

**Thermomechanical behaviour of bituminous materials including
RAP and rejuvenator and Environmental impact of their fabrication process**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie civilă și instalații

autor ing. Andrei-Roman FORTON

conducători științific:

Prof.univ.dr.ing. Liviu Adrian CIUTINA – Universitatea Politehnica Timișoara

Prof.univ.dr.ing. Hervé DI BENEDETTO, University of Lyon, ENTPE

luna Iunie anul 2021

Rețeaua de drumuri publice din România oferă acces motorizat în majoritatea regiunilor, localităților țării și conform Institutului Național de Statistică [1] lungimea rețelei de drumuri publice la sfârșitul anului 2019 măsura 86 391 km din care: 17 873 km (20,69%) autostrăzi și drumuri naționale, 35 083 km (40,61%) drumuri județene și 33 435 km (38,70%) drumuri locale. Drumurile naționale reprezintă partea majoritară a rețelei de drumuri din țară, aproximativ 70% din traficul rutier desfășurându-se pe acestea. Pe baza programelor de reabilitare și modernizare care a fost realizate în ultimii ani în România, la sfârșitul anului 2019 drumurile naționale au ajuns la: 95,1% drumuri prevăzute cu îmbrăcăminti rutiere moderne, 4% drumuri realizate cu îmbrăcăminte rutieră semipermanentă (macadam), 0,8% drumuri pietruite și 0,1% drumuri de pământ. Doar 42,3% din drumurile județene și 19% din drumurile locale prezintă o îmbrăcăminte rutieră modernă. Pe de altă parte, 38% din totalul drumurilor publice au depășit durata de viață, necorespunzând exigențelor pentru desfășurarea în condiții de siguranță și confort a circulației rutiere și nici celor de mediu. Prin urmare, analizând toate datele prezentate se poate concluziona că un program național bazat pe politici sustenabile de reabilitare și modernizare a rețelei de drumuri din România este binevenit în viitorul apropiat.

Este important de menționat faptul că în România nu există politici privind refolosirea și/sau reciclarea materialelor în domeniul rutier, chiar dacă există unele linii directe și unele norme privind metodele de reciclare. Încă lipsește o strategie națională privind refolosirea materialelor obținute prin frezarea vechilor îmbrăcăminti bituminoase existente care și-au depășit durata de viață, în ideea de a produce noi mixturi asfaltice de înaltă performanță.

O strategie adecvată ar putea fi impunerea utilizării unui procent minim de materiale recuperate (RAP) în producția de noi mixturi asfaltice. O astfel de strategie va conduce în timp la alte strategii legate de creșterea cantităților de reutilizare a materialelor RAP în ideea de a ajunge la „up-cycling”. Această soluție de up-cycling ar putea fi un factor cheie în dezvoltarea durabilă a rețelei de drumuri publice din România. O strategie adecvată de reutilizare a materialelor RAP, bazată pe experiența altor țări europene și recomandările europene, va deveni un instrument cheie pentru România.

În ultimele decenii, s-au depus multe eforturi de cercetare pentru a găsi soluții mai bune pentru a crește rata de reutilizare a materiale recuperate/reciclate și regenerabile utilizate în industria construcțiilor de drumuri.

Drumurile, la fel ca toate celelalte tipuri de construcții necesită pe parcursul ‘vieții’ lor sau la sfârșitul acesteia, mai multe intervenții, cum ar fi reabilitarea, modernizarea, refacerea,

reconstrucția etc., pentru a asigura siguranța și confortul participanților la trafic. Materialele RAP se referă la termenul folosit pentru materialele obținute prin frezare sau prin îndepărtarea completă a îmbrăcăminților bituminoase vechi/degradate. Materialul RAP este considerat ca fiind 100% reciclabil, iar utilizarea sa la producerea de noi mixturi asfaltice duce la beneficii importante, precum reducerea costurilor sau conservarea energiei, agregatelor și lianți bituminoși etc. [2], [3].

Majoritatea materialelor de construcție pot fi doar reciclabile. Pe de altă parte, asfaltul este unul dintre puținele materiale de construcție care este 100% reutilizabil. Prin urmare, materialele asfaltice sunt considerate materiale 100% reutilizabile și reciclabile. Conform Briefingului tehnic (2020) al European Asphalt Pavement Association (EAPA) „reutilizarea materialelor rutiere trebuie să fie întotdeauna prima opțiune și reciclarea a doua” [4].

Din motive economice și de mediu, utilizarea materialelor recuperate (RAP) în producția de noi mixturi asfaltice realizate la cald HMA (Hot-Mix Asphalt) [2], [5]-[8] și mixturi asfaltice ‘călduțe’ WMA (Warm Mix Asphalt) [9], [10] a devenit o strategie comună pentru construcția și întreținerea drumurilor în multe țări.

