

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT:

Contribuții privind analiza prin modelarea structurilor rutiere reabilite la solicitări asimilate traficului rutier



Bd. Lacul Tei 122-124, Sect. 2, cod poștal 020396, București, România
Tel.: +40-21-242.12.08, Tel./Fax: +40-21-242.07.81
secretariat@utcb.ro, www.utcb.ro

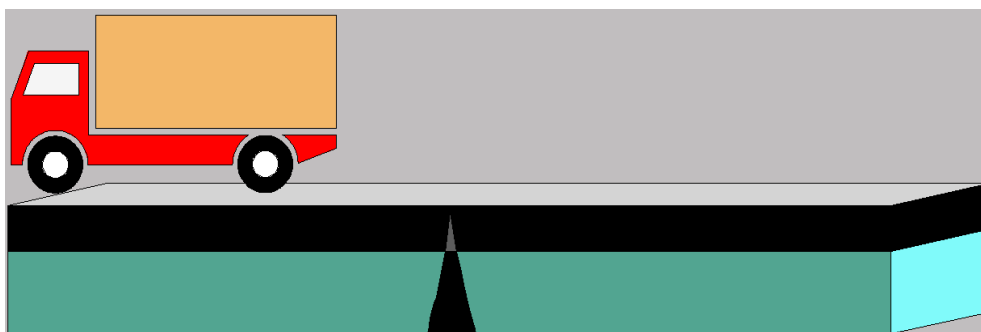


UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

ȘCOALA DE STUDII DOCTORALE

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

***CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA PRIN MODELAREA STRUCTURILOR
RUTIERE REABILITATE LA SOLICITĂRI ASIMILATE TRAFICULUI RUTIER***



Conducător Științific: **Prof. Dr. Ing. Mihai Dicu**

Doctorand: **Asist. Ing. Mihai Gabriel LOBAZĂ**

BUCUREȘTI 2020

CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA PRIN MODELAREA STRUCTURILOR RUTIERE REABILITATE LA SOLICITĂRI ASIMILATE TRAFICULUI RUTIER

CUPRINS

PREFAȚĂ

MULȚUMIRI

CUPRINS

LISTA FIGURILOR

LISTA TABELELOR

LISTA NOTAȚIILOR ȘI ABREVIERILOR

CUPRINS

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

1.1 Scopul tezei de doctorat **Error! Bookmark not defined.**

1.2 Programul de cercetare al tezei de doctorat 1

1.3 Structura tezei de doctorat 1

CAPITOLUL 2. EFECTELE TRAFICULUI RUTIER ASUPRA STRUCTURILOR RUTIERE 2

2.1 Studiul AASTHO (LEF, ESALs) 3

2.2 Agresivitatea traficului 3

CAPITOLUL 3. STRUCTURI RUTIERE MIXTE (COMPOZITE -ASFALT PE BETON DE CIMENT) 4

3.1 Structurile rutiere mixte 4

3.2 Transferul încărcării la stratul din beton de ciment fisurat 4

3.2.1 Transferul la interfață prin fricțiune, la stratul din beton de ciment 4

3.2.2 Influența îmbrăcăminții asfaltice asupra transferului 5

3.3 Conlucrarea între covorul asfaltic de protecție și îmbrăcămintea din beton fisurată 5

CAPITOLUL 4. TENDINȚA DE FISURARE A ÎMBRĂCĂMINȚILOR ASFALTICE PE STRAT SUPORT DIN BETON DE CIMENT 5

4.1 Fisurarea la structuri rutiere mixte 5

4.2 Forfecarea asfaltului datorită efectului de clampanire a dalelor 5

4.3 Variațiile termice sezoniere în structurile rutiere mixte 5

4.4 Fenomenul de oboseală la straturi asfaltice datorită efectului de izbire repetată sub trafic pe suportul rigid 5

CAPITOLUL 5. MECANICA FISURĂRII LA STRATURI ASFALTICE 6

5.1 Criteriul energetic 6

5.2 Factorul de intensitate a efortului K 6

5.3 Propagarea fisurii în timp datorită fenomenului de oboseală 6

5.4 Fisurarea materialelor cu comportare elastic 7

5.5 Fisurarea materialelor cu comportare elasto-plastică 7

5.5.1 CTOD 7

5.5.2 Integrala pe contur J 7

CAPITOLUL 6. MODELAREA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A FISURĂRII STRUCTURILOR RUTIERE COMPOZITE 8

6.1 Modelarea teoretică 8

6.1.1 Schema de calcul a unei structuri rutiere la solicitări combinate din trafic și variații de temperatură ale materialului. 8

6.1.2 Fenomenul de oboseală a materialelor rutiere la cicluri de solicitări 9

6.1.3 Caracterizarea experimentală a fisurării structurilor rutiere 9

6.2 Modelarea experimentală 10

6.2.1 Modelare empirică a fisurării reflective în laboratorul CFDP-UTCB 10

6.2.2 Măsurători prin modelare experimentală în laborator 11

6.2.3 Concepția fisurării reflective publicată în literatura de specialitate 11

CAPITOLUL 7. CONTRIBUȚII LA CERCETAREA EXPERIMENTALĂ PRIN MODELARE ÎN LABORATOR A FISURĂRII REFLECTIVE ÎN COVOARE ASFALTICE LA DRUMURI 12

7.1 Metoda de simulare în laborator la scară redusă a propagării fisurii prin structuri rutiere 12

7.2 Procedura de reducere la scară încercării de laborator a solicitării date de vehiculul greu asupra unei structuri rutiere 12

7.3 Procedura de evaluare la scară redusă a materialelor din straturile rutiere 12

7.4 Etapele dezvoltării echipamentului experimental în laborator, capabil a simula solicitările din temperatură și trafic 13

7.5 Fisurimetrul Termostatat 13

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT:*Contribuții privind analiza prin modelarea structurilor rutiere reabilite la solicitări asimilate traficului rutier*

7.5.1	Schema mecanică de funcționare a Fisurimetrului Termostatat	13
7.5.2	Schema de încărcare a epruvetelor	13
CAPITOLUL 8. CONTRIBUTII SI INTERPRETARI ALE PARAMETRILOR FISURARII REFLECTIVE PRIN OBSERVAȚII ȘI PRELUCRĂRI ALE REZULTATELOR IN MODELARE EXPERIMENTALA		14
8.1	Măsurători experimentale pe structuri compozite utilizând Fisurimetrul Termostatat	14
8.1.1	Deformata epruvetei asfalt-beton (w)	15
8.1.2	Relații de regresie între parametrii fisurării reflectivă	16
8.1.3	Observații asupra experimentelor realizate	16
8.2	Observații și interpretări ale rezultatelor epruvetei de calibrare a încercării 4b	16
8.3	Capacitatea de transfer a fisurii de la beton la stratul de protecție	22
8.4	Interpretare multicriterială a procesului de fisurare reflectivă	23
8.5	Măsurători în teren pentru calibrarea încercărilor de laborator	24
CAPITOLUL 9. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE		26
9.1	Concluzii finale	26
9.2	Contribuții personale	32
9.3	Direcții viitoare de cercetare	33
A. ANEXE		
BIBLIOGRAFIE		

Capitolul 1. INTRODUCERE

În ultimii 20 de ani, strategia administrației naționale a infrastructurii rutiere s-a axat pe lucrări de modernizare și reabilitare a rețelei de drumuri, activități ce presupuneau ameliorarea condițiilor de circulație rutieră pe o rețea de drumuri vechi, prin îmbunătățirea inclusiv a condițiilor de suprafață a părții carosabile. Această opțiune a condus la adoptarea unor soluții de reactualizare a calității la nivelul structurii rutiere, pentru a corespunde cerințelor creșterii traficului.

Dezvoltarea unor metode eficiente de proiectare/execuție, ce garantează o durată de serviciu mare a structurii rutiere, fără consum inutil de resurse sau distrugerea mediului înconjurător, reprezintă o condiție obligatorie în vremurile noastre.

1.1 Scopul tezei de doctorat

Prin tema abordată, teza de doctorat intitulată ***Contribuții privind Analiza prin Modelarea Structurilor Rutiere Reabilite la Solicitări Asimilate Traficului Rutier***, studiază prin modelare experimentală a structurii rutiere, solicitări echivalente unui trafic rutier asimilat la scara modelului. Prin aceste încercări atipice testelor de laborator reglementate, se dorește a se obține informații noi, utilizate pentru protecția îmbrăcăminților vechi fisurate (structuri rutiere mixte prefisurate, strat de protecție din asfalt așternut peste beton de ciment fisurat), în diverse ipoteze de solicitare.

Obiectivul principal al tezei este acela de a reduce costurile de cercetare destinate anticipării comportării materialelor rutiere asfaltice, utilizate ca straturi de protecție în activitatea de reabilitare la structuri rutiere fisurate. Astfel, prin încercări accelerate de simulare a traficului rutier, se urmărește obținerea performanței soluțiilor de rețetă optimă la fel ca și încercările tradiționale.

Rezultatele tezei se pot concretiza prin obținerea unui nou mod, altul decât încercările clasice, mai rapid și mai ieftin, de a anticipa durata normată de funcționare a stratului asfaltic de protecție, așezat peste o îmbrăcămințe rutieră veche, de a anticipa apariția și propagarea fisurii la suprafață.

Prelucrarea rezultatelor prin identificarea parametrilor care influențează fisurarea straturilor asfaltice așezate peste un beton de ciment prefisurat este o altă etapă necesară a tezei de doctorat, precum și stabilirea unor relații de calcul între acești parametri, ținând cont și de aplicabilitatea cercetărilor anterioare din literatura de specialitate.

1.2 Programul de cercetare al tezei de doctorat

Cele trei rapoarte de cercetare aferente lucrării de doctorat au avut ca scop final stabilirea unei metodologii de încercare a epruvetelor cu ajutorul Fisurometrului Termostatat [1], prin simularea efectelor traficului asupra acestora.

- Cercetarea prin modelare structurală în laborator a efectelor traficului asupra sistemelor rutiere reabilite [2]
- Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator la solicitări echivalente traficului rutier [3]
- Identificarea parametrilor de influență a propagării fisurării prin straturi asfaltice de protecție la îmbrăcăminți rutiere degradate [4]

1.3 Structura tezei de doctorat

Lucrarea de doctorat este structurată în două parti distincte pe 9 capitole, bibliografie și anexe, după cum urmează:

În **Capitolul I –INTRODUCERE** sunt descrise scopul și programul de cercetare a tezei de doctorat pentru a arăta actualitatea și necesitatea subiectului dezvoltat în cadrul lucrării, dar și etapele inițiale propuse în vederea concluzionării finale. De asemenea, în cadrul acestui capitol s-a prezentat structura tezei prin descrierea succintă a fiecărui capitol în parte.

PARTEA 1-a SINTEZĂ DOCUMENTARĂ cu cercetarea fenomenului de fisurare reflectivă la covoare asfaltice, utilizate la întreținerea drumurilor degradate prin fisurarea suprafeței carosabile.

În **Capitolul II –EFECTELE TRAFICULUI RUTIER ASUPRA STRUCTURILOR RUTIERE**, sunt descrise două moduri de abordare în vederea stabilirii efectelor solicitărilor din traficul rutier asupra structurilor rutiere și mai precis studiul AASHTO și Agresivitate.

Capitolul III -STRUCTURI RUTIERE MIXTE (COMPOZITE -ASFALT PE BETON DE CIMENT), prezintă succint caracteristicile structurilor rutiere mixte, diferența de comportare între materialele din care sunt alcătuite (betonul de ciment și mixturile asfaltice).

Capitolul IV -TENDINȚA DE FISURARE A IMBRACAMINTILOR ASFALTICE PE STRAT SUPORT DIN BETON DE CIMENT, abordează fisurarea din punctul de vedere al cauzelor din care aceasta apare și anume forfecarea asfaltului dată de clămpănirea dalelor de beton, variațiile termice sezoniere ce reprezintă un element important ținând cont de diferența de rigiditate a celor 2 straturi. În ultima parte a capitolului s-a analizat și fenomenul de oboseală a straturilor asfaltice datorat solicitărilor din trafic.

Capitolul V –MECANICA FISURĂRII LA STRATURILE ASFALTICE, se face o trecere în revistă a teoriilor care au stat la baza studiilor fisurării mixturilor asfaltice, abordare ce implică introducerea unui factor de intensitate a efortului (legea lui Paris) care exprimă viteza de propagare a fisurii.

Capitolul VI –MODELAREA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A FISURĂRII STRUCTURILOR RUTIERE COMPOZITE, prezintă schema de calcul a structurii compozite solicitate de încărcări din trafic și temperatură. În acest capitol se exemplifică cum se pot aplica teoriile mecanicii fisurării în cazul unor structuri rutiere mixte, dar și modul în care grosimea stratului de protecție influențează fisurarea. Totodată se prezintă câteva metode experimentale de încercare la fisurare, în laborator, a structurilor rutiere.

PARTEA 2-a STUDIUL EXPERIMENTAL AL FISURĂRII REFLECTIVE, prin modelare la scara redusă în laborator

Capitolul VII –CONTRIBUȚII LA CERCETAREA EXPERIMENTALĂ PRIN MODELARE ÎN LABORATOR A FISURĂRII REFLECTIVE ÎN COVOARE ASFALTICE LA DRUMURI. Principiile de bază ale metodelor experimentale descrise în capitolul VI se pot aplica și la cele mixte, în anumite condiții, aparatura având nevoie de câteva modificări în acest sens. Unul dintre aceste echipamente îl reprezintă Fisurimetrul Termostatat descris din punct de vedere a schemei de funcționare, atât mecanic, cât și achiziție date.

Capitolul VIII – CONTRIBUȚII ȘI INTERPRETĂRI ALE PARAMETRILOR FISURĂRII REFLECTIVE PRIN OBSERVAȚII ȘI PRELUCRĂRI ALE REZULTATELOR ÎN MODELARE EXPERIMENTALĂ, introduce nou în studiile experimentale, parametri necesari a fi determinați pentru a caracteriza fisura reflectivă în cazul structurilor compozite, prelucrarea acestora prin modele de regresie, urmând ca apoi să se facă câteva observații legate atât de acești parametri. Capacitatea de transfer a fisurii din beton în asfalt este dezvoltată într-un subcapitol. Un alt element de noutate al tezei îl reprezintă interpretarea multicriterială, prin indici parametri. Ultimul subcapitol este rezervat paralelismului între măsurătorile efectuate în cale și cele în laborator.

Capitolul IX – CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE, face un rezumat al concluziilor și observațiilor experimentale, punctând elementele importante, noi în studiul fisurării, se pun în evidență contribuțiile personale oferite prin teza de doctorat, dar în același timp și pașii care trebuiesc urmați după finalizarea acesteia ca direcții viitoare de cercetare.

ANEXELE prezintă rezultatele încercărilor experimentale efectuate în cadrul tezei, precum și prelucrarea acestora.

Capitolul 2. EFECTELE TRAFICULUI RUTIER ASUPRA STRUCTURILOR RUTIERE

Cunoașterea efectelor produse de încărcările din trafic asupra structurilor rutiere este foarte importantă din mai multe puncte de vedere [5]:

- *tehnic* (proiectarea structurilor rutiere, a rețetelor materialelor componente ale fiecărui strat din alcătuirea structurii rutiere),
- *administrativ* (limitarea încărcării pe osie și a încărcării totale a vehiculelor),
- *economic* (transport eficient, economic și stabilirea taxelor pentru utilizarea căilor de comunicație).

Încărcarea din trafic se transmite în structura rutieră prin intermediul roților. Osiile pot fi simple, în tandem sau tridem, distribuția încărcării pe acestea nu este întotdeauna cea optimă.

Vehiculele nu induc în structura rutieră doar încărcări verticale, ci de asemenea și orizontale rezultate din acțiunile de accelerare-frânare ale autovehiculelor.

2.1 Studiul AASTHO (LEF, ESALs)

Un prim studiu asupra efectelor încărcărilor din trafic în structurile rutiere a fost prezentat de programul experimental AASTHO (American Association of State Transportation Officials) din anii 1950. Analizând datele testelor s-au dezvoltat expresii empirice reprezentând relații între încărcarea din trafic, performanța sistemelor rutiere, și variabilele proiectării acestora. Aceste expresii au fost utilizate pentru a introduce așa numiții factori de echivalare a traficului (load equivalency factors), LEF, folosiți pentru a cuantifica efectele diverselor configurații și încărcări ale osiilor, printr-un număr echivalent de treceri a unei configurații și încărcări particulare ale osiei.

$$LEF = \frac{\text{Numărul de încărcări ale osiei standard ce produce o anumită pierdere a nivelului de serviciu}}{\text{Numărul de încărcări ale unei osii X ce produce o anumită pierdere a nivelului de serviciu}} \quad [6]$$

În determinarea LEF există 3 metode generale [6]:

- Empirică,
- Teoretică,
- Mecanică (sau mecanic-empirică).

Analizând în detaliu datele testelor AASTHO, s-a dezvoltat un nou concept, ESALs (equivalent single-axle load). Acesta a fost creat pentru a transforma diferitele încărcări și configurații întâlnite în trafic, într-un număr echivalent de osii simple de 80kN. Acest concept s-a bazat pe două ipoteze:

- efectul distructiv a unui număr de solicitări a unui grup de axe (definite prin mărimea și configurația încărcării) se poate exprima printr-un număr diferit de solicitări a unei încărcări standard.
- vătămarea structurii sau schimbarea nivelului de serviciu are o evoluție liniară [7].

Datorită schimbărilor de configurație și încărcare a vehiculelor din momentul efectuării studiilor AASTHO, trebuie dezvoltate modele noi de calcul ce pot fi aplicate condițiilor de încărcare actuale, dar și materialelor ce intră în componența straturilor structurii rutiere.

În această sens a fost gândită și direcția de dezvoltare a tezei de doctorat, respectiv o modelare experimentală, care să pună în valoare efectele cumulate asimilate din solicitări de trafic și variații ale temperaturii sezoniere ca factor al variației condițiilor de mediu înconjurător.

2.2 Agresivitatea traficului

După cum a concluzionat domnul Dicu Mihai [8] [9] (idei preluate în cadrul unei discipline electivă [10], dar și în lucrarea de disertație [11]), traficul prin compoziția sa acționează în mod diferit la nivelul structurii rutiere. Astfel, la drumuri extraurbane traficul rutier este caracterizat de prezența vehiculelor grele de marfă și de viteza de circulație, pe când în localități traficul rutier este format în principal de autovehicule ușoare (autoturisme și autoutilitare de transport marfă) la care viteza de circulație este redusă, iar frecvența pornirilor-opririlor este mai mare decât la drumurile extraurbane, datorită prezentei intersecțiilor în principal.

În această situație, la drumurile extraurbane se ia în calcul influența efectelor repetării încărcărilor din vehicule grele asupra capacității portante a structurii rutiere, pe când în cazul drumurilor urbane se analizează efectele contactului pneu-carosabil, mai mult decât influența asupra solicitărilor tangențiale de uzură.

