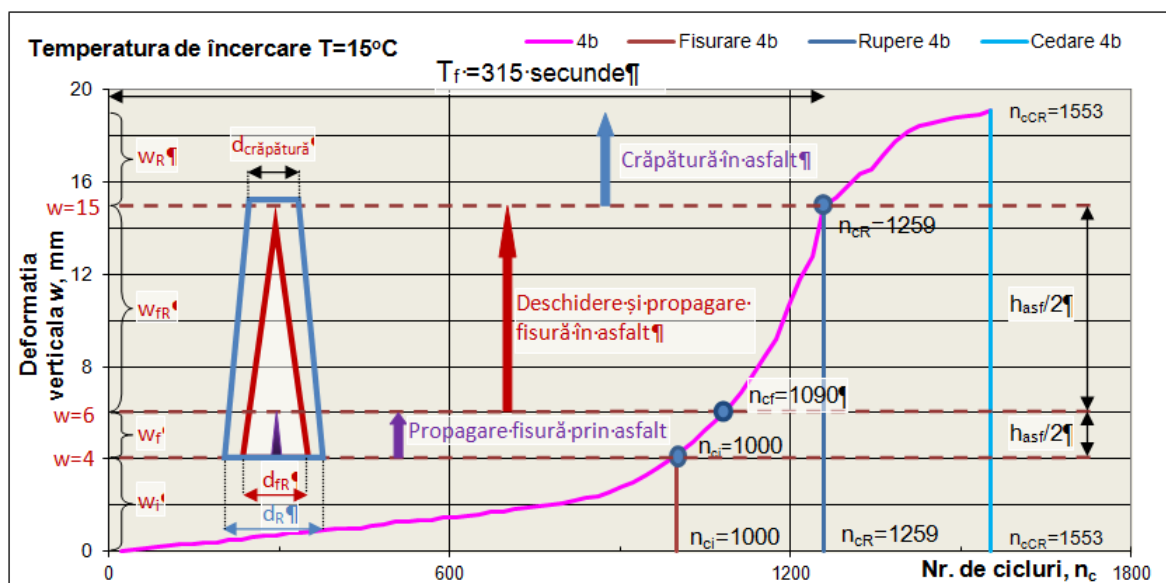


Raport de cercetare nr. 3:

IDENTIFICAREA PARAMETRILOR DE INFLUENȚĂ A PROPAGĂRII FISURĂRII PRIN STRATURI ASFALTICE DE PROTECȚIE LA ÎMBRĂCĂMINȚI RUTIERE DEGRADATE



Conducător Științific: Prof. Dr. Ing. Mihai Dicu

Doctorand: Asist. Ing. Mihai Gabriel LOBAZĂ

Cuprins

1	INTRODUCERE.....	4
1.1	Raportul de cercetare 1. Cercetarea prin modelare structurală în laborator a efectelor traficului asupra sistemelor rutiere reabilite	5
1.2	Raportul de cercetare numărul 2. Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator la solicitări echivalente traficului rutier.	9
1.3	Raportul de cercetare numărul 3. Identificarea parametrilor de influență a propagării fisurării prin straturi asfaltice de protecție la îmbrăcămînți rutiere degradate	11
2	MECANICA FISURĂRII.....	12
2.1	Criteriul energetic.....	12
2.2	Factorul de intensitate al efortului K	13
2.3	Propagarea fisurii în timp (oboseala materialelor)	13
2.4	Fisurarea materialelor cu comportare liniar elastică	14
2.5	Fisurarea materialelor cu comportare elasto-plastică.....	18
2.5.1	CTOD	18
2.5.2	Integrala pe contur J	21
3	CONCEPȚIA FISURĂRII REFLECTIVE PUBLICATĂ ÎN LITERATURA DE SPECIALITATE	23
3.1	Prediction of existing reflective cracking potential of flexible pavements”, Jorge C. Pais și Paulo A.A. Pereira [13]	24
3.2	„Lab asphalt testing evaluation of reflective cracking”, Fujie Zhou, Lijun Sun[14]	25
3.3	“New procedures and criteria for asphalt mixes and pavements design regarding fatigue failure and thermal stresses”, F. Perez Jimenez, R. Miro, A. Martinez, R. Botella, G. Valdes[15].	26
3.4	“Investigation of cracking in bituminous mixtures with a 4PBT”, M.L. Nguyen, C. Sauzeat, H. Di Benedetto, L. Wendling[16].....	30
3.5	Concluziile extrase din literatura de specialitate	32
4	CONTRIBUȚII ȘI INTERPRETĂRI ALE PARAMETRILOR FISURĂRII REFLECTIVE PRIN OBSERVAȚII ȘI PRELUCRĂRI ALE REZULTATELOR EXPERIMENTALE.....	33
4.1	Epruveta 4b	34
4.2	Epruvetele 5a și 5b	42
4.3	Epruveta 6a.....	49
4.4	Epruvetele 7a și 7b	55

4.5	Epruvetele 8a și 8b	62
4.6	Epruvetele 9a și 9b	70
5	PARAMETRII FISURĂRII	76
6	INTERPRETARE MULTICRITERIALĂ A PROCESULUI DE FISURARE REFLECTIVĂ.....	78
7	CONCLUZII.....	83
7.1	Parametrii fisurării reflective.....	83
7.2	Mixtura asfaltică.....	84
7.3	Fisurometrul Termostatat	84
8	BIBLIOGRAFIE.....	85

1 INTRODUCERE

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

Fisurarea este considerată a 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.

Prin tema abordată, teza de doctorat intitulată ***Contribuții privind Analiza prin Modelarea Structurilor Rutiere Reabilitate 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, asupra comportării straturilor de uzură asfaltice, utilizate pentru protecția îmbrăcăminților vechi fisurate. Acestea sunt asimilate în procesul cercetării de laborator ca și structuri rutiere mixte prefisurate, în diverse ipoteze de solicitare, în condițiile utilizării lui la execuție ca strat de protecție din asfalt așternut peste o îmbrăcămintă rutieră din beton de ciment, fisurat în perioada de exploatare normată.

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 în laborator, de simulare a traficului rutier care solicită modelul experimental de structură rutieră la scară redusă, se urmărește obținerea performanței soluțiilor de rețetă optimă proiectată în laborator prin încercări tradiționale.

Rezultatele proiectului se pot concretiza prin obținerea un nou mod de anticipare a propagării fisurii prin reflexie la straturi asfaltice care vor fi utilizate ca îmbrăcăminți rutiere de protecție, altul decât încercările clasice, mai rapid și mai ieftin, de a anticipa durata normată de funcționare a stratului asfaltic de protecție, așezat peste o îmbrăcămintă rutieră veche, de a anticipa apariția și propagarea fisurii la suprafață.

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

1.1 Raportul de cercetare 1. Cercetarea prin modelare structurală în laborator a efectelor traficului asupra sistemelor rutiere reabilite

Astfel, în primul raport de cercetare, **Cercetarea prin modelare structurală în laborator a efectelor traficului asupra sistemelor rutiere reabilite**, s-a pus în evidență modul în care stratul de îmbrăcăminte asfaltică îmbunătățește transferul încărcărilor din trafic din fundație, micșorând nivelul solicitării din stratul din beton.[1]

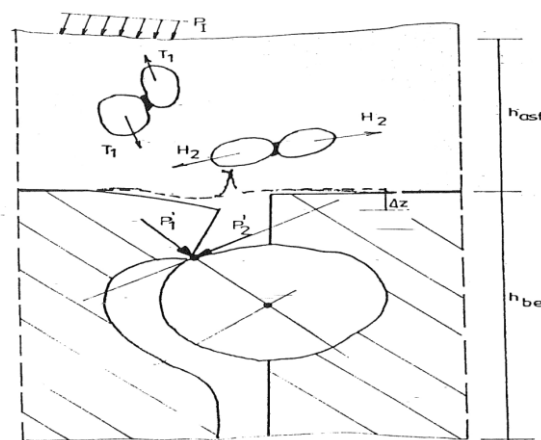


Figura 1.1 Transferul sarcinii la fisură în prezența stratului asfaltic de protecție.[2]

Efectele traficului asupra structurii rutiere (mixte, în cazul tezei de doctorat) s-au analizat în studiile AASHTO, introducându-se noțiunea de factor de echivalare a traficului (load equivalency factor, **LEF**), însă aplicabilitatea ecuațiilor AASHTO este limitată în zilele noastre datorită schimbărilor în configurația și încărcările vehiculelor.[3]

$$LEF = \frac{\text{Nr. de încărcări ale osiei standard ce produce o anumită pierdere a niv. de serviciu}}{\text{Nr. de încărcări ale unei osii X ce produce o anumită pierdere a niv. de serviciu}} \quad (1)$$

O abordare asemănătoare este exprimarea acestor efecte prin o noțiune denumită agresivitate, **A**. Aceasta permite compararea deteriorării șoselei la trecerea unui vehicul greu, față de deteriorarea pe care o suferă șoseaua la trecerea unui vehicul greu de referință.[4]

$$A = \sum (n_i \cdot y_i) \quad (2)$$

Unde: A- agresivitatea

n_i - numărul de osii i (simple, tandem, tridem) recensate

y_i - agresivitatea diferitelor tipuri de osii, i .

Aceste modalități de evaluare a efectelor traficului presupun cunoașterea modului în care un tip de vehicul-osie influențează structura rutieră, ținând cont, printre altele, de tipul structurii,

de mediul înconjurător. Ecuațiile *LEF*, respectiv *A*, trebuie aplicate în zonele unde sunt aceleași condiții în care au fost determinate. Extrapolarea acestora implică un anumit grad de neîncredere.

De aceea studierea la nivel teoretic și experimental a modului de dezvoltare, apariție a fisurii până la cederea întregii structuri, este extrem de necesară cercetătorilor din domeniul infrastructurii de transport rutier, dar și specialiștilor care avizează soluții de protecție prin covoare asfaltice la îmbrăcăminți rutiere fisurate în exploatarea unui drum.

Printre cei care s-au ocupat la început cu explicitarea mecanică a fisurării la cicluri de solicitări (temperatură și trafic) s-au numărat Griffith, Irwin, Kies. Irwin a introdus factorul de intensitate a solicitării, notat cu *K*[5]

$$K^2 = \frac{G \cdot E}{1 - \mu^2} \quad (3)[5]$$

unde: *K* = factor de intensitate a solicitării după Irwin

G = variația energiei după Griffith

E = modulul materialului din stratul rutier

μ = coeficient Poisson pentru același material.

Irwin a observat că se pot distinge trei etape ale stării de tensiune în deschiderea fisurii ca măsură a propagării acestui fenomen.

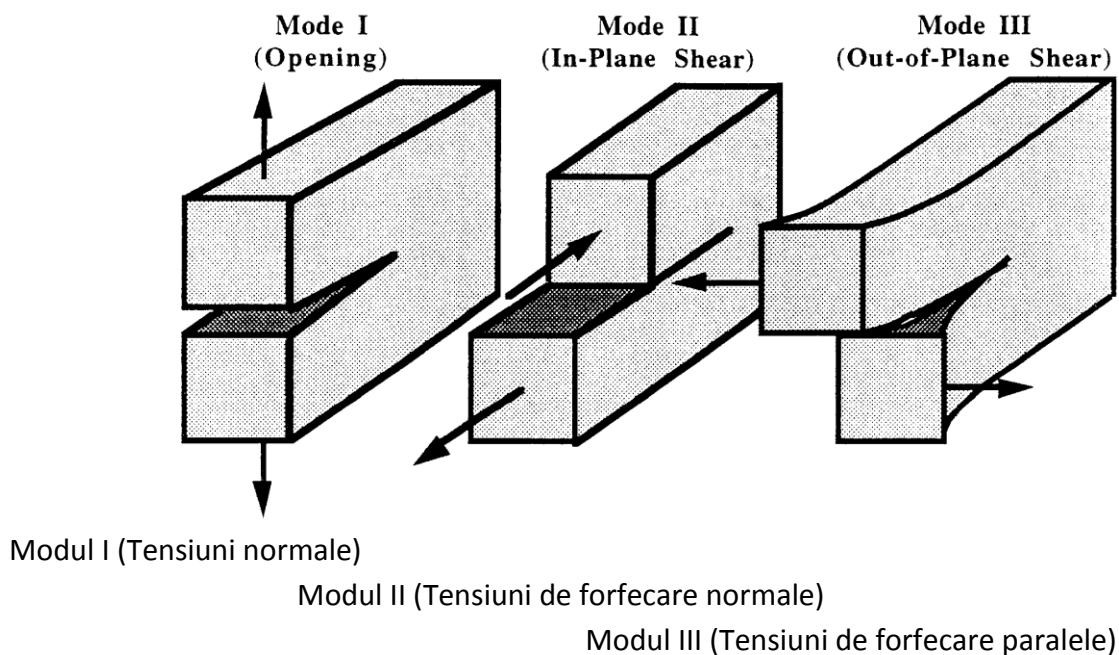


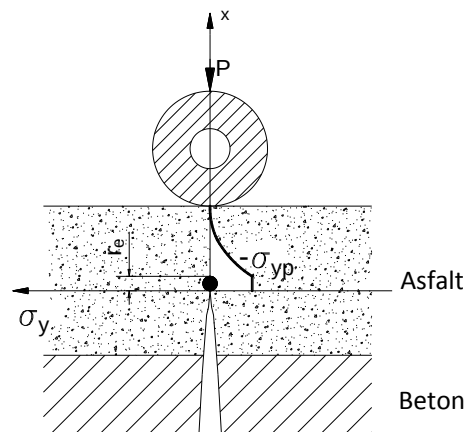
Figura 1.2 Moduri de dezvoltare a stării de tensiune [6]

Factorul de intensitate *K*, se poate determina în toate cele trei moduri de aplicare a solicitării (*K_I*, *K_{II}*, *K_{III}*).

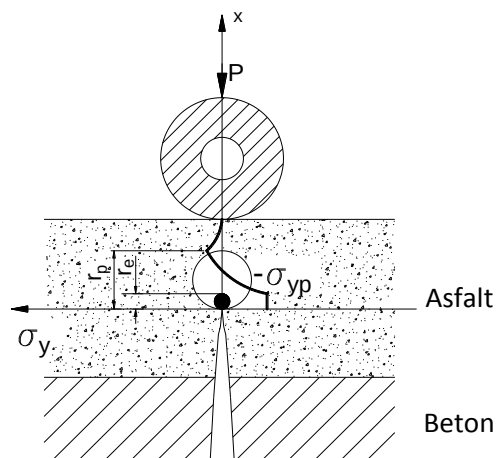
Fenomenul de oboseală, datorat încărcărilor din trafic, se poate asocia cu modul I de sollicitare, deci cu K_I . Oboseala structurală apare ca urmare a apariției microfisurării, care, prin acumularea ciclurilor de încărcare, se dezvoltă sub formă de fisuri deschise în stratul rutier. Dezvoltarea fisurii pe grosimea stratului de asfalt de protecție a betonului, se datorează depășirii limitei de plasticizare a materialului din capul fisurii.

Sunt acceptate în teoriile existente 3 etape de evoluție a fisurii:

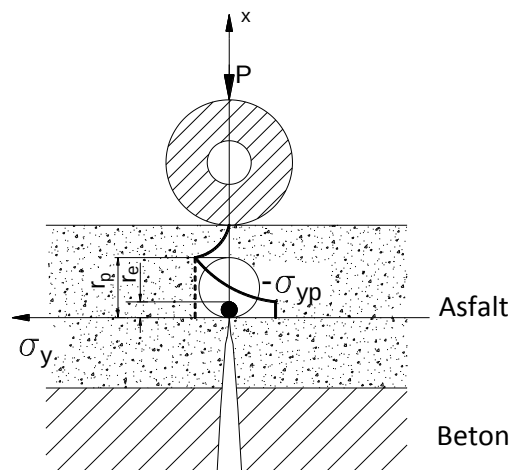
ETAPA I:
acumulare energetică în domeniul elastic (inițializare)



ETAPA II:
acumulare energetică în domeniul plastic (propagare fisură)



ETAPA III:
acumulare energetică la rupere



Irwin a calculat mărimea zonei plasticizate din capătul unei fisuri în modul I de sollicitare, r_p :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (4)[6]$$

Unde:

K_I –factorul de intensitate în modul I

σ_{YS} –limita de elasticitate (efortul pe direcția dezvoltării fisurii)

r_y –mărimea zonei plasticizate

Viteza de creștere a fisurii la oboseală a fost studiată de Paris, care a găsit o ecuație ce descrie această mărime (legea Paris –Erdogan). Legea poate fi folosită pentru a cuantifica durata de viață reziduală (încărcare ciclică) a unui specimen.

$$\frac{df}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (5)[7]$$

Unde:

$\frac{df}{dN}$ -rata de creștere a fisurii,

df –creșterea lungimii fisurii,

dN –creșterea numărului de cicluri N ,

A, m –constante ale materialului,

ΔK -amplitudinea factorului intensității solicitării.

Dacă integrăm legea lui Paris (relația 5 **Error! Reference source not found.** **Error! Reference source not found.**), prin introducerea în formulă a factorului K_I conform relației lui Irwin (relația 4), atât pentru solicitări din trafic cât și din temperatură, se obține un grafic de forma celui din Figura 1.3. 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
- în faza finală această situație se inversează.

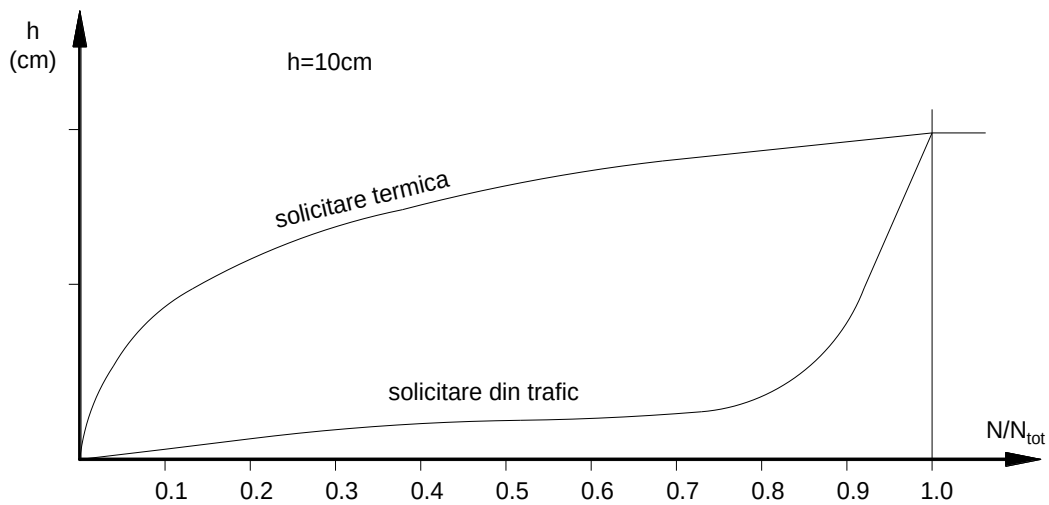


Figura 1.3 Viteza de propagare a fisurii.[4]

În Figura 1.3 apar următoarele notații:

N = număr cicluri solicitare (termice sau trafic);

N_{tot} = număr total cicluri când fisura apare la suprafața carosabilului.

h = grosimea stratului de protecție din asfalt

Aceste relații analitice se utilizează la analiza parametrilor propagării fisurii în structurile rutiere compozite (asfalt pe beton de ciment prefisurat), structuri ce fac obiectul de studiu a prezentei teze de doctorat.

Teoria din spatele fenomenului de fisurare în straturi rutiere, poate fi supusă unor ipoteze simplificatoare prin acceptarea unor observații experimentale obținute prin testarea pe diferite aparate de laborator.

1.2 Raportul de cercetare numărul 2. Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator la solicitări echivalente traficului rutier.