În ultimii ani, multe țări au dezvoltat diverse politici bazate pe sustenabilitatea în domeniul rutier, bazate pe recuperarea, reutilizarea, reciclarea materialelor pentru a produce noi materiale ‘mai prietenoase cu mediul înconjurător’ (eco-friendlier).

Conform Raportului tehnic anual din 2018 din SUA, industria asfaltului este considerată „cel mai sânguinos reciclator”, unde mai mult de 99% din materialele RAP sunt refofolosite și 82,2 milioane de tone de materiale RAP sunt utilizate în mixturi asfaltice noi [11].

În ceea ce privește partea europeană, conform Asociației Europene de Drumuri (EAPA), cantitatea de materiale RAP disponibile în diferite țări europene, la sfârșitul anului 2018, era de 49,50 Mt. Cele mai mari procente de materiale RAP corespund Germaniei (26% din totalul RAP disponibil în 2018 în Europa), Italia (18%), Franța (16%), Marea Britanie (12%) și 28% pentru celelalte țări. Conform acestor date, în 2018, în Europa, aproape 76% din totalul materialelor RAP disponibile au fost reutilizate la producerea unor noi mixturi asfaltice fabricate la cald/‘călduțe’/rece (71% HMA sau WMA + 5% realizate la rece), 20% reciclate din total și 4% utilizate în alte aplicații. Cu toate acestea, reutilizarea materialelor rutiere în producția de noi mixturi asfaltice nu este foarte populară în România, ne-existând date raportate cu privire la refofolosirea unor astfel de materiale.

Diverse studii au evidențiat faptul că atunci când mai mult de 20% de material RAP este utilizat în masa unor mixturi asfaltice noi, acesta duce la o creștere a modului complex și la reducerea duratei de oboseală a mixturilor asfaltice finale [7], [8], [10], [12] - [14].

Pentru a crește rata de utilizare a materialului RAP și pentru a îmbunătăți performanțele produsului final, multe studii au arătat potențialul agenților de întinerire (agenților regeneratori) de a regenera liantul îmbătrânit din materialul RAP și, în cele din urmă, de a induce un efect pozitiv asupra caracteristicilor mecanice ale produsului final, care pot fi considerat ca fiind un amestec/material mai prietenos cu mediul [15]-[17].

Utilizarea regeneratoarelor (Rej) a fost introdusă pentru prima dată în 1960 ca tratament de conservare a îmbrăcăminților rutiere bituminoase cu rolul principal de a restabili caracteristicile fizice și chimice ale liantului îmbătrânit RAP.

Concluziile mai multor studii și scopurile mai multor programe de cercetare în desfășurare care se concentrează pe investigarea influenței și a efectului diferitelor materiale RAP și a diferiților regeneratori asupra performanțelor finale ale mixturilor asfaltice noi pot fi rezumate după cum urmează:

- regeneratorii pot îmbunătăți caracteristicile de deformare permanentă a mixturilor asfaltice finale - concluziile lui Haghshenas et al. (2016) [18], Zhou et al. (2015) [19];
- performanțele pe termen lung a regeneratoarelor pot să nu prezinte stabilitate la expunerea la temperatură ridicată pentru o perioadă lungă de timp - concluzie raport

NRRA (2020) [20];

- regeneratorii pot reduce rezistența la umiditate - concluzia lui Haghshenas et al. (2016) [18], Tran et al. (2012) [21], Hajj et al. (2013) [22], Im and Zhou (2014) [23];
- regeneratorii pot reduce rigiditatea mixturilor asfaltice finale - concluzii din Tran et al. (2012) [21], Hajj et al. (2013) [22], Im et al. (2014) [23];
- regeneratorii pot îmbunătăți rezistența la fisurare a mixturilor asfaltice finale - concluziile lui Tran et al. (2012) [21], Hajj et al. (2013) [22], Im et al. (2014) [23];
- regeneratorii pot îmbunătăți rezistența la oboseală și pot oferi rezistență la oboseală chiar și după orele de îmbătrânire consumate - concluzii din formularul de raport NRRA 2020 [20]; rezistența la fisurare la temperaturi scăzute a mixturilor asfaltice produse cu material RAP este îmbunătățită atunci când au fost folosiți regeneratorii. De asemenea, chiar dacă probele au fost supuse la îmbătrânire pentru câteva ore, acest proces nu a provocat un efect important asupra rezistenței la fisurare la temperaturii scăzute - concluzii din raportul NRRA 2020 [20].