Justificarea apariției și propagării fisurării prin îmbracaminti rutiere este caracterizată în general de efectul ciclurilor de încărcare-descărcare date de vehiculele grele.

Se calculează numărul încărcărilor la rupere (N_t și N_z) și respectiv vătămările, definite prin:

$$D_t = \frac{1}{N_t} \quad D_z = \frac{1}{N_z}$$

Când trebuie să se compare o osie cu altă osie, în literatura de specialitate se recurge la noțiunea de vătămare relativă. Pentru aceasta se alege o osie de referință a cărei agresivitate este egală cu 1. Acestei osii de referință i se asociază valorile d_t și d_z ale vătămărilor. În acest fel, o osie oarecare se caracterizează prin cele două valori D_t și D_z ; se introduc rapoartele:

$$y_t = \frac{D_t}{d_t} \quad y_z = \frac{D_z}{d_z}$$

Cele două mărimi y_z și y_t sunt reprezentative pentru vatămările relative pe care le suferă suportul șoselei și stratul de beton și traduc agresivitatea unei osii sau a unui grup de osii. Pentru a se putea face comparații între sarcini, este comod ca acestea să fie reduse la un singur parametru $y=F(y_z, y_t)$.

Agresivitatea unui vehicul greu se determină însumând agresivitățile y_i ale diferitelor osii sau grupe de osii Σy_i și împărțind rezultatul obținut la suma agresivităților osiilor vehiculului de referință ($y_t + y_z$).

$$A = \frac{\Sigma y_i}{y_t + y_z}$$

Agresivitatea asupra unui tip de structură rutieră cu relația:

$$A = n_1 Y_1 + n_4 Y_4 + n_{5,6} Y_{5,6}$$

unde: n_1 = numărul de osii simple recenzate;

n_4 = numărul de osii tandem recenzate;

$n_{5,6}$ = numărul de osii tridem recenzate;

A = agresivitatea traficului.

O structură suplă tradițională nu poate suporta un trafic intens, exceptând cazul când terenul este excelent și asfaltul foarte deformabil, dar atunci vor apare văluriri.

Structurile rutiere rigide, cu îmbrăcăminte sau strat de bază din beton, sub acțiunea sarcinilor exterioare și a variațiilor de temperatură, lucrează la încovoiere și se prezintă sub forma unor dale, fiind fragmentate prin rosturi dispuse transversal și longitudinal.

Înlocuirea stratului semirigid cu un strat de baza din beton de ciment rutier în cadrul structurilor mixte (compozite), prezintă o serie de avantaje din punct de vedere al preluării încărcărilor din trafic.

Capitolul 3. STRUCTURI RUTIERE MIXTE (COMPOZITE -Asfalt pe Beton de Ciment)

3.1 Structurile rutiere mixte

Studiul fisurării reflective este sugestiv de cercetat în cazul structurilor rutiere mixte, alcătuite prin asocierea straturilor rigide cu cele suple în cadrul aceluiasi sistem rutier, în pofida deosebirilor radicale de comportare sub acțiunea traficului și a agenților naturali, permit o soluționare mai economică a problemelor ce se pun în construcțiile de drumuri, prin aceea că proprietățile betonului și ale asfaltului se completează reciproc.

Principală problemă a acestui tip de alcătuire în cazul asfaltului pe o îmbrăcăminte veche din beton fisurat în perioada de exploatare, o reprezintă transmiterea rosturilor și fisurilor din beton în îmbrăcămintea bituminoasă (fisurare reflectivă din beton în asfalt).

Apariția fisurilor în îmbrăcămintea rutieră asfaltică, este favorizată de doi factori: variațiile de temperatură și încărcările date de trafic.

3.2 Transferul încărcării la stratul din beton de ciment fisurat

3.2.1 Transferul la interfață prin fricțiune, la stratul din beton de ciment

Pentru ca straturile din beton de ciment să se comporte corespunzător la acțiunea încărcărilor date de trafic, deschiderea fisurii trebuie menținută sub o anumită limită astfel încât încărcarea să se transmită de la o dală la cealaltă, în dreptul rostului, respectiv în zona fisurii în cazul structurii rutiere reabilite (fisurate), numai prin aportul frecării.

Pentru ilustrarea mecanismului de transfer al încărcării la fisura apărută într-un strat de beton ce lucrează într-o primă etapă ca îmbrăcăminte rutieră, se considera agregatul mineral redus la o granula de diametru (d); în acest fel poate fi pusă în evidență deplasarea verticală (Δz) a capatului unui fragment acționat de încărcarea (P) data de roata, în raport cu capatul fragmentului de dală alăturat.

Transferul încărcării este asigurat de contactul celor două fețe ale fragmentelor de dală.

Concluzia la care s-a ajuns a fost că, pentru a contribui la transferul încărcării, granula de agregat din betonul de ciment trebuie să respecte condiția:

$$d \geq 2(\Delta x)$$

3.2.2 Influența îmbrăcăminții asfaltice asupra transferului

În situația consolidării cu un strat asfaltic a unei îmbrăcăminti vechi din beton de ciment care a fisurat, se ajunge la o îmbunătățire a transferului la fisura și deci, la o îndepărtare a momentului fragmentării dalei.

Problema este ca mai devreme sau mai târziu fisura se propaga prin stratul asfaltic, datorită fenomenului de oboseală din repetarea încărcărilor din trafic. De aceea, este important de cunoscut parametrii ce constituie factori atenuanți a acestui proces de fisurare și care ajută la întârzierea apariției acestuia la suprafața carosabilului.

Pe măsura avansării procesului de oboseală a structurii asfaltului, deci a comportării lui în stadiul plastic, valoarea uzurii la nivelul fisurii din beton crește, moment în care începe procesul de propagare a fisurii prin asfalt.

3.3 Conlucrarea între covorul asfaltic de protecție și îmbrăcămintea din beton fisurată

Diagrama de repartiție a efortului de întindere din încovoiere, variază în stratul asfaltic și în cel din fundația de beton, în funcție de aderența dintre ele.

În cazul în care cele două straturi lucrează separat (fără aderență la interfață), diagrama eforturilor de întindere din încovoiere se dezvoltă separat în fiecare dintre ele. Cedarea apare în stratul unde se depășește rezistența admisibilă la întindere din încovoiere. În cazul aderenței asfalt-beton de ciment, apare o diagramă de solicitare la întindere din încovoiere de sens contrar pe grosimea stratului de acroșare ce se creează în îmbrăcămintea asfaltică, în zona de aderență.

Fisurarea îmbrăcăminții asfaltice apare atunci când se depășește capacitatea limită de alungire a asfaltului.

Capitolul 4. TENDINȚA DE FISURARE A ÎMBRĂCĂMINȚILOR ASFALTICE PE STRAT SUPORT DIN BETON DE CIMENT

4.1 Fisurarea la structuri rutiere mixte

Apariția fisurilor în asfalt, în dreptul rosturilor din beton, este cauzată de forțele tăietoare care apar în rosturi, de dilatația termică diferențială și de oboseala materialului.

4.2 Forfecarea asfaltului datorită efectului de clampanire a dalelor

Rezemarea incompletă, mai ales la colțuri, ca urmare a fenomenului de pompă a părții fine din mediul suport provocat de șocurile transmise de sarcinile mobile, poate duce cu timpul la clămpănirea dalelor. Deplasările verticale independente ale marginii dalelor generează în rosturi forțe tăietoare care apar instantaneu. Îmbrăcămintea bituminoasă are o rezistență redusă la solicitări de forfecare și se fisurează.

4.3 Variațiile termice sezoniere în structurile rutiere mixte

La variațiile sezoniere de temperatură, dalele de beton au variații însemnate de volum. Conlucrarea dintre beton și mixtura asfaltică la variațiile de temperatură este dificilă din cauza naturii liantului și a coeficienților de dilatație diferiți. Coeficientul de dilatație al asfaltului este mult mai mare față de beton și nu este constant, având o variație pronunțată cu temperatura.

Dilatarea și contracția dalei de beton conduc la o îngustare sau o mărire a deschiderii rostului. Îmbrăcămintea asfaltică trebuie să preia aceste solicitări numai pe lungimea corespunzătoare deschiderii rostului, pe care se poate mișca liber.

4.4 Fenomenul de oboseală la straturi asfaltice datorită efectului de izbire repetată sub trafic pe suportul rigid

Izbirile îmbrăcăminții se produc ori de câte ori pneurile, aflate în plină viteză, întâlnesc brusc denivelările căii sau vehiculul nu este condus sau nu funcționează lin [12].

Oboseala materialului prin izbire repetată poate afecta în mod grav straturile de rulare, alcătuite din mixturi asfaltice, așezate pe un suport rigid, dacă acestea au o grosime prea mică. Când se folosește un asfalt plastic care poate urmări deplasările axiale ale dalelor fără să fisureze, există pericolul ca să apară fenomenul de fluaj (cu bitum dur și agregate de concasaj) însă prin scăderea plasticității pot apare fisuri deasupra rosturilor din dalele de beton.

Capitolul 5. MECANICA FISURARII LA STRATURI ASFALTICE

Fisurarea este considerată fi una din principalele cauze a deteriorării structurilor rutiere, ceea ce implică alocarea de resurse financiare mari pentru repararea și menținerea acestora în parametri optimi de funcționare.

"Fisurarea reflectivă" este procesul de transmitere la suprafața părții carosabile a fisurilor de contracție hidrostatică sau termică din straturile alcătuite din agregate naturale stabilizate cu lianți hidrostatici sau puzzolanici. În cazul ranforsărilor drumurilor existente, acest proces se poate referi la transmiterea la suprafața noii îmbrăcămînți bituminoase a fisurilor și/sau a crăpăturilor existente în vechea îmbrăcăminte rutieră." [13]

Concluzionând, fisurarea reflectivă apare datorită solicitărilor date de încărcările din trafic, dar și a variațiilor din temperatură ce induc în structură eforturi de contracție și întindere.

Putem considera că există 2 etape ale procesului de fisurare [14], fără a lua în considerare ultima etapă de cedare, în care viteza de propagare a fisurii crește rapid:

- **Inițierea fisurii**, caracterizată prin microfisuri care se transformă în macrofisuri și poate fi definită ca numărul de cicluri în care se aplică solicitarea la care este vizibilă fisura în stratul de protecție.
- **Propagarea fisurii**, reprezintă etapa în care fisura se propagă până la suprafața stratului, pe întreaga grosime a acestuia. Propagarea fisurii în cazul îmbrăcămînții flexibile poate fi exprimată prin legea lui Paris și Erdogan (relația 1) [15].

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n \quad (1)$$

5.1 Criteriul energetic

Variația energiei G se definește ca fiind variația energiei potențiale odată cu suprafața fisurată a unui **material liniar elastic**. [16]

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (2)$$

Relația 2 este valabilă în cazul unei plăci de dimensiuni infinite (lățimea plăcii B este mult mai mare decât $2a$) supusă unui efort de întindere, având lungimea fisurii egală cu $2a$.

5.2 Factorul de intensitate al efortului K

Factorul de intensitate al efortului caracterizează starea de eforturi și deformații la vârful fisurii și are ca ecuație:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (3)$$

Relația dintre variația energiei și factorul de intensitate al efortului se obține din ecuațiile 2 și 3:

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (4)$$

5.3 Propagarea fisurii în timp datorită fenomenului de oboseala

Pentru a determina modul în care o fisură se propagă prin materialul respectiv, se poate utiliza legea lui Paris (ecuația 1) care exprimă viteza de propagare a fisurii $\left(\frac{da}{dN}\right)$ în funcție de factorul de intensitate al efortului K . Putem astfel afla în orice moment care este lungimea fisurii, deci, în cazul straturilor de protecție

din asfalt, care este momentul optim la care trebuie intervenit de către autoritățile responsabile, cu costuri minime.

5.4 Fisurarea materialelor cu comportare elastic

Un material are o comportare elastic liniară atunci când relația dintre eforturi și deformații este liniară, iar deformația revine la 0 atunci când încărcarea aplicată este îndepărtată. Legea care guvernează aceste materiale este legea lui Hooke. Factorul de intensitate al efortului s-a determinat ținându-se cont de mărimea zonei plasticizate r , ce apare în vârful fisurii. Modelul Irwin presupune zona plasticizată sub forma unui cerc.

Modelul Dugdale-Barenblatt este o altă abordare pentru aflarea zonei plasticizate, care nu mai este sub forma unui cerc, ci are o formă alungită.

Corecțiile de plasticitate pot extinde concluziile din domeniul liniar elastic și dincolo de acesta, dar în momentul în care comportarea materialului devine neliniară, cum este cazul mixturii asfaltice, factorul de intensitate al efortului nu mai caracterizează fisura (calculat cu relațiile din mecanica fisurii în stadiul liniar elastic). De aceea s-au introdus alte două modalități de calcul a comportării acesteia la vârful fisurii, CTOD (crack tip opening displacement) –deplasarea deschiderii din vârful fisurii și integrala pe contur J . [6]

5.5 Fisurarea materialelor cu comportare elasto-plastica

La un material cu comportare elasto-plastică relația dintre eforturi și deformații nu mai este liniară, iar deformația nu revine la 0 atunci când încărcarea aplicată este îndepărtată.

La începutul încărcării materialul se comporta elastic, relația dintre efort și deformații fiind liniară, iar după ce efortul trece de o anumită valoare, materialul devine plastic, relația devenind neliniară, descărcarea făcându-se liniar cu o pantă egală cu modulul de elasticitate (paralelă cu zona elastică).

5.5.1 CTOD

Necesitatea parametrului CTOD a apărut când Wells [17] a observat că înainte ca fisura să se propage (eforturile din zona plasticizată ajung și depășesc rezistența la fisurare a materialului), vârful fisurii nu mai are o formă ascuțită, ci prezintă o tocare. Se poate spune că vârful fisurii are o anumită deschidere notată cu δ .

S-a determinat parametrul CTOD ([6]), plecând de la modelul Irwin, cu zona plasticizată de rază r_y [18], considerându-se deschiderea $\delta = 2 \cdot u_y$. u_y este deplasarea pe direcția y a fisurii determinată în ipoteza comportării liniar elastice. Relația 5 este valabilă atunci când zona de curgere a materialului este foarte mică.

$$\delta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} \cdot E} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (5)$$

O altă modalitate de calcul o constituie cea bazată pe modelul Dugdale-Barenblatt **Error! Reference source not found.** Ipotezele acestui model sunt stare plană de eforturi și material care își păstrează elasticitatea (nu rigidizează).

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} \cdot E} = \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (6)$$

5.5.2 Integrala pe contur J

Integrala J a fost introdusă de Rice [19] în 1968 și reprezintă energia disponibilă pe unitatea de suprafață a fisurii (ținând cont și de zona plasticizată) [20]. Aplicabilitatea acesteia la materialele neliniar-elastice și cele elasto-plastice are câteva restricții, cea mai importantă fiind că descărcarea nu trebuie să aibă loc. Cu alte cuvinte nu este valabilă în cazul încărcărilor ciclice (acestea implică încărcare-descărcare).

Capitolul 6. MODELAREA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A FISURĂRII STRUCTURILOR RUTIERE COMPOZITE

6.1 Modelarea teoretică

6.1.1 Schema de calcul a unei structuri rutiere la solicitări combinate din trafic și variații de temperatură ale materialului.

Metodele analitice de dimensionare a unei structuri rutiere au la bază o schemă analitică. Pe baza acestora se modelează fenomenologic structura rutieră pentru determinarea parametrilor de calcul.

Solicitarea dată de trafic reprezentată de osii de 13 tone este modelată printr-un efort vertical amplasat pe o bandă transversală situată la distanța x față de poziția fisurii din fundația din beton de ciment. În Figura 6.1 se prezintă schema de încărcare pe un model tridimensional ce reprezintă o bandă de circulație.

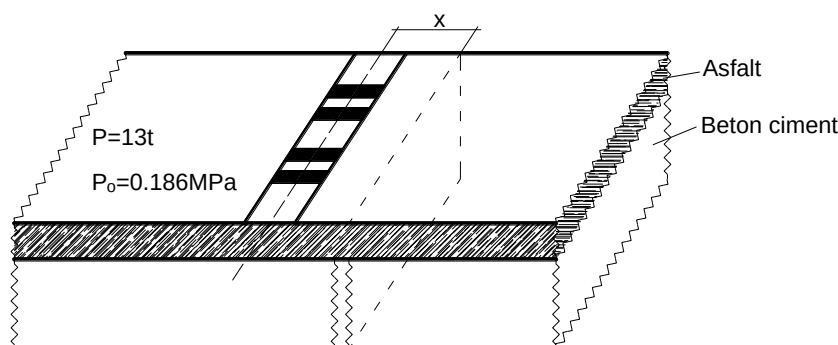


Figura 6.1 Model de calcul tridimensional

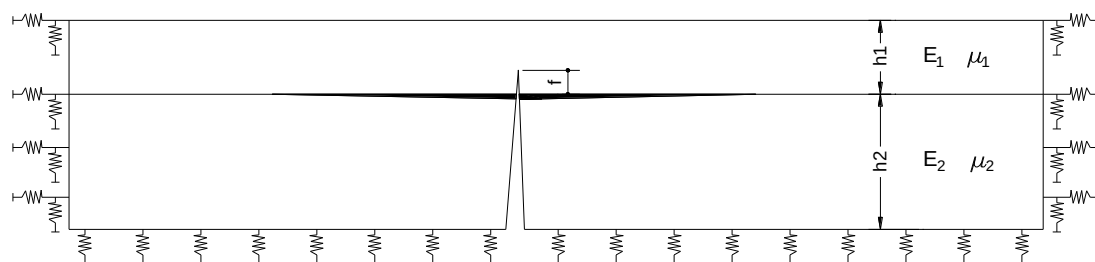


Figura 6.2 Model de calcul bidimensional

În ceea ce privește modelul bidimensional de calcul (Figura 6.2), acesta are următoarele caracteristici:

- Stratul de rulare (uzură) de grosime h_1 are modulul lui Young E_1 ,
- Fundația sistemului rutier este alcătuită dintr-un singur strat de grosime h_2 și modul E_2 ,
- Patul drumului este reprezentat printr-un mediu Winkler,
- Stratul superior este fisurat pe o adâncime f .

Schemele generale de modelare a solicitării din trafic și a solicitării din variații de temperatură se regăsesc mai jos:

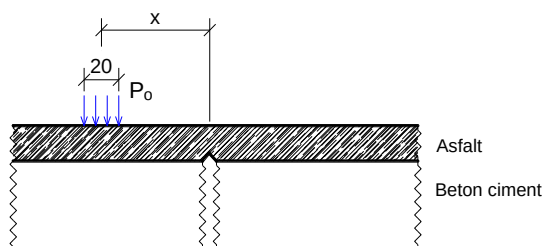


Figura 6.3 Model solicitări din trafic

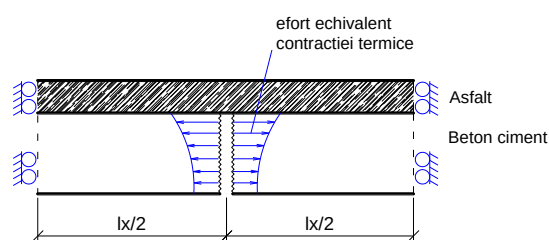


Figura 6.4 Model solicitări din temperatură

6.1.2 Fenomenul de oboseală a materialelor rutiere la cicluri de solicitări

K. Majidzadeh și D.V.Ramsamooj [18] au arătat că termenul de oboseală structurală este asociat cu deranjarea sau deteriorarea la cicluri de încărcare repetată a legăturilor dintre componentele stratului rutier.