În al doilea raport de cercetare, **Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator la solicitări echivalente traficului rutier**, se prezintă modul de preparare a epruvetelor în laborator, rezultatele încercărilor experimentale, folosind aparatul prototip Fisurimetrul Termostatat, precum și prelucrări matematice. Concluziile acestui raport sunt cele ce urmează:

- există o perioadă inițială de “așezare” a epruvetei între reazeme de aproximativ 500-600 de cicluri (Figura 1.4).

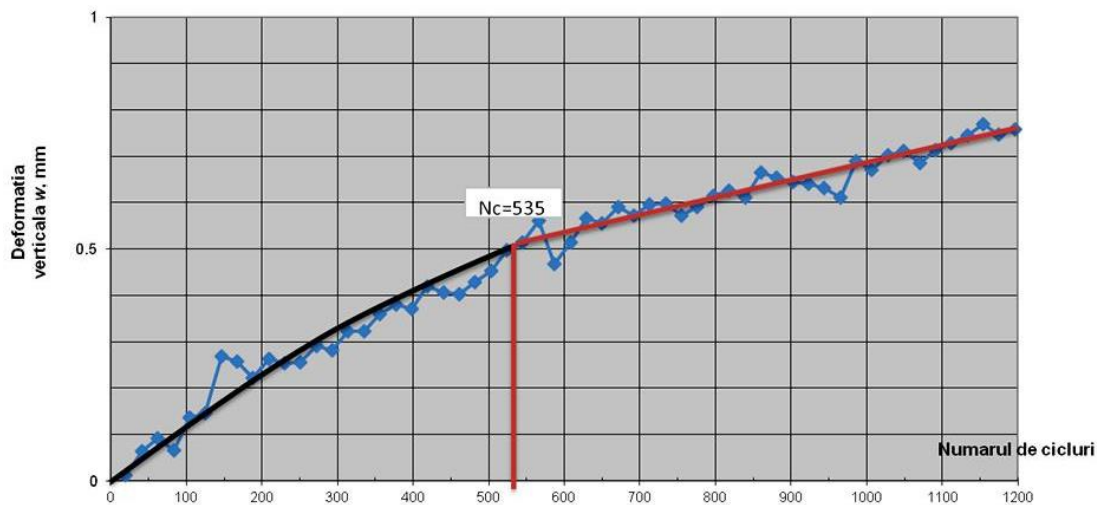


Figura 1.4 Perioadă inițială de așezare

- funcția exponențială, $y = a \cdot e^{b \cdot x}$, descrie cel mai bine evoluția deformăției verticale, w , în raport cu numărul de cicluri, N_c (Tabel 1.1).

Tabel 1.1 Funcțiile exponențiale corespunzătoare epruvetelor studiate

Epruveta	Funcția exponențială $y = a \cdot e^{b \cdot x}$	Coeficientul de determinare r^2	Numărul de cicluri la care apare fisura în mixtură, N_f
2a	$y = 0.647 \cdot e^{0.000177 \cdot x}$	0.9661	9281
3a	$y = 0.519 \cdot e^{0.00017 \cdot x}$	0.9643	11675
3b	$y = 1.113 \cdot e^{0.000507 \cdot x}$	0.9957	3002
6a	$y = 0.403 \cdot e^{0.000223 \cdot x}$	0.9389	10037
7a	$y = 0.613 \cdot e^{0.00025 \cdot x}$	0.9901	7450
7b	$y = 0.897 \cdot e^{0.000378 \cdot x}$	0.9815	4178

- stratul suport din beton de ciment influențează comportarea epruvetei la solicitări echivalente traficului rutier P (Figura 1.5), prin dimensiunile agregatelor din zona fisurată (frecarea acestora), dar și prin deschiderea inițială a fisurii betonului, db (tabelul 2, figura 6).

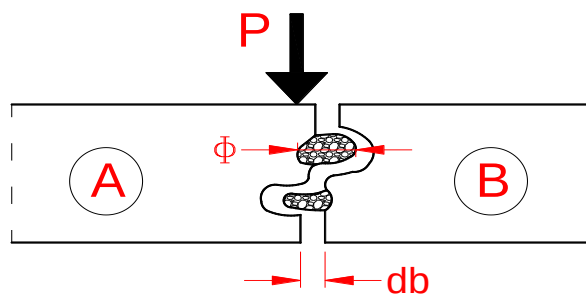


Figura 1.5 Influența dimensiunii agregatelor, Φ , și a deschiderii inițiale a fisurii db la transferul încărcării

Tabel 1.2 Deschiderea inițială a betonului de ciment, db .

Epruveta	Deschiderea inițială a fisurii plăcii de beton, db	db/db_{4b}	Nr. de cicluri la care se produce ruperea, n_{cR}
6a	5.492	0.3815	10520
7a	5.974	0.4150	7790
7b	8.445	0.5867	4283
4b	14.39	1	1553

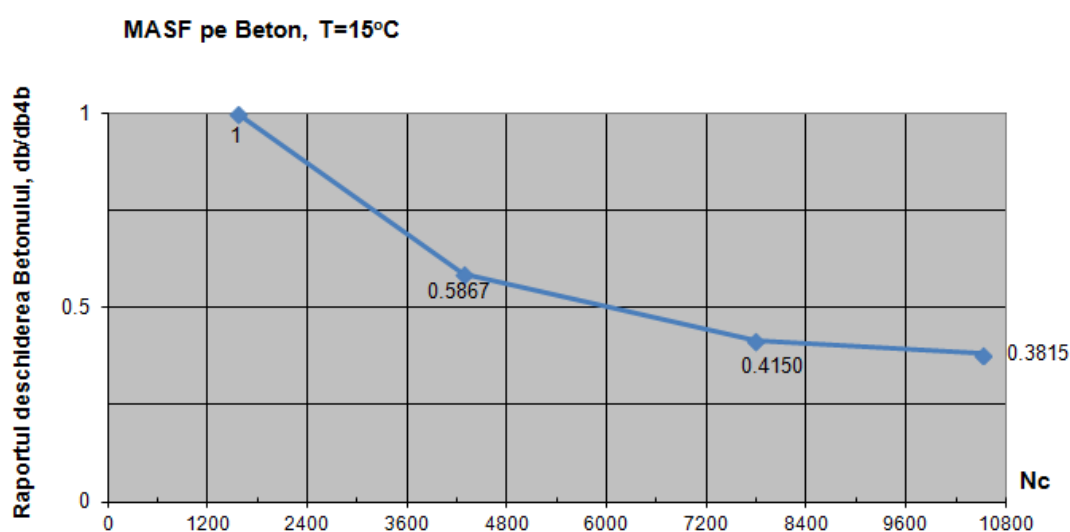


Figura 1.6 Deschiderea inițială a betonului funcție de numărul de cicluri

1.3 Raportul de cercetare numărul 3. Identificarea parametrilor de influență a propagării fisurării prin straturi asfaltice de protecție la îmbrăcămînți rutiere degradate

Raportul de cercetare de față, va conține interpretări ale modului în care parametrii influențează propagarea fisurării, se va încerca utilizarea, adaptarea unor funcții cunoscute în literatura de specialitate (exp. Legea lui Paris) la rezultatele obținute, precum și găsirea unei modalități de apreciere a comportării unui covor asfaltic de protecție a unei îmbrăcămînți rutiere degradate în timp, din punctul de vedere al fisurării reflectivă (transmiterea fisurilor din vechea îmbrăcăminte degradată în covorul asfaltic de protecție).

2 MECANICA FISURĂRII

Pentru a putea înțelege mai bine rezultatele cercetărilor în problematica fisurării straturilor asfaltice de protecție, voi trece în revistă abordările fisurării în general: criteriul energetic (G) și factorul de intensitate al efortului (K).

2.1 Criteriul energetic

Cel care a inițiat această teorie a fost Griffith, Irwin dezvoltând-o în continuare. Această abordare presupune că fisura se propagă atunci când energia acumulată în zona acesteia este mai mare decât rezistența materialului. [6]

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

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (6)$$

Relația 6 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 $2a$ (Figura 2.1).

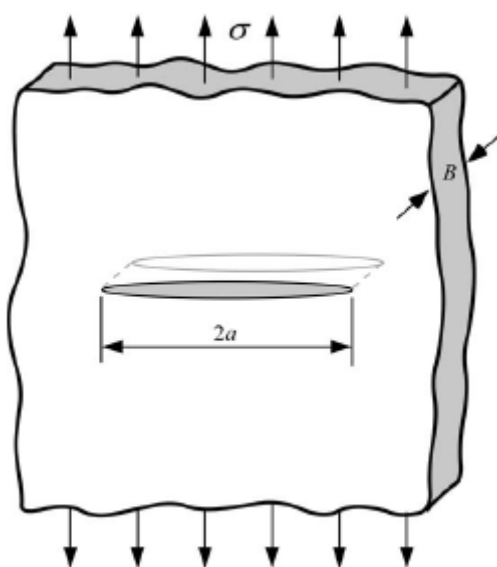


Figura 2.1 Fisură într-o placă cu dimensiuni infinite [6]

2.2 Factorul de intensitate al efortului K

Factorul de intensitate al efortului caracterizează starea de eforturi și deformații la vârful fisurii (Figura 2.2) și are ca ecuație[6]:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (7)$$

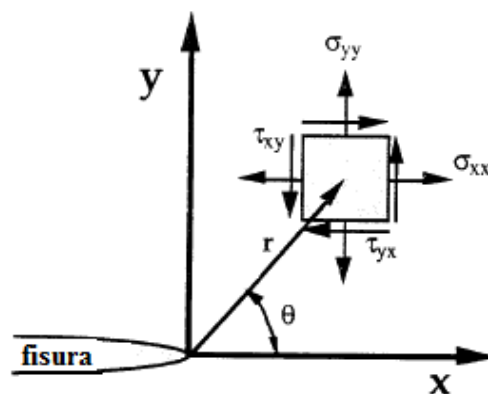


Figura 2.2 Eforturile prezente lângă vârful fisurii [6]

Relația dintre variația energiei și factorul de intensitate al efortului se obține din ecuațiile 6 și 7:

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (8)[6]$$

2.3 Propagarea fisurii în timp (oboseala materialelor)

Pentru a determina modul în care o fisură se propagă prin materialul respectiv, se poate utiliza legea lui Paris (ecuația 5) care exprimă viteza de propagare a fisurii $\left(\frac{da}{dN}\right)$, 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.

Materialele cărora se poate aplica această abordare se pot împărți în liniar-elastice și elasto-plastice (acestea nu sunt influențate de timpul de încărcare), dar și materiale vâsco-elastice și vâsco-plastice, care depind de timpul de încărcare.

Cercetările în domeniul fisurării au folosit teoriile existente și le-au adaptat în funcție de materialul observat, calculul lui K complicându-se pe măsură ce comportarea acestuia trece de la liniar la neliniar (inclusiv variația în timp). Dacă la materialele liniar elastice, s-au putut găsi relații

empirice care să determine cât mai corect valoarea acestuia, la cele elasto-plastice, dar și la cele cu componentă vâscoasă a fost necesară utilizarea elementului finit.

2.4 Fisurarea materialelor cu comportare liniar elastică

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 (Figura 2.3). Legea care guvernează aceste materiale este legea lui Hooke.

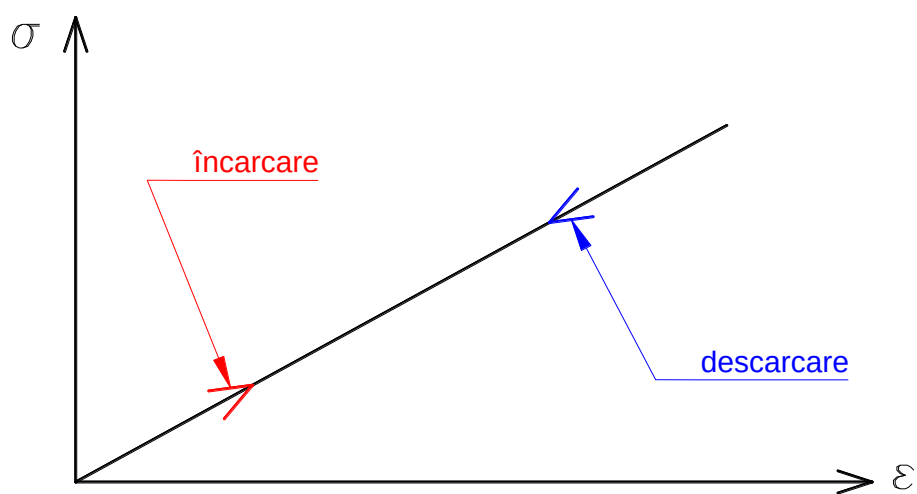


Figura 2.3 Comportarea elastic liniară

În cazul acestor materiale, factorul de intensitate al efortului s-a determinat ținându-se cont de mărimea zonei plasticizate r , ce apare în vârful fisurii.

În cazul modelului Irwin, această zonă are forma unui cerc de rază r .

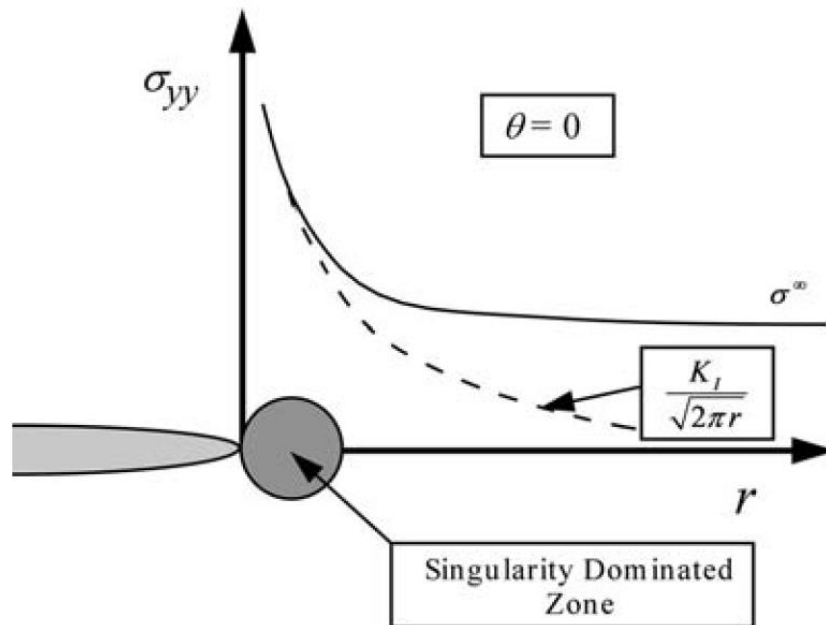


Figura 2.4 Zona plasticizată, modelul Irwin.

Eforturile din planul fisurării (axa r , Figura 2.4) din imediata vecinătate a vârfului fisurii, în modul I de solcitare, se obțin considerând $\theta = 0$ (Figura 2.2):

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \quad (9)[6]$$

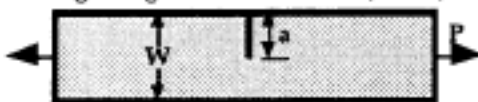
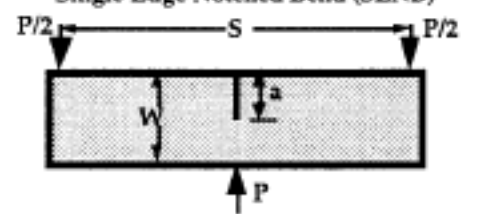
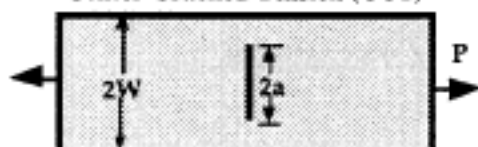
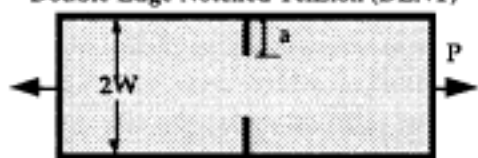
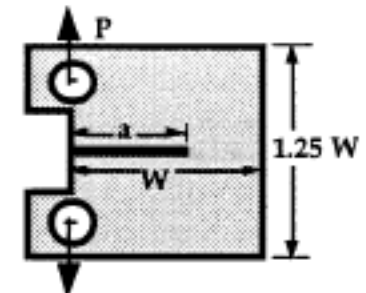
Plecând de la ecuația 7, valabilă în cazul unui element cu dimensiuni infinite, s-a determinat relația (10) și în cazul unui element cu dimensiuni finite, introducându-se o constantă adimensională Y , care depinde de geometria probei și de modul de solcitare.

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (10)$$

Relația pentru care s-au găsit valorile lui K_I din Tabel 2.1 este dată de ecuația 11:

$$K_I = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (11)[6]$$

Tabel 2.1 Relații de calcul pentru KI, materiale linear elastice[6]

GEOMETRY	$f(a/W)^*$
Single Edge Notched Tension (SENT) 	$\frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \left[0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W} \right) + 0.37 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2W} \right)^3 \right]$
Single Edge Notched Bend (SENB) 	$\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W} \right) + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right]$
Center Cracked Tension (CCT) 	$\sqrt{\frac{\pi a}{4W} \sec \frac{\pi a}{2W}} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$
Double Edge Notched Tension (DENT) 	$\frac{\sqrt{\frac{\pi a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \left[1.122 - 0.561 \left(\frac{a}{W} \right) - 0.205 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.471 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 0.190 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$
Compact Specimen 	$\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$

Modelul Dugdale-Barenblatt este o altă abordare pentru aflarea zonei plasticizate, care nu mai este sub forma unui cerc, ci are forma din Figura 2.5.

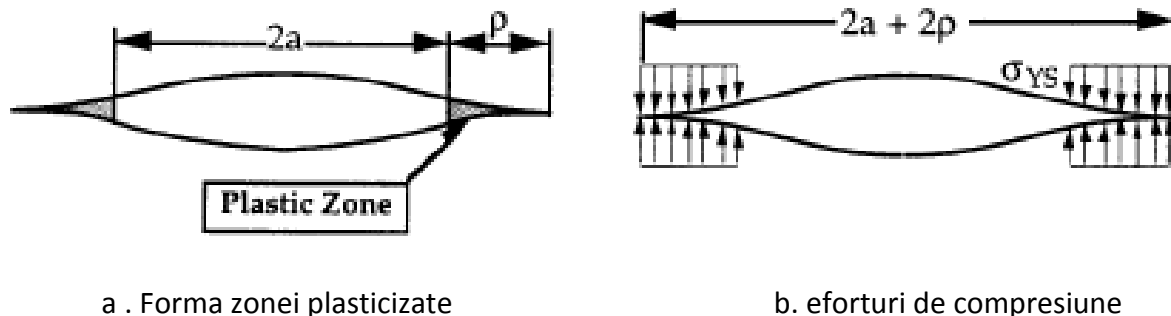


Figura 2.5 Modelul Dugdale-Barenblatt

S-a putut determina mărimea zonei plasticizate, ρ , în funcție de factorul de intensitate al efortului K și efortul de compresiune σ_{YS} , efort care are valori în jurul rezistenței la curgere a materialului.

$$\rho = \frac{\pi}{8} \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (12)[6]$$

Cele 2 modele, Irwin și Dugdale, dau aproximativ aceleași valori ale zonei plasticizate.

Factorul de solicitare al efortului, folosind modelul Dugdale-Barenblatt, a fost determinat de către Burdekin și Stone, având valori mult mai apropiate de adevăr decât cel obținut de Dugdale și Barenblatt.

$$K_{eff} = \sigma_{YS} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left[\frac{8}{\pi^2} \cdot \ln \sec \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_{YS}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)[6]$$

În tot acest studiu, s-a considerat că lungimea reală a fisurii este egală cu lungimea vizibilă a fisurii plus mărimea zonei plasticizate. Aceste corecții 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]

2.5 Fisurarea materialelor cu comportare elasto-plastică

La un material cu comportare elasto-plastică relația dintre eforturi și deformații un mai este liniară, iar deformația un revine la 0 atunci când încărcarea aplicată este îndepărtată (Figura 2.6). 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).