Studiul prezentat în această teză de doctorat a fost realizat în cadrul unei colaborări între Universitatea Politehnica Timișoara/Facultatea de Construcții/Departamentul Căi de Comunicație Terestre, Fundații și Cadastru din România și Universitatea din Lyon/École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) din Franța. Obiectivele sunt, I) caracterizarea performanțelor termomecanice ale amestecurilor de lianți și a mixturilor asfaltice produse cu materiale recuperate (RAP) și agent regenerat (Rej) și, II) investigarea potențialului impact asupra mediului înconjurător al procesului de producție al unei tone de mixtură asfaltică produsă cu adaos de material RAP, în diferite procente, cu și fără adaos de agent regenerat

Prin urmare, s-au efectuat investigații experimentale cuprinzătoare pe lianți și mixturi asfaltice. Toate testele pe bitumuri și pe mixturi asfaltice au fost efectuate în Centrul de cercetare Infrastructuri pentru Construcții și Transporturi, Laboratorul de drumuri din cadrul Universității Politehnica Timișoara, împreună cu evaluarea de impact asupra mediului înconjurător. Pe de altă parte, analizele numerice, estimările și predicțiile celor mai mulți parametri/caracteristici ale biturilor și mixturilor asfaltice au fost efectuate în cadrul ENTPE.

Studiul asupra amestecurilor de lianți (Capitolul 2) s-a concentrat asupra proprietăților diferitelor amestecuri de bitumuri produse prin amestecarea unui tip de bitum proaspăt/de aport, de penetrație 50/70, un bitum extras și recuperat dintr-un material RAP și un agent regenerat de origine vegetală. Influența și efectele adaosului de bitum RAP și regenerat au fost analizate mai întâi în termeni clasici pe baza investigării proprietăților convenționale europene (penetrație la 25°C, punctul de înmuiere înel și bilă, punctul de rupere Fraass, densitate și ductilitate la 25°C). Efectele acestora au fost de asemenea analizate din punct de vedere al proprietăților termoreologice ale amestecurilor de lianți obținute pe baza testelor de modul complex realizate cu reometrul cu forfecare dinamică DSR (la temperaturi intermediare și ridicate) și a testelor de determinare a modulului de rigiditate la încovoiere realizate cu reometrul cu bară de încovoiere BBR (la temperaturi scăzute). Comportamentul Liniar Vâsco-Elastic (LVE) a tuturor biturilor testate a fost modelat cu succes folosind modelul 2S2P1D (2 elemente elastice, 2 elemente parabolice și 1 element perfect vâscos) dezvoltat în laboratorul ENTPE.

Planul experimental include un total de 17 amestecuri de lianți. Proporțiile dintre bitumul îmbătrânit RAP, bitumul proaspăt și agentul regenerat au fost calculate pentru a reproduce proporțiile reale dintre aceste componente întâlnite în mixturile asfaltice corespondente testate (cu un conținut total de liant de 5,6%, regeneratorul nu a fost considerat ca parte a acestuia) conținând 25%, 50%, și 75% material RAP și 0,0%, 0,2%, 0,4% și 0,6% de regenerat din masa a materialului RAP (în total 12 amestecuri). Aceste proporții corespund la 0%, 5%, 10% și 15% de regenerat din masa bitumului recuperat RAP din amestecurile

finale. Trei amestecuri suplimentare între bitumul RAP și agentul regenerador au fost produse și testate, acestea fiind considerate „materiale de bază” în prima metodă de estimare prezentată în secțiunile următoare. De asemenea, au fost testate și cele două bitumuri de bază.

Rezultatele experimentale arată o descreștere a valorilor penetrației și o creștere a temperaturii inel-bilă, temperaturii Fraass și a indicelui de penetrație o dată cu creșterea conținutului de bitum RAP respectiv cu descreșterea conținutului de regenerador în amestecuri. Tendințe similare celor observate pentru temperatura Fraass și indicele de penetrație au fost observate pentru densitate. Pentru amestecurile realizate fără agent regenerador, alungirea scade odată cu creșterea conținutului de bitum RAP și este întotdeauna mai mică de 150 mm.