Procesul de inițiere a fisurării și de finalizare prin apariția ruperii, diferă de la material la material. Dezvoltarea fisurii pe grosimea stratului este asociată apariției discontinuităților structurale și variațiilor energetice în această zonă.

Discontinuitatea structurală este echivalentă cu plasticizarea materialului din capul fisurii care, prin depășirea unei anumite limite, permite dezvoltarea ei pe grosimea stratului rutier.

Din acest punct de vedere teoriile existente acceptă următoarele etape de evoluție a fisurii [21]:

- Acumulare energetică în domeniul elastic
- Acumulare energetică în domeniul plastic
- Acumulare energetică la rupere

Mecanica fisurării a fost demonstrată de Irwin prin introducerea unui factor ce exprimă intensitatea solicitării. Astfel, el a observat că se pot distinge trei etape ale stării de tensiune în deschiderea fisurii ca măsură a propagării acestui fenomen (Figura 6.5).

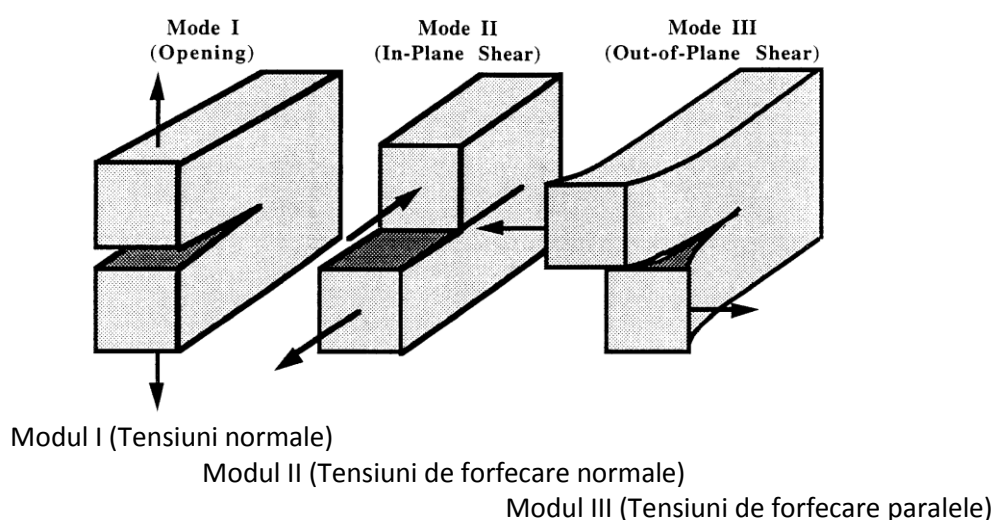


Figura 6.5 Moduri de dezvoltare a stării de tensiune

6.1.3 Caracterizarea experimentală a fisurării structurilor rutiere

În lucrări de cercetare efectuate la Universitatea Tehnică din Ohio, S.U.A., aplicabilitatea teoriei fisurării prin straturi asfaltice a fost examinată prin două concepte ca ipoteze de calcul:

- materialul trebuie considerat omogen, izotrop și cu comportare elasto – plastică;
- fisurarea în zona plastică trebuie să fie mică prin raportarea deschiderii fisurii de bază.

6.1.3.1 Mecanismul fisurării în stadiul elasto - plastic

Concentrarea efortului în vârful fisurii, conduce la plastifierea zonei din jurul acesteia. Întrucât zona plastifiată este limitată în jurul vârfului fisurii, comportamentul global al structurii stratului este liniar elastic.

Conceptul de curgere plastică limitată, se poate evalua calitativ prin compararea raportului dintre mărimea zonei plastificate din vârful fisurii și celelalte dimensiuni ale structurii legate de adâncimea ei (f) și ecartul acesteia (d). Cantitativ acest raport a fost stabilit de norme A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials) la 1/50.

6.1.3.2 Propagarea procesului de fisurare din fundație în îmbrăcămintă

Există mai multe variante de propagare a fisurii în îmbrăcămintea asfaltică:

- Propagare verticală cu sau fără aderență
 - Propagare orizontală cu, fără sau pierdere parțială de aderență

Propagarea fisurii se face sub efectul a două solicitări distincte: solicitări termice și din trafic

6.1.3.3 Calculul factorului de intensitate a efortului din temperatură

La solicitări lente rezultate din cicluri ale variațiilor zilnice de temperatură, îmbrăcămintea asfaltică suferă o scădere de rigiditate. În consecință deformațiile stratului de bază fisurat sunt puțin influențate de modificarea de rigiditate a îmbrăcăminții asfaltice.

Calculul factorului de intensitate a efortului din temperatură se face în ipoteza că propagarea fisurii în stratul asfaltic are loc în timp ce ecartul ei la baza stratului rămâne constant.

6.1.3.4 Integrarea legii lui Paris

Integrarea legii lui Paris conduce la expresia numărului de zile la care fisura apare la suprafața carosabilului:

$$n = \frac{e^{m\gamma h} h^{(1+m/2)}}{(1+m/2)C_1}$$

6.1.3.5 Influența grosimii stratului de protecție asfaltic (h)

Timpul de propagare a fisurii este proporțional cu doi termeni ce depind de grosimea (h) a îmbrăcăminții asfaltice:

- un termen exponential $e^{m\gamma h}$ care reprezintă influența protecției termice a stratului din beton de ciment;
- un monom $h^{(1+m/2)}$, care arată că la o solicitare identică, o creștere a grosimii îmbrăcăminții asfaltice cu 20% - 30% dublează timpul de propagare a fisurii la suprafața carosabilului.

6.1.3.6 Durata de viață la oboseală

Integrarea legii Paris, a condus la obținerea unei curbe de formă diferită față de cea corespunzătoare solicitării din temperatură.

Luându-se în considerare separat numărul de cicluri de solicitare raportat la numărul total de cicluri, când s-a propagat fisura la suprafața carosabilului, s-au putut face următoarele observații: viteza de propagare a fisurii este mai lentă la solicitarea din trafic față de cea din temperatură în faza inițială iar în faza finală această situație se inversează.

6.2 Modelarea experimentală

6.2.1 Modelare empirică a fisurării reflective în laboratorul CFDP-UTCB

În cadrul tezei de doctorat a domnului profesor doctor inginer Mihai DICU [22], s-au folosit de o serie de dispozitive, pentru a pune în evidență în mod separat o serie de parametrii aferenți conlucrării asfalt-beton de ciment din cadrul unui model de structură rutieră mixtă (compozită). Principiile de funcționare ale dispozitivelor și rezultatele obținute, sunt prezentate în cele ce urmează.

6.2.1.1 Caracteristicile standului de încercări în laborator

Elementul de structură rutieră modelată în laborator, supusă încercărilor de investigare prin simularea solicitărilor din realitate, este alcătuit din trei straturi și anume: o placă de beton cu dimensiuni ale suprafeței de 51x14 cm și grosimea de 10cm, care reazemă pe un pat de nisip de 14 cm grosime. Peste beton se aplică o mixtură bituminoasă cu grosimea de 3 cm.

Placa este fixată la un capăt de suportul A, iar de celălalt capăt se trage cu o forță orizontală H. O forță ciclică verticală $\tilde{P}$ simulează încărcarea din trafic, care solicită dala la încovoiere repetată. Încărcarea se aplică la suprafața sistemului, având presiunea egală cu 5daN/cm² și diametrul urmei circulare de 5 cm. Ciclul de încărcare este de 5 s.

Acest stand de încărcare simulează concomitent pe de o parte, solicitarea de încovoiere dată de trafic și pe de altă parte, contractia termică a fundației de beton. Se măsoară intensitatea efortului, numărul de cicluri ale încărcării și apariția fisurii în îmbrăcămintea.

6.2.1.2 Încercări la încovoiere repetată pe plăci din beton

Această determinare efectuată în laborator permite analiza separată a comportării stratului din beton compactat la cicluri alternante ale unei solicitări verticale. Realizarea solicitării de încovoiere repetată

la nivelul placii de beton s-a realizat prin suprapunerea efectului încărcării verticale ciclice cu o tensiune $H = 200 \text{ daN}$.

6.2.1.3 Încercări de întindere ale asfaltului la contractia dalei

Se analizează comportarea modelului de structură rutieră mixtă la temperaturi negative. Aceste condiții simulează comportarea structurii rutiere mixte în timpul iernii, când apare contractia betonului din fundație la temperatura negativă simulată prin creșterea forței orizontale H , care conduce la reducerea capacității de alungire a asfaltului în aceste condiții.

6.2.2 Măsurători prin modelare experimentală în laborator

6.2.2.1 Simularea propagării fisurilor prin structurile rutiere

Pentru a dezvolta o teorie pertinentă a fenomenului de fisurare în straturi rutiere, se începe cu analiza acestei fenomenologii pe grinzi.

Astfel echipamentul de testare a straturilor de ranforsare din laboratorul TTI (Texas A&M Transportation Institute), permite analiza pe materiale rutiere prin modelarea la scară redusă a fisurilor pe grinzi. Echipamentul are posibilitatea măsurării fisurilor la un anumit număr de cicluri de încărcare, pentru care se pot determina următorii parametri:

- viteza de dezvoltare a fisurii (df/dN) în funcție de pseudo-integrandul J ;
- viteza de dezvoltare a fisurii (df/dN) în funcție de factorul de ranforsare;
- încărcarea măsurată în funcție de deplasarea de referință, utilizată la calculul pseudo-energiei.

6.2.3 Concepția fisurării reflective publicată în literatura de specialitate

Fisurarea reflectivă este procesul de transmitere la suprafața părții carosabile a fisurilor de contracție termică din straturile alcătuite din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolanici, sau din solicitările dinamice generate de un trafic rutier intens și greu. În cazul ranforsărilor drumurilor existente, acest proces se poate referi la transmiterea la suprafața noii îmbrăcămînți bituminoase a fisurilor și/sau a crăpăturilor existente în vechea îmbrăcămînți rutieră [13]. Deci, Fisurarea reflectivă apare datorită încărcărilor din trafic, dar și a variațiilor din temperatură ce induc în structură eforturi de contracție și întindere.

Din prelucrarea acestor informații extrase din literatura de specialitate (Jorge C. Pais și Paulo A.A. Pereira [23], F. Zhou și L. Sun [24], Școala de Tehnologii Superioare în Montreal (QC, Canada) [25]), se pot extrage următoarele concluzii definitorii pentru fisurarea reflectivă și caracterizarea parametrilor de generare, după cum urmează:

- Potențialul fisurării reflective este generat de o funcție caracteristică proprietăților materialelor, în principal grosimea stratului de acoperire și rigiditatea acestuia
- Fisurarea reflectivă este rezultatul mișcărilor diferențiale verticale și orizontale deasupra fisurii din structura existentă. Aceste mișcări, denumite și activitatea fisurii, sunt cauzate de eforturile din temperatură, încărcări din trafic, sau o combinație a celor două.
- Pentru a ține cont de efectele temperaturii care influențează componenta orizontală, aceasta trebuie să ajungă cel puțin la 50% din cea verticală de după așternere. Din moment ce valoarea maximă orizontală este 50% din cea verticală, efectele temperaturii sunt neglijabile în fisurarea reflectivă.
- În acest efect suprapus din solicitări ale traficului rutier cu variațiile sezoniere ale temperaturii din structura rutieră compozită (asfalt pe beton de ciment), apar solicitări de forfecare a stratului de asfalt deasupra fisurii/crapăturii existente în stratul suport din beton de ciment, care prin dezvoltarea fenomenului de oboseală locală, conduce la inițierea și dezvoltarea în timpul exploatării drumului a fisurării și transmiterea acesteia prin stratul asfaltic
- Apare notiunea de forfecare echivalentă în zona fisurii/crapăturii existente în stratul suport celui asfaltic, care poate fi definită de durata de viață la oboseală
- Fisurarea reflectivă se produce în 3 etape:

- Desprinderea stratului de asfalt de structura existentă.
- Odată cu creșterea numărului de cicluri de încărcare, se mărește această zonă de desprindere. Studiile reflectă faptul că o parte din această desprindere este benefică pentru prevenirea procesului de fisurare reflectivă, dar până la o lățime de 10cm.
- Dezvoltarea pe verticală a fisurii înspre fața superioară a stratului de protecție.

Capitolul 7. CONTRIBUȚII LA CERCETAREA EXPERIMENTALĂ PRIN MODELARE ÎN LABORATOR A FISURĂRII REFLECTIVE ÎN COVOARE ASFALTICE LA DRUMURI

7.1 Metoda de simulare în laborator la scară redusă a propagării fisurii prin structuri rutiere

Pentru a simula un fenomen, mai întâi este necesară o descriere a acestuia în realitate.

Oboseala structurii rutiere asociată fisurării când forfecarea și momentele de încovoiere date de traficul greu creează o stare de tensiune locală, ce conduce la propagarea fisurii în stratul asfaltic de protecție. De obicei acest fenomen se dezvoltă la structuri rutiere cu îmbrăcămînți degradate prin fisurare și care au fost protejate prin așternere de covoare asfaltice.

Variațiile de temperatură sezonieră conduc la deplasări orizontale la nivelul stratului vechi degradat prin fisurare (mai ales la straturi legate cu lianți hidraulici).

Acest efect are un caracter mai agresiv iarna la deschiderea fisurii, prin contracția stratului legat cu liant hidraulic și rigidificarea covorului asfaltic de protecție.

7.2 Procedura de reducere la scara încercării de laborator a solicitării date de vehiculul greu asupra unei structuri rutiere

Modelarea unui obiect presupune aplicarea unei reduceri a dimensiunilor geometrice [1].

Simularea încărcării autovehiculului din realitate la scara modelului din laborator, presupune reducerea dimensiunilor constructive la scara modelului, prin analiza elementelor constructive de contact între vehicul și cale.

Schemă principală a standului de încercări, din punct de vedere al dispoziției constructive este prezentată în Figura 7.1.

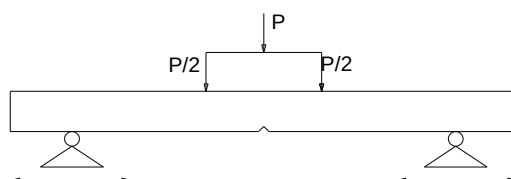


Figura 7.1 Dispoziția constructivă a standului de încercări

Pentru simularea osiei de calcul, încărcarea cu forța P se va face prin intermediul unui jug cu ampriză variabilă funcție de necesitățile încărcării.

Solicitarea se va face la o frecvență controlată impusă de valorile recomandate de literatura de specialitate, respectiv 4Hz.

7.3 Procedura de evaluare la scară redusă a materialelor din straturile rutiere

Ipotezele de reducere la scară și tipurile de încercări de similitudine comportamentală conform standardelor în vigoare în domeniul infrastructurii transportului rutier, sunt următoarele:

- reducere la scară a scheletului mineral din structura materială a stratului rutier
- reducere la scară a cantității de liant necesare.

7.4 Etapele dezvoltării echipamentului experimental în laborator, capabil a simula solicitările din temperatură și trafic

Realizarea echipamentului de laborator pentru testarea fisurării reflective, presupune:

- identificarea principalilor parametri comportamentali ai fenomenului de propagare a fisurii.
- elaborarea unei scheme analitice de simulare a fenomenului, care să definească parametrii fisurării
- concepția unui model la scară redusă care să poată simula fenomenul fisurării din realitate pe diverse materiale rutiere.
- obținerea unui echipament asistat de un sistem de achiziție performant, care să permită evaluarea comportării unui material rutier față de fenomenul de propagare a fisurii la cicluri dinamice ale încălcării și variații de temperatură.
- elaborarea unei proceduri de interpretare a datelor obținute și a unei metode de evaluare a performanțelor materialului rutier în raport cu fenomenul de fisurare.

7.5 Fisurometrul Termostatat

Echipamentul pentru studierea fenomenului de fisurare a structurilor rutiere compozite este un sistem complex ce simulează solicitarea traficului și a factorilor climatici asupra unor epruvete sub forma de placă.

7.5.1 Schema mecanică de funcționare a Fisurometrului Termostatat

Schema de funcționare a epruvetei [26] se aseamănă încercării la întindere din încovoier pe grinzi, reglementată în normele de testare în laborator. Diferența o constituie modul de încercare „*inversat*” (Figura 7.2), pentru a permite amplasarea camerelor video, în vederea achiziției de date privind inițierea și propagarea fisurii prin epruvetă.

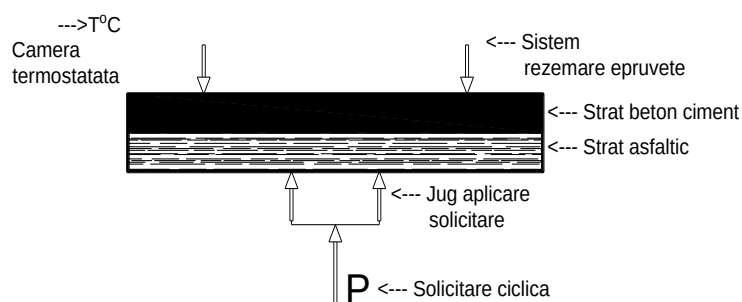


Figura 7.2 Schema mecanică de funcționare a Fisurometrului Termostatat

7.5.2 Schema de încărcare a epruvetelor

Pentru a grăbi apariția fenomenului de fisurare și propagarea fisurii sub încărcări ciclice, se poate recurge la trepte de încărcare, urmărindu-se evoluția deformației epruvetei în condiții extreme de solicitare. Utilizând cicluri constante de încărcare și trepte echivalente de solicitare, se poate determina prin raportare comportamentală, rețeta optimă din punct de vedere al evoluției fenomenului de fisurare.

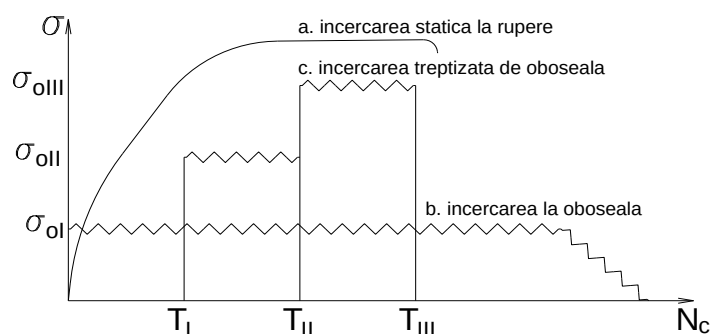


Figura 7.3 Tipuri de încercări la fisurare.

