică pentru stratul de uzură cu dimensiunea maximă a agregatelor de 16 mm și pentru anumite mixturi asfaltice călduțe preparate cu diverși aditivi de tip organic, aditiv chimic și zeolit sintetic în diferite procente. Mixturile asfaltice evaluate sunt: mixtura asfalică clasică (HMA), mixtura asfalică călduță cu 3 % ceară clasică din masa bitumului (WMA+3%W1), mixtura asfalică călduță cu 1,5 % ceară clasică din masa bitumului (WMA+1,5%W1), mixtura asfalică călduță cu 0,5 % aditiv chimic din masa bitumului (WMA+0,5%C), respectiv mixtura asfalică călduță cu 0,3 % zeolit sintetic din masa mixturii asfaltice (WMA+0,3%Z). În total au fost realizate cinci analize de impact asupra mediului (EIA). EIA a fost realizată utilizând software-ul GaBi [28].

Ciclul de viață al unei mixturi asfaltice constă în cinci faze principale și anume: producerea, construcția, utilizarea, întreținerea și sfârșitul duratei de viață. Studiul prezentat evaluează faza de producere a mixturii asfaltice și a fost evaluată pentru a evidenția impactul tehnologiei de producere a acesteia asupra mediului. Următoarele trei etape au fost considerate ca parte a fazei de producție:

- A1. Procurarea materialelor componente;
- A2. Transportul materialelor componente;
- A3. Producerea propriu-zisă a mixturii asfaltice la fabrica de mixturi asfaltice.

Etapă de procurare a materialelor componente are impactul cel mai mare asupra mediului în toate cele cinci cazuri studiate, urmată de faza de producere propriu-zisă a mixturii asfaltice și de transportul materialelor componente.

Comparând mixtura asfalică la cald cu mixtura asfalică călduță s-a observat că impactul global al WMA a fost aproape egal cu impactul global al HMA. Nu au existat diferențe semnificative între impacturile HMA și WMA. Totuși, în cazul mixturii asfaltice călduțe cu zeolit sintetic s-a remarcat o mărire a impactului pentru toate categoriile studiate. În cazul celorlalte trei tipuri de WMA impactul a fost ușor mai redus decât pentru HMA. Mixtura asfalică călduță cu impactul cel mai redus este cea produsă cu aditiv chimic.

În ceea ce privește faza de producere propriu-zisă a mixturii asfaltice, impactul WMA a fost cu cca 20 % mai mic decât impactul HMA, datorită reducerii temperaturii de preparare. Cu toate acestea, impactul fazei de procurare a materialelor componente a fost puțin mai mare în WMA cu aditivi: cca 4 % în cazul aditivului organic și cca 2 % în cazul aditivului chimic. Pentru zeolitul sintetic se remarcă o creștere de cca 30 % în faza de procurare a materialelor. Astfel, reducerea temperaturii de fabricare a WMA cu zeolit sintetic a produs un beneficiu în faza de producere propriu-zisă a mixturii asfaltice, care a fost compensată de creșterea

impactului fazei de procurare a materialelor ca urmare a compoziției mai complexe mixturii asfaltice călduțe. În consecință, impactului mixturii asfaltice cu zeolit sintetic a fost mai mare decât impactul mixturii asfaltice clasice.

În cazul mixturilor asfaltice cu aditiv chimic, respectiv aditiv organic s-a înregistrat o scădere a impactului asupra mediului față de HMA. Reducerea impactului a fost atribuită în principal reducerii temperaturii de fabricare care a condus la reducerea energiei necesare.

Trebuie remarcat faptul că unul dintre principalele avantaje ale mixturilor asfaltice călduțe este reprezentat de posibilitatea utilizarea unei cantități mai mare de mixtură asfaltică recuperată (RAP) ca urmare a funcționalității crescute a WMA comparativ cu HMA. Performanța îmbunătățită a mixturii asfaltice preparate la o temperatură mai redusă, cu o îmbătrânire mai mică a liantului, contracarează liantul mai rigid din mixtura asfaltică recuperată. Diverse studii au raportat procente de utilizare a mixturii asfaltice recuperate de 50 %. Având în vedere întregul proces tehnologic și impactul aditivilor folosiți, avantajele oferite de scăderea temperaturii de producție sunt diminuate. Cu toate acestea, pe lângă avantajele de impact asupra mediului există beneficii sociale suplimentare care trebuie considerate. Unul dintre acestea se referă la condițiile de lucru din fabrică sau de la punerea în operă a mixturii asfaltice, oferind muncitorilor posibilitatea de a lucra în vecinătatea materialelor mai puțin periculoase (fierbinți), de a inhala mai puțin fum și gaz și de a purta echipament de protecție mai ușor.

Comportarea mixturilor asfaltice, în timp, la temperaturi scăzute sau ridicate, rămâne un subiect de cercetare ulterioară, inclusiv prin realizarea unor experimentări pe teren.