Testele DSR de modul complex au fost efectuate la temperaturi cuprinse între 25°C la 85°C pe un domeniu de frecvență de la 0,1 Hz la 10 Hz. Principiul de suprapunere timp-temperatură a fost validat pentru toate bitumurile testate. Datele obținute pe baza testelor DSR efectuate pe toate amestecurile au fost modelate cu succes folosind modelul 2S2P1D pentru care patru parametri au fost considerați constanți pentru toate materialele testate. Astfel doar trei parametri 2S2P1D au fost investigați. Acești parametrii cât și factorii de tranziție prezintă unele tendințe remarcabile (relații liniare sau logaritmice) odată cu creșterea conținutului de bitum RAP și de agent regenerador în masa amestecurilor finale. Vâscozitatea de forfecare constantă la 85°C a fost obținută ca modulul vâscozității complexe la temperatură ridicată/frecvență joasă în domeniul comportamentului Newtonian al bitumurilor. Mai apoi această vâscozitate a fost calculată pentru alte temperaturi, de la 75°C la 25°C, din valorile experimentale obținute la temperatura de referință de 85°C. Pentru toate temperaturile, valorile vâscozității cresc o dată cu creșterea conținutului de bitum RAP și cu descreșterea conținutului de agent regenerador în masa amestecurilor. A fost observat faptul că adaosul de agent regenerador contrabalansează efectul de rigidizare a bitumului RAP din amestecuri.

Temperaturile critice superioare, respectiv inferioare au fost determinate din datele obținute pe baza testelor DSR și BBR. Testele au fost efectuate în concordanță cu cadrul general Superpave, cu unele diferențe minore în analiza rezultatelor testelor pentru a obține temperaturile critice considerate ale amestecurilor testate. Rezultatele experimentale arată că ambele temperaturi critice cresc odată cu creșterea conținutului de bitum RAP din masa amestecurilor și scad odată cu creșterea conținutului de agent regenerador din masa amestecurilor. Se pare că agentul regenerador poate avea un efect de contrabalansare, deoarece neutralizează efectul bitumului îmbătrânit. Cu toate acestea, este interesant de observat faptul că este necesar un dozaj mai mic de agent regenerador pentru a obține o temperatură critică inferioară similară cu cea a bitumului proaspăt decât în cazul temperaturii critice superioare.

Pentru majoritatea parametrilor analizați, rezultatele obținute pentru amestecurile produse cu 10% sau 15% agent regenerador din masa bitumului RAP, sunt mai apropiate de cele obținute pentru bitumul proaspăt 50/70, independent de conținutul bitumului RAP. Dozajul de 10% sau 15% de întinerire depinzând de parametrul investigat. Practic, acest lucru indică capacitatea regeneradorului, din punct de vedere al caracteristicilor termomecanice, de a întineri/reactiva bitumul îmbătrânit RAP și, în cele din urmă, de a oferi un produs final cu proprietăți similare ale bitum proaspăt.

Relații puternice între rezultatele experimentale determinate pentru parametrii convenționali, vâscozitatea la 25°C și ambele temperaturi critice, au fost observate.

De asemenea, au fost propuse două metode de estimare diferite și toți parametrii investigați au fost estimați pentru toate amestecurile produse, pornind doar de la rezultatele experimentale obținute pentru constituenții de bază.

Prima metodă de estimare este o abordare clasică în care 5 bitumuri au fost considerate ca fiind materiale de bază (bitumul proaspăt, bitumul recuperat RAP și cele 3 amestecuri suplimentare RAP + Rej).

A doua metoda de estimare este o nouă abordare cu trei componente (bitum proaspăt,

bitum RAP și agentul regenerat). Pentru agentul regenerat s-au obținut și folosit unele valori echivalente pentru toți parametrii, valori obținute prin minimizarea distanței dintre valorile experimentale și cele estimate pentru toate amestecurile considerate. Trebuie subliniat faptul că aceste valori echivalente au fost utilizate numai în contextul legii de estimare, prin urmare acestea nu sunt destinate să reflecte proprietățile reale ale agentului regenerat.

O corespondență ușor mai bună între valorile estimate ale tuturor parametrilor menționați mai sus, obținuți cu a doua estimare, care este o intrare originală a acestei lucrări, și valorile experimentale, s-a obținut. Mai mult decât atât, cea de-a doua estimare are marele avantaj de a necesita doar parametri pentru fiecare dintre cei trei constituenți de bază, atunci când dozajul este fix.

Pentru a determina valorile unghiului de fază din valorile estimate ale normei modulului complex, pentru toate amestecurile, pe întregul domeniu de frecvență și temperatură, modelul 2S2P1D a fost calibrat pe curbele directe ale normei modulului complex la o temperatură de referință de 55°C, pentru a fi siguri că toate amestecurile analizate sunt materiale termoreologice simple. Aceasta abordare este metodă nouă propusă în această cercetare. S-a observat faptul că valorile calculate ale unghiului de fază sunt apropiate de valorile măsurate pentru toate amestecurile considerate. O corelație mai bună cu măsurătorile experimentale a fost găsită pentru valorile unghiului de fază calculate din modelul 2S2P1D calibrat pe curbele directe ale normei modulului complexe obținute cu cea de-a doua metodă de estimare.