După cum am menționat în cele scrise mai înainte, modul de încercare este unul inversat, astfel aplicarea încărcării se face de jos în sus (Figura 7.4). Acest lucru permite amplasarea celor 2 camere video (la partea superioară a plăcii de beton și în laterala epruvetei), cu ajutorul cărora se poate observa și chiar măsura propagarea fisurii prin stratul asfaltic.

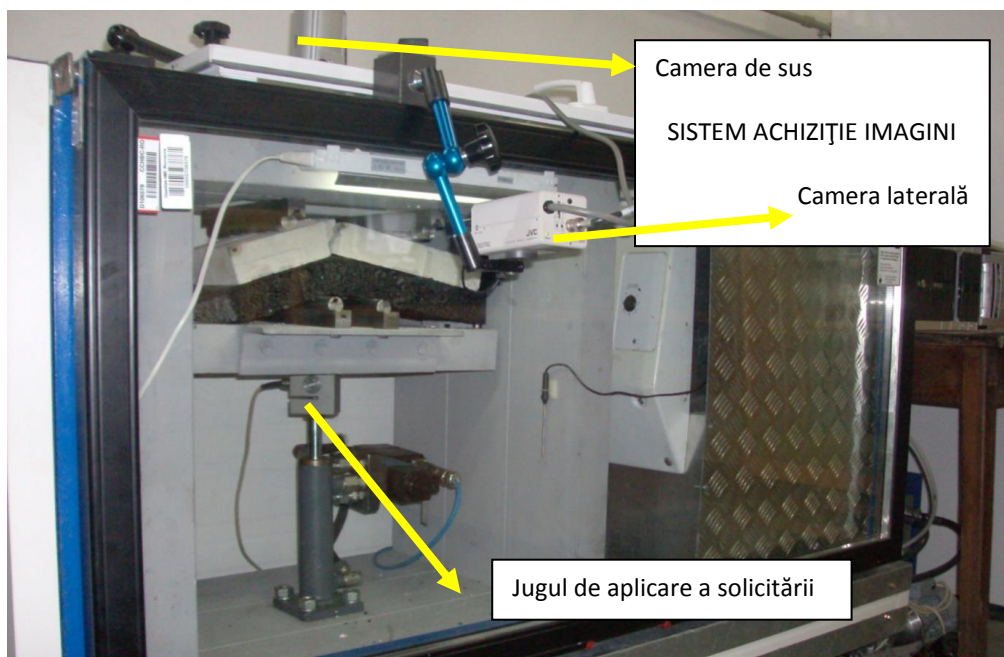


Figura 7.4 Poziționarea camerelor video pentru urmărirea fenomenului de fisurare

Capitolul 8. CONTRIBUTII SI INTERPRETARI ALE PARAMETRILOR FISURARII REFLECTIVE PRIN OBSERVAȚII ȘI PRELUCRĂRI ALE REZULTATELOR IN MODELARE EXPERIMENTALA

8.1 Măsurători experimentale pe structuri compozite utilizând Fisurimetrul Termostatat

Cu ajutorul acestui aparat, se pot măsura prin sistemul de achiziție video următorii parametri (Figura 8.1):

- w = săgeata (deformata) epruvetei asfalt-beton,
- db = deschiderea fisurii existente în betonul de ciment prefisurat (strat vechi),
- e = desprinderea la interfața asfalt-beton în zona fisurii,
- f = lungimea fisurii în stratul asfaltic de acoperire (covor asfaltic),
- d = deschiderea fisurii în stratul asfaltic de acoperire.

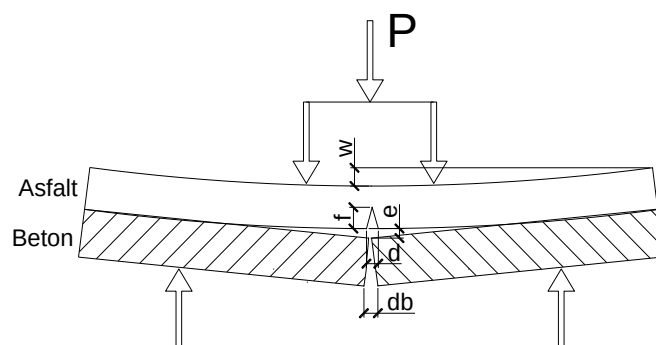


Figura 8.1 Parametrii fisurii reflective

Parametrii masurabili si in cale, la aparitia fenomenului de oboseala, prin propagarea fisurarii la suprafata carosabila, sunt deformatiile inregistrate (w), dupa un anumit numar de cicluri de solicitare posibil

a fi cuantificabile (n_c), db , d , e , f ce se pot achiziționa imagistic (camere video cu soft de prelucrare date) în înregistrările din cursul testării la fisurare pe FISUROMETRUL TERMOSTATAT.

8.1.1 Deformata epruvetei asfalt-beton (w)

Studiile inițiale de performanță efectuate prin analize comparative pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, au pus în evidență aportul adus de un sistem antifisură de tip geomembrană [27], la întârzierea propagării fisurilor reflective prin stratul asfaltic de protecție (Figura 8.2). Aceste studii de performanță s-au făcut utilizând variația deformației verticale w în timp (număr de cicluri, n_c).

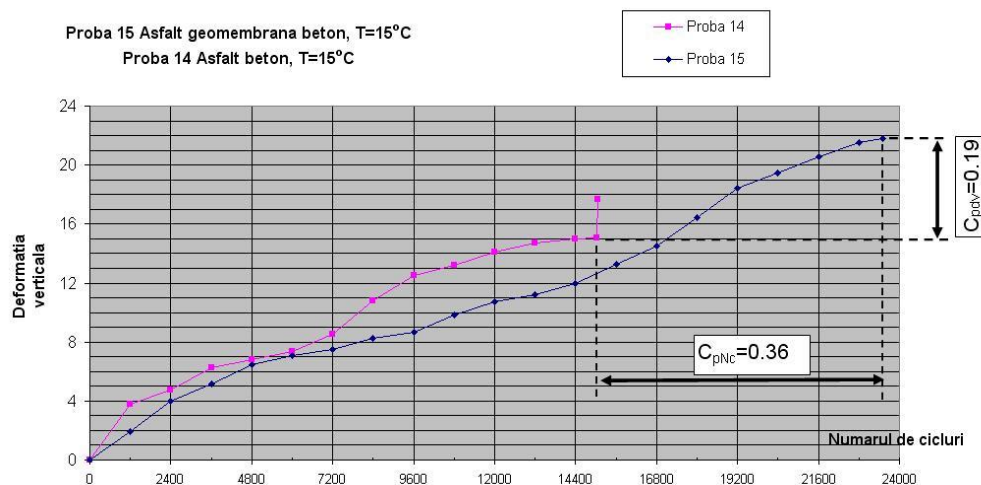


Figura 8.2 Contribuția sistemului antifisură la întârzierea propagării fisurii reflective

În Figura 8.2 s-au făcut următoarele notații:

- C_{pdv} =coeficient de performanță la deformații verticale (w),
- C_{pNc} =coeficient de performanță raportat la numărul de cicluri suportat la propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic de protecție.

S-au pus în evidență coeficienți de performanță [28] ale soluției antifisură cu geocompozit prin raportarea elementelor omoloage măsurate pe FISUROMETRUL TERMOSTAT.

- cu coeficientul de performanță la deformații verticale $C_{pdv}=0.19$, se poate aprecia o reducere de 19% a deformației aferente propagării fisurii reflective din stratul din beton de ciment degradat, datorită preluării tensiunilor din întindere din încovoiere de către geocompozit;
- cu coeficientul de performanță la numărul de cicluri de încărcare $C_{pNc}=0.36$, se poate aprecia un spor al duratei de viață asimilate la soluția cu geotextil antifisura de 36%.

Epuvetele încercate au fost solicitate în trepte, pornind de la o forță de 40daN și o amplitudine de 40daN. Fiecare treaptă de încărcare se modifică la 1200 de cicluri, însemnând la fiecare 5 minute [29] (Figura 8.3).

Număr cicluri	Amplitudinea daN	Forta aN
0	40	40
1200	40	80
2400	40	120
3600	40	160
4800	40	200
6000	40	240
7200	40	280
8400	40	320

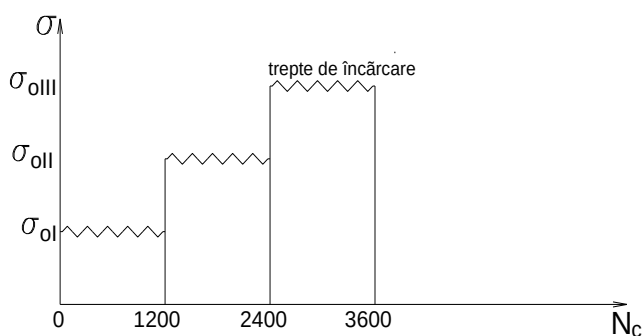


Figura 8.3 Trepte de încărcare

8.1.2 Relații de regresie între parametrii fisurării reflective

Cu ajutorul regresiei neliniare, s-au obținut relații între acești parametri luați doi câte doi (deformata probei w , lungimea f și deschiderea d a fisurii, în funcție de numărul de cicluri de încărcare-descărcare, n_c).

I. între deformata verticală și numărul de cicluri

$$w = a_0 \cdot e^{b_0 \cdot n_c} \quad \text{unde } w = \text{deformata verticală}$$

II. între deschiderea fisurii în asfalt și numărul de cicluri

$$d = a_0 \cdot e^{b_0 \cdot n_c} \quad \text{unde } d = \text{deschiderea fisurii în asfalt}$$

III. între lungimea fisurii în asfalt și numărul de cicluri

$$f = a_0 \cdot \ln(n_c) - b_0 \quad \text{unde } f = \text{lungimea fisurii în asfalt}$$

IV. între deschiderea fisurii în asfalt și lungimea acesteia

$$d = a_0 \cdot e^{b_0 \cdot f} \quad \text{unde } d = \text{deschiderea fisurii în asfalt}$$

8.1.3 Observații asupra experimentelor realizate

În continuare se vor prezenta câteva observații asupra experimentelor efectuate pe un număr de 10 epruvete (4b, 5a, 5b, 6a, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b).

Menționez că modelul experimental a avut aceeași placă de beton de ciment prefisurat, dar și aceeași mixtură asfaltică ca strat de protecție MAS16 [30], după cum am prezentat în raportul de cercetare numărul 2.

Notația epruvetelor cu a și b s-au făcut pentru plăci de mixtură (15x30cm) tăiate din aceeași placă 30x30cm, așa cum s-a detaliat la prezentarea echipamentului de încercare la fisurare reflectivă, FISUROMETRUL TERMOSTAT. Exemplu: s-a confecționat [31] o placă denumită 5 având dimensiunea 30cm lățime, 30cm lungime; din aceasta, prin tăiere în jumătate, au rezultat 2 plăci 5a și 5b, care corespund unui model de dala la scara redusă, în funcție de care s-a stabilit și nivelul solicitării asimilate unui trafic rutier pentru echipamentul de testare în laborator Fisurometrul Termostatat.

Aceste plăci din asfalt, care pastrează grosimea unui covor asfaltic, s-au lipit pe suportul din beton prefisurat printr-un amorsaj de bitum și apoi încercate pe rând. În acest scenariu, încercarea succesivă conduce la modificarea transferului la fisura predeterminată a suportului din beton de ciment.

Observațiile experimentale sunt legate de condițiile diferite de amorsare a plăcii asfaltice pe suportul din beton de ciment prefisurat, de deschiderea inițială a fisurii existente în suportul din beton de ciment și bineînțeles de condițiile structurale obținute la confecționarea plăcilor asfaltice.

8.2 Observații și interpretări ale rezultatelor epruvetei de calibrare a încercării 4b

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs cedarea epruvetelor este de 80daN, numărul de cicluri la care s-a produs fisurarea este $n_{ci4b}=1000$ (inițierea fisurii în stratul asfaltic), respectiv cedarea $n_{CCR4b}=1553$ (adică propagarea fisurii pe întreaga grosime a stratului asfaltic). Timpul total de încercare este de 388 secunde, în condițiile în care frecvența solicitărilor la fisurometrul termostatat este constantă.

În Figura 8.4 se prezintă evoluția deformăției verticale (determinată prin prelucrare imagistică și înregistrată de softul echipamentului Fisurometrul Termostatat), în funcție de numărul de cicluri. S-a notat cu **Cedare 4b** numărul de cicluri la care s-a oprit experimentul, iar cu **Rupere 4b** momentul în care fisura s-a propagat prin întreaga grosime a mixturii asfaltice de protecție. Astfel, putem considera capacitatea de rezistență la fisurare reflectivă pentru 4b un număr de cicluri de 1259 și ca durata de viață (315 secunde). Calibrarea acestor date obținute prin modelare experimentală se poate realiza prin analiză comparativă cu un sector experimental, când se cunoaște situația defectelor prin fisurare a unei îmbrăcăminti rutiere rigide, înaintea aplicării unui covor asfaltic de protecție.

Deocamdată, analiza prin modelare experimentală în laborator se va face doar până în acest punct de cercetare, respectiv până când fisura reflectivă apare la suprafața stratului asfaltic și este "vizibilă" peste 80% din grosimea acestui strat.

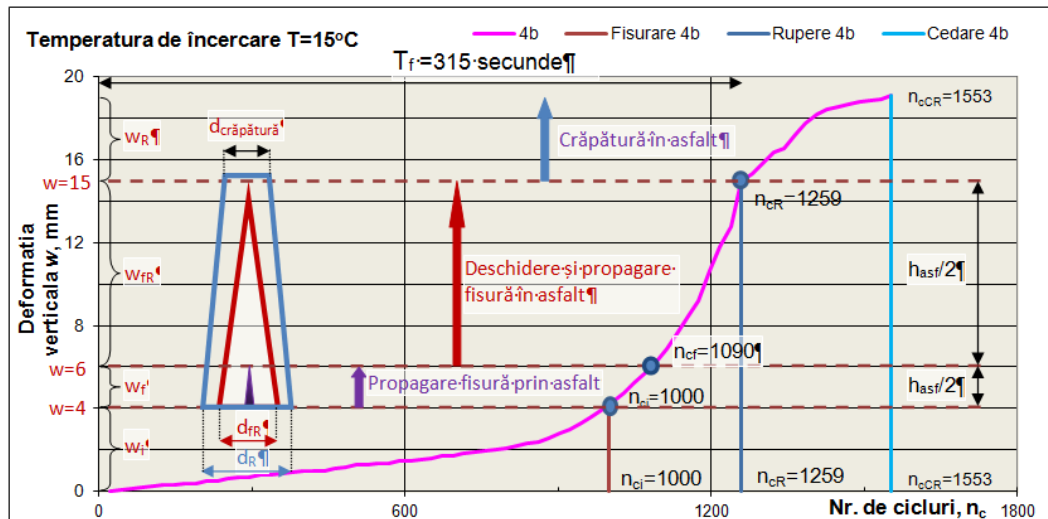


Figura 8.4. Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri pentru 4b

Pentru a dispune de o perioadă suficientă la capacitatea dispozitivului de înregistrare progresivă a fisurării reflectivă prin stratul asfaltic al epruvetei, temperatura de încercare este fixată la 15°C , corespunzător unei rigidități controlate a stratului asfaltic.

Epruveta 4b a fost utilizată pentru calibrarea programului experimental, în sensul identificării parametrilor încercării la fisurare reflectivă pentru simularea stratului de protecție asfaltic la îmbrăcăminți din beton de ciment degradate prin fisurare.

Astfel, în Figura 8.4 se pun în evidență principalii termeni ai fisurării la încercarea în regim accelerat prin modelarea experimentală în laborator.

Așadar, se pot identifica următorii parametri de analiză:

- Durata de funcționare la fisurare în regim accelerat (T_f)
- Deschidere fisură în strat asfaltic (d)
- Desprindere asfalt de pe beton în zona fisurii (e)
- Număr de cicluri la inițierea și propagarea fisurii n_{ci} , la deschiderea și propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic n_{cf} și la cedarea prin rupere $n_{cR}=n_{ctot}$.
- Deformația verticală (deflexiunea) la inițierea și propagarea fisurii w_i , la deschiderea și propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic w_{fr} , la cedarea prin rupere w_{fr} și la apariția crăpăturii în stratul asfaltic w_R .
- deschiderea fisurii din stratul suport din beton de ciment (db)

În cazul structurilor rutiere flexibile sau semirigide, deformația verticală (deflexiunea) la inițierea fisurii w_i poate pune în evidență deflexiunea maximă din teren (d_{adm}), iar când apare fisura la suprafața stratului asfaltic de protecție în teren ($d > d_{adm}$). În cazul structurilor rutiere rigide, la care stratul de uzură este asfaltic (cazul dezvoltat în teza de doctorat), deformația verticală (w), se datorează reducerii transferului la fisura existent pe toată grosimea stratului suport din beton de ciment.

Pe sector experimental, prin intermediul măsurătorilor deflectometrice, se pot determina N_{ci} corespunzător atingerii deflexiunii admisibile (d_{adm}) și N_{cf} corespunzător tasării aferente apariției fisurii la suprafața stratului asfaltic. În cazul structurii rutiere rigide cu strat de uzură din mixtură asfaltică, interpretarea fisurării reflectivă este indirectă, respectiv, atunci când apare fisura la suprafața carosabilă, adică în stratul asfaltic, deci procesul de propagare a fisurării s-a încheiat, se pot anticipa parametrii aferenți procesului prin utilizarea procedurii descrisă în prezenta teză.

Interpretarea este indirectă, deoarece în afara de investigațiile din teren trebuie să se apeleze și la încercări clasice de laborator pentru determinarea caracteristicilor reziduale ale materialelor din îmbrăcămintea rutieră. Se poate evalua astfel capacitatea de preluare a fisurării reflectivă la momentul analizei, precum și evoluția parametrilor aferenți prin studiul pe modelul experimental ce se poate cerceta pe o epruvetă extrasă din cale. În acest mod se poate anticipa rezerva din durata de funcționare a îmbrăcămintii rutiere rigide, printr-un coeficient de performanță rezultat din comportarea la fisurare.

reflective a epruvetei extrase din cale raportabil la rezultatul la același proces realizat pe o epruveta similară, dar confectionată în laborator.

Pentru materialul asfaltic utilizat se determină experimental timpul (t_i) și numărul de cicluri la care se inițiază fisurarea la interfața asfalt-beton de ciment (n_{ci}), precum și timpul final (t_f) și numărul de cicluri înregistrat când fisura apare la suprafața stratului asfaltic (n_{cf}). Astfel, pentru alte lucrări cu aceeași rețetă, se pot anticipa timpi aferenți duratei normate de funcționare, respective $Dt = t_f - t_i$.

Un simplu calcul indică faptul că aproximativ 80% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 20% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 8.1).