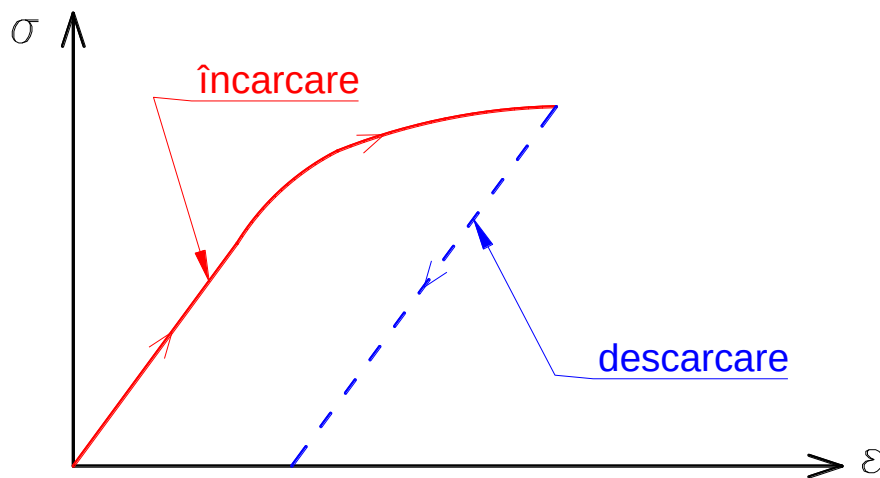


Figura 2.6 Comportare elasto-plastică

După cum am amintit mai sus, pentru a se putea modela fisura în cazul materialelor cu comportarea neliniară, s-au introdus cei doi parametri CTOD și integrala J.

2.5.1 CTOD

Necesitatea parametrului CTOD a apărut când Wells a observat că înaintea 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 tocire. Se poate spune că vârful fisurii are o anumită deschidere notată cu δ (Figura 2.7, [6]).

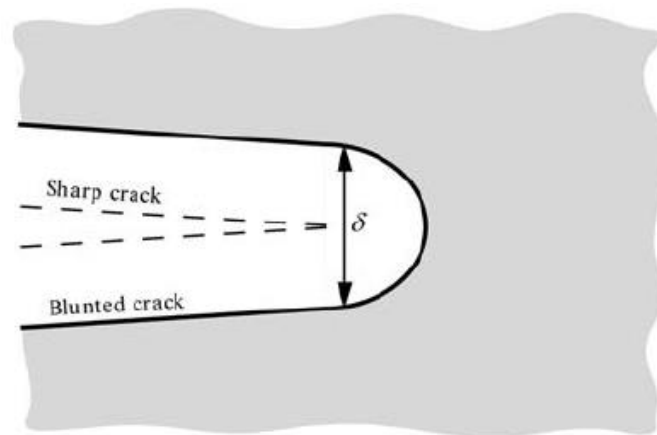


Figura 2.7 Deschiderea apărută la vârful fisurii,

S-a determinat parametrul CTOD (Figura 2.8, [6]), plecând de la modelul Irwin, cu zona plasticizată de rază r_y (relația 4), considerându-se deschiderea $\delta = 2 \cdot u_y$. u_y este deplasarea pe direcția y a fisurii determinată în ipoteza comportării liniar elastice. Relația 14 este valabilă atunci când zona de curgere a materialului este foarte mică.

$$\delta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} \cdot E} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (14)[6]$$

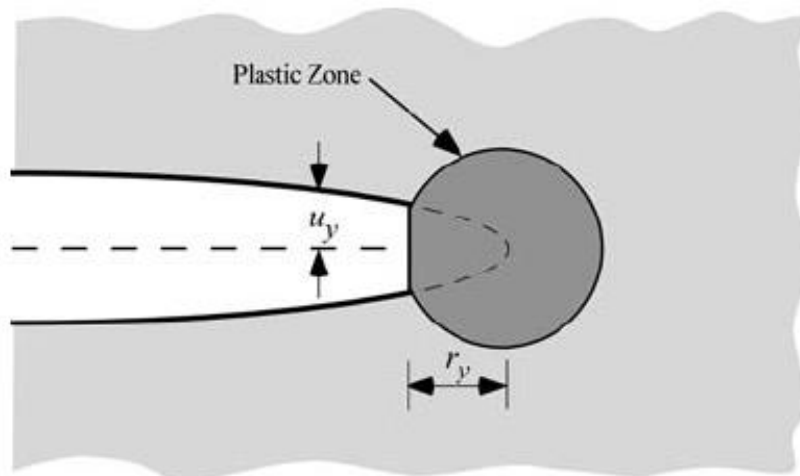


Figura 2.8 CTOD calculat după modelul Irwin

O altă modalitate de calcul o constituie cea bazată pe modelul Dugdale-Barenblatt (Figura 2.9, [6]). Ipotezele acestui model sunt stare plană de eforturi și material care își păstrează elasticitatea (nu rigidizează).

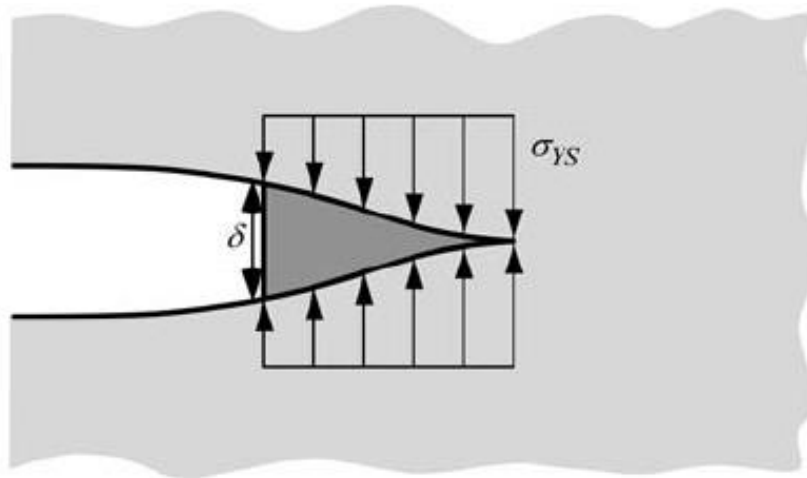


Figura 2.9 CTOD calculat după modelul Dugdale-Barenblatt

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} \cdot E} = \frac{G}{\sigma_{YS}} \quad (15)[6]$$

În ceea ce privește încercarea în 3 puncte (Figura 2.10), CTOD se determină prin măsurarea deschiderii fisurii la partea superioară (V), presupunând că cele două jumătăți sunt rigide și se rotesc în jurul unui punct (articulație) ce se află la intersecția celor 2 fețe ale fisurii.

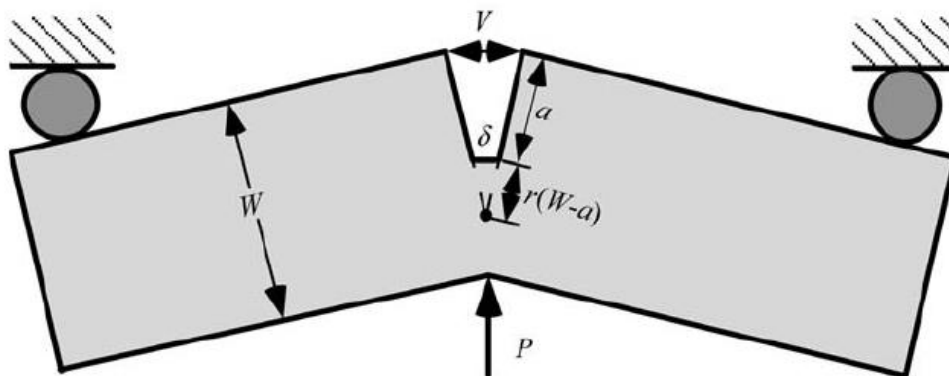


Figura 2.10 CTOD determinat experimental, încercarea în 3 puncte

$$\delta = \frac{r(W-a) \cdot V}{r(W-a) + a} \quad (16)[6]$$

r (factor de rotație) este o constantă adimensională cu valori cuprinse între 0 și 1.

Acest model "articulat" nu este foarte corect atunci când avem deformații în principal elastice. De aceea se introduce în calculul CTOD atât componenta elastică prin factorul de intensitate al efortului, cât și componenta plastică de forma ecuației **Error! Reference source not found.**

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2}{m \cdot \sigma_{YS} \cdot E'} + \frac{r_p \cdot (W-a) \cdot V_p}{r_p \cdot (W-a) + a} \quad (17)[6]$$

m este o constantă adimensională $m = 1$ pentru efort constant
 $m = 2$ pentru deformăție constantă

2.5.2 Integrala pe contur J

Integrala J a fost introdusă de Rice[8] în 1968 și reprezintă energia disponibilă pe unitatea de suprafață a fisurii (ținând cont și de zona plasticizată)[9]. 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).

Integrala J a fost redată sub mai multe forme, aceasta caracterizând fisura atât din punct de vedere al energiei, dar și al eforturilor din vârful acesteia pentru un material neliniar elastic (ce poate fi asemănat cu un material elasto-plastic).

- Variația energiei eliberate în timpul încărcării (raportul dintre variația energiei potențiale și suprafața considerată)

$$J = -\frac{dE_p}{dA}$$

sau pentru încărcare cu forță constantă (cum este cazul încercărilor pe Fisurimetru Termostatat ce fac obiectul prezentei teze de doctorat), relația devine:

$$J = \left(\frac{dU^*}{da} \right)_P \text{ sau } J = \left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^P \Delta dP \right)_P$$

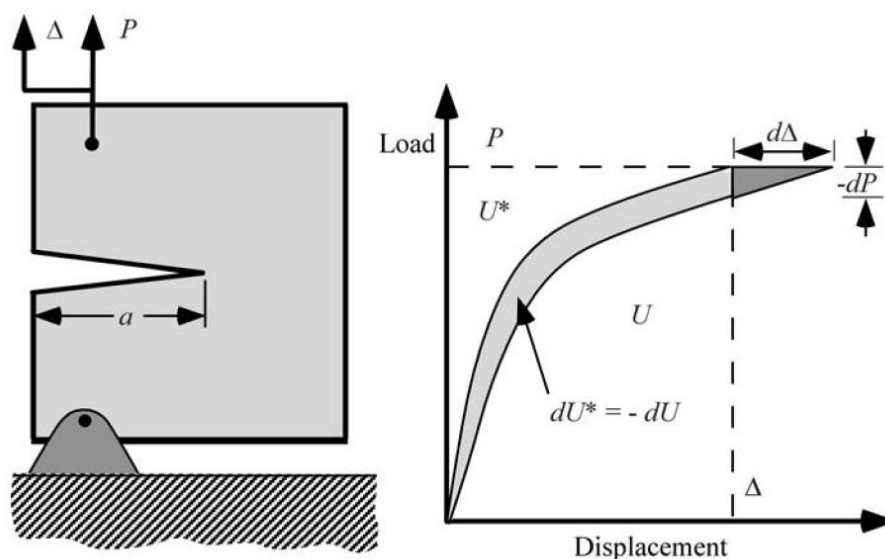


Figura 2.11 Integrala J exprimată ca variația energiei eliberate[6]

- Integrala J ca o linie independentă de contur (Figura 2.12). Acest contur trebuie ales cât mai departe de zona plasticizată de la vârful fisurii.

$$J = \int_{\Gamma} \left(w \cdot dy - T_i \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right)$$

w –energia specifică de deformație

T_i –vector tranțiune într-un punct al conturului

u_i –vectorul deplasărilor

ds –creșterea lungimii pe conturul considerat

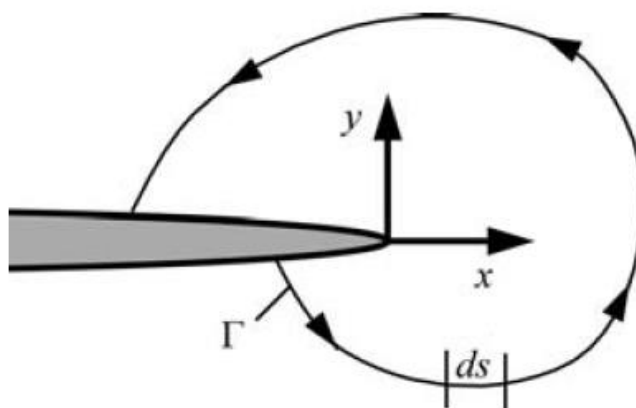


Figura 2.12 Contur ales arbitrar în jurul fisurii[6]

- J ca un parametru al intensității efortului

$$\sigma_{ij} = k_1 \cdot \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

k_1 – constantă de proporționalitate

Trebuie remarcat că pentru $n=1$, relația este asemănătoare cu cea a factorului de intensitate al efortului K din mecanica liniar elastică.

3 CONCEPȚIA FISURĂRII REFLECTIVE PUBLICATĂ ÎN LITERATURA DE SPECIALITATE

Fisurarea reflectivă este procesul de transmitere la suprafața părții carosabile a fisurilor de contracție hidraulică sau 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 îmbrăcăminte rutieră[10]. Deci, fisurarea reflectivă apare datorită încărcărilor 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[11], 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 5).

Pentru a determina parametrii A și n (constante de material) se pot folosi următoarele relații empirice [12]:

$$n = c_1 \cdot \frac{2}{m} \text{ -pentru deplasare controlată} \quad (18)$$

$$n = c_1 \cdot 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right) \text{ -pentru forță controlată} \quad (19)$$

Unde m –panta curbei de comleantă pentru un timp de încărcare dat (t)

$$m = a_2 + 2 \cdot a_3 \cdot \log t \quad (20)$$

c_1 și c_2 –coeficienți ce depind de rigiditatea mixturii, respectiv de procentul de goluri din mixtură

Constanta de material A se determină în funcție de mai mulți factori, cum ar fi modulul complex (E^*), rezistența la întindere a mixturii (σ_t), energia de rupere a mixturii (Γ), dar și de panta curbei de comleantă (m).[12]

O altă relația utilizată de către Mostafa M. Elseifi și Imad L. Al-Qadi [11], are forma

$$\log A = -2.605104 + 0.184408 \cdot AV - 4.704209 \cdot \log AC - 0.00000066 \cdot E \quad (21)$$

Unde AV -volumul de goluri%

AC -conținutul de bitum %

E -modulul rezilient al mixturii. (denumit și modul de elasticitate dinamic dacă determinarea se face în domeniul elastic).

Totuși, pentru a afla cât mai precis aceste constante, este necesar efectuarea de teste pe grinzi realizate din mixtura respectivă, grinzi supuse unor încărcări repetate.

În cadrul experimentelor realizate de către Mostafa M. Elseifi și Imad L. Al-Qadi, s-a utilizat un program de element finit care determină factorul K indirect utilizând integrala independentă de contur J.

3.1 Prediction of existing reflective cracking potential of flexible pavements”, Jorge C. Pais și Paulo A.A. Pereira [13]

În acest articol autorii ajung la următoarele concluzii:

- Potențialul fisurării reflective este generat de o funcție caracteristică a 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.
- Activitatea fisurii din structurile existente fisurate a fost măsurată de Rust, 1987, folosind un dispozitiv denumit CAM (Figura 3.1) care măsoară mișcarea relativă a marginilor fisurii.

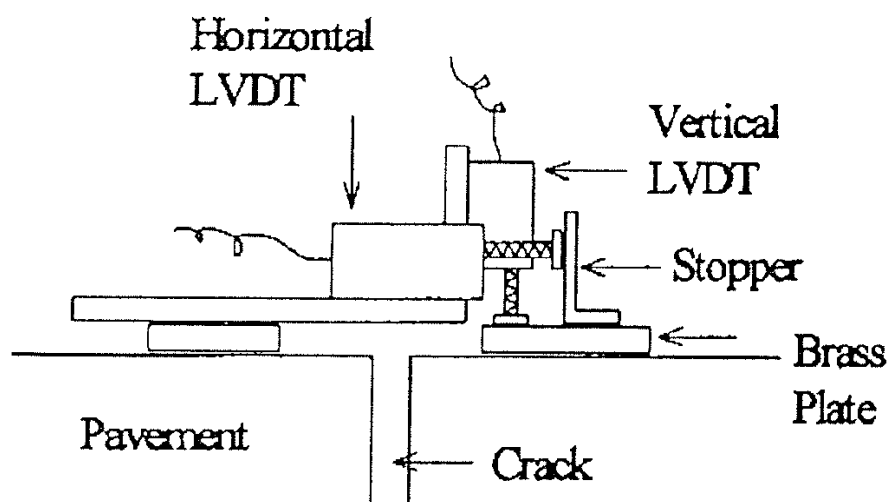


Figura 3.1 Dispozitivul CAM (Crack Activity Meter)

Testul efectuat s-a bazat pe găsirea unei funcții care să prezică evoluția fisurii după așternerea stratului de protecție, folosindu-se de evoluția fisurii înainte de așternere, a structurii existente, ținându-se cont de caracteristicile materialelor componente ale stratului așternut.

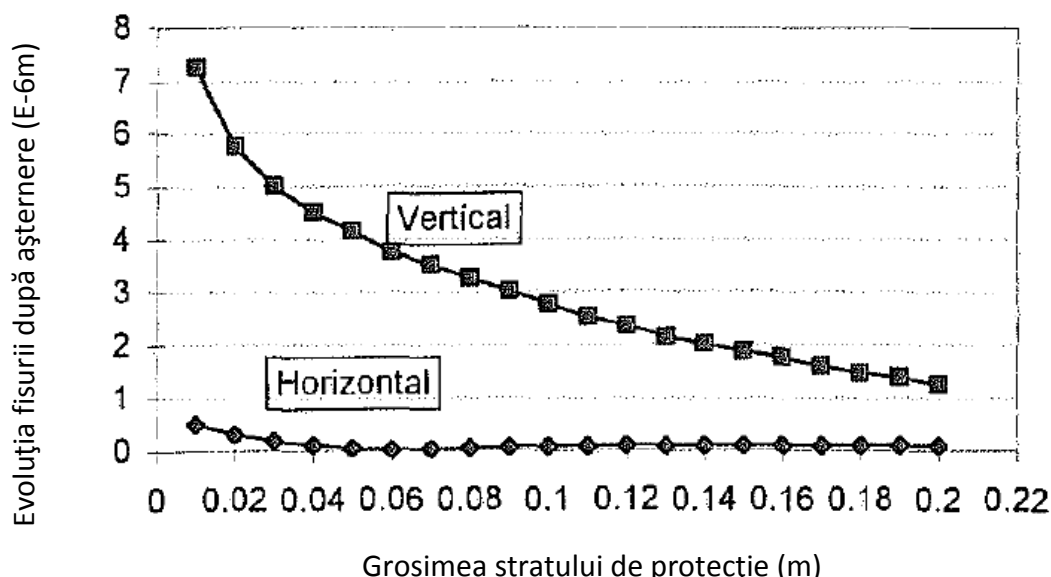


Figura 3.2 Evoluția fisurii măsurate cu CAM, funcție de grosimea stratului de protecție

Folosind metoda elementului finit aceștia au ajuns la 2 concluzii:

- După așternere, componenta orizontală a fisurii are o importanță mică în comparație cu cea verticală. În toate simulările efectuate, componenta orizontală nu poate atinge un nivel mai mare decât 50% din cea verticală
- După așternere, componenta verticală este mult redusă și urmărește o funcție logaritmică ce depinde de grosimea stratului.

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.