Analiza statistică efectuată pentru a evidenția acuratețea ambelor metode de estimare pentru toți parametrii, considerând toate amestecurile testate, arată că o estimare mai precisă a rezultat prin aplicarea celei de-a doua metode de estimare.

O nouă metodă a fost propusă în cazul în care parametrii echivalenți pentru agentul regenerat nu sunt cunoscuți din experimente anterioare. O bună aproximare poate fi obținută dintr-un singur test efectuat pe amestecul de liant produs dintre bitumul RAP și conținutul maxim de agentul regenerat: RAP + 15% Rej, în cazul acestui studiu. În aceste condiții, rezultatele utilizate pentru valorile aproximative pentru agentul regenerat sunt foarte similare în comparație cu valorile optimizate utilizate în a doua metodă de estimare. Această concluzie este validată, de asemenea, pe două noi amestecuri, acestea având alt conținut de agentul regenerat: 7,5% respectiv 8,5%. Această abordare propusă prezintă marele avantaj de a necesita mai puține teste decât abordarea clasică și poate fi utilizată pentru orice combinație de RAP/regenerat, spre deosebire de abordarea clasică.

Parametrii echivalenți utilizați sunt probabil dependenți doar de agentul regenerat, ceea ce reprezintă un alt avantaj al metodei propuse. Acest punct ar trebui să fie confirmat considerând o gamă mai largă de bitumuri proaspete și alte bitumuri RAP.

Studiul asupra mixturilor asfaltice (Capitolul 3) s-a concentrat asupra investigării comportamentului a 13 mixturi asfaltice produse folosind diferite cantități de material RAP cu sau fără regeneratul de origine vegetală. Bitumurile și agentul regenerat, amestecurile dintre acestea precum și proporțiile lor, sunt aceleași precum cele considerate în capitolul 2 și prezentate, pe scurt, mai sus. Toate materialele utilizate în acest studiu sunt specifice pentru România. Toate materialele (agregate, lianți și material RAP) au fost caracterizate printr-o serie de teste conform specificațiilor din standardele românești.

În primul etapă, au fost produse și testate șapte tipuri de mixturi asfaltice convenționale/tradiționale pentru a determina conținutul optim de liant. Apoi, o a doua campanie experimentală a fost propusă, în care 13 tipuri de mixturi asfaltice produse cu adaos de material RAP și agent regenerat, care au o curbă de granulozitate continuă de 16 mm, similară cu cea utilizată pentru mixtura asfaltică de referință/convențională, același conținut total de liant (5,60% conținut total de liant din masa mixturii asfaltice, agentul regenerat nefiind considerat în acest procent) și aceeași proporție de material RAP (25% RAP lot 0-8 mm + 75% RAP lot 8-22.4 mm).

Măsurători hidrostatice, teste Marshall, teste pentru determinarea rigidității prin încercarea la întindere indirectă la diferite temperaturi (10°C, 15°C, 20°C și 25°C), teste pentru determinarea fluajului dinamic prin încercarea de compresie ciclică cu presiune laterală (300 kPa, confinament 50 kPa, 50°C, 10000 cicluri) și teste de modul complex prin încercarea la încovoiere în două puncte de epruvete trapezoidale, au fost efectuate pe toate cele 13 tipuri de mixtură asfaltică mai sus menționate. S-a evidențiat influența materialului RAP și a agentului regenerat asupra comportamentului mixturilor asfaltice. Efectul creșterii conținutului de material RAP a condus la un comportament mai rigid al mixturilor asfaltice. Pe de altă parte, creșterea conținutului de agent regenerat a condus la un efect invers, care contrabalansează efectul materialului RAP.

Este important de menționat faptul că amestecurile de liant din diferitele tipuri de mixturi asfaltice sunt aceleași cu cele testate în Capitolul 2. Așadar, efectul general al liantului asupra proprietăților mixturii asfaltice este un punct central al acestui studiu. Cu toate acestea, este important de menționat faptul că amestecurile de liant studiate în Capitolul 2 au fost perfect amestecate în laborator. Chiar dacă procente de bitum proaspăt, bitumul RAP și agentul regenerat sunt aceleași, pot apărea unele diferențe între aceste amestecuri perfecte (Capitolul 2) și amestecurile de liant din mixturi asfaltice.