Această observație este în concordanță cu realitatea, prin care se știe că rolul de rezistență la fisurarea din oboseală, în cazul unei structuri rutiere compozite, de tip strat de uzură asfaltic pe suport din beton de ciment, îl are acest ultim strat, respectiv stratul rutier de bază.

Tabel 8.1 Indicele de fisurare a mixturii, epruveta 4b

Epruveta	Indice de fisurare REFLECTIVĂ, I_{fr}	Număr de cicluri LA PROPAGAREA REFLECTIVĂ A FISURII
4b	$I_{fr} = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} = \frac{1000}{1259} = 79.43\%$	$n_{cR} - n_{ci} = 1259 - 1000 = 259$

Doi dintre parametrii măsurați în cadrul experimentului, care influențează indirect propagarea fisurii prin stratul asfaltic de protecție, sunt: deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment (db_i , conlucrare prin frecare între agregate și/sau între piatra de ciment, între pereții fisurii), și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton (e_i , amorșajul de bitum, la interfața dintre beton și mixtură).

Aceștia sunt evidențiați pe modelul experimental aferent echipamentului de laborator FISUROMETRUL TERMOSTATAT în Figura 8.5, iar valorile pentru proba 4b, utilizată în studiul de calibrare a programului experimental, sunt prezentate prin prelucrarea imagistică generate de soft-ul echipamentului în Tabel 8.2.

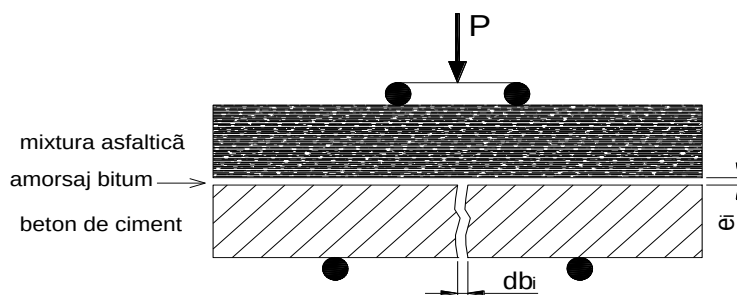
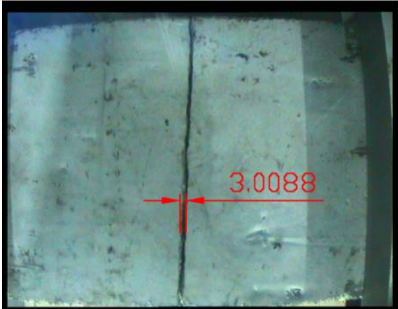
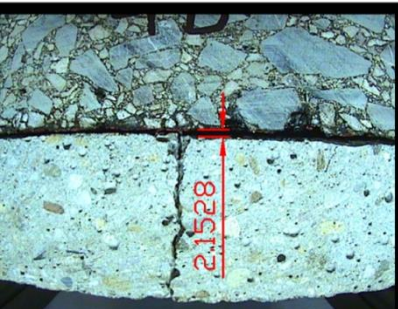
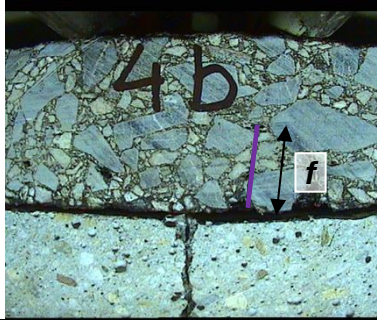
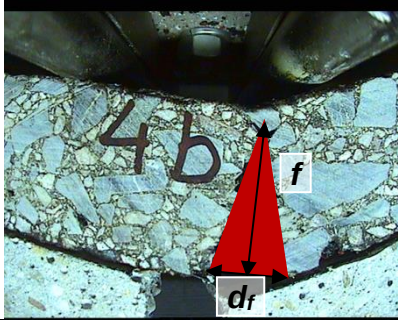


Figura 8.5 Parametrii inițiali ai studiului fisurării

Tabel 8.2 Valorile deschiderii inițiale db_i și ale desprinderii inițiale (amorșajul de bitum) e_i

Epruveta	Vedere sus db_i = deschiderea inițială a betonului (mm)	Vedere laterală e_i = desprinderea inițială a plăcii de asfalt de betonul de ciment (mm)
4b		
	$db_i = 3.0088$	$e_i = 2.1528$

Tabel 8.3 Etapele fisurării reflective în cazul așternerii stratului asfaltic de protecție peste o îmbrăcămintă din beton de ciment prefisurată

Epruveta	Etapa 1. Solicitarea este preluată de frecarea între plăcile de beton prefisurat	Etapa 2. Fisura din beton s-a transmis în asfalt de protecție (propagare)	Etapa 3. Fisura a ajuns la suprafața asfaltului de protecție (deschidere și propagare fisura prin asfalt)
4b			
	Numărul de cicluri: 0- n_{ci} Deformația verticală: 0- w_i Lungime fisură: $f=0$ Deschidere fisură: $d_f=0$	Numărul de cicluri: n_{ci} - n_{cf} Deformația verticală: w_i - w_f Lungime fisură asfalt: $f=0$ - $h_{asf}/2$ Deschidere fisură: $d_f=0$	Numărul de cicluri: n_{cf} - n_{cR} Deformația verticală: w_f - w_{fR} Lungime fisură: $f=h_{asf}/2$ - h_{asf} Deschidere fisură: d_f

Pentru calibrarea modelului matematic cu rezultatele obținute prin modelarea experimentală pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, se utilizează, în continuarea cercetării fisurării reflective din stratul suport prefisurat din beton de ciment în stratul superior asfaltic cu rol de uzură și de protecție în același timp a îmbracamintii din beton de ciment fisurate în exploatare, următoarele notații:

- $n = \frac{n_{cf}-n_{ci}}{n_{cR}-n_{ci}}$ -pentru $n_{cf} \geq n_{ci}$
- **d exp** –deschiderea fisurii în asfalt măsurată pe model experimental
- **d calc** –deschiderea fisurii în asfalt determinată pe model matematic
- **f exp** –lungimea fisurii în asfalt măsurată pe model experimental
- **f calc** –lungimea fisurii în asfalt determinată pe model matematic
- **db exp** –deschiderea betonului măsurată pe model experimental
- **db calc** –deschiderea betonului determinată pe model matematic

Rezultatele cercetării în această direcție, au pus în evidență următoarele principii de evaluare ai parametrilor fisurării reflective, după cum urmează:

- Măsurătorile și prelucrările acestor parametri, lungimea și deschiderea fisurii, pentru epruveta 4b indică:
- Variația deschiderii fisurii **d**, dar și a lungimii **f** în stratul asfaltic, în raport cu creșterea numărului de cicluri **n**, este neliniară (Figura 8.6). Modelul de regresie care descrie cel mai bine această relație este de forma:

$$y = \frac{a_0 \cdot n}{1 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2} \quad (7)$$

- Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$): $n_{cf} = 1080$ cicluri ($n = 0.3$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 30% din durata totală a propagării acesteia). Aceasta constatare este extrem de importantă prin raportarea cu alte modele experimentale utilizate în evaluarea fenomenului de oboseală din straturile asfaltice, care stabilesc că rezistența stratului este consumată în cazul în care s-a consumat jumătate din deformația acumulată la ciclurile de solicitare.

În Figura 8.6, se poate observa faptul că rezistența inițială la fisurare a stratului asfaltic este mai mare, prin creșterea accentuată a valorii deschiderii fisurii (**d**) și evoluția mai lentă a propagării fisurii (**f**). De asemenea se remarcă faptul că diagrama evoluției fenomenologice experimentale este redată cu acuratețe de legea matematică aferentă.

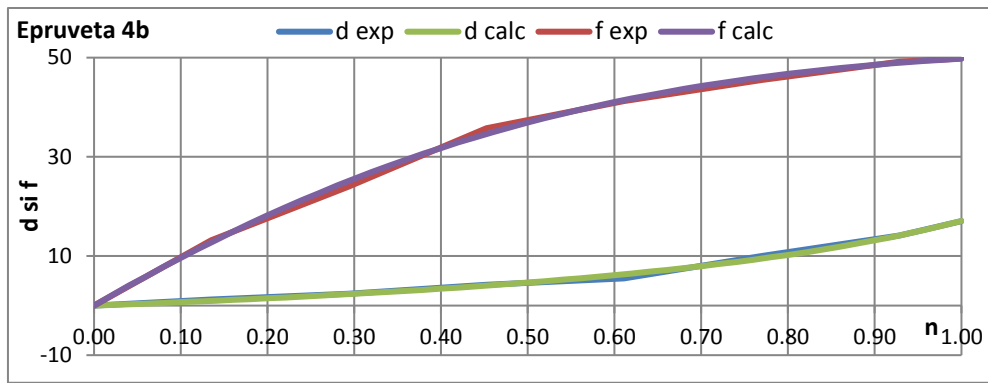


Figura 8.6 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 4b

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului db în raport cu n este modelul MMF (Morgan-Morgan-Finney), Figura 8.7:

$$db = \frac{a_0 \cdot a_1 + a_2 \cdot n^{a_3}}{a_1 + n^{a_3}} \quad (8)$$

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din modelul MMF se va adăuga valoarea deschiderii inițiale db_i (Tabel 8.2)

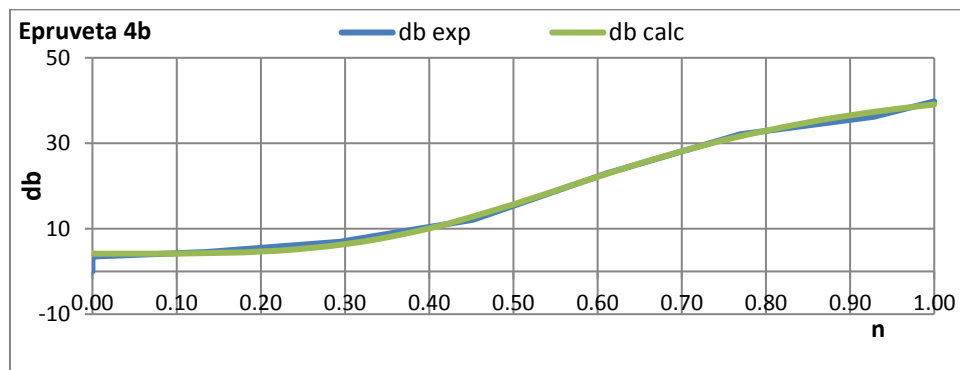


Figura 8.7 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 4b

Ținând cont de modelele de regresie găsite între acești 4 parametri (2 câte 2), se poate observa evoluția lor într-o reprezentare tridimensională :

- deschidere d , lungime f și n , în stratul asfaltic (Figura 8.8),
- deschidere d și lungime f fisură în asfalt și deschiderea betonului db (Figura 8.9)

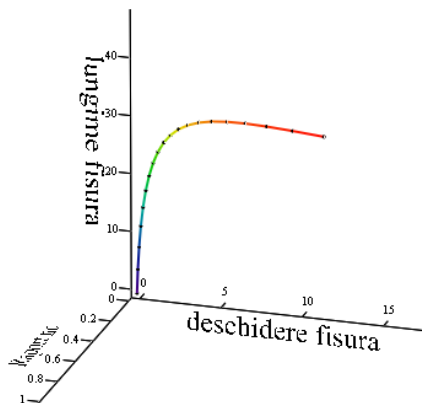


Figura 8.8 Reprezentare tridimensională d , f , n , epruveta 4b.

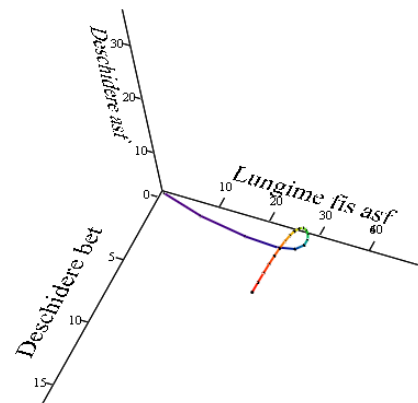


Figura 8.9 Reprezentare tridimensională d , f , db , epruveta 4b.

În Figura 8.8, reprezentarea grafică pune în evidență lungimea fisurii și deschiderea ei la baza

stratului asfaltic în cele trei faze de lucru ale asfaltului, respectiv în stadiul elastic (culoarea albastră), elasto plastică (culoarea verde) și plastică (culoarea roșie), când începe procesul de rupere la fisurarea reflectivă..

Figura 8.9 reprezintă evoluția fisurării reflective din asfalt, respectiv creșterea lungimii și deschiderii fisurii, dar prin raportare la deschiderea fisurii din placa suport din beton de ciment. Se poate observa că apare dezvoltarea liniei roșii de comportare în stadiu plastic a stratului asfaltic din Figura 8.8, consecutiv cu deschiderea fisurii din betonul de ciment. Când se consumă transferul de sarcină la fisura din suportul din beton de ciment și întreaga solicitare a încărcării verticale asimilate traficului rutier este preluată de stratul asfaltic, fisura reflectivă apare la suprafața carosabilă.

Această analiză experimentală conduce la concluzia, că în cazul covorului asfaltic pe o îmbrăcaminte rutieră veche din beton de ciment, apariția fisurării reflective la suprafața carosabilă, presupune consumarea capacității portante a stratului asfaltic și frezarea asfaltului în vederea așternerii unui nou strat asfaltic, reprezintă o soluție ineficientă.

În acest caz apare recomandarea aplicării de studii complementare de evaluare a capacității portante a întregului complex rutier în vederea aplicării unei eventuale soluții de ranforsare a structurii rutiere.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 8.10). Pentru a fi mai sugestivă diagrama de variație parametrică a fisurării reflective (Figura 8.10), s-a raportat valoarea parametrului într-un punct la valoarea totală adimensională cu rol de indice de performanță la fisurarea reflectivă. (exemplu: f/f_{tot} , unde f –lungimea fisurii în punctul considerat, f_{tot} –lungimea din momentul propagării fisurii pe grosimea stratului asfaltic)

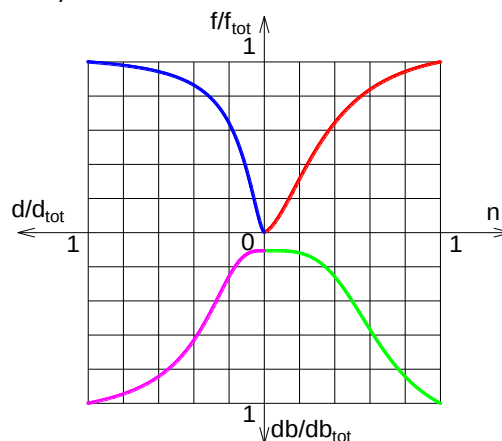


Figura 8.10 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 4b.

Această diagramă de analiză multicriterială (Figura 8.10), permite identificarea parametrilor mai puțin vizibili la prelucrarea imagistică a datelor obținute cu soft-ul aferent dispozitivului fisurometru termostațat

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 8.11), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 8.12) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 8.13), se calculează prin derivarea funcțiilor

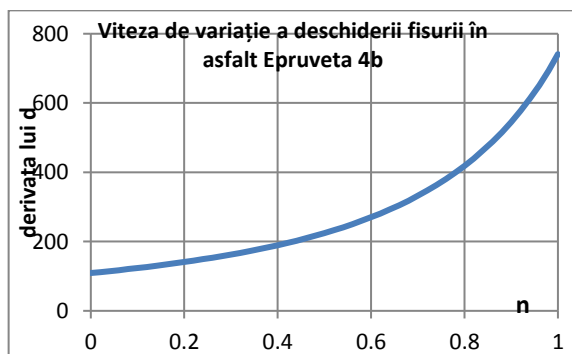


Figura 8.11 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 4b

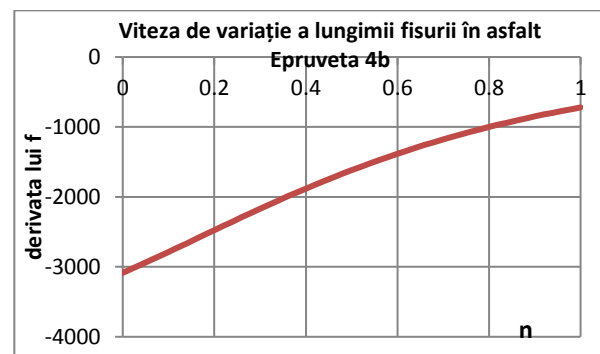


Figura 8.12 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 4b

Se poate constata funcție de curbura diagramelor legatura dintre parametrii fisurarii reflective, astfel, dacă viteza de variație la deschiderea fisurii în asfalt este mai redusă, urmând ca în finalul testului la propagarea reflectivă să crească accentuat, viteza de variație a lungimii fisurii este mai accentuată la începutul testului, estompându-se către sfârșitul testului. Această comportare diferită între viteza de deschidere a fisurii și lungimea ei prin propagare pe grosimea stratului asfaltic, se explică prin comportarea reologică a acestui material rutier și prin trecerea de la comportarea elastică la cea plastică în timpul dezvoltării stării de deformare locală în "vârfurile fisurii", conform teoriei Irwin.

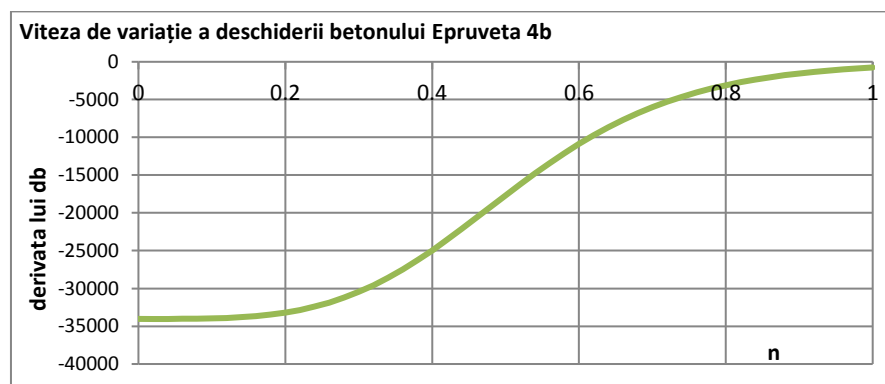


Figura 8.13 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 4b

În Figura 8.13, unde se prezintă viteza de variație a deschiderii fisurii existente în stratul suport din beton de ciment, se pune în evidență fenomenul creat de efectul de transfer la fisura prin frecarea inițială a perților acestui strat suport, atenuat de amortizarea procesului de transfer prin prezența stratului asfaltic la fibra superioară a stratului din beton de ciment, care lucrează împreună cu acesta prin aplicarea operației tehnologice de amorsaj. Astfel, inițial, când lucrează transferul din fisura stratului din beton de ciment împreună cu amortizarea stratului asfaltic prezent la suprafața acestuia, capacitatea de preluare a deformației verticale (deflexiunea sub sarcină) este mai mare și deci viteza de deschidere a fisurii existente din betonul de ciment este mai mică.