Studiile efectuate au permis publicarea de către doctorand a peste 20 de articole în reviste și volumele unor conferințe naționale și internaționale. Dintre acestea 11 sunt indexate ISI, patru fiind publicate în reviste ISI (dintre care trei în reviste cu factor de impact mai mare de 3), iar 5 sunt indexate BDI.

Referințe

[1] World Commission on Environment and Development (Comisia Mondială pentru Mediu și Dezvoltare), Our common future (Viitorul nostru comun), Oxford University Press, USA, 1987.

[2] J. D'Angelo, J. Cowsert, D.D. Newcomb, Warm-Mix Asphalt: European Practice, 2008.

[3] European Asphalt Pavement Association, The Use of Warm Mix Asphalt. EAPA position paper, (2014). <http://www.eapa.org/> (accessed May 26, 2018).

[4] S.D. Capitão, L.G. Picado-Santos, F. Martinho, Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt, Construction and Building Materials. 36 (2012) 1016–1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>.

[5] M.C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno, Warm mix asphalt: an overview, Journal of Cleaner Production. 24 (2012) 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>.

[6] G.C. Hurley, B.D. Prowell, Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt, (2005). <https://trid.trb.org/view/787746> (accessed April 13, 2020).

[7] M.R. Mohd Hasan, Z. You, X. Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, Construction and Building Materials. 152 (2017) 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135>.

[8] G. Hurley, B. Prowell, Evaluation of Sasobit® for use in warm-mix asphalt, 2005.

- [9] R. Bonaquist, *Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt*, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC, 2011.
- [10] R. Mallick, J. Bergendahl, A laboratory study on CO₂ emission from asphalt binder and its reduction with the use of warm mix asphalt, *International Journal of Sustainable Engineering*. 2 (2009) 275–283. <https://doi.org/10.1080/19397030903137287>.
- [11] N. Bower, H. Wen, S. Wu, K. Willoughby, J. Weston, J. DeVol, Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington state, *International Journal of Pavement Engineering*. 17 (2016) 423–434. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993199>.
- [12] C. Raab, I. Camargo, M.N. Partl, Ageing and performance of warm mix asphalt pavements, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 4 (2017) 388–394. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.07.002>.
- [13] A. Topal, B. Sengoz, B.V. Kok, M. Yilmaz, P. Aghazadeh Dokandari, J. Oner, D. Kaya, Evaluation of mixture characteristics of warm mix asphalt involving natural and synthetic zeolite additives, *Construction and Building Materials*. 57 (2014) 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.093>.
- [14] A. Vaitkus, D. Čygas, A. Laurinavičius, Z. Perveneckas, Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm mix asphalt in Lithuania, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering - BALT J ROAD BRIDGE ENG*. 4 (2009) 80–86. <https://doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.80-86>.
- [15] A. Vaitkus, D. Čygas, A. Laurinavičius, V. Vorobjovas, Z. Perveneckas, Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*. 112 (2016) 800–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212>.
- [16] A. Ali, A. Abbas, M. Nazzal, A. Alhasan, A. Roy, D. Powers, Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*. 48 (2013) 1058–1066. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.081>.
- [17] A. Nikolaidis, *Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality*, CRC Press, 2014.
- [18] J.-F. Corté, H.D. Benedetto, *Matériaux routiers bitumineux: Tome 1, Description et propriétés des constituants*, Hermes Science Publications, France, 2004.
- [19] G. Lucaci, I. Costescu, F. Belc, *Construcția drumurilor*, Editura Tehnică, Romania, 2000.
- [20] J.C. Petersen, *Binder characterization and evaluation*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- [21] D. Lesueur, *Rhéologie des bitumes: Principes et modifications*, *Rhéologie*. 2 (2002) 1–30.
- [22] M. Marasteanu, T. Clyne, J. McGraw, X. Li, R. Velasquez, High-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binders, *Transportation Research Record*. 1901 (2005) 52–59. <https://doi.org/10.3141/1901-07>.
- [23] D. Lesueur, The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification., *Advances in Colloid and Interface Science*. 145 (2008) 42–82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>.
- [24] C. Romanescu, C. Răcănel, *Reologia lianților bituminoși și a mixturilor asfaltice*, Romania, 2003.
- [25] K. Peterson, B. Bury, C. Duinink, D. Holt, A. Johnson, D. Johnson, R. Kjonaas, M. Marasteanu, M. Marti, J. Quade, G. Skok, D. Van Deusen, R.O. Wolters, *Asphalt Paving design guide*, Minnesota Asphalt Pavement Association (MAPA), USA, 2014.
- [26] R. West, C. Rodezno, F. Leiva, F. Yin, *Development of a Framework for Balanced Mix Design*, Project NCHRP 20-07/Task 406, National Cooperative Highway

Research Program, USA, 2018.

[27] E. Coleri, S. Sreedhar, I.A. Obaid, Development of a Balanced Mix Design Method in Oregon, Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration, USA, 2020.

[28] GaBi software, n.d. <http://www.gabi-software.com/international/index/>.