Pentru majoritatea parametrilor investigați (caracteristicile Marshall, modul de rigiditate și fluajul dinamic), variațiile acestora cu valorile penetrației amestecurilor de liant corespondente au condus la relații puternice pentru mixturile asfaltice/amestecurile de liant produse cu același conținut de material RAP/bitum RAP (25%, 50% și 75%). Cu toate acestea, relația generală dintre acești parametri și penetrația biturilor nu este atât de puternică. Aceste tendințe ar putea fi explicate prin faptul că, cel mai probabil, utilizarea materialului RAP duce la o schimbare a curbelor de granulozitate ale mixturilor asfaltice finale. În plus, utilizarea aceleiași energii de compactare pentru toate mixturile asfaltice, conținutul de agent regenerat care a fost stabilit funcție de masa materialului RAP și diferența dintre densitatea agregatelor RAP și densitatea agregatelor de aport conduc la rezultate prezentate în acest studiu.

Datele experimentale obținute din testele de modul complex au fost modelate folosind același model 2S2P1D. S-a observat că parametrii 2S2P1D și factorii de tranziție ai mixturilor asfaltice nu urmează o tendință clară odată cu creșterea conținutului de material RAP și a agentului regenerat. Această observație este în contrast cu tendințele liniare ale acestor parametri cu conținutul de bitum RAP care au fost observate pentru amestecurile de liant corespondente. Modulul E_0 al mixturilor asfaltice prezintă o relație satisfăcătoare cu valorile penetrației biturilor corespondente.

Transformarea SHStS (Shift, Homothety, Shift și time Shift) propusă de echipa ENTPE a fost aplicată pentru a prezice comportamentul mixturilor asfaltice pornind doar de la cunoașterea comportamentului biturilor corespondente. O predicție satisfăcătoare a fost obținută în ciuda intervalului limitat al măsurătorilor DSR pe bitumuri. Modelul 2S2P1D a fost, de asemenea, utilizat cu succes pentru a prezice comportamentul LVE al mixturilor asfaltice. O relație liniară între unii parametri ai mixturilor asfaltice, inclusiv norma modulului complex la 15°C și 10 Hz și valorile de penetrație ale biturilor/amestecurilor corespondente.

Norma modulului complex la 15°C și 10 Hz a mixturilor asfaltice a fost simulată pornind doar de la cunoașterea comportamentului biturilor/amestecurilor corespondente și a celor trei constante SHStS. O bună corelație între rezultatele experimentale și cele simulate ale normei de modul complex a fost obținută, dovedită de valoarea satisfăcătoare a coeficientului de determinare R^2 de 0,981 și de erorile relative care sunt întotdeauna mai mici de 5%.

Merită menționat faptul că toate tendințele prezentate în Capitolul 3 confirmă parțial concluziile prezentate în Capitolul 2.

În ultima parte a studiului a fost efectuată o evaluare de impact asupra mediului înconjurător (EIA) (Capitolul 4) pentru a estima potențialul impact a procesului de producție al

unei tone de mixtură asfaltică dintre cele 13 tipuri considerate și testate în Capitolul 3, asupra mediului, în timp ce toate celelalte procese s-au presupus a fi similare. EIA a fost realizată utilizând software-ul GaBi. Aceasta evaluare a fost realizată considerând următoarele trei etape: aprovizionarea cu materii prime, transportul și fabricarea acestora.

O analiză comparativă și o analiză internă au fost efectuate pentru a evidenția mai bine impactul asupra mediului al procesului de producție a mixturilor asfaltice realizate cu adaos de material RAP și agent regenerativ.

Așa cum era de așteptat, procesul de producție al mixturii asfaltice convenționale duce la cel mai mare impact asupra mediului. Adaosul de material recuperat duce la o scădere clară a consumului de energie și a impactului asupra mediului. Pe de altă parte, atunci când în acest proces sunt folosiți agenți regenerativi, aceștia pot afecta echilibrul energetic și pot reduce diferența de impact asupra mediului. Cu toate acestea, creșterea conținutului de agent regenerativ corespunde unei mici creșteri a impactului. S-a observat un impact considerabil pentru indicatorul ce caracterizează utilizarea terenului, datorită faptului că agentul regenerativ considerat în acest studiu este un amestec de uleiuri vegetale.

Atunci când mai puțin de 25% material RAP este utilizat la producerea unei noi mixturi asfaltice, caracteristicile mixturii finale ar putea fi considerate în limitele specificate de standardele românești pentru o mixtură asfaltică tradițională cu dimensiunea maximă a agregatului de 16 mm. Prin urmare, scăderea impactului asupra mediului este de aproximativ 20% pentru această soluție în comparație cu cea convențională.