În etapa intermediară, când transferul la fisura stratului suport din beton de ciment se consumă și se mobilizează capacitatea de preluare a transmiterii fisurii prin stratul asfaltic se schimbă curbura diagramei, în așa fel încât în faza finală de propagare reflectivă viteza de deschidere a fisurii din stratul din beton să crească la o deflexiune mai redusă.

Toate aceste constatări experimentale, transpuse pentru explicitare fenomenologică în modelare matematică, își pot găsi utilitatea practică prin utilizarea procedurii de lucru propuse în cadrul tezei de doctorat, în cazul aplicării unui program de cercetare extins, pe mai multe tipuri de materiale rutiere asfaltice folosite ca variante de execuție la stratul asfaltic de protecție a unei îmbrăcăminti din beton de ciment degradate în perioada de exploatare.

8.3 Capacitatea de transfer a fisurii de la beton la stratul de protecție

Fisura reflectivă apărută la suprafața carosabilă, fără a fi însoțită și de apariția de tasări locale, presupune ca fenomenul propagării să apară fără deschiderea la nivel de pierdere de transfer la nivelul stratului din beton de ciment și atunci, parametrul desprinderii la interfața asfalt-beton este practic zero, pe când atunci când apar și tasări se presupune că s-a consumat transferul la fisura din stratul suport din beton și apar și desprinderi de interfață, respectiv apare cu valori și parametrul (e).

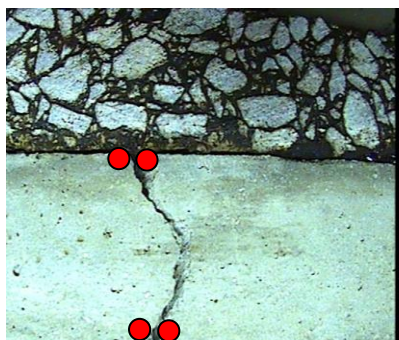


Figura 8.14 Dala cu conlucrare la fisura (db=3mm), fisură în dală

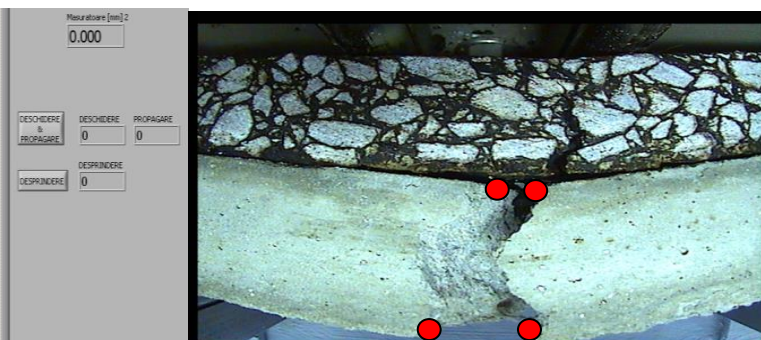


Figura 8.15 Dală fără conlucrare la fisura (db=7mm), crăpătură în dală

Pentru a putea interpreta modul de propagare a fisurii printr-un strat asfaltic de protecție a unei îmbrăcămînți din beton de ciment degradat prin fisurare, fisuri care pot fi de diverse grade de severitate în funcție de deschiderea acestora, s-a programat un studiu experimental pe 8 epruvete de laborator [27], care diferă între ele prin deschiderea predeterminată a fisurii din betonul de ciment.

Timpul de propagare al fisurii prin stratul asfaltic de protecție se determină indirect prin numărul de cicluri aferent procesului de fisurare și prin deformarea verticală rezultată (săgeata w).

Pentru suportul din beton de ciment prefisurat cu deschiderea predeterminată de 3mm (Figura 8.14), se observă că inițial exista capacitate de transfer în suportul din beton de ciment, săgeata aferentă fisurării din stratul asfaltic de protecție este de 4mm (proba 3a), iar pentru următoarele epruvete asfaltice lipite pe același suport deja încercat la proba 3a, săgeata crește la 13mm datorită reducerii transferului la fisură din suportul din beton de ciment.

La proba 2a se constată că la o săgeată de 13mm, numărul de cicluri aferent propagării fisurii prin stratul asfaltic coboară la 9000, ceea ce semnifică că stratul suport are o capacitate mai redusă de preluare a solicitării de întindere din încovoiere prin transferul la fisura, aceasta fiind preluată de stratul asfaltic.

Același mecanism de propagare a fisurii prin stratul de protecție asfaltic se regăsește și în cazul analizei acestui proces în funcție de deschiderea fisurii din epruveta asfaltică.

Proba 2b s-a rupt instantaneu de la primele cicluri de solicitare, deoarece nu mai exista transfer la fisura în stratul din beton de ciment.

În ceea ce privește analiza procesului de propagare reflectivă a fisurii din stratul prefisurat din beton de ciment în stratul de protecție asfaltic, rezultatele obținute în laborator pun în evidență același mecanism de dezvoltare prezentat la analizele anterioare, respectiv un timp mai scurt de propagare atunci când deschiderea fisurii din suportul din beton este mai mare. Exprimarea în timp mai scurt de propagare este indirectă, prin intermediul numărului de cicluri de solicitare, care este mai redus în cazul existenței de crăpături în stratul din beton de ciment (exemplu $db=7mm$).

Pentru epruvetele asfaltice lipite pe suportul din beton prefisurat cu deschiderea de 7mm, constatarea făcută este evidentă prin faptul că numărul de cicluri la care se propagă fisura prin acestea este mult redus (proba 2b se fisurează la 300 cicluri față de proba 2a la 9000 de cicluri).

S-a constatat un timp mai scurt de propagare atunci când deschiderea fisurii din suportul din beton este mai mare. Exprimarea în timp mai scurt de propagare este indirectă, prin intermediul numărului de cicluri de solicitare, care este mai redus în cazul existenței de crăpături în stratul din beton de ciment (exemplu $db=7mm$).

S-a observă faptul că lungimea fisurii propagate în epruveta din asfalt se propagă pe grosimea stratului (5cm) la un număr de 12900 cicluri atunci când există și transfer la fisura existent în suportul din beton de ciment ($db=3mm$), dar se propagă practic la grosimea stratului asfaltic de 5cm la numai 3600 cicluri atunci când nu mai există conlucrare de transfer în stratul suport din beton de ciment (crăpătură, $db=7mm$).

8.4 Interpretare multicriterială a procesului de fisurare reflectivă

Interpretarea multicriterială a procesului de fisurare reflectivă la structuri rutiere rigide reabilite prin așternerea unui covor asfaltic de protecție, presupune o analiză combinată între factorii de influență a

procesului de transmitere și propagare a fisurii din îmbrăcămintea din beton de ciment fisurat, în stratul asfaltic de protecție.

Acești factori de influență sunt descriși sub formă de indici parametrici:

- indicele parametrului cicluri de solicitări I_{nc} ,
- indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment I_{db} ,
- indicele de deschidere a fisurii reflectivă în stratul asfaltic I_d ,
- indicele de propagare a fisurii prin stratul asfaltic I_f .

Diagramele de interpretare multicriterială a procesului de propagare reflectivă a fisurii prin stratul asfaltic al modelului experimental, sunt prezentate în Anexa prezentei teze de doctorat, pentru fiecare epruvetă în parte.

Epruveta 4b reprezintă proba pentru calibrarea încercării, întrucât și din prelucrarea imagistică a rezultat că toți acei parametri de analiză (n_c , db , d , f) au evoluat prin interdependență, iar variația lor este una proporțională (Figura 8.6 și Figura 8.7).

Se poate observa o creștere pe partea dreaptă a bisectoarei din cadranul variației deschiderii fisurii betonului (I_{db}) cu indicele de deschidere al fisurii din stratul asfaltic (I_d) al modelului experimental (Figura 8.10).

O explicitare a acestei comportări la fisurare reflectivă a stratului asfaltic, o are efectul de transfer redus în fisura din betonul de ciment, la care deschiderea inițială $db_i=3.01\text{mm}$ (Tabel 8.2).

Comparând această comportare la fisurare a modelului experimental de structură rutieră asfalt-beton de ciment, cu modelul 7a, se poate constata o evoluție diferită în cadranul I_{nc}/I_f , datorită transferului la fisură din stratul prefisurat din beton de ciment unde $db_i=1.25\text{mm}$.

- Creșterea transferului la fisură din stratul din beton, aproximativ de 2 ori, la proba 7a față de 4b, conduce la o dezvoltare prin propagarea fisurii la epruveta 7a în cadranul I_{nc}/I_f pe direcția primei bisectoare, ceea ce înseamnă că acest fenomen reprezintă capacitatea portantă la fisurare prin oboseală a stratului asfaltic.
- În cazul probei 4b, datorită transferului redus în stratul din beton de ciment prefisurat, solicitarea principală care stă la baza evoluției fisurii reflectivă din stratul asfaltic, este cea din întindere din încovoiere, iar curba de evoluție în cadranul I_{nc}/I_f , se găsește desupra primei bisectoare (Figura 8.10).

8.5 Măsurători în teren pentru calibrarea încercărilor de laborator

Pentru a urmări evoluția în timp a degradărilor structurii rutiere, avem nevoie de informații legate de tipul și grosimea straturilor din componența structurii, degradările ce apar de-a lungul timpului la nivelul căii de rulare (partea vizibilă a sistemului rutier), dimensiunile acestora, dar și informații legate de traficul de pe sectorul respectiv de drum (categorii de vehicule, numărul acestora, distribuția greutății pe tipuri de osii) și diferențele de temperatură zilnică și sezonieră.

Odată cunoscute, se pot lua decizii asupra modului și momentului în care se intervine asupra părții carosabile (fie prin tratamente de suprafață, fie prin înlocuirea straturilor superioare de protecție, fie prin refacerea integrală a sistemului rutier, e.t.c.).

Una din metodele cele mai eficiente la ora actuală, pentru a centraliza informațiile culese din teren, o reprezintă sisteme informatice geografice GIS (Geographical Information System). Acestea permit o mai bună organizare a datelor, stochează, prelucrează și vizualizează informațiile introduse.

Pentru colectarea și întreținerea la zi a informațiilor interesante din punct de vedere al infrastructurii drumului, s-a conceput un sistem combinat video/GPS (poate fi format dintr-un laptop la care se conectează un receptor GPS și camere video), montat pe o mașină care rulează pe drumul respectiv și măsoară prin tehnologia asimilată scanării degradările apărute la suprafața sistemului rutier, poziționându-le ca și amplasare pe partea carosabilă cu ajutorul receptorilor GPS.

După măsurătorile efectuate pe teren cu ajutorul acestui vehicul, se trece la prelucrarea datelor.

În cazul fisurării reflectivă la analiza fenomenului de oboseală pentru structuri rutiere compozite (îmbrăcămintă asfalt pe suport din beton de ciment), din suprafața scanată se alege cea fisurată longitudinal. Acest tip de fisurare este consacrată fenomenului de oboseală structurală, rezultat ca fisurare reflectivă din

cedarea straturilor rutiere inferioare. La suprafața carosabilă apar fisurile longitudinale din oboseală, care în general sunt însoțite și de deformări permanente alocate fâgășuirii sau tasărilor locale, deci deformațiilor verticale (w), studiate în cazul modelării experimentale cu Fisurimetrul Termostat.

Se poate vizualiza conlucrarea de interfață asfalt-beton, prin teste cu Georadarul, pentru a constata modificările de aderență, respectiv, apariția parametrului de desprindere și prin măsurători în cale.

Dacă se dispune și de recensăminte de trafic [32], care presupune cunoașterea numărului de cicluri de încărcare aferente volumului de trafic N_c [33] [34] [35], înseamnă că se dispune de un al doi-lea parametru de cercetare echivalent (n_c). Cu cei doi parametri evaluați pe un sector experimental din realitate se poate utiliza procedura de analiză stabilită prin programul experimental al prezentei teze de doctorat, consacrată determinării performanței structurii rutiere compozite, prin raportarea la comportarea modelului la scară redusă testat în laborator pe Fisurimetrul Termostat.

Ceea ce acest mod de achiziție și prelucrare a datelor nu ne oferă, cel puțin în ceea ce privește fisurarea structurilor rutiere, este ceea ce se întâmplă până când fisura apare la suprafață, mai precis timpul în care aceasta se propagă din fundație, prin straturile superioare. De asemenea, un alt inconvenient îl reprezintă timpul mare de urmărire necesar evaluării comportării soluțiilor adoptate.

Pentru a îndepărta aceste inconveniente, se realizează modelări experimentale care simulează cât mai exact, evoluția degradărilor în urma acțiunii traficului și a variațiilor de temperatură la etapa de proiectare a rețelei mixturii asfaltice în laborator, anticipându-se prin procedura de cercetare propusă prin teza de doctorat, un factor extrem de important pentru elaborarea strategiilor de intervenție în cale și anume, durata normată de funcționare a structurii rutiere proiectate.

Astfel, s-au extras epruvete din carosabil de pe teren cu ocazia desfășurării unei expertize tehnice de calitate, epruvete care au fost prelucrate ulterior pentru obținerea dimensiunilor prevăzute pentru încercare prin modelare experimentală în laborator cu FISUROMETRUL TERMOSTAT.

Pentru această parte a Programului Experimental al Tezei de Doctorat, s-au utilizat două locații după cum urmează:

Din prima locație, amplasată pe DNCB (Centura București), s-au prelevat eșantioane din îmbrăcămintea rutieră cu strat de uzură din MAS 16, cu o durată de exploatare de 7 ani, prin care s-a urmărit determinarea caracteristicilor de fisurare reflectivă în cazul unei mixturi asfaltice cu un grad de severitate ridicat.

Din cea de-a doua locație, s-au mai prelevat epruvete din cale, cu ocazia desfășurării unei alte expertize de drumuri în zona Autostrăzii Arad-Nădlac, aflată în perioada de construcție în anul 2014.

Stratul asfaltic a fost decupat din suprafața carosabilă, ori împreună cu suportul din beton de ciment, ori prin desprinderea efectivă a stratului de uzură asfaltic la nivelul amorsajului cu stratul de bază din beton de ciment.

În acest caz există două opțiuni de cercetare a fisurării reflectivă:

1. Pe epruveta care are aderență la suportul din beton de ciment, se mai efectuează o tăietură la fibra inferioară a stratului din beton, pentru a obține slăbirea secțiunii stratului rigid, în vederea anticipării fisurării reflectivă la solicitări cu FISUROMETRUL TERMOSTAT;

2. Pentru epruveta unde s-a reușit la carotarea din teren, desprinderea de stratul din beton, se aplică metoda descrisă la studiul de caz aplicat în cadrul tezei și anume, tăierea plăcii asfaltice în laborator la dimensiunea plăcii din beton prefisurat și lipirea plăcii asfaltice de placa de beton prefisurat prin amorsare. În acest caz se pune în evidență calitatea amorsajului la interfața asfalt-beton.

Eșantioanele prelevate din cale (Strat MAS 16 cu grosimea $H=5\text{cm}$) și pregătite la scara modelului experimental, au fost pozate pe același suport prefisurat din beton de ciment, prin amorsarea de interfață (cazul 2), așa cum s-a procedat și în cazul programului experimental efectuat pe epruvete asfaltice confecționate în laborator.

Se menționează faptul că transferul la fisura din suportul din beton de ciment era parțial consumată, datorită testelor din primul program experimental. În acest caz, diminuarea transferului în fisura din suportul din beton de ciment se ia în considerare prin raportarea rezultatelor față de ultima probă încercată în primul program experimental.

Calculul procentual arată că 95.5% (9a), respectiv 80% (9b) din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 4.5% (9a), respectiv 20% (9b) din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin

placa de asfalt (Tabel 8.4). Se observă o creștere considerabilă a comportării statului de protecție după apariția fisurii în acesta la epruveta 9b.

Tabel 8.4 Indicele de fisurare a mixturii, 9a și 9b

Epruveta	Indice de fisurare, $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{CR}}$ (%)	Numărul de cicluri
9a	95.50%	564
9b	79.80%	2940

Rezultatele incercărilor de laborator efectuate pe acest set de epruvete extrase din teren au fost următoarele:

1. Pe epruvetele extrase la DNCB, când deschiderea fisurii inițiale la suportul din beton de ciment este $db=5\text{mm}$ (considerată crapatura)

Se poate trage concluzia, ca în cazul deschiderii mari din suportul din beton de ciment, deci în cazul lipsei transferului la fisură când se mobilizează numai rezistența la întindere din încovoiere din stratul asfaltic, care are și o cotă consumată din rezistența la oboseală structurală în perioada de exploatare deja derulată până la momentul prelevării epruvetei din cale, rezerva de capacitate de preluare a fisurării reflectivă este de $6342/11972=0,53$, respectiv de 53%.

Se poate constata faptul că urmând efectuarea testului de fisurare reflectivă după încheierea primului program experimental, respectiv după încercarea probei 9b, pentru deschiderea fisurii inițiale considerate $db=3\text{mm}$, epruveta asfaltică fisurează inițial la fibra inferioară la 2864 cicluri cu $w=3,98\text{mm}$, iar pe întreaga grosime la un număr de cicluri de $n_c=9838$ cicluri cu $w=14,15\text{mm}$. În acest caz se poate constata că rezerva de fisurare reflectivă este de $9838/11972=0,82$ în situația existenței transferului la fisura betonului de ciment suport, adică de 82%;

2. Pe epruvetele extrase de pe tronsonul de autostradă aflat în construcție la momentul preluării epruvetelor din îmbrăcămintea asfaltică, și unde s-a observat apariția unui proces de fisurare cu grad de severitate redus în suportul din beton de ciment, la confecționarea modelului de fisurare reflectivă pentru a fi testat pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, s-a luat în considerație $db=0\text{mm}$, deci s-a urmărit o închidere perfectă a fisurii din suportul din beton de ciment.

Se poate constata că numărul de cicluri obținute pe modelul experimental care folosește epruveta prelucrată din teren aferentă unui strat asfaltic imediat după așternerea în cale și deci încă necirculat, corespunde valorilor obținute pe epruveta la care stratul asfaltic a fost confecționată în laborator. Acest fapt, demonstrează că cercetarea performanțelor inițiale ale comportării la fisurare reflectivă a unei mixturi asfaltice propuse la execuție pe teren, se poate analiza încă din faza de proiectare a rețelei mixturii asfaltice în laborator, atunci când se analizează rețeta optimă pentru așternerea îmbrăcăminții în partea carosabilă.