3.2 „Lab asphalt testing evaluation of reflective cracking”, Fujie Zhou, Lijun Sun[14]

În această lucrare se concluzionează că fisurarea reflectivă se produce în 3 etape și anume:

- Desprinderea stratului de asfalt de structura existentă se produce datorită forței tangențiale mari prezentă la interfața dintre cele 2, dată de încărcare din trafic.

- 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. Cu alte cuvinte există o dimensiune optimă a acestei desprinderi. Efortul σ_1 se găsește la o distanță de 5-10cm de rost (fisură) pentru o desprindere de 5-32cm. Acesta este etapa a 2a, când fisura se produce la o distanță de 4-6cm de rost, și nu în dreptul rostului.
- σ_y predomină în σ_1 , în special după ce lățimea desprinderii este mai mare de 5cm. Deci propagarea fisurii se datorează în principal lui σ_y . Cea de-a 3a etapă o reprezintă dezvoltarea pe verticală a fisurii înspre fața superioară a stratului de protecție.

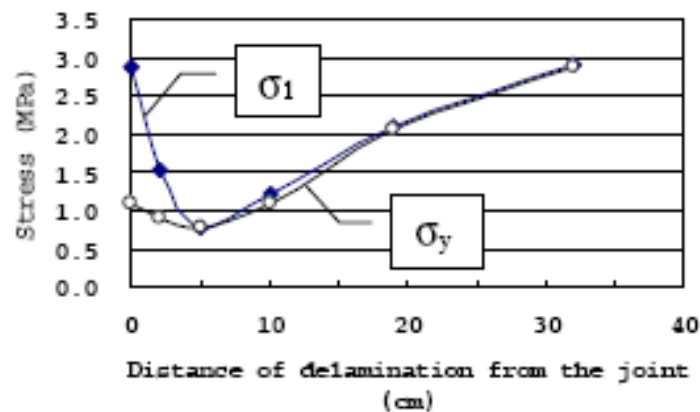


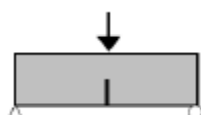
Figura 3.3 Efectul desprinderii asfaltului de betonul de ciment asupra eforturilor și

3.3 “New procedures and criteria for asphalt mixes and pavements design regarding fatigue failure and thermal stresses”, F. Perez Jimenez, R. Miro, A. Martinez, R. Botella, G. Valdes[15]

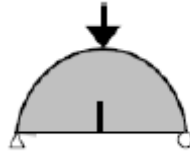
Deși nu este un studiu al fisurării reflective, trebuie punctate și aceste 2 noi metode de testare în cadrul Laboratorului de cercetare rutieră din cadrul Universității Tehnice din Catalonia pentru proiectarea mixturilor asfaltice dar și evaluarea fisurării din oboseală: Fenix și EBADE.

Metode experimentale existente care simulează inițierea și propagarea fisurii:

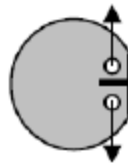
- Încovoierea în 3 sau 4 puncte pentru o grindă dreptunghiulară cu creștătură marginală, tip SENB (single edge notched beam specimen)



- încovoierea în 3 puncte pentru o grindă semicirculară cu creștătură marginală tip SCB (semicircular bending test)



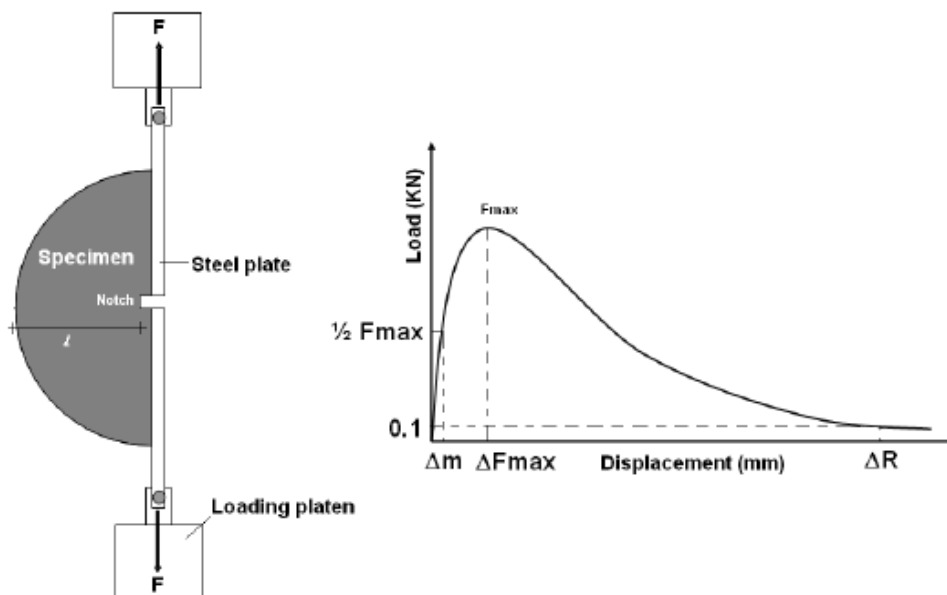
- încercarea la tracțiune compactă pe o epruvetă sub formă de disc tip DC(T) (disked-shaped compact tension test)



Metoda Fenix

Metoda combină încercările de încovoiere pe grindă semicirculară tip SCB și cea de tracțiune. Epruveta este o grindă semicirculară cu creștătură (6mm adâncime) aflată la mijlocul feței plate, încercată la tracțiune, solicitare realizată prin aplicarea unei deplasări (viteza de 1mm/min) asupra plăcuțelor metalice lipite de o parte și de cealaltă a creștăturii.

Scopul acestei încercări de laborator este de a evalua rezistența la fisurare a mixturilor bituminoase, prin determinarea energiei disipate în timpul testului (o combinație între energia disipată la fluaj și energia de fisurare).



Testul Fenix

Grafic al deplasării plăcuțelor funcție de valoarea încărcării

Figura 3.4 Date experimentale: forța și deplasarea

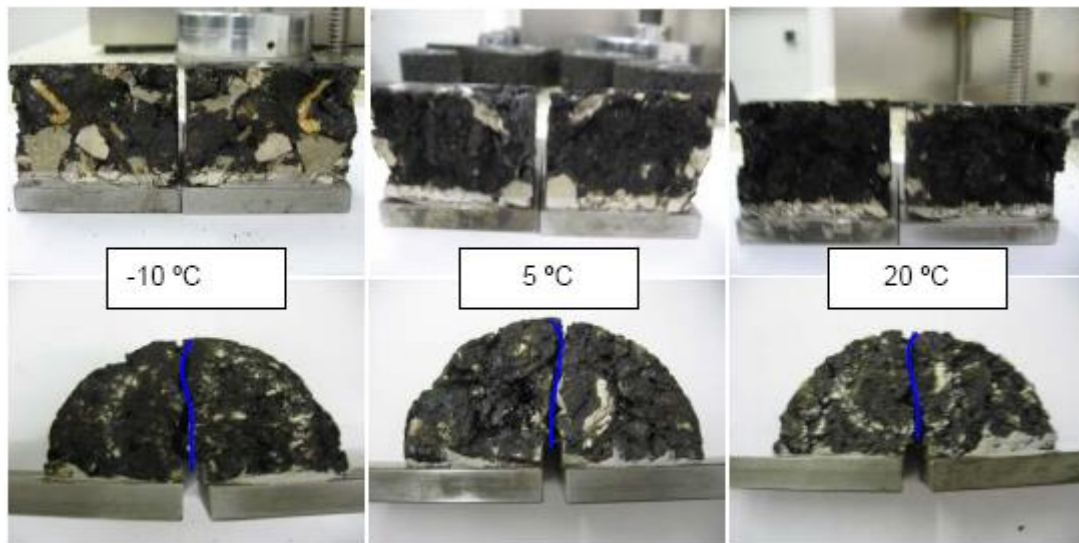


Figura 3.5 Vederi ale suprafeței fisurate (sus), respectiv ale propagării fisurii (jos)

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l}$$

Energia disipată:

G_D –energia disipată (J/m²)

W_D –lucrul mecanic disipat =aria formată sub curba Forță-deplasare (kN.mm)

h –grosimea epruvetei (m)

l –raza grinzii circulare minus crestătura

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{max}}{\Delta_m}$$

Indicele de rigiditate la întindere I_{RT} .

Concluzia: Rezistența la fisurare prin oboseală se poate exprima ca o funcție a energiei disipate G_D și I_{RT} prin definirea unei zone cu mixturi care au o comportare mai bună la oboseală. La același I_{RT} se comportă mai bine mixturile cu o valoare mai mare a energiei disipate G_D .

Metoda EBADE (Strain Sweep Fatigue Test)

Spre deosebire de metoda Fenix, aceasta presupune aplicarea unor trepte de deplasări (se păstrează deplasarea constantă un anumit număr de cicluri, după care se crește treptat). Este o încercare de oboseală care presupune un timp mai scăzut și mai puțin costisitoare față de cele clasice (încercarea la oboseală pe probe trapezoidale, încercarea în 4 puncte pe epruvete prismatice).

Metoda presupune aplicarea unei deplasări constante (pozitive și negative) prin intermediul unui piston, asupra unui capăt alepruvetei prismatce, celălalt fiind fix. Se simulează astfel încărcări de compresiune și întindere (solicitare sinusoidală).

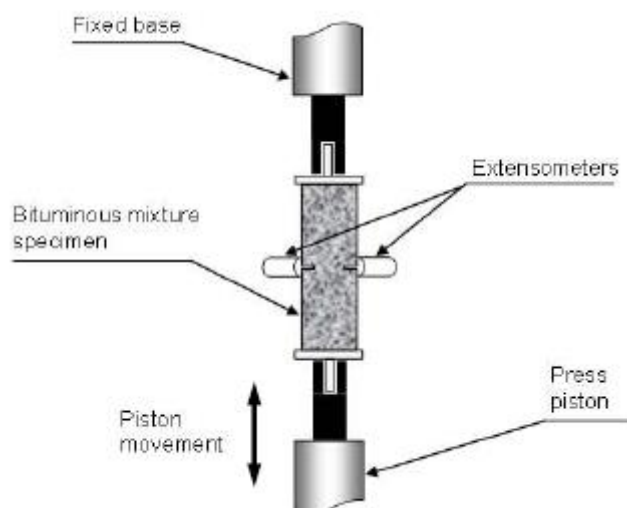


Figura 3.6 Stand de încercare metoda EBADE

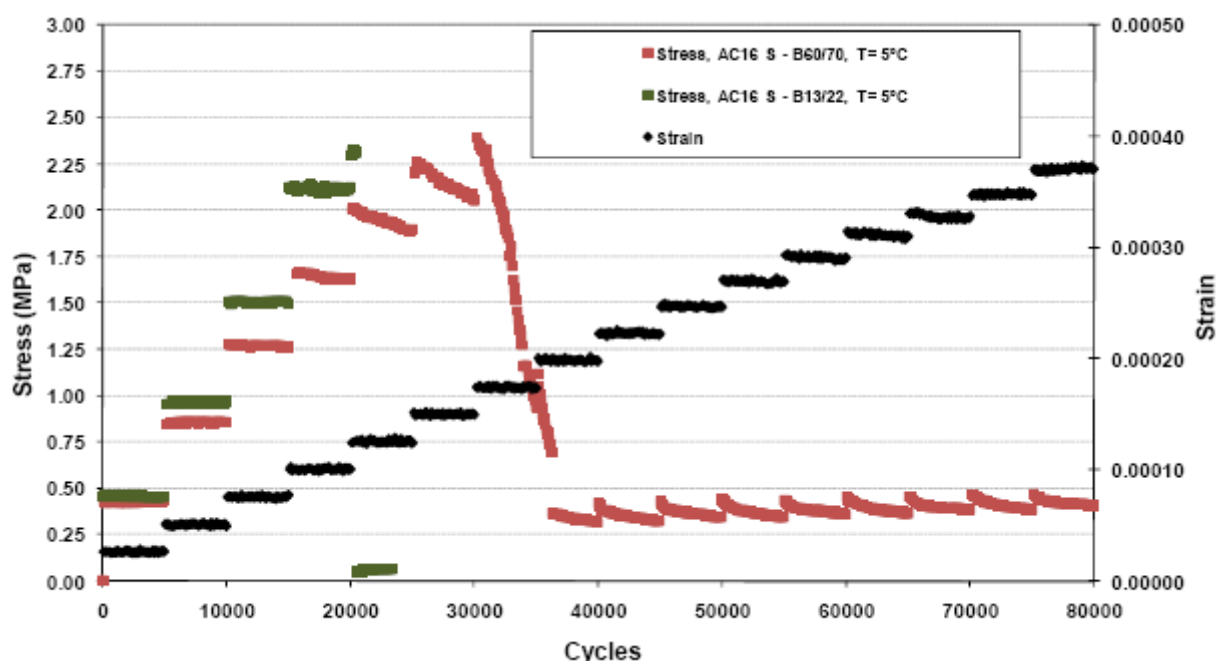


Figura 3.7 Grafic eforturi și deformații funcție de numărul de cicluri, metoda EBADE.

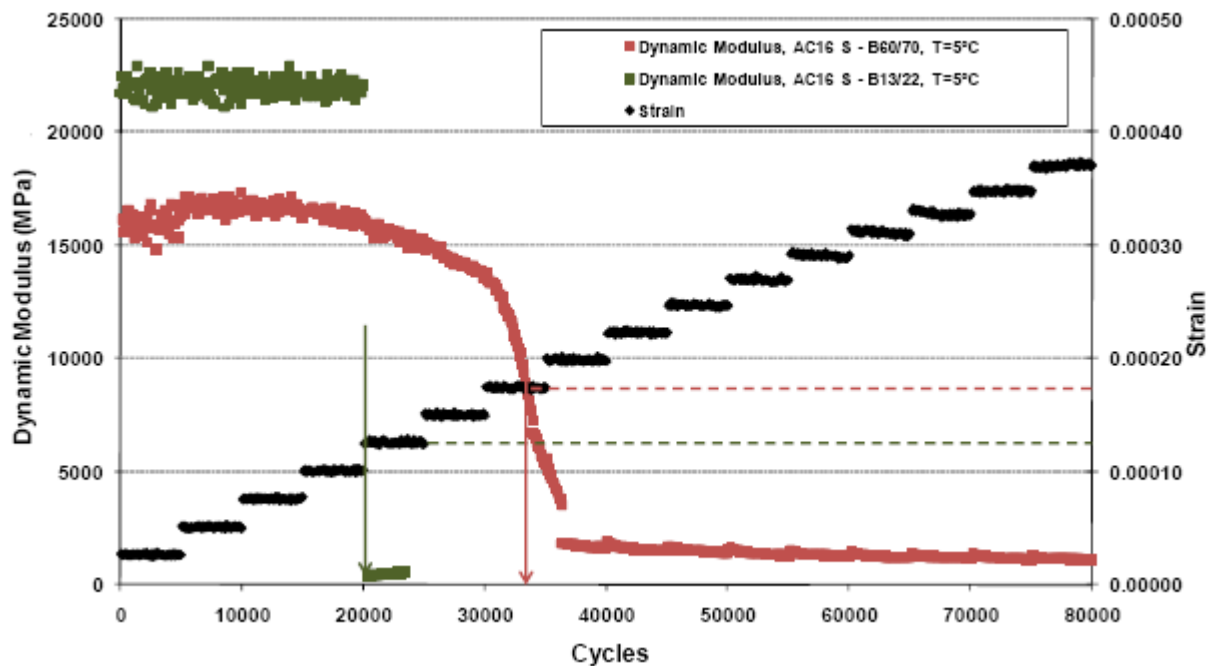


Figura 3.8 Modulul de rigiditate funcție de numărul de cicluri.

3.4 “Investigation of cracking in bituminous mixtures with a 4PBT”, M.L. Nguyen, C. Sauzeat, H. Di Benedetto, L. Wendling[16]

Autorii au efectuat teste folosind testul în 4 puncte, în care încărcarea este aplicată la partea superioară, iar proba prezintă o tăietură de 2cm la mijlocul ei, pe întreaga lățime (se simulează prezența unei fisuri).

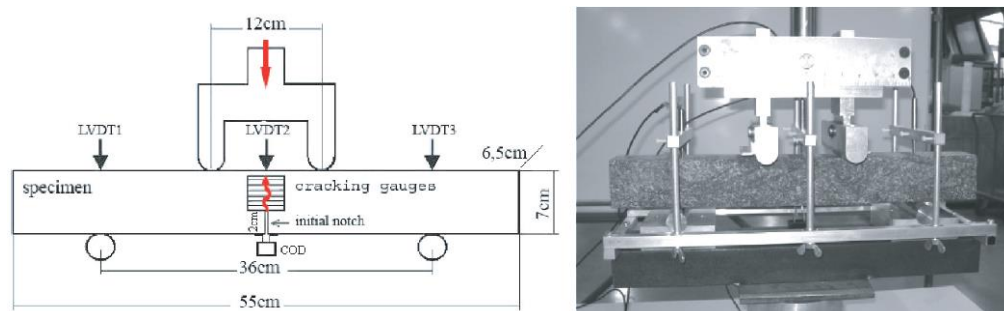


Figura 3.9 Testul în 4 puncte cu creștătură

Săgeata (deformația) epruvetei este măsurată cu ajutorul unor senzori (LVDT) care înregistrează deplasarea lor în timpul încercării. Aceștia au notat-o cu f .

$$f = LVDT2 - \frac{LVDT1 + LVDT3}{2}$$

Lungimea fisurii s-a măsurat experimental cu 2 dispozitive lipite de o parte și de cealaltă a probei. Dispozitivul este format din 21 de fire paralele la 2.5mm distanță (acestea au o lungime de 8cm). Un neajuns al acestei metode este că detectarea fisurii poate fi întârziată de rezistența firelor.

După cum am vazut în capitolul anterior, una dintre metodele de evaluare a propagării fisurii este CTOD. În acest articol se folosește ceva asemănător și anume COD (crack opening displacement –deplasarea deschiderii fisurii), măsurat cu ajutorul unui extensiometru.

Metoda utilizată mai departe se numește DRCL (displacement ratio method for predicting crack length –raportul deplasării pentru a estima lungimea fisurii).

$$r_{dm\grave{a}s} = \frac{COD}{f}$$

Folosind elementul finit, s-a calculat acest raport pentru diferite valori ale lungimii fisurii (a), urmând ca în ultima parte a metodei să se compare valorile măsurate cu cele calculate. Calibrarea modelării cu element finit se consideră bună când rezultatele experimentale sunt apropiate de cele experimentale.

$$f(a)_{EF} = r_{dm\grave{a}s}$$

Pentru calcul s-a folosit formula cunoscută a factorului de intensitate al efortului K_I , în componența căreia intră factorul de formă Y .

$$K_I = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot (L - l)}{B \cdot w^2} \cdot Y(x) \cdot \sqrt{a}$$

unde: P –încărcarea la care se produce ruperea

l –deschiderea superioară a rezemelor

L –deschiderea inferioară a reazemelor

B –lățimea probei

w –înălțimea probei

a –lungimea fisurii

$x=a/w$ –adâncimea relativă a tăieturii

$$Y(x) = \left[\frac{w}{3 \cdot (L-l)} \right] \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot B}{x} \cdot \frac{dC}{dx}} \text{ -factor de formă}$$

C -compleanța

3.5 Concluziile extrase din literatura de specialitate

Din prelucrarea informațiilor extrase, se pot trage următoarele concluzii definitorii pentru fisurarea reflectivă și caracterizarea parametrilor de generare a acesteia, după cum urmează:

- Potențialul fisurării reflective este generat de o funcție caracteristică a 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/crapaturii 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 noțiunea de forfecare echivalentă în zona fisurii/crapaturii 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, se produce datorită forței tangențiale mari prezentă la interfața dintre cele 2, dată de încărcare din trafic.
 - -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. Cu alte cuvinte există o dimensiune optimă a acestei desprinderi. Efortul σ_1 se găsește la o distanță de 5-10cm de rost (fisură) pentru o desprindere de 5-32cm. Acesta este etapa a 2a, când fisura se produce la o distanță de 4-6cm de rost, și nu în dreptul rostului.
 - — σ_y predomină în σ_1 , în special după ce lățimea desprinderii este mai mare de 5cm. Deci propagarea fisurii se datorează în principal lui σ_y . Cea

de-a 3a etapă o reprezintă dezvoltarea pe verticală a fisurii înspre fața superioară a stratului de protecție.