Când se utilizează cantități mari de material RAP pentru producerea unei noi mixturi asfaltice, ar trebui utilizați și agenți regenerativi. Deși soluția cu 75% RAP a fost considerată pentru a evidenția potențialul impact asupra mediului al acestui material RAP 100% reciclabil, o scădere substanțială a impactului asupra mediului ar putea fi obținută (mai mult de 50% din impactul obținut pentru soluția clasică).

Pentru procesul de producție a mixturilor asfaltice care conțin material RAP și cantități diferite de agent regenerativ, s-a observat o creștere a impactului asupra mediului odată cu creșterea conținutului de agent regenerativ, comparativ cu cele produse numai cu material RAP. Cu toate acestea, aceasta creștere reprezintă doar aproximativ 1,5% din creșterea impactului de mediu la 0,2% conținut de agent regenerativ din masa totală a mixturii asfaltice finale.

Pe baza investigațiilor experimentale și a rezultatelor prezentate în Capitolele 2 și 3, mixtura asfaltică D.50.R.0.4 (50% material RAP + 0,4% agent regenerativ)/amestecul de liant corespondent (50/70 + 50% RAP + 10% Rej) prezintă un comportament mai apropiat față de cel al unei mixturi asfaltice convenționale/bitumul proaspăt corespondent (50/70). Impactul asupra mediului pentru această soluție (D.50.R.0.4) duce la o scădere de aproximativ 33-40% (în funcție de indicatorul/parametrul de mediu analizat) decât soluția convențională.

Mai multe aspecte ale acestui studiu merită investigații suplimentare. Prin urmare, ca perspective, următoarele puncte ar putea continua activitatea dezvoltată în teza prezentată:

- metoda propusă (a doua abordare) pentru a estima proprietățile convenționale, proprietățile LVE, vâscozitatea, norma modulului complex și temperaturile critice ale amestecurilor de liant produse cu adaos de bitum recuperat RAP și agent regenerativ, este promițătoare, dar necesită în continuare o validare considerând un număr mai mare de diferite bitumuri și agenți regenerativi;
- investigație viitoare ar trebui considerată prin efectuarea testelor DSR pe domenii mai mari de temperaturi și frecvențe și, de asemenea, prin efectuarea unei investigații la temperaturi scăzute a amestecurilor îmbătrânite (RTFOT sau PAV). De asemenea, s-ar putea efectua un studiu al liniarității;
- un alt aspect important care ar trebui investigat este legat de relația dintre compoziție, proprietățile chimice, microstructura și parametrii 2S2P1D ai amestecurilor de liant care sunt produse cu bitum RAP și agenți regenerativi. Acest lucru ar putea aduce

informații cu privire la efectele chimice și termomecanice ale agentului regenerativ asupra comportamentului pe termen lung al amestecurilor de lianți;

- ar trebui luate în considerare diferite condiții de amestecare/producere a amestecurilor într-un studiu viitor pentru a compara rezultatele estimate cu datele experimentale;
- în ceea ce privește studiul comportamentului termomecanic al mixturilor asfaltice produse cu material RAP și agent regenerativ, s-ar putea efectua cercetări suplimentare asupra oboselei, fâșurării și fisurării termice pentru a investiga efectul acestui produs asupra acestor caracteristici. De asemenea, testele de modul complex ar putea fi investigate pe domenii mai mari de temperatură și frecvență, utilizând echipamente/aparatură de compresie-tensiune;
- ar trebui efectuată o analiză suplimentară a relațiilor proprietăților mecanice dintre lianți și mixturi asfaltice. În special, ar putea fi investigată corespondența dintre performanțele de oboseală și performanțele de orneraj și proprietățile biturilor corespondente;
- un punct important care merită investigat este legat de compararea dintre comportamentul și proprietățile mixturilor asfaltice și amestecurilor de liant, respectiv masticurile corespondente. Această cercetare ar putea conduce la câteva date interesante cu privire la auto-vindecarea fisurilor și recuperarea proprietăților liniare vâsco-elastice;
- continuarea analizelor privind impactul asupra mediului înconjurător pentru soluțiile prezentate în acest studiu, realizarea unei evaluări a ciclului de viață (analiza LCA) ar putea fi făcută luând în considerare toate celelalte procese excluse prin condițiile de margine din acest studiu. Astfel, analiza costului ciclului de viață (LCA) ar putea fi completată cu o analiză a costurilor (LCC) pentru mixturile asfaltice produse cu material RAP și agent regenerativ, luând în considerare costurile și materialele locale;
- toate concluziile care au fost evidențiate în acest studiu se bazează pe investigații de laborator și analize conexe. Prin urmare, ar trebui efectuată o validare in-situ prin observații cu privire la performanțele acestor mixturi asfaltice.