Capitolul 9. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

9.1 Concluzii finale

Teza de doctorat intitulată "CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA PRIN MODELAREA STRUCTURILOR RUTIERE REABILITATE LA SOLICITĂRI ASIMILATE TRAFICULUI RUTIER", a avut drept principal scop identificarea unei proceduri de analiza parametrică a rezultatelor testelor de fisurare reflectivă obținute în laborator pe echipamentul prototip aflat în stadiul de cercetare la Laboratorul CFDP-UTCB. Pentru realizarea acestui obiectiv am organizat conținutul tezei de doctorat în două părți distincte, respectiv PARTEA 1-a SINTEZA DOCUMENTARĂ, cu principalele studii și cercetări analizate din literatura de specialitate, prin care s-au publicat rezultatele obținute în testarea mixturilor asfaltice la fisurarea reflectivă și PARTEA 2-a CONTRIBUȚII PERSONALE LA STUDIUL FISURĂRII REFLECTIVE utilizând echipamentul FISUROMETRUL TERMOSTAT

În PARTEA 1-a am sintetizat o serie de teorii și publicații din literatura de specialitate, care au pus în valoare caracteristicile principale ale dezvoltării fisurării reflectivă din straturi rutiere uzate în exploatare în straturi asfaltice noi, cu rol de protecție și de uzura la astfel de structuri rutiere.

În PARTEA a 2-a am identificat și interpretat prin testele efectuate pe Fisurimetrul Termostat, următorii parametri ai fisurării reflective prin covorul asfaltic de protecție a unei îmbrăcăminti rutiere rigide degradate prin fisurare:

- Durata de funcționare la fisurare în regim accelerat (T_f)
- Deschidere fisură în strat asfaltic (d)
- Desprindere asfalt de pe beton în zona fisurii (e)
- Număr de cicluri la inițierea și propagarea fisurii n_{ci} , la deschiderea și propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic n_{cf} și la cedarea prin rupere $n_{cR}=n_{ctot}$.
- Deformația verticală (deflexiunea) la inițierea și propagarea fisurii w_i , la deschiderea și propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic w_f , la cedarea prin rupere w_{fR} și la apariția crăpăturii în stratul asfaltic w_R .
- Deschiderea fisurii din stratul suport din beton de ciment (db)

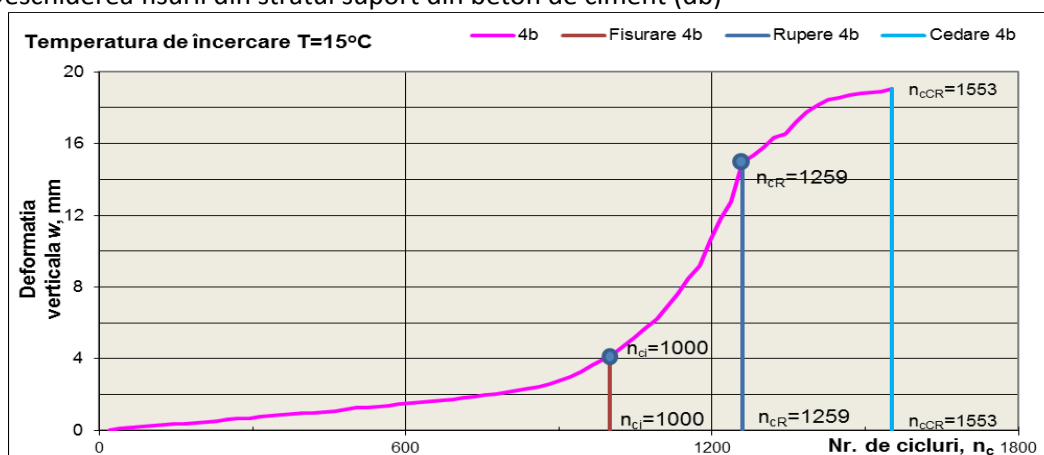


Figura 9.1 Variația deformației verticale w , în funcție de numărul de cicluri n_c

Figura 9.1, rezultată ca reprezentare grafică obținută în timpul încercării efectuate cu FISUROMETRUL TERMOSTAT, arată variația înregistrată a deformației verticale (w) a epruvetei în raport de creșterea numărului de solicitări (n_c). Se poate determina creșterea deformației elasto-plastice a stratului asfaltic pe suportul prefisurat din beton de ciment până în momentul apariției fisurii reflectivă la fibra inferioară supusă ciclurilor de solicitare din întindere din încovoiere (când se poate determina n_{ci} - numărul de cicluri la inițierea fisurării reflectivă), urmată de faza 2, propagarea fisurii pe grosimea stratului asfaltic, când se determină n_{cf} , și ultima fază (faza 3), când fisura de la suprafață se transformă în crăpătură peste 0.5mm și apare ruperea epruvetei. Aceste etape se găsesc și în realitate, când se face evaluarea prin investigare vizuală a evoluției fisurării pe un sector experimental de drum și prin consecință, se poate interpreta fisurarea reflectivă la momentul apariției la suprafața carosabilă în funcție de deschiderea ei, funcție de grosimea stratului asfaltic (h_{ast}) și evaluările de trafic (N_c -traficul real, transformat în trafic de calcul, comparabil cu numărul de cicluri determinat pe epruveta extrasă din cale- n_c).

De asemenea, dacă existau și măsurători efectuate cu georadarul pe sectorul experimental, se poate determina prin măsurători nedistructive și excentricitatea fisurii reflectivă, funcție de parametrul desprinderii la interfața asfalt-beton de ciment (e). Bineînțeles că un parametru important posibil a fi măsurat pe teren este tasarea (w) din dreptul fisurii analizate.

Teste efectuate pe epruvete extrase din cale pe o zonă nefisurată, pregătite la scara modelului de încercare pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, pot stabili parametrii fisurării reflectivă la momentul analizei structurii rutiere pe sectorul experimental, considerați ca valori efective pe teren. Prin raportare la valori obținute pe epruvete similare, dar confecționate în condiții de laborator, se pot determina coeficienți adimensionali de performanță, sub forma de indici de fisurare, care pot prezenta calitativ informații despre rezerva de rezistență la fisurarea reflectivă a îmbrăcăminții asfaltice existente.

Prin această analiză, se poate stabili până la momentul programat pe această cale de cercetare calitativă, perioada de perspectivă a intervenției de refacere a covorului asfaltic, respectiv frezarea celui existent și refacerea lui cu un nou strat asfaltic, a cărui durată normală de funcționare poate fi anticipată prin testare cu FISUROMETRUL TERMOSTAT.

Rezultatele obținute în cadrul Programului Experimental și în etapa de Interpretare a rezultatelor obținute prin Modelare Matematică, pot fi sintetizate după cum urmează:

I. ETAPA 1 de cercetare „**Măsurători experimentale pe structuri compozite utilizând Fisurimetrul Termostatat**”

La momentul stabilirii Programului Experimental al tezei de doctorat, Echipamentul FISUROMETRUL TERMOSTAT se afla în faza de prototip de aparat destinat studiului fisurării reflective prin epruvete asfaltice tip plăci dreptunghiulare, utilizate pentru modelarea experimentală.

În această etapă de studiu, am parcurs o etapă de calibrare a modelului experimental, în vederea posibilității de înregistrare a parametrilor prin achiziție imagistică, în perioada testării la propagarea fisurii prin stratul asfaltic, în cazul încercării modelului experimental la cicluri în regim accelerat (în trepte succesive și predeterminate de creștere a forței de încărcare) ale solicitării echivalente traficului rutier.

Utilizând această schemă de testare a fisurării reflective din suportul prefisurat din beton de ciment în covorul asfaltic de protecție, se pot obține diverse interpretări comportamentale ale structurii rutiere compozite asfalt-beton de ciment.

II. ETAPA 2-a „**Analiza parametrilor definitorii fenomenului de propagare a fisurii din îmbrăcăminți din beton degradat în stratul asfaltic de protecție**”

În cazul evoluției propagării fisurii la epruvete asfalt pe beton se pot analiza parametrii prezentați în etapa 1 (Figura 9.2).

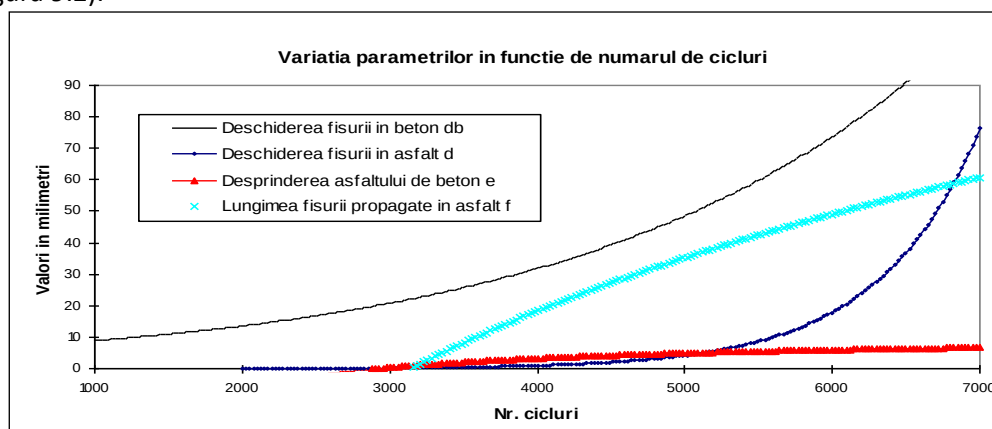


Figura 9.2 Variația parametrilor fisurării în funcție de numărul de cicluri

După cum se observă din reprezentarea grafică a evoluției parametrilor menționați, apariția fiecărui parametru se produce etapizat, așa cum se vede și din prelucrarea imagistică (Figura 8.14 și Figura 8.15), respectiv mai întâi se produce deschiderea fisurii din beton (**db**), datorită reducerii capacității de preluare a solicitărilor din întindere din încovoiere repetate, apoi se amorsează fisura la baza stratului asfaltic de protecție (**d**), în timp ce, practic, desprinderea la interfața asfalt-beton (**e**) se dezvoltă în timpul propagării fisurii pe grosimea stratului asfaltic de protecție (crește lungimea fisurii pe grosimea stratului asfaltic).

III. ETAPA a 3-a „**Interpretarea rezultatelor obținute în laborator**”

Cercetarea din laborator pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, pune în evidență două tipuri de analize la procedura de evaluare a performanței în exploatare a soluției de protecție a îmbrăcăminților din beton de ciment degradate prin apariția fisurilor și crăpăturilor în timpul perioadei de exploatare și anume:

- performanța straturilor de protecție asfaltice prevăzute cu sistem antifisură de tipul geocompozitelor;
- performanța la propagarea fisurii din stratul din beton degradat în stratul de protecție asfaltic, funcție de gradul de severitate la fisurare (fisura cu **db**=3mm, crăpătura cu **db**=7mm).
- S-a putut constata faptul că în cazul unei fisuri cu deschiderea mică (**db**=3mm) în stratul suport din beton de ciment, atunci când există transfer de tensiuni din întindere din încovoiere la solicitările ciclice asimilate traficului rutier, numărul de cicluri (n_c) este mai mare (exemplu Proba 3a, **db**= 3mm, **w**=4mm, n_c = 12700), iar atunci când degradarea apărută este o crăpătură în suportul din beton de ciment (**db**=7mm), deci nu există o conlucrare perfectă între pereții fisurii, numărul de cicluri N_c aferent propagării fisurii prin stratul asfaltic este mult mai mic (exemplu Proba 4b, **db**= 7mm, **w**= 24mm, n_c = 3600).

- De asemenea trebuie luat în considerare faptul că epruvetele asfaltice au fost lipite prin amorsare de același suport din beton de ciment prefisurat, ceea ce înseamnă că pe măsura creșterii numărului de cicluri aplicat, se consumă din aderența de conlucrare la fisura din placa din beton de ciment, deci scăzând capacitatea de transfer la fisura stratului suport, viteza de propagare a acesteia prin stratul asfaltic de protecție crește.

IV. ETAPA a 4-a “Interpretarea rezultatelor obținute prin modelarea experimentală, utilizând modelarea matematică”

În urma testelor de laborator obținute prin modelare experimentală destinată cercetării prin simulare fenomenologică a fisurării reflective din suportul din beton de ciment prefisurat în stratul asfaltic de acoperire cu rol de covor asfaltic de protecție în cazul îmbrăcăminților din beton de ciment degradate printr-un proces de fisurare în perioada de exploatare, se trece la etapa de modelare matematică a acestor rezultate, pentru evaluarea unor legi de evoluție a fisurării reflective.

V. ETAPA a 5-a “Interpretarea parametrică a procesului de fisurare reflectivă”

În continuare se vor prezenta câteva observații asupra experimentelor efectuate pe un număr de 10 epruvete (4b, 5a, 5b, 6a, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b), din punct de vedere al variației consecutive a parametrilor fisurării reflective, obținute cu FISUROMETRUL TERMOSTAT.

Aceste plăci din asfalt, care păstrează grosimea unui covor asfaltic, s-au lipit pe suportul din beton prefisurat printr-un amorsaj de bitum și apoi încercate pe rând. În acest scenariu, încercarea succesivă, conduce la modificarea transferului la fisura predeterminată a suportului din beton de ciment.

Observațiile experimentale sunt legate de condițiile diferite de amorsare ale plăcii asfaltice pe suportul din beton de ciment prefisurat, de deschiderea inițială a fisurii existente în suportul din beton de ciment și bineînțeles de condițiile structurale obținute la confecționarea plăcilor asfaltice.

Pentru a dispune de o perioadă suficientă la capabilitatea dispozitivului de înregistrare progresivă a fisurării reflective prin stratul asfaltic al epruvetei, temperatura de încercare este fixată la 15°C, corespunzător unei rigidități controlate a stratului asfaltic.

În tabelul centralizator care urmează, se prezintă o astfel de analiză a parametrilor fisurării reflective.

Tabel 9.1 Parametrii fisurării db_i , e_i , e_f și numărul de cicluri la rupere și fisurare

Proba	db_i	e_i	e_f	n_{cR}	n_{cf}	$n_{cR} - n_{cf}$
6a	1.1480	2.9161		10520	9974	546
7a	1.2487	2.5909	0	7790	7496	294
8a	1.3547	3.7808	-30.312	11338	11100	238
8b	1.4843	3.7651	-5.2985	12081	11550	531
9a	1.5641	3.9895	-5.3206	12536	11972	564
5b	1.7432	2.5419	18.0604	12429	12116	313
7b	1.7652	3.7385	5.2845	4283	4183	100
9b	1.8062	3.1721	0	14552	11612	2940
5a	2.1008	1.6753	27.4216	12556	12200	356
4b	3.0088	2.1528	17.4627	1259	1000	259

- Doi dintre parametrii măsurați în cadrul experimentului, care influențează indirect propagarea fisurii prin stratul asfaltic de protecție, sunt: deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment (db_i , conlucrare prin frecare între agregate și/sau între piatra de ciment, între peretii fisurii), și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton (e_i , amorsajul de bitum, la interfața dintre beton și mixtură).
- Se identifică printr-un indice de fisurare (Tabel 9.2), determinat prin raportarea numărului de cicluri determinat la finalizarea fisurării reflective față de numărul de cicluri determinat la inițierea fisurii la fibra inferioară a stratului asfaltic, durata de viață, respectiv o durată de funcționare a covorului asfaltic la procesul de propagare a fisurii din stratul inferior degradat în perioada de exploatare:

Tabel 9.2 Durata de viață la fisurare/rupere a epruvetelor.

Epruveta	Indicele de fisurare I_f	Raportul $(n_{cR}-n_{ci})/n_{cR}$
6a	94.81%	5.19%
7a	96.23%	3.77%
8a	97.90%	2.10%
8b	95.60%	4.40%
9a	95.50%	4.50%
5b	97.48%	2.52%
7b	97.67%	2.33%
9b	79.80%	20.20%
5a	97.16%	2.84%

În Tabel 9.2, se poate observa, că în cazul în care raportul între numărul de cicluri la fisurarea inițială și numărul de cicluri de la fisurarea finală, are o valoare mai mare, deci fisura se propagă într-un timp mai mare, indicele de fisurare este mai mic, respectiv durata normată de funcționare raportată la perioada de propagare a fisurii este mai mare (exemplu, la proba 9b, la un indice de fisurare de 79.8%, durata normată de funcționare poate crește cu 20,2%);

c. Rezultatele modelării experimentale pe FISUROMETRUL TERMOSTAT pot fi exprimate utilizând un model matematic, mai precis funcții de regresie ce descriu variațiile parametrilor fisurării, în funcție de ce se dorește:

- Lungimea fisurii în funcție de numărul de cicluri –putem determina după cât timp fisura se propagă pe jumătate din grosimea stratului de protecție. Aceasta constatare este extrem de importantă prin raportarea cu alte modele experimentale utilizate în evaluarea fenomenului de oboseală din straturile asfaltice, care stabilesc că rezistența stratului este consumată în cazul în care s-a consumat jumătate din deformația acumulată la ciclurile de solicitare;
- Calculând viteza de variație a deschiderii fisurii existente în stratul suport din beton de ciment, se pune în evidență fenomenul creat de efectul de transfer la fisura prin frecarea inițială a pereților acestui strat suport, atenuat de amortizarea procesului de transfer prin prezența stratului asfaltic la fibra superioară a stratului din beton de ciment, care lucrează împreună cu acesta prin aplicarea operației tehnologice de amorsaj. Astfel, inițial, când lucrează transferul din fisura stratului din beton de ciment împreună cu amortizarea stratului asfaltic prezent la suprafața acestuia, capacitatea de preluare a deformației verticale (deflexiunea sub sarcina) este mai mare și deci viteza de deschidere a fisurii existente din betonul de ciment este mai mică;
- În etapa intermediară, când transferul la fisura stratului suport din beton de ciment se consumă și se mobilizează capacitatea de preluare a transiterii fisurii prin stratul asfaltic, se schimbă curbura diagramei, în așa fel încât în faza finală de propagare reflectivă viteza de deschidere a fisurii din stratul din beton sa crească la o deflexiune mai redusă.

VI. ETAPA a 6-a „Interpretare multicriterială a procesului de fisurare reflectivă”

Interpretarea multicriterială a procesului de fisurare reflectivă la structuri rutiere rigide reabilite prin așternerea unui covor asfaltic de protecție, presupune o analiză combinată între factorii de influență a procesului de transmitere și propagare a fisurii din îmbrăcămintea din beton de ciment fisurat, în stratul asfaltic de protecție.

Acești factori de influență sunt descriși sub formă de indici parametrici:

- indicele parametrului cicluri de solicitări I_{nc} ,
 - indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment I_{db} ,
 - indicele de deschidere a fisurii reflectivă în stratul asfaltic I_d ,
 - indicele de propagare a fisurii prin stratul asfaltic I_f .
- a. Creșterea transferului la fisură din stratul din beton de 2 ori la proba 7a față de 4b, conduce la o dezvoltare prin propagarea fisurii la epruveta 7a în cadranul I_{nc}/I_f pe direcția primei bisectoare,

ceea ce înseamnă că acest fenomen reprezintă capacitatea portantă la fisurare prin oboseală a stratului asfaltic.