- În cadrul experimentelor realizate de către Mostafa M. Elseifi și Imad L. Al-Qadi, s-a utilizat un program care determină factorul K indirect utilizând integrala independentă de contur J . Aceasta se definește ca fiind schimbarea energiei mecanice în unitatea de aria a suprafeței noi fisurate.
- Testul FPBNF are o abordare asemănătoare cu cel efectuat în cadrul prezenței teze de doctorat și poate constitui un alt mod de abordare față de cel prezentat în cadrul acesui raport de cercetare.

4 CONTRIBUȚII ȘI INTERPRETĂRI ALE PARAMETRILOR FISURĂRII REFLECTIVE PRIN OBSERVAȚII ȘI PRELUCRĂRI ALE REZULTATELOR EXPERIMENTALE

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

Menționez că acestea au avut aceeași placă de beton de ciment prefisurat, dar și aceeași mixtură asfaltică ca strat de protecție MASF16, după cum am prezentat în raportul de cercetare numărul 2, ***Analiza prin interpretare statistică a soluțiilor obținute în regim accelerat în laborator la solicitări echivalente traficului rutier.***

Notația epruvetelor cu a și b s-au făcut pentru plăci de mixtură (15x30cm) tăiate din aceeași placă 30x30cm. Exemplu: s-a confecționat 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 dală la scară redusă, în funcție de care s-a stabilit și nivelul solicitării asimilate unui trafic rutier. 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. Solicitarea la încărcări ciclice asimilate unui trafic rutier, se aplică la Fisurometrul Termostat în trepte ascendente de încărcare (forța este variabilă în funcție de rigiditatea mixturii asfaltice), pentru a testa epruveta în regim accelerat. Aplicarea regimului accelerat se face pentru protecția prototipului Fisurometrul Termostat. Testul la fisurare reflectivă se evaluează prin indici de performanță. Aceștia sunt coeficienți adimensionali, care reprezintă raportări comportamentale ale testelor efectuate în același regim de solicitare pe straturi rutiere confecționate în condiții similare (rezultate prin media a cel puțin două încercări rezultate din confecționare identică a plăcii de 30x30cm, partajată în epruvete de 15x30cm) și în condiții de temperatură controlată.

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.

Interpretările observațiilor experimentale pe fiecare epruvetă testată, sunt prezentate în continuare.

4.1 Epruveta 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 $n_{CCR4b}=1553$ (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 4.1 se prezintă evoluția deformației verticale (determinată prin prelucrare imagistică și înregistrată de softul echipamentului) 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 analiza comparativă cu un sector experimental, când se cunoaște situația defectelor prin fisurare a unei îmbrăcămînți rutiere rigide, înaintea aplicării unui covor asfaltic de protecție. Analiza ar fi de durată, întrucât va trebui urmărit sectorul în timpul exploatării și de determinat traficul efectiv, transformat în trafic de calcul în momentul în care fisurile reflectivă apar la suprafața covorului asfaltic de protecție. Această variantă de cercetare, care necesită o finanțare corespunzătoare, constituie o direcție viitoare de analiză a programului experimental propus prin proiectul cercetării aferent tezei de doctorat.

Deocamdată, analiza prin modelare experimentală în laborator se va face doar până în punctul de rupere, respectiv până când fisura apare la suprafața stratului asfaltic și este “vizibilă” peste 80% din grosimea acestui strat.

Pentru a dispune de o perioadă suficientă la capabilitatea 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.

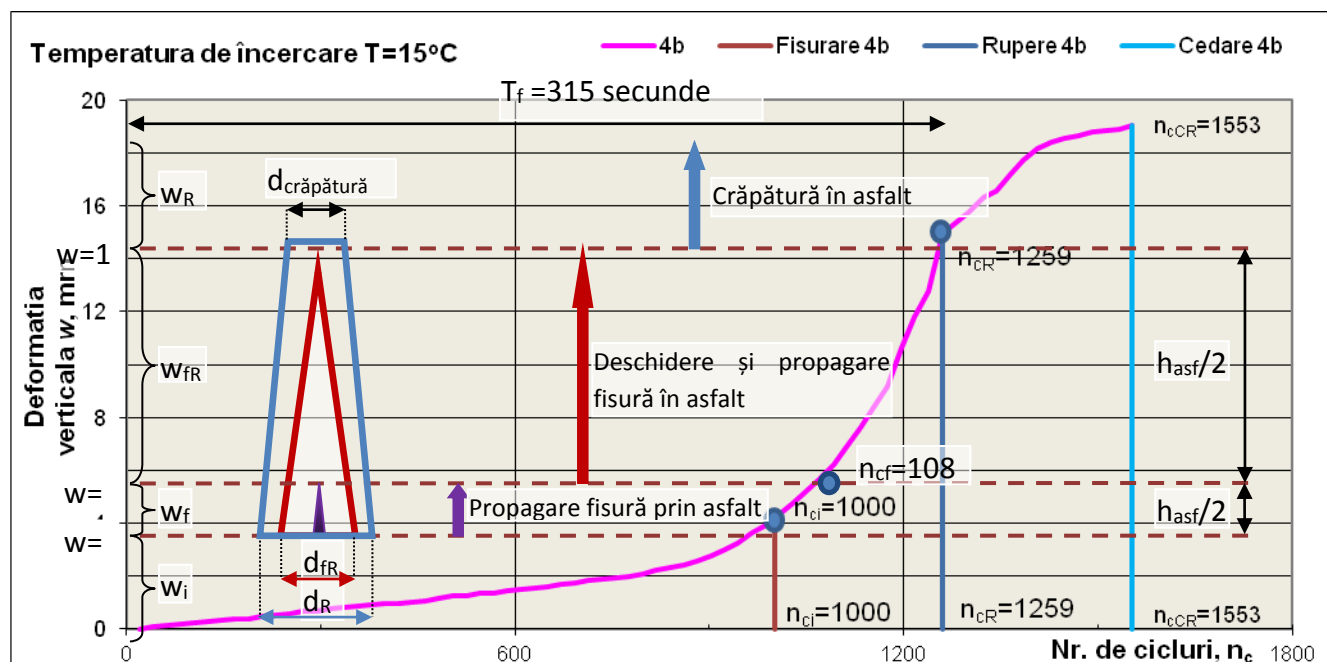


Figura 4.1. Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri pentru 4b

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 4.1 se pun în evidență **principalii termeni ai fisurării la încercarea în regim accelerat prin modelarea experimentală în laborator**. Luând în considerație variația deformației verticale în funcție de creșterea numărului de cicluri de întindere din încovoiere repetată a epruvetei din beton prefisurat peste care s-a așternut un strat asfaltic de protecție (4cm MASF16), în cazul aplicării soluției de întreținere-reparație la structura rutieră rigidă, 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_f , la cedarea prin rupere w_R și la apariția crăpăturii în stratul asfaltic w_R .

Un parametru care un trebuie neglijat, deși nu apare în Figura 4.1, este **deschiderea fisurii din stratul suport din beton de ciment, db** .

Deformația verticală (deflexiunea) la inițierea fisurii w_i poate pune în evidență deflexiunea maximă din teren (δ_{adm}), iar când apare fisura la suprafața stratului asfaltic de protecție în teren ($\delta > \delta_{adm}$).

Pe sector experimental, prin intermediul măsurătorilor deflectometrice se pot determina N_{ci} corespunzător atingerii deflexiunii admisibile (δ_{adm}) și N_{cf} corespunzător tasării aferente apariției fisurii la suprafața stratului asfaltic.

Pentru materialul asfaltic utilizat se determină experimental n_{ci} și n_{cf} , astfel, pentru alte lucrări cu aceeași rețetă, se pot anticipa timpi aferenți duratei normate de funcționare.

În Tabel 4.1 se prezintă numărul de cicluri și deformația verticală la care s-au produs fisurarea, ruperea, respectiv cedarea epruvetei 4b.

Tabel 4.1 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/ruptura/cedare, epruveta 4b

Fisurare	4b	Cedare (crăpătura)	4b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_c	Deformația verticală, w
$n_{ci} = 1000$	4.3086	$n_{cCR} = 1553$	19.0684
		Rupere	4b
		$n_{cR} = 1259$	12.768

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 4.2). Numărul de cicluri corespunzător propagării fisurii este de 259.

Tabel 4.2 Indicele de fisurare a mixturii, epruveta 4b

Epruveta	Indice de fisurare reflectivă, I_f	Număr de cicluri la propagarea reflectivă a fisurii
4b	$I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} = \frac{1000}{1259} = 79.43\%$	$n_{cR} - n_{ci} = 1259 - 1000 = 259$

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), și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton (e_i , amorsajul de bitum dintre beton și mixtură). Aceștia sunt notați în Figura 4.2, iar valorile pentru proba 4b, utilizată în studiul de calibrare a programului experimental, sunt date în Tabel 4.3.

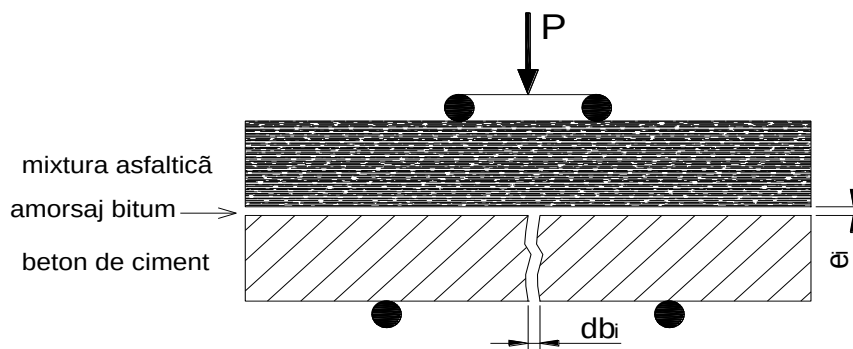
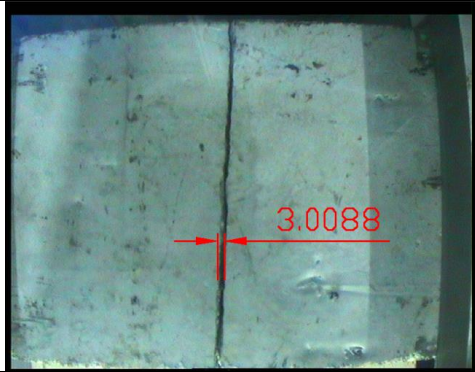
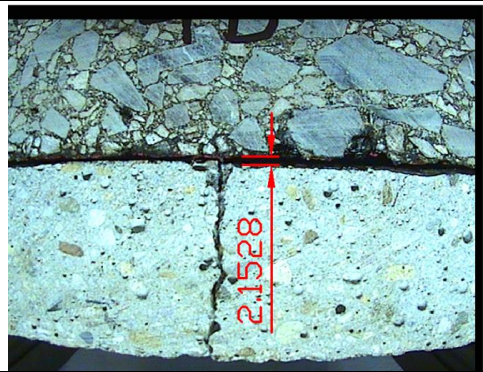
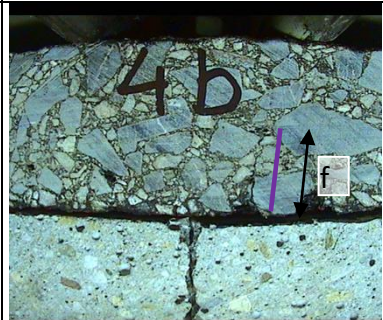
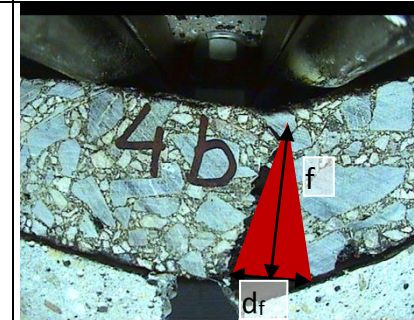


Figura 4.2 Parametrii inițiali ai studiului fisurării

Tabel 4.3 Valorile deschiderii inițiale db_i și ale desprinderii inițiale (amorsajul 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 4.4 Etapele fisurării reflective în cazul așternerii stratului asfaltic de protecție peste o îmbrăcămințe din beton de ciment prefisurat

Epruveta	Etapa 1. Solicitarea este preluată de frecarea între plăcile de beton prefisurat	Etapa 2. Fisura din beton s-a transmis în asfaltul 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: $d_i=0$	Numărul de cicluri: $n_{ci}-n_{cf}$ Deformația verticală: w_i-w_f Lungime fisură asfalt: $f=0-h_{asf}/2$ Deschidere fisură: $d_i=0$	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

În cea de-a doua parte a încercării, atunci când fisura s-a transmis la placa de asfalt, s-au măsurat și alți parametri cum ar fi deschiderea d și lungimea f a fisurii în asfalt (Figura 4.3).

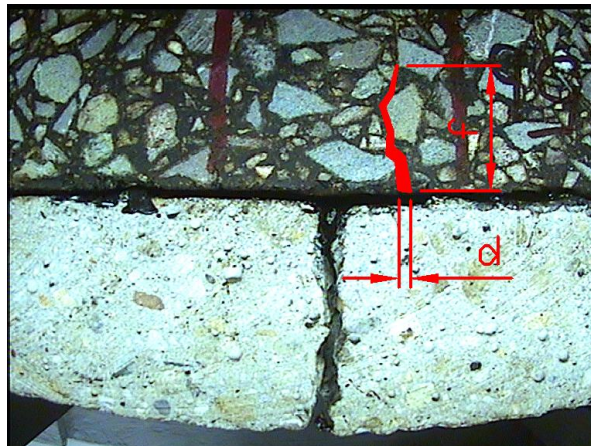


Figura 4.3 Parametrii fisurii în asfalt, deschiderea d și lungimea f

În continuare se vor utiliza următoarele notații:

- $n = \frac{n_c - n_{ci}}{n_{cR} - n_{ci}}$ - pentru $n_c \geq n_{ci}$
- **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

Măsurătorile și prelucrarile acestor parametri (Tabel 4.5), lungimea și deschiderea fisurii, pentru epruveta 4b indică:

- Variația deschiderii fisurii d , dar și a lungimii f în raport cu n , este neliniară (Figura 4.4). Modelul de regresie care descrie cel mai bine această relație este de forma:

$$y = \frac{a_0 \cdot n}{1 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2} \quad (22)$$

Pentru $y = d$

$$a_0 = 6.43, a_1 = -0.6115, a_2 = 0.01166,$$

Abaterea standard $S=0.4708$, iar coeficientul de corelare $r=0.998$.

Pentru $y = f$

$$a_0 = 0.01013, a_1 = 0.4565, a_2 = 0.5776,$$

Abaterea standard $S=0.7936$, iar coeficientul de corelare $r=0.9993$.

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).

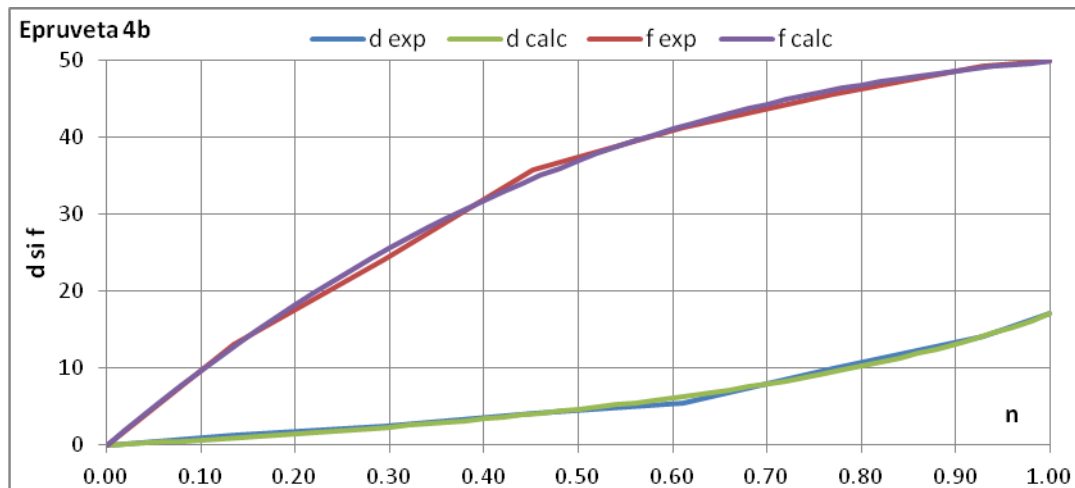


Figura 4.4 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 4b

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului db în raport cu n este modelul MMF (Morgan-Morgan-Finney), Figura 4.5:

$$db = \frac{a_0 \cdot a_1 + a_2 \cdot n^{a_3}}{a_1 + n^{a_3}} \quad (23)$$

$$a_0 = 4.144, a_1 = 1.936 \cdot 10^{-1}, a_2 = 4.58 \cdot 10, a_3 = 3.75$$

Abaterea standard $S=0.961$, iar coeficientul de corelare $r=0.9988$.

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 4.3)

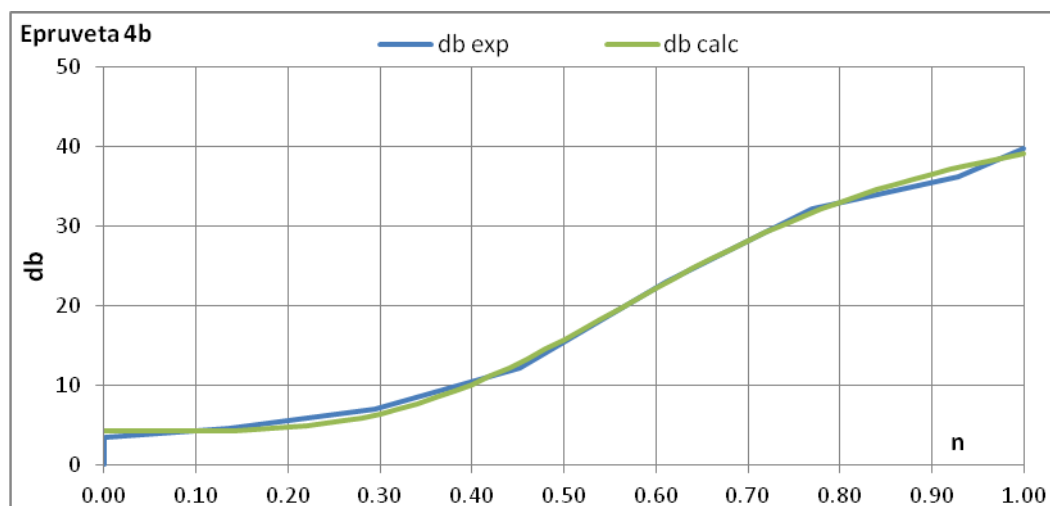


Figura 4.5 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 4b

Tabel 4.5 Rezultate experimentale epruveta 4b

Epruveta	ncf	n	d	f	db
4b	0				3.0088
	385				3.0088
	600				3.0088
	865				3.3028
	1007	0.00	0	0	6.4758
	1041	0.13	1.2226	13.1845	7.5449
	1081	0.29	2.4000	24.0375	9.9082
	1121	0.45	4.2037	35.7716	15.0728
	1161	0.61	5.4849	41.2156	25.9983
	1201	0.77	10.0141	45.5222	35.1315
	1241	0.93	14.1314	49.2098	39.2394
	1259	1.00	17.0370	49.8227	42.8079

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 4.6),
 - deschidere **d** și lungime **f** fisură în asfalt și deschiderea betonului **db** (Figura 4.7)

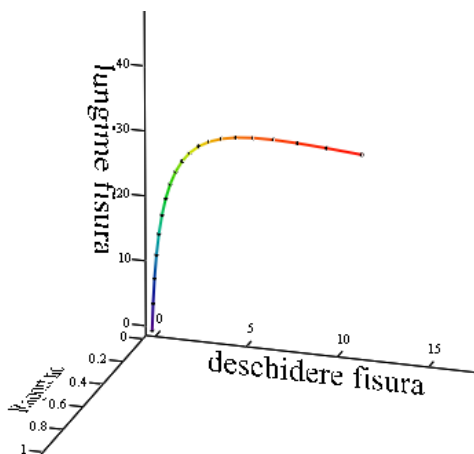


Figura 4.6 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 4b.