Referințe

- [1] Institutul Național de Statistică din România [National Institute of Statistics from Romania]. <https://insse.ro/cms/ro/content/lungimea-căilor-de-transport-la-sfârșitul-anului-2019> (accessed Nov. 07, 2020).
- [2] R. Franke and K. Ksaibati, A methodology for cost-benefit analysis of recycled asphalt pavement (RAP) in various highway applications, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 16, no. 7, pp. 660–666, Aug. 2015, doi: 10.1080/10298436.2014.943217.
- [3] F. Hong and J. A. Prozzi, “Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 19, no. 8, pp. 1–16, Nov. 2018, doi: 10.1080/14680629.2017.1348306.
- [4] European Asphalt Pavement Association (EAPA), “Recommendations for Road Authorities to achieve circular economy through the re-use and recycling of asphalt. Technical Briefing,” 2020.
- [5] G. Mazzoni, E. Bocci, and F. Canestrari, “Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 5, no. 3, pp. 157–168, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.001>.
- [6] F. Yin, F. Kaseer, E. Arámbula-Mercado, and A. Epps Martin, “Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 18, no. sup4, pp. 273–292, Nov. 2017, doi: 10.1080/14680629.2017.1389074.
- [7] N. Tapsoba, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, H. Baaj, and M. Ech, “Behaviour of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and asphalt shingle,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 15, no. 2, pp. 330–347, Apr. 2014, doi: 10.1080/14680629.2013.871091.
- [8] K. H. Moon, A. C. Falchetto, M. Marasteanu, and M. Turos, “Using recycled asphalt materials as an alternative material source in asphalt pavements,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 149–159, 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0211-1.
- [9] Y. A.-S. Sun Yiren A4 - Wang, Weiyang A4 - Chen, Jingyun, Y. Sun, W. Wang, J. Chen, and Y. A.-S. Sun Yiren A4 - Wang, Weiyang A4 - Chen, Jingyun, “Investigating impacts of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement binder content on rutting and fatigue performance of asphalt binder through MSCR and LAS tests,” *J. Clean. Prod.*, vol. 219, pp. 879–893, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.131>.
- [10] W. Song, B. Huang, and X. Shu, “Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 191–198, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.269>.
- [11] X. Li, M. O. Marasteanu, R. C. Williams, and T. R. Clyne, “Effect of Reclaimed Asphalt Pavement (Proportion and Type) and Binder Grade on Asphalt Mixtures,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2051, no. 1, pp. 90–97, Jan. 2008, doi: 10.3141/2051-11.
- [12] R. MCDANIEL and R. M. ANDERSON, “NCHRP Report 452 - Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician’s Manual,” WASHINGTON, D.C, D.C, 2001.
- [13] B. Huang, Z. Zhang, W. Kingery, and G. Zuo, “Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP,” in *Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements*, 2004, pp. 631–638.

- [14] A. Behnood, "Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 171–182, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.209.
- [15] L. P. Ingrassia, X. Lu, G. Ferrotti, and F. Canestrari, "Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 144, pp. 209–222, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034>.
- [16] F. Kaseer et al., "Strategies for Producing Asphalt Mixtures with High RAP Content," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 11, p. 5019002, Nov. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002910.
- [17] V. Antunes, A. Freire, and J. Neves, "A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling," *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 453–469, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258.
- [18] H. F. Haghshenas, H. Nabizadeh, Y.-R. Kim, and K. Santosh, "Research on High-RAP Asphalt Mixtures with Rejuvenators and WMA Additives," 2016. [Online]. Available: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/31604>.
- [19] F. Zhou, S. Im, D. Morton, R. Lee, S. Hu, and T. Scullion, "Rejuvenator Characterization, Blend Characteristics, and Proposed Mix Design Method," *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 84, pp. 675–704, 2015.
- [20] A. Blanchette, S. T. Lee, and T. Wood, "Asphalt Mix Rejuvenators Synthesis," 2020. [Online]. Available: <http://www.dot.state.mn.us/research/reports/2020/NRRA202002.pdf>.
- [21] N. H. Tran, A. Taylor, and R. Willis, "NCAT Report 12-05 - Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents," 2012. [Online]. Available: <http://www.ncat.us/files/reports/2012/rep12-05.pdf>.
- [22] E. Y. Hajj, M. I. Souliman, M. Z. Alavi, and L. G. L. Salazar, "Influence of Hydrogreen Bioasphalt on Viscoelastic Properties of Reclaimed Asphalt Mixtures," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2371, no. 1, pp. 13–22, Jan. 2013, doi: 10.3141/2371-02.
- [23] S. Im, F. Zhou, R. Lee, and T. Scullion, "Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 596–603, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.025>.