- b. În cazul probei 4b, datorită transferului redus în stratul din beton de ciment prefisurat, solicitarea principală care stă la baza evoluției fisurii reflectivă din stratul asfaltic, este cea din întindere din încovoiere, iar curba de evoluție în cadranul I_{nc}/I_f , se găsește sub prima bisectoare.
- c. Aproximativ 95% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 5% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt

VII. ETAPA a 7-a Măsurători în teren pentru calibrarea încercărilor de laborator

S-au extras epruvete din carosabil cu ocazia desfășurării unei expertize tehnice de calitate, epruvete care au fost prelucrate ulterior pentru obținerea dimensiunilor prevăzute pentru încercare prin modelare experimentală în laborator cu FISUROMETRUL TERMOSTAT.

Se poate trage concluzia, că în cazul deschiderii mari din suportul din beton de ciment, deci în cazul lipsei transferului la fisură când se mobilizează numai rezistența la întindere din încovoiere din stratul asfaltic, care are și o cotă consumată din rezistența la oboseală structurală în perioada de exploatare deja derulată până la momentul prelevării epruvetei din cale, rezerva de capacitate de preluare a fisurării reflectivă este de 53%. În cazul în care există transferul la fisura betonului de ciment suport se poate constata că rezerva de fisurare reflectivă este de 82%. Aceste concluzii sunt valabile în cazul probelor prelevate de pe Centura Bucureștiului.

Pe epruvetele extrase de pe tronsonul de autostradă aflat în construcție la momentul preluării epruvetelor din îmbrăcămintea asfaltică, și unde s-a observat apariția unui proces de fisurare cu grad de severitate redus în suportul din beton de ciment, la confecționarea modelului de fisurare reflectivă pentru a fi testat pe FISUROMETRUL TERMOSTAT, s-a luat în considerație $db=0mm$, deci s-a urmărit o închidere perfectă a fisurii din suportul din beton de ciment.

S-a putut constata că numărul de cicluri obținute pe modelul experimental care folosește epruveta prelucrată din teren aferentă unui strat asfaltic imediat după așternerea în cale și deci încă necirculat, corespunde valorilor obținute pe epruveta la care stratul asfaltic a fost confecționată în laborator. Acest fapt, demonstrează că cercetarea performanțelor inițiale ale comportării la fisurare reflectivă a unei mixturi asfaltice propuse la execuția pe teren, se poate analiza încă din faza de proiectare a rețelei mixturii asfaltice în laborator, atunci când se analizează rețeta optimă pentru așternerea în îmbrăcămintea părții carosabile.

Subliniez la acest moment că testarea în laborator pe echipamentul FISUROMETRUL TERMOSTAT, se face în regim accelerat, utilizând caracteristicile conceptuale ale acestuia, pe când fisurarea reflectivă din realitate, determinată pe epruveta din cale, se produce în timpul exploatării sub efectele traficului efectiv derulat în perioada analizată.

Aceasta situație presupune o cercetare aprofundată, care să aibă drept finalitate obținerea unor coeficienți de echivalare a traficului asimilat solicitărilor obținute prin testarea în regim accelerat cu FISUROMETRUL TERMOSTAT (numărul de cicluri la care apare fisurarea reflectivă $n_{c,f}$) cu traficul real (N_{cef}), obținut prin prelucrarea datelor aferente sectorului experimental, din care se extrage epruveta pentru testare pe modelul din laborator.

În acest scenariu de cercetare al fisurării reflectivă, coeficientul de performanță legat de traficul suportabil este $C_{pnc,f}=n_{c,f}/N_{cef}$, un coeficient calitativ și cu caracter informativ. Acesta, împreună cu ceilalți parametri ai fisurării reflectivă obținuți în laborator, pot facilita o interpretare a caracteristicilor stratului asfaltic testat privind comportarea la propagarea fisurii din stratul suport, care era fisurat la momentul aplicării intervenției lucrării de întreținere cu covorul asfaltic de protecție.

În cel de-al doilea scenariu prezentat în cazul etapei de construcție exemplificat prin extragerea epruvetei de pe tronsonul de autostradă, coeficientul de performanță la fisurarea reflectivă, aferent traficului de perspectivă, se determină prin raportarea numărului de cicluri (n_{c1}), testat pe epruveta de strat asfaltic proiectat și confecționat în laborator, față de numărul de cicluri (n_{c2}), obținut tot prin încercarea pe Fisurometrul Termostatat, dar cu strat asfaltic modelat experimental din epruveta extrasă din cale.

Rezultă $C_{pnc,f}=n_{c1}/n_{c2}$, care este un coeficient calitativ și cu caracter informativ. Acesta, împreună cu ceilalți parametri ai fisurării reflectivă obținuți în laborator, pot facilita o interpretare a caracteristicilor stratului asfaltic testat privind comportarea la propagarea fisurii din stratul suport, imediat după finalizare execuției în teren a unei structuri rutiere compozite, de tipul strat din beton de ciment prevăzut cu strat de uzură asfaltic.

9.2 Contribuții personale

Principala contribuție a acestei teze de doctorat o reprezintă crearea unei metodologii de lucru cu aparatul prototip, și anume Fisurimetrul Termostatat.

Acest aparat a fost gândit și creat în cadrul unui proiect CEEEX cu titlul " *Metoda de testare complexă a structurilor rutiere compozite și a materialelor componente în vederea evaluării și certificării conform normelor europene*", sub îndrumarea domnului profesor doctor inginer Mihai DICU. Din echipa care a participat la acest proiect, eu m-am ocupat de partea experimentală.

În cadrul tezei am detaliat modul în care se face încercarea, plecând de la pregătirea epruvetelor de beton de ciment fisurat peste care s-a lipit stratul de protecție (fie cu mixtură preparată în laborator, fie plăci luate din teren). Trebuie acordată o atenție deosebită modului în care se face lipirea: cantitatea de bitum, modul de turnare a acestuia, dar și deschiderii inițiale ale fisurii betonul de ciment (să fie cât mai aproape de 0) pentru a putea observa și transferul la fisură, mai precis aportul frecării celor două părți ale betonului fisurat.

Pasul următor este încercarea propriu-zisă. Aceasta se face la solicitări echivalente traficului rutier, în regim accelerat. Am stabilit treptele de încărcare în timpul experimentelor efectuate pentru teza de față, plecând de la concluziile trase în urma încercărilor făcute anterior începerii programului de cercetare. Ideea de bază este în a scurta timpul necesar încercării, atât datorită construcției aparatului, dar și în urmărirea propagării fisurii, transmise din beton, prin stratul de protecție. Consider că treptele de forță și amplitudinea alese în acest moment sunt optime pentru încercările pe Fisurimetrul Termostatat.

Pentru a putea descrie cât mai bine fisurarea reflectivă, am introdus o serie de parametri, măsurați cu ajutorul sistemului video și înregistrați de cel de achiziție date, cum ar fi deschiderea fisurii în beton **db**, deformată epruvetei **w**, lungimea **f** și deschiderea **d** a fisurii stratului de protecție, dar și desprinderea betonului de mixtură **e**, dar și numărul de cicluri până la care apare cederea epruvetei **n_c**.

Am constatat că folosirea softului existent al sistemului de achiziție video automată poate duce la erori considerabile de măsurare, având în vedere calitatea și zoom-ul imaginii pe care se determină MANUAL parametrii și a faptului că valorile acestora sunt de ordinul milimetrelor cu patru zecimale. În același timp, măsurarea se face în timp real, existând posibilitatea propagării rapide a fisurii, datele înregistrate până în acel moment să fie insuficiente unei prelucrări statistice de calitate. Pentru aceasta după inițierea fisurii, am micșorat timpul de salvare a imaginilor din timpul încercării, în funcție de viteza de propagare a acesteia, chiar până la 5 secunde diferență, urmând ca ulterior să se facă corespondența între măsurătorile efectuate cu softul aparatului și prelucrarea imagistică după terminarea încercării, măbind astfel setul de date avute la dispoziție.

O a treia etapă o constituie prelucrarea datelor experimentale printr-o modelare matematică, utilizând funcții de regresie neliniară. Se poate observa că am putut găsi anumite funcții care descriu relațiile între parametrii urmăriți.

Un ultim pas îl constituie interpretarea datelor oferite de echipament. Pentru aceasta am introdus în cadrul tezei coeficienții de performanță (notați cu **Cp**), necesari atât pentru compararea a două dau mai multe rețete de mixtură preparată în laborator, fie între plăcile extrase din cale și cele preparate în laborator, dar și între epruvete din cale, în felul acesta putându-se aprecia modul în care afectează distribuția traficului pe sectoare diferite de drum.

Un alt element care ne ajută la interpretare îl constituie determinarea indicilor parametrici cum ar fi:

- indicele parametrului cicluri de solicitări **I_{nc}**,
- indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment **I_{db}**,
- indicele de deschidere a fisurii reflectivă în stratul asfaltic **I_d**,
- indicele de propagare a fisurii prin stratul asfaltic **I_f**

Prelucrarea acestora ne oferă o imagine tridimensională a fisurării reflectivă, legând astfel parametrii amintiți mai sus (**db**, **f**, **d**, **w**, **n_c**). După calibrarea modelului matematic se poate afla oricare parametru dacă se cunosc alți doi.

Subsidiar acestui element de noutate, ca și contribuție, îl constituie sinteza bibliografică din literatura de specialitate, preocupările în cadrul fisurării reflectivă fiind de actualitate și în continuă schimbare. Folosirea elementului finit devine astfel obligatorie în a simula efectele solicitărilor din trafic asupra structurii

rutiere, în același timp calibrând rezultatele modelării matematice a rezultatelor experimentale, dar și a situației reale din teren.

9.3 Direcții viitoare de cercetare

Din conținutul tezei de doctorat și din parcurgerea Programului Experimental, care au condus la redactarea CONCLUZIILOR FINALE și ale CONTRIBUȚIILOR PERSONALE, rezultă necesitatea continuării cercetării, pentru rezolvarea următoarelor teme de viitor:

1. Aplicarea procedurii de cercetare a fenomenului de fisurare reflectivă din straturi prefisurate, asimilate îmbrăcăminților rutiere degradate, în straturi asfaltice de protecție, prin extinderea paletii de materiale rutiere utilizate ca straturi de uzură. În acest fel se vor obține coeficienți de performanță la fisurarea reflectivă pe diverse materiale utilizate la execuția îmbrăcăminților rutiere.
2. Realizarea echivalării traficului rutier de pe sectoare experimentale predeterminate, cu numărul de cicluri aferent solicitării în regim dinamic pe FISUROMETRUL TERMOSTAT. În acest fel se face o corelare și între sistemul de rezemare a straturilor rutiere din realitate cu cel oferit de echipamentul FISUROMETRUL TERMOSTAT, care se bazează pe schema de solicitare a grinzilor la întindere din încovoiere.
3. Upgradarea echipamentului prototip FISUROMETRUL TERMOSTAT cu un dispozitiv capabil să inducă solicitări orizontale, pentru a putea pune în evidență cumulumul de solicitări echivalente din trafic și cu cele din temperatură, specifice straturilor rutiere aglomerate cu lianți hidraulici, folosiți atât la structuri rutiere semirigide, cât și la cele rigide.

Bibliografie

- [1] X. CEEEX, „Metodă de testare complexă a structurilor rutiere compozite și a materialelor componente în vederea evaluării și certificării conform normelor europene,” CFDP, UTCB, București, 2006.
- [2] M. G. Lobază, „Cercetarea prin modelare structurală în laborator a efectelor traficului asupra sistemelor rutiere reabilite,” Raport de Cercetare nr. 1, București, 2012.
- [3] M. G. Lobază, „Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator, la solicitări echivalente traficului rutier,” Raport de Cercetare nr. 2, București, 2013.
- [4] M. G. Lobază, „Identificarea parametrilor de influență a propagării fisurării prin straturi asfaltice de protecție la îmbrăcăminți rutiere degradate,” Raport de Cercetare nr. 3, București, 2015.
- [5] M. Huhtala, „The Effect of Wheel Loads on Pavements,” în *4th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*, Ann Arbor, 1995.
- [6] Minnesota. Department of Transportation. Office of Materials and Road Research, University of Minnesota. Department of Civil Engineering, „Load Testing of Instrumented Pavement Sections: Literature Review,” Minnesota Department of Transportation, Office of Materials and Road Research, 1999.
- [7] A. Ioannides și L. Khazanovich, „Load Equivalency Concepts: A Mechanistic Reappraisal,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no 1388, 1993.
- [8] M. Dicu, Preocupări în domeniul analizei procesului de fisurare la îmbrăcăminți rutiere, București: Conspress, 2012.
- [9] M. Dicu, Îmbrăcăminți rutiere. Investigații și interpretări, București: Conspress, 2000.
- [10] M. G. Lobază, „Agresivitatea traficului rutier asupra structurilor rutiere,” Diciplina electivă nr. 1, București, 2012.
- [11] M. G. Lobază, „Analiza propagării fisurii prin modelarea straturilor rutiere în laborator,” Lucrare de disertație, București, 2010.
- [12] S. Jercan, „Mecanismul conlucrării și prevenirea fisurării îmbrăcăminților asfaltice pe fundație din beton de ciment,” în *A IX-a Conferință Națională de Drumuri și Poduri, Volumul 1 Drumuri*, Neptun, 1994.

- [13] Administrația Națională a Drumurilor, „Normativ pentru dimensionarea sistemelor rutiere suple și semirigide (metoda analitică) (revizuire PD 177-1976), indicativ PD 177-2001,” *Buletin Tehnic Rutier*, pp. 38-83, Ianuarie 2001.
- [14] J. C. Pais și P. A. Pereira, „Prediction of existing reflective cracking potential of flexible pavements,” în *Fourth International RILEM Conference and Exhibition on Reflective Cracking in Pavements*, Ottawa, 2000.
- [15] F. Erdogan, „Crack Propagation Theories,” în *Fracture, An Advanced Treatise, Vol. II: Mathematical Fundamentals*, New York, Academic Press, 1968, pp. 497-590.
- [16] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Third Edition, CRC Press, 2005.
- [17] A. Wells, „Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture,” în *Proceedings of the crack propagation symposium*, Cranfield, UK, 1961.
- [18] D. Ramsamooj și K. Majidzadeh, „Mechanistic Approach to the solution of cracking in pavements,” National Research Council, Highway Research Board, California, 1973.
- [19] J. Rice, „A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [20] J. Begley și J. Landes, „The J-integral as a fracture criterion,” în *Fracture Toughness, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1972.
- [21] M. G. Lobază, „Mecanica fisurării traficului rutier asupra structurilor rutiere,” Disciplina electivă nr. 2, București, 2012.
- [22] M. Dicu, „Fisurarea sistemelor rutiere mixte,” Teza de doctorat, București, 1996.
- [23] J. C. Pais și P. A. Pereira, „Prediction of existing reflective cracking potential of flexible pavements,” în *Fourth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements - Research in Practice*, Ottawa, Ontario, Canada, RILEM Publications SARL, 2000, pp. 1555-164.
- [24] F. Zhou și L. Sun, „Lab asphalt testing evaluation of reflective cracking,” în *Accelerated Pavement Testing International Conference*, Reno, Nevada, 1999.
- [25] D. Perraton, G. Guissi, P. Pierre și G. Dore, „A new laboratory test for reflective cracking in mode I and/or mode II,” în *Proceedings of the 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Chicago, USA, 2008.
- [26] M. G. Lobază, M. Dicu, C. Răcănel și A. Burlacu, „Analiza structurilor rutiere reabilite prin încercări accelerate în laborator,” în *Cercetare, Administrare Rutieră, Ediția a IV-a*, București, 2011.
- [27] M. G. Lobază și M. Dicu, „Anticiparea procesului de fisurare a îmbrăcăminților asfaltice prin modelare experimentală în laborator,” în *Road Research and Administration, VI-th Edition*, București, 2013.
- [28] M. Dicu și M. G. Lobază, „The cracking device with temperature control for the laboratory identification of the road material performance,” în *Proceedings of the 7th International RILEM Symposium ATCBM09 on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Rhodes, Greece, 2009.
- [29] M. Dicu, C. Răcănel, Ș. M. Lazăr, A. Burlacu, M. G. Lobază, C. Murgu și C. Iacob, „Determinarea performanțelor rutiere în raport cu fenomenul de fisurare din oboseală,” în *Cercetare, Investigare, Administrare Rutieră*, București, 2008.
- [30] AND605-2016, „Normativ privind mixturile asfaltice executate la cald. Condiții tehnice de proiectare, preparare și punere în operă a mixturilor asfaltice,” Monitorul oficial al României, 2018.
- [31] SREN12697-33:2004, „Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 33: Confecționarea epruvetelor cu compactorul cu placă,” 2004.
- [32] AND602-2012, „Metode de investigare a traficului rutier,” 2012.
- [33] AND584/2012, „Normativ pentru determinarea traficului de calcul pentru proiectarea drumurilor din punct de vedere al capacității portante și al capacității de circulație,” 2012.
- [34] PD177-2001, „Normativ pentru dimensionarea sistemelor suple și semirigide (metoda analitică),” 2001.
- [35] NP081-2002, „Normativ de dimensionare a structurilor rutiere rigide,” 2002.

- [36] M. M. Elseifi și I. L. Al-Qadi , „A Simplified Overlay Design Model against Reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction,” *Road Materials and Pavement Design* , pp. 169-191, 2004.
- [37] C. Romanescu și C. Răcănel, Reologia lianților bituminoși și a mixturilor asfaltice, București: Matrix Rom, 2003.
- [38] A. A. Griffith, „The phenomena of rupture and flow in solids,” vol. 221, nr. 582-593, pp. 163-198, 1921.
- [39] G. Irwin și J. Kies, „Fracturing and Fracture Dynamics,” *Welding Journal Research Supplement*, 1952.
- [40] G. Irwin și J. Kies, „Critical Energy rate analisis of fracture strength of large welded structures,” *The Welding Journal Research Supplement*, 1954.
- [41] M. G. Lobază și M. Dicu, „Modelarea experimentală a comportării covoarelor asfaltice la fisurarea reflectivă din îmbrăcăminți rutiere degradate -Studii parametrice,” în *Road Research and Administration, VII-th Edition*, București, 2015.
- [42] P. F. Jimenez, R. Miro, A. Martinez, R. Botella și G. Valdes, „New procedures and criteria for asphalt mixes and pavements design regarding fatigue failure and thermal stresses,” în *24th World Road Congress Proceedings: Roads for a Better Life: Mobility, Sustainability and Development*, Mexico City, 2011.
- [43] V. Goanță, Mecanica Ruperii, Iași: Editura Tehnopress, 2006.
- [44] D. Winne și B. Windt, „Application of the Griffith-Irwin theory of crack propagation,” *Transactions of ASME*, vol. 80, pp. 1643-1655, 1958.
- [45] B. Gross și J. E. Srawley, „Stress-Intensity Factors for three-point bend specimens by boundary collocation,” NASA TN D-3092, Washington D.C., 1965.
- [46] O. Lupu, „Aplicații GIS la managementul lucrărilor de drumuri,” Lucrare de disertație CFDP, UTCB, București, 2012.
- [47] AND540-2003, „Normativ pentru evaluarea stării de degradare a îmbrăcăminții bituminoase pentru drumuri cu structuri rutiere suple și semirigide,” 2004.