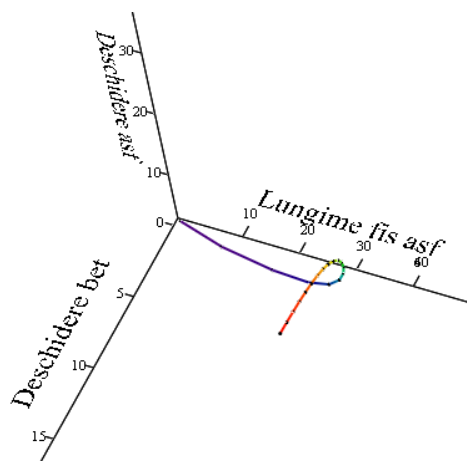


Figura 4.7 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 4b.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.8). Pentru a fi mai sugestiv desenul, s-a raportat valoarea parametrului într-un punct la valoarea totală (exemplu: f/f_{tot} , unde f –lungimea fisurii în punctul considerat, f_{tot} -lungimea din momentul propagării fisurii pe întreaga grosime a stratului asfaltic)

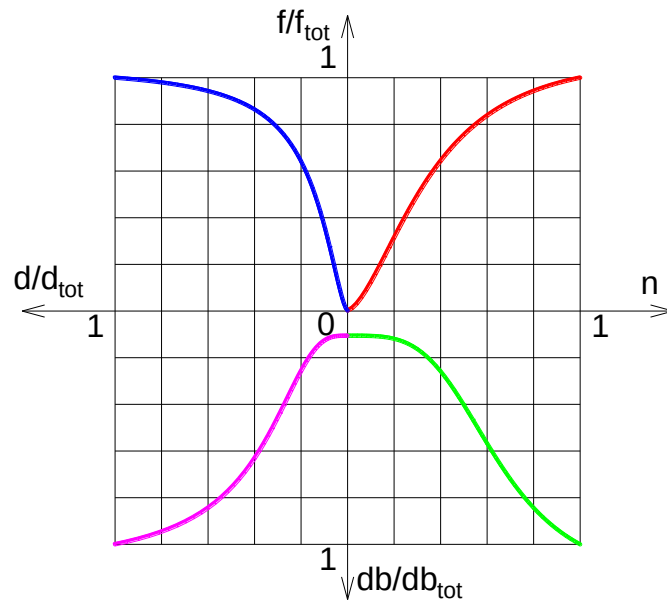


Figura 4.8 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 4b.

Această diagramă de analiză multicriterială permite identificarea parametrului mai puțin vizibil la prelucrarea imagistică a datelor obținute cu softul aferent dispozitivului Fisurimetrului Termostatat.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.9), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.10) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 4.11), se calculează prin derivarea funcției ($\frac{d}{dn}d$, $\frac{d}{dn}f$, $\frac{d}{dn}db$).

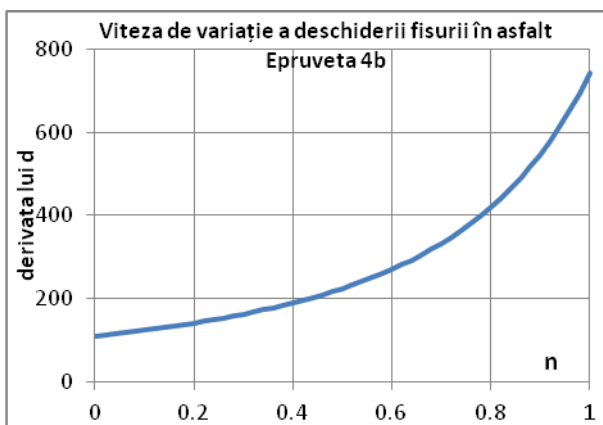


Figura 4.9 Viteza de variație a deschiderii fisurii d , epruveta 4b

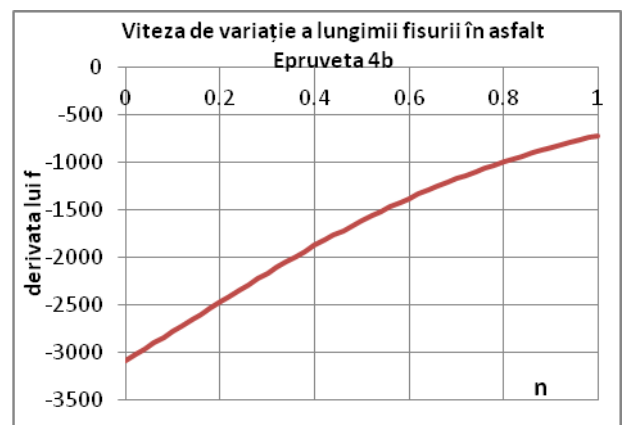


Figura 4.10 Viteza de variație a lungimii fisurii f , epruveta 4b

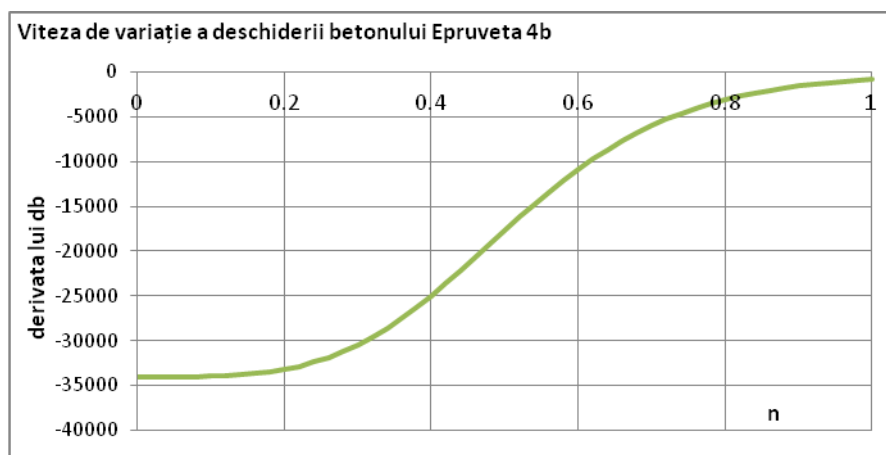


Figura 4.11 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 4b

Se poate constata, în funcție de curbura diagramelor, legătura dintre parametrii fisurării reflective. Astfel, dacă viteza de variație la deschiderea fisurii în asfalt este mai redusă, urmând ca în finalul testului de propagare 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 componenta reologică a acestui material rutier și prin trecerea de la comportarea elastică la cea plastică în timpul dezvoltării stării de deformare locală la vârful fisurii, conform teoriei lui Irwin.

În Figura 4.11, 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 fisură prin frecare 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 sarcină) este mai mare și deci viteza de deschidere a fisurii existente în beton 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.

4.2 Epruvetele 5a și 5b

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs cedarea epruvetelor este de 440daN, numărul de cicluri fiind aproximativ egal: fisurarea la

$n_{ci5a}=12.200$ comparativ cu $n_{ci5b}=12.116$, iar ruperea la $n_{CR5a}=12.556$ comparativ cu $n_{CR5b}=12.429$ (Tabel 4.6). Timpul total de încercare este de aproximativ 3140 secunde la 5a, respectiv 3108 secunde la 5b.

Din punct de vedere a evoluției deformației verticale în funcție de numărul de cicluri (Figura 4.12), până în momentul apariției fisurii în mixtura asfaltică, se constată că proba **5a** are o creștere mai rapidă față de **5b**. În schimb, fisura apare la un număr mai mic cu 84 de cicluri (21 de secunde), iar ruperea cu 127 de cicluri (32 de secunde) la **5b** față de **5a**.

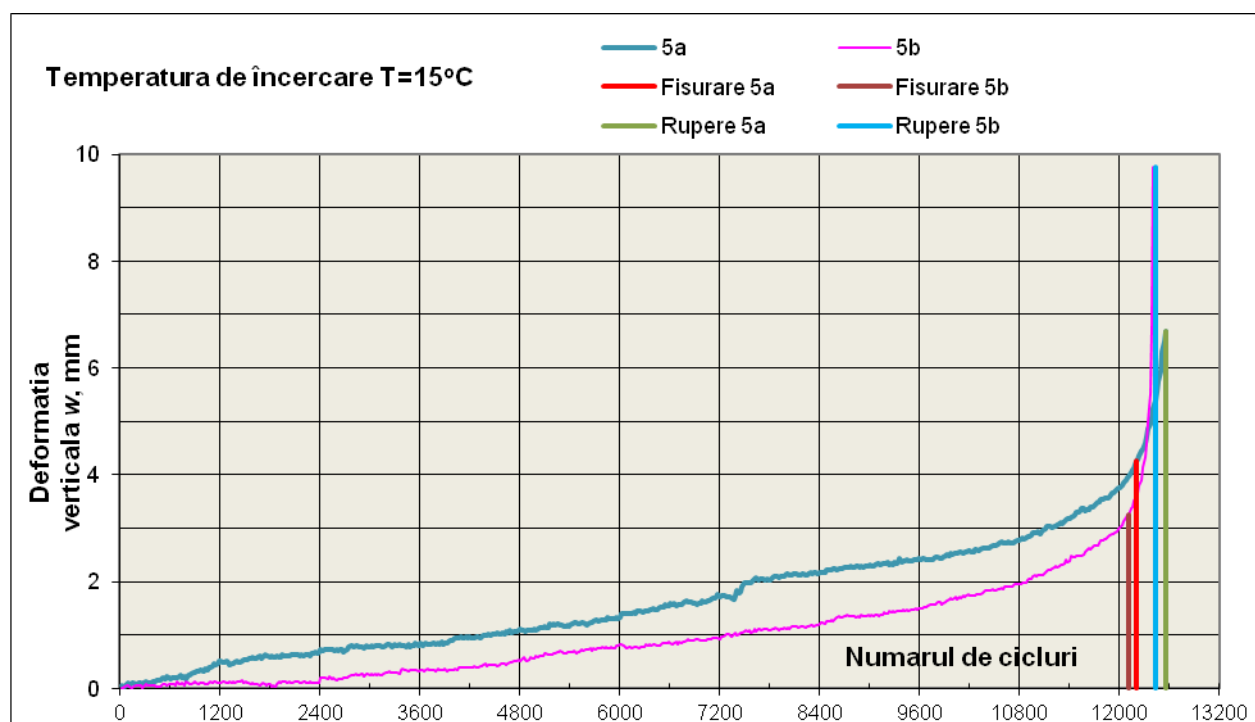


Figura 4.12 Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri pentru epruvetele 5a și 5b

Tabel 4.6 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/rupere, 5a și 5b

Fisurare	5a	Fisurare	5b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w
12200	4.2651	12116	3.2518
Rupere	5a	Rupere	5b
Numărul de cicluri, n_{CR}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{CR}	Deformația verticală, w
12556	6.6868	12429	9.754

Un simplu calcul indică faptul că aproximativ 97% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și doar 3% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 4.7).

Tabel 4.7 Indice de fisurare a mixturii, epruvetele 5a și 5b

Epruveta	Indice de fisurare, $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}}$ (%)	Număr de cicluri
5a	97.16%	336
5b	97.48%	313

Analizând din punct de vedere al deschiderii inițiale a fisurii betonului de ciment (db_i), se observă (Tabel 4.8) că $db_{i5a} > db_{i5b}$, fapt ce ar indica o mai bună conlucrare prin frecare între agregate și/sau între piatra de ciment (transfer la fisura existentă în stratul din beton de ciment). Acest lucru s-ar traduce printr-o durată de serviciu mai mare, invers față de rezultatele experimentale.

Trecând la analiza celui alt parametru măsurat, desprinderea inițială a mixturii asfaltice față de beton, se constată în Tabel 4.8 că $e_{i5b} > e_{i5a}$. Acest lucru îl putem interpreta printr-o diferență între peliculele de bitum cu care s-au făcut lipirea (amorsarea la interfața) plăcilor de asfalt de beton la cele 2 epruvete. Observăm (Figura 4.13) că bitumul nu este prezent pe întreaga suprafață a plăcii de asfalt (implicit pe cea de beton de ciment prefisurat, ceea ce poate însemna neuniformitatea condițiilor de lucru).



5a

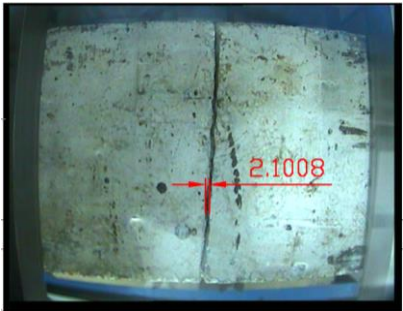
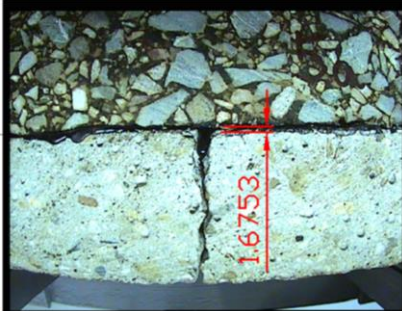
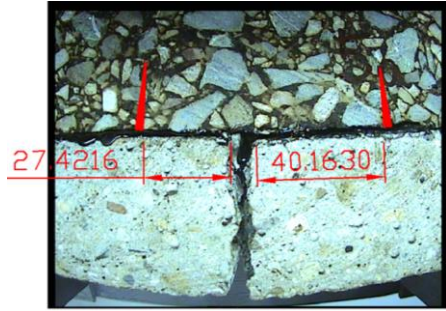
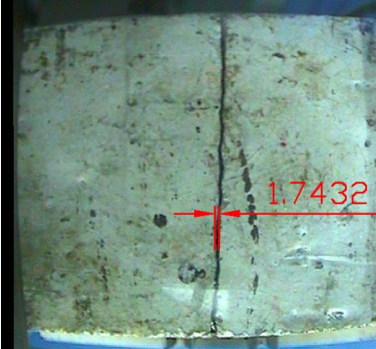
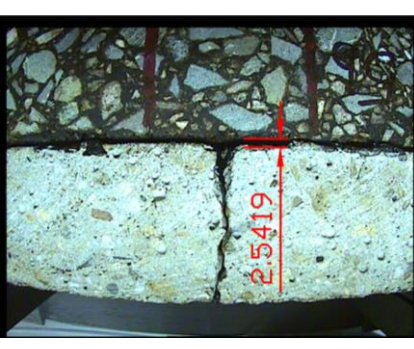
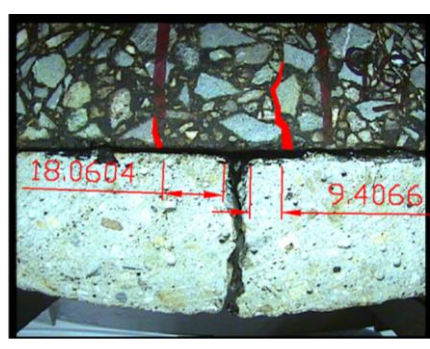


5b

Figura 4.13 Suprafața de amorsare/lipire cu bitum, epruvetele 5a și 5b

În cazul epruvetei **5a**, bitumul acoperă aproximativ 95%, comparativ cu **5b**, unde este de 80%. La ambele, suprafața neacoperită de bitum (unde nu există conlucrare între beton și asfalt) se găsește la extremitățile plăcii.

Tabel 4.8 Valorile deschiderii inițiale db_i , desprinderii inițiale (amorsajul de bitum) e_i și ale excentricității fisurii în asfalt e_f , epruvetele 5a și 5b

Epruveta	Vedere sus db_i = deschiderea inițială a betonului (mm)	Vedere laterală e = desprinderea inițială a plăcii de asfalt de betonul de ciment (mm)	Vedere laterală fisurare e_f = excentricitatea fisurii plăcii de asfalt față de fisura betonului de ciment (mm)
5a	 $db_i=2.1008$	 $e=1.6753$	 $e_f=27.4216 / 40.1630$
5b	 $db_i=1.7432$	 $e=2.5419$	 $e_f=18.0604 / 9.4066$

În concluzie, trebuie avut în vedere nu numai grosimea stratului de bitum aplicat, ci și modul în care este distribuit pe suprafața plăcii de asfalt și implicit de beton. Aceasta este una din explicațiile comportării asemănătoare în timp a celor 2 epruvete, solicitate la încărcări echivalente traficului rutier, chiar dacă deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment ar fi indicat o durată de serviciu mai mare pentru 5a.

Un alt aspect este poziția fisurii apărute în asfalt comparativ cu cea din beton. Excentricitatea fisurilor, una față de alta, se poate datora suprafeței neacoperite de bitum, după ce placa de asfalt s-a lipit de cea de beton. În Figura 4.13 se poate observa că există o parte unde bitumul lipsește (marcată cu alb), chiar în dreptul fisurii. Cu alte cuvinte, la prepararea epruvetelor trebuie ca turnarea bitumului să se facă în lungul plăcii, liniar și uniform. De asemenea trebuie controlată pe viitor cantitatea și tipul de bitum utilizat la amorsare.

Măsurătorile și prelucrările acestor parametri (Tabel 4.9), lungimea și deschiderea fisurii, pentru epruveta 5b indică:

- Variația deschiderii fisurii **d**, dar și a lungimii **f** în raport cu **n**, este neliniară (Figura 4.14). Modelul de regresie este același ca la epruveta 4b:

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

Pentru $y = d$

$$a_0 = 4.801, a_1 = 4.775, a_2 = -4.79,$$

Abaterea standard $S=0.655$, iar coeficientul de corelare $r=0.9996$.

Pentru $y = f$

$$a_0 = 62.13, a_1 = 4.984, a_2 = -4.734,$$

Abaterea standard $S=1.636$, iar coeficientul de corelare $r=0.9973$.

Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$): $n_{cf} = 12350$ cicluri ($n = 0.8$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 80% din durata totală a propagării acesteia).

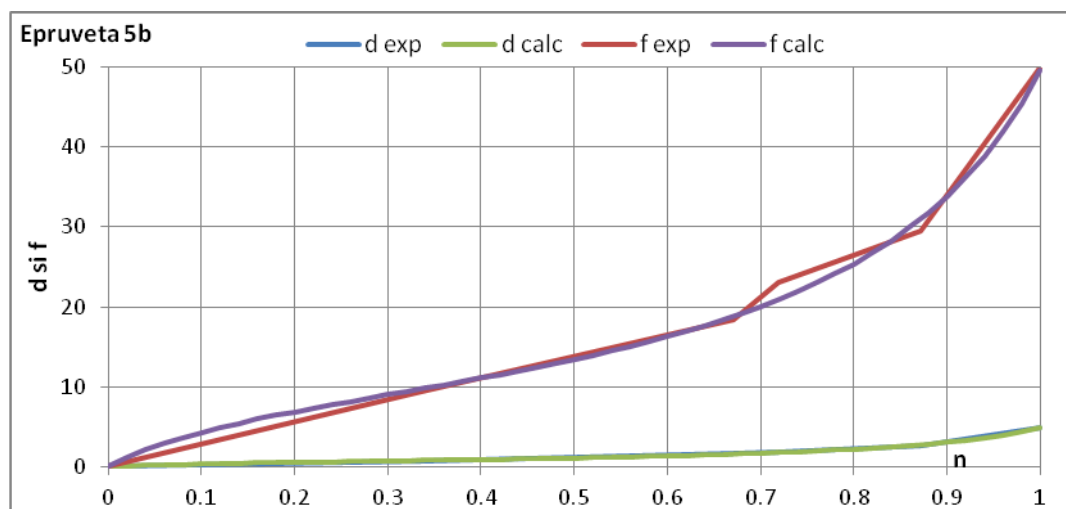


Figura 4.14 Variația deschiderii **d** și lungimii fisurii **f** în funcție de **n**, epruveta 6a

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului **db** în raport cu **n** este modelul Bleasdale, Figura 4.15:

$$db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{\frac{1}{a_2}}$$

$$a_0 = 2.965 \cdot 10^{-1}, a_1 = -2.694 \cdot 10^{-1}, a_2 = 1.386$$

Abaterea standard $S=0.3413$, iar coeficientul de corelare $r=0.998$.

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din modelul Bleasdale se va adăuga valoarea deschiderii inițiale db_i (Tabel 4.8)

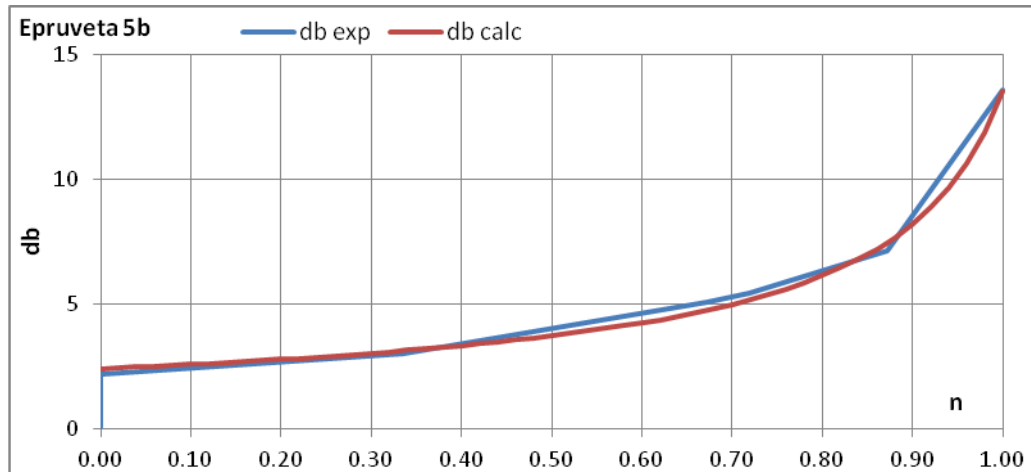


Figura 4.15 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 5b

Tabel 4.9 Rezultate experimentale epruveta 5b

Epruveta	nc	n	d	f	db
5b	0				1.7432
	5461				1.7432
	6661				1.8366
	7861				1.9549
	9061				2.173
	10261				2.3589
	11461				2.7259
	12116	0	0.0000	0	3.911
	12221	0.335463	0.7461	9.3256	4.7631
	12326	0.670927	1.6232	18.35478	6.8209
	12341	0.71885	1.8180	23.1514	7.1553
	12389	0.872204	2.6756	29.4654	8.9007
	12429	1	4.8850	50	15.3147

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 (Figura 4.16),
 - deschidere d și lungime f fisură în asfalt și deschiderea fisurii inițiale a betonului db (Figura 4.17)

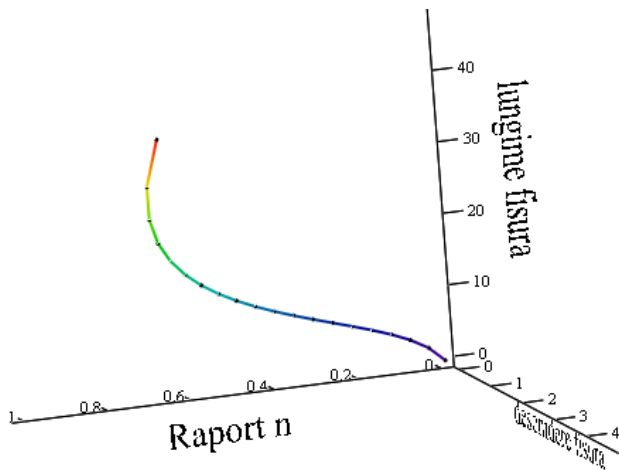


Figura 4.16 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 5b.

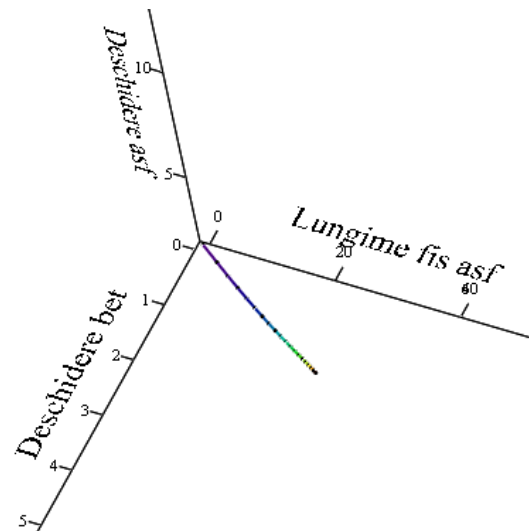


Figura 4.17 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 5b.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.18).

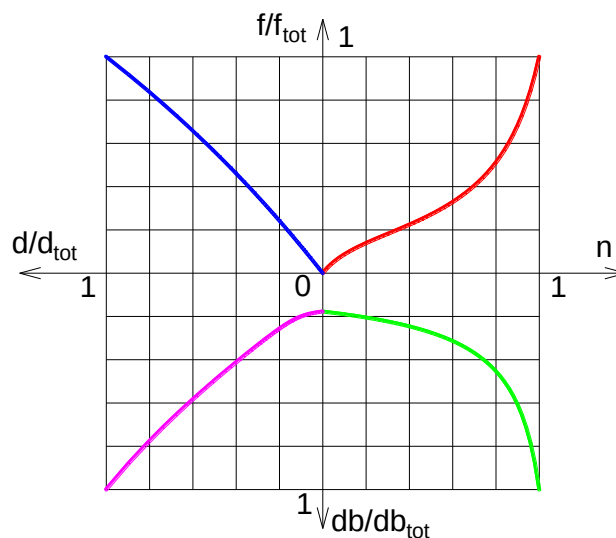


Figura 4.18 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 5b.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.19), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.20) prin asfalt prezintă o diagramă de variație parabolică asemănătoare, care se explică prin faptul că la inițierea fisurii prin asfalt, secțiunea are capacitatea de a rezista efectului de propagare reflectivă. Acest proces corespunde unei viteze de variație a deschiderii/lungimii fisurii în asfalt mai reduse. Urmează un palier al vitezei în perioada de plasticizare a materialului de la vârful fisurii, conform modelului Irwin, după care viteza crește semnificativ când fisura se propagă peste jumătate din grosimea stratului.
- Viteza de variație a deschiderii betonului de ciment este prezentată în Figura 4.21. Aceasta are o variație corespunzătoare transferului în fisura existentă. În momentul

în care nu mai există frecare de contact în fisura din stratul din beton (pierdere de transfer în fisură), viteza deschiderii crește semnificativ.

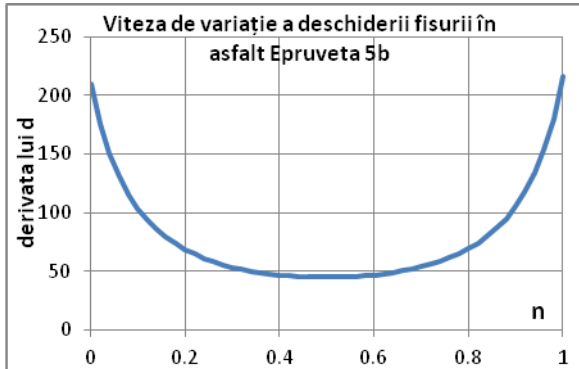


Figura 4.19 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 5b

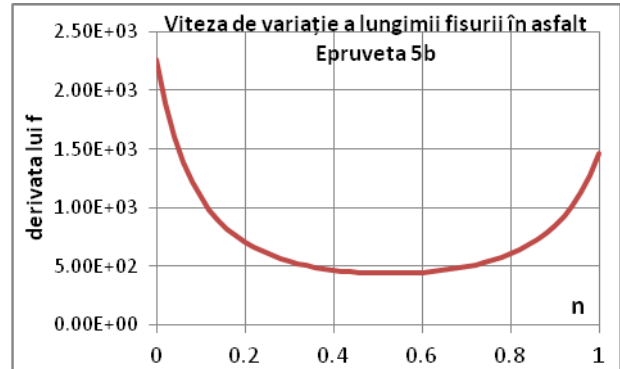


Figura 4.20 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 5b

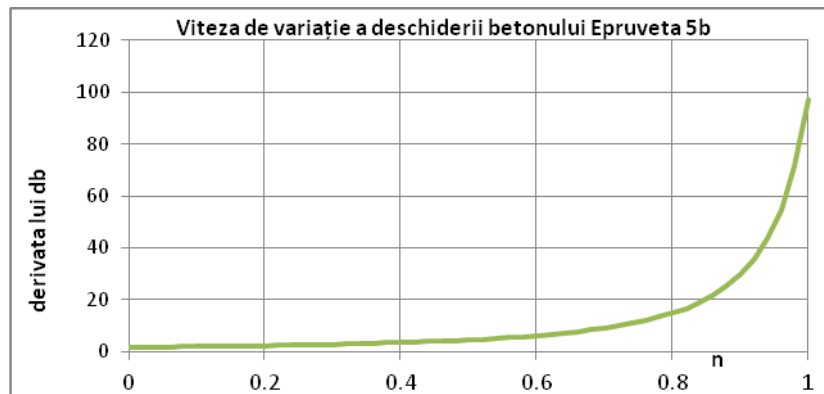


Figura 4.21 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 5b

4.3 Epruveta 6a

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs ruperea este de 360daN, numărul de cicluri fiind: fisurarea la $n_{ci6a}=9974$, iar ruperea la $n_{cR6a}=10520$ (Tabel 4.10). Timpul total de încercare este de 2630 secunde.

Din punct de vedere a evoluției deformației verticale în funcție de numărul de cicluri (Figura 4.22), aceasta este asemănătoare cu a celorlalte epruvete de mai sus.

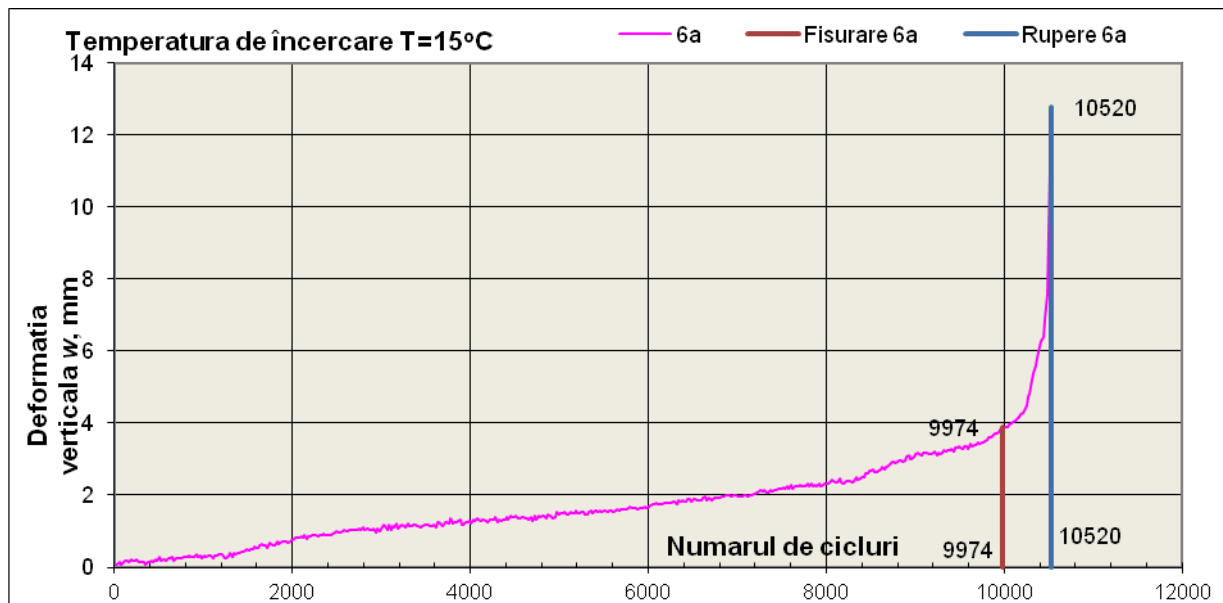


Figura 4.22 Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri pentru epruveta 6a

Tabel 4.10 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/rupere, epruveta 6a

Fisurare	6a
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w
9974	3.8933
Rupere	6a
Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w
10520	12.7563

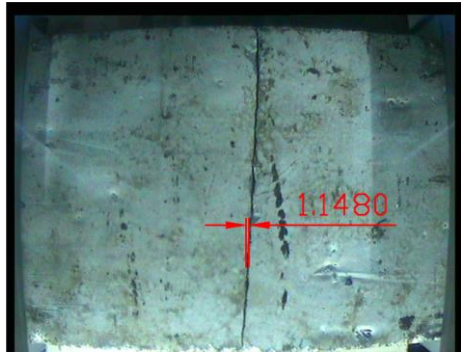
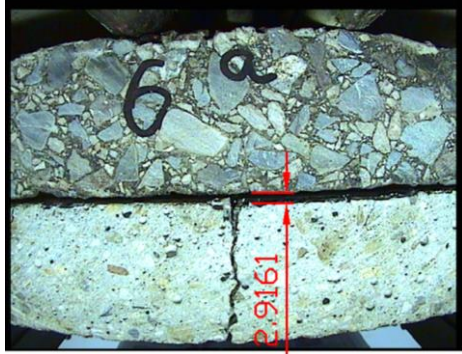
Aproximativ 95% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 5% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 4.11).

Tabel 4.11 Indice de fisurare a mixturii, epruveta 6a

Epruveta	Indice de fisurare reflectivă, $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} (\%)$	Numărul de cicluri
6a	94.81%	546

În Tabel 4.12 sunt dați cei doi parametrii inițiali ai epruvetei 6a: deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment db_i și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton e_i .

Tabel 4.12 Valorile deschiderii inițiale db_i , desprinderii inițiale (amorsajul de bitum) e_i și ale excentricității fisurii în asfalt e_i , epruveta 6a

Epruveta	Vedere sus	Vedere laterală
	db = deschiderea inițială a betonului (mm)	e = desprinderea inițială a plăcii de asfalt de betonul de ciment (mm)
6a		
	$db_i=1.148$	$ei=2.9161$

Măsurătorile și prelucrările parametrilor fisurării (Tabel 4.13), lungimea și deschiderea fisurii în asfalt, deschiderea betonului de ciment, pentru epruveta 6a indică:

- Variația deschiderii fisurii d , dar și a lungimii f în raport cu n , este neliniară (Figura 4.23). Modelul de regresie este același ca la epruveta 4b:

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

Pentru $y = d$

$$a_0 = 4.545, a_1 = -1.018, a_2 = -0.189,$$

Abaterea standard $S=0.986$, iar coeficientul de corelare $r=0.9955$.

Pentru $y = f$

$$a_0 = 56.78, a_1 = 1.231, a_2 = -1.065,$$

Abaterea standard $S=1.434$, iar coeficientul de corelare $r=0.997$.

Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$): $n_{cf} = 10300$ cicluri ($n = 0.6$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 60% din durata totală a propagării acesteia).

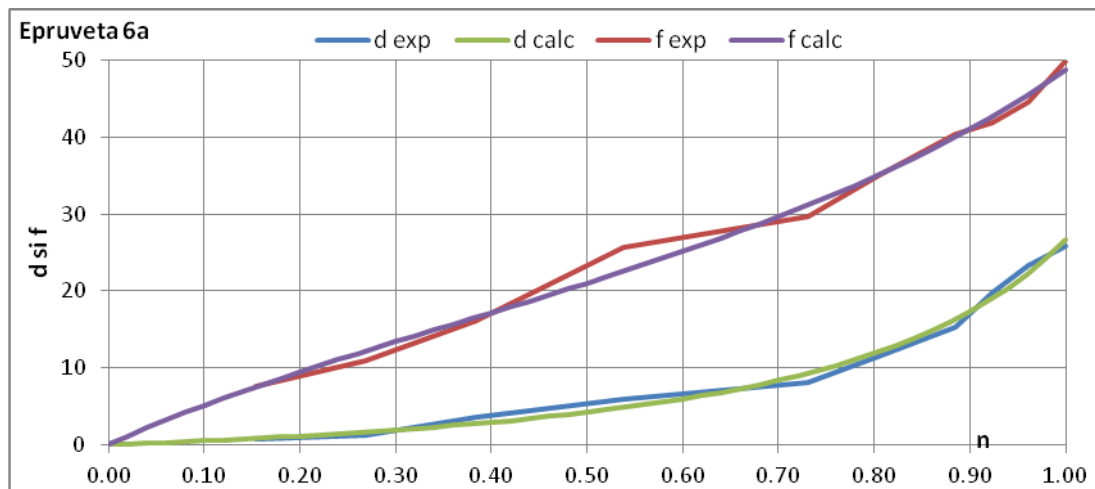


Figura 4.23 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 6a.

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului db în raport cu n este modelul Bleasdale, Figura 4.24:

$$db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{\frac{1}{a_2}}$$

$$a_0 = 4.49 \cdot 10^{-2}, a_1 = -4.168 \cdot 10^{-2}, a_2 = 2.746$$

Abaterea standard $S=0.228$, iar coeficientul de corelare $r=0.997$.

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din modelul Bleasdale se va adăuga valoarea deschiderii inițiale db_i (Tabel 4.12)

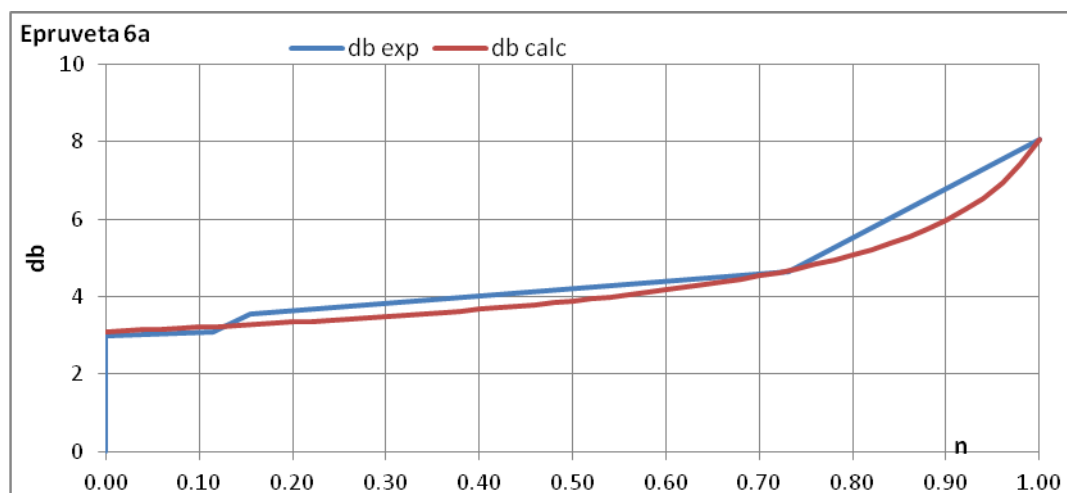


Figura 4.24 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 6a

Tabel 4.13 Rezultate experimentale epruveta 6^a

Epruveta	nc	n	d	f	db
6a	0				1.1480
	6698				1.4525
	7286				1.8509
	8609				2.2960
	8987				3.0468
	9974	0.00	0.00	0.00	4.1328
	10037	0.12			4.2395
	10058	0.15	0.67	7.52	4.6858
	10121	0.27	1.26	10.97	4.6858
	10184	0.38	3.56	16.21	4.6858
	10268	0.54	5.99	25.61	4.6858
	10373	0.73	8.11	29.68	5.8034
	10415	0.81	11.56	35.29	5.8034
	10457	0.88	15.34	40.44	5.8034
	10478	0.92	19.79	41.82	5.8034
	10499	0.96	23.36	44.63	5.8034
	10520	1.00	25.75	50.00	9.2098

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** (Figura 4.25),
 - deschidere **d** și lungime **f** fisură în asfalt și deschiderea betonului **db** (Figura 4.26)

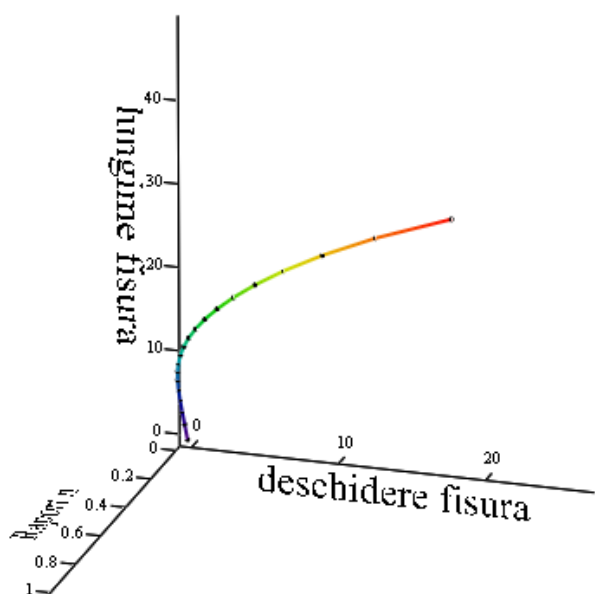


Figura 4.25 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 6a.

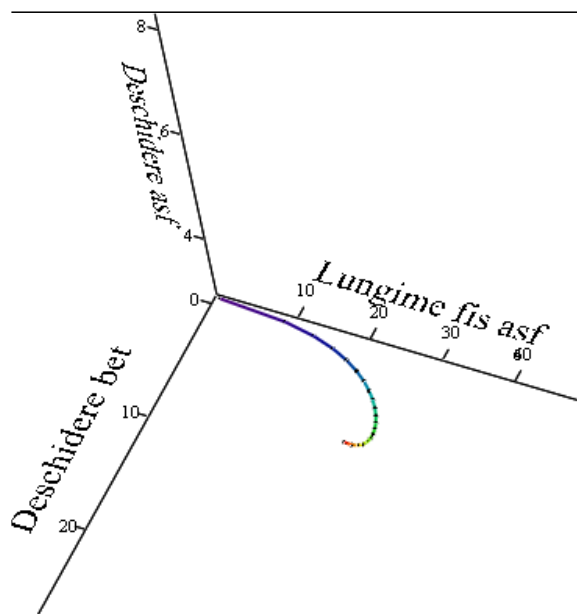


Figura 4.26 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 6a.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.27).

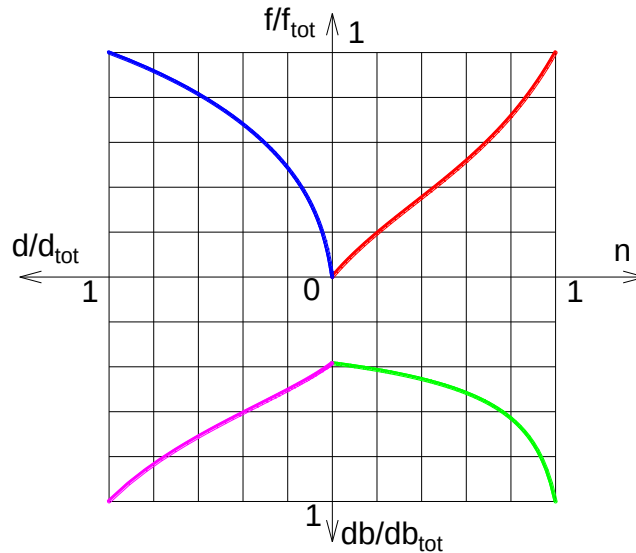


Figura 4.27 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 6a.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.28), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.29) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 4.30).

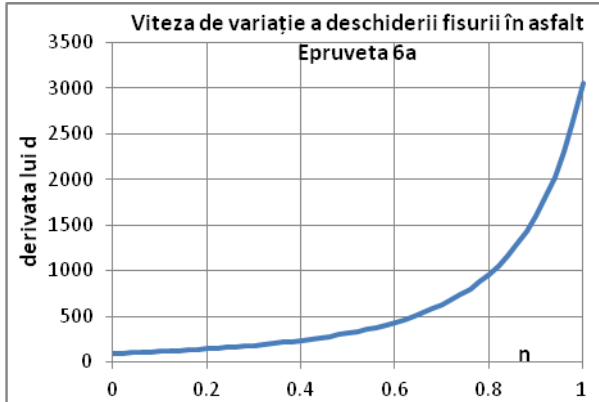


Figura 4.28 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 6a

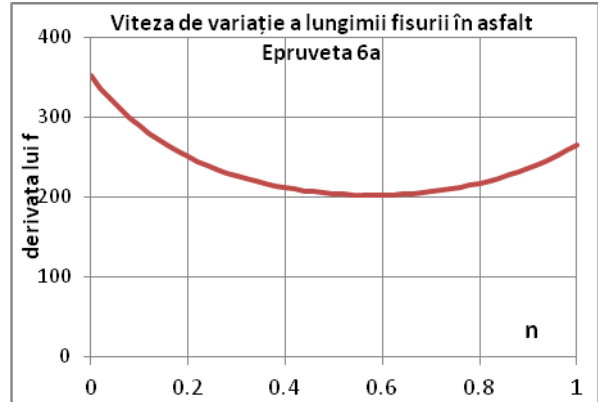


Figura 4.29 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 6a

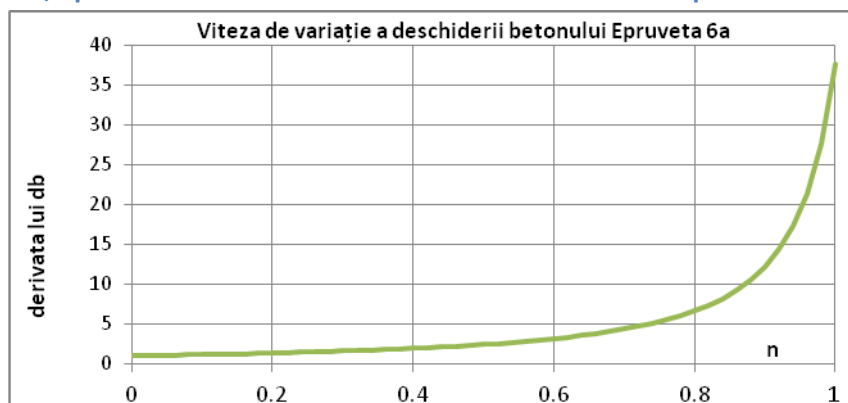


Figura 4.30 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 6a

4.4 Epruvetele 7a și 7b

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs cedarea epruvetelor este de 160daN pentru 7b și 280daN pentru 7a, numărul de cicluri fiind: fisurarea la $n_{ci7a}=7.496$ comparativ cu $n_{ci7b}=4178$, iar ruperea la $n_{cR7a}=7790$ comparativ cu $n_{cR7b}=4283$ (Tabel 4.14). Timpul total de încercare este de 1948 secunde la 7a, respectiv 1071 secunde la 7b.

Din punct de vedere a evoluției deformației verticale în funcție de numărul de cicluri (Figura 4.31), până în momentul apariției fisurii în mixtura asfaltică, se constată că proba **7b** are o creștere mai rapidă față de **7a**. Fisura apare la un număr de cicluri mai mic cu 3318 (830 secunde), iar ruperea cu 3507 de cicluri (877 de secunde) la **7b** față de **7a**.

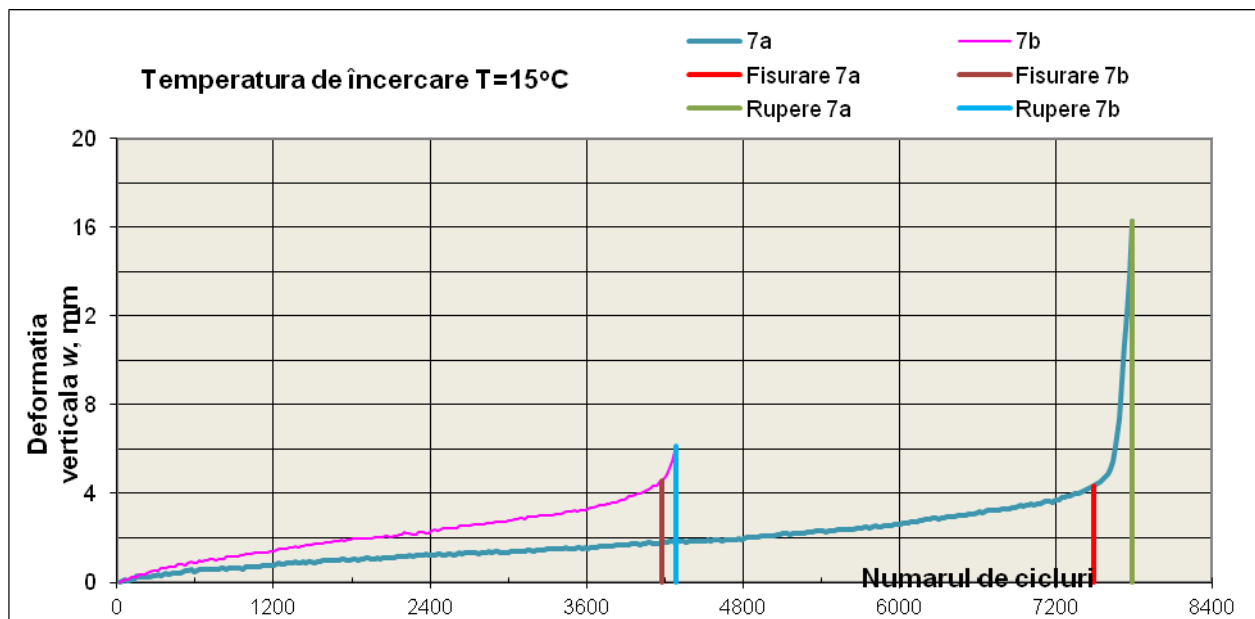


Figura 4.31 Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri, 7a și 7b

Tabel 4.14 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/ruptură, 7a și 7b

Fisurare	7a	Fisurare	7b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w
7496	4.3402	4178	4.5984
Rupere	7a	Rupere	7b
Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w
7790	16.2704	4283	6.1332

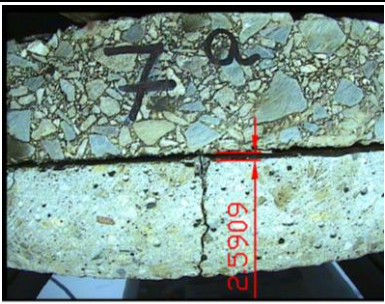
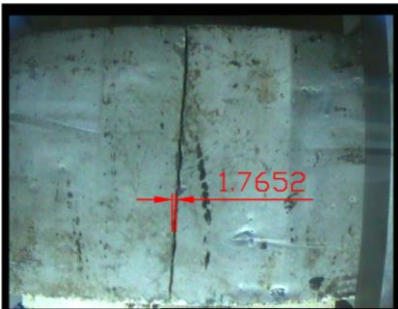
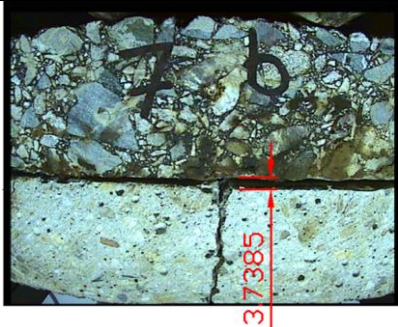
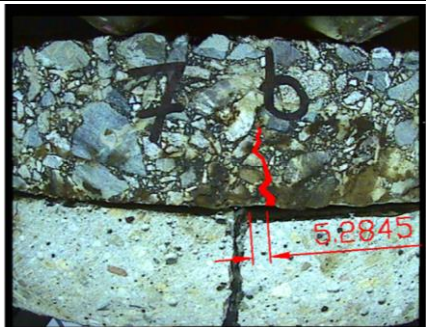
Un simplu calcul indică faptul că aproximativ 96-97% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 3-4% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 4.15).

Tabel 4.15 Indicele de fisurare a mixturii, 7a și 7b

Epruveta	Indice de fisurare reflectivă, $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} (\%)$	Numărul de cicluri
7a	96.23%	294
7b	97.57%	105

Atât deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment db_i , cât și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton e_i , sunt mai mici în cazul epruvetei 7a față de epruveta 7b (Tabel 4.16). Măsurătorile acestor 2 parametri reprezintă o confirmare a comportării mai bune a probei 7a.

Tabel 4.16 Valorile deschiderii inițiale db_i , desprinderii inițiale (amorsajul de bitum) e_i și ale excentricității fisurii în asfalt e_f 7a și 7b

Epruveta	Vedere sus db = deschiderea inițială a betonului (mm)	Vedere laterală e = desprinderea inițială a plăcii de asfalt de betonul de ciment (mm)	Vedere laterală fisurare e_f = excentricitatea fisurii plăcii de asfalt față de fisura betonului de ciment (mm)
7a	 $db_i=1.2487$	 $ei=2.5909$	 $e_f=0$
7b	 $db_i=1.7652$	 $ei=3.7385$	 $e_f=5.2845$

Măsurătorile și prelucrările parametrilor fisurării (Tabel 4.17 și Tabel 4.18), lungimea și deschiderea fisurii în asfalt, deschiderea betonului de ciment, pentru epruvetele 7a și 7b indică:

- Variația deschiderii fisurii d , dar și a lungimii f în raport cu n , este neliniară (Figura 4.32, Figura 4.33). Modelul de regresie este același ca la epruveta 4b:

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

Pentru $y = d$

7a $a_0 = 3.584, a_1 = -0.9611, a_2 = 0.2085,$

Abaterea standard $S=0.4336$, iar coeficientul de corelare $r=0.9965$.

7b $a_0 = 1.199, a_1 = 1.527, a_2 = -2.169,$

Abaterea standard $S=0$, iar coeficientul de corelare $r=1$.

Pentru $y = f$

7a $a_0 = 25.54, a_1 = -0.7563, a_2 = 0.2773,$

Abaterea standard $S=1.434$, iar coeficientul de corelare $r=0.997$.

7b $a_0 = 23.66, a_1 = -0.2574, a_2 = -0.2694,$

Abaterea standard $S=0$, iar coeficientul de corelare $r=1$.

Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$):

- 7a $-n_{cf} = 7680$ cicluri ($n = 0.62$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 62% din durata totală a propagării acesteia).
- 7b $-n_{cf} = 4250$ cicluri ($n = 0.69$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 69% din durata totală a propagării acesteia).

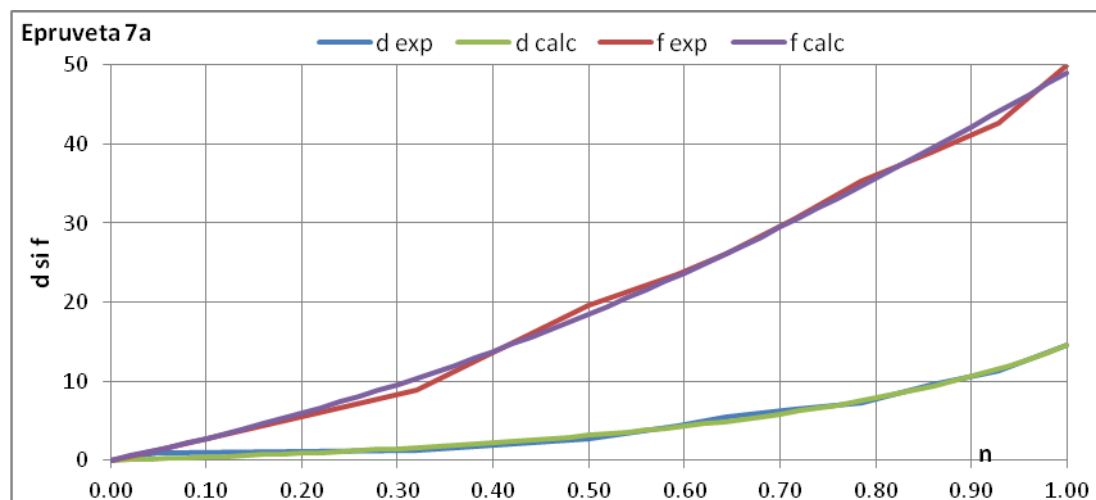


Figura 4.32 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 7a.

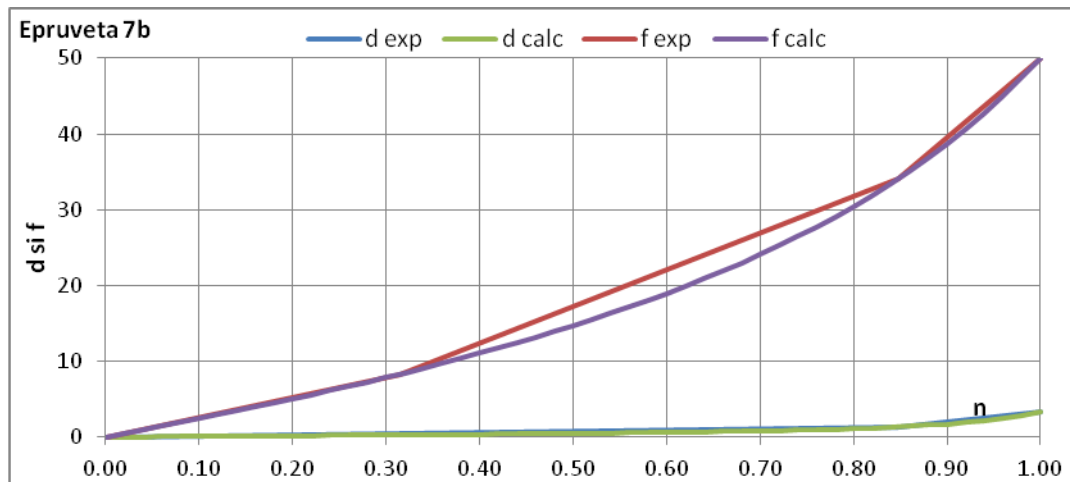


Figura 4.33 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 7b.

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului db în raport cu n este modelul MMF pentru 7a și Bleasdale pentru 7b, Figura 4.34 și Figura 4.35:

$$7a - db = \frac{a_0 \cdot a_1 + a_2 \cdot n^3}{a_1 + n^3}$$

$$7b - db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{\frac{1}{a_2}}$$

7a $a_0 = 6.323, a_1 = 2.367 \cdot 10^{-2}, a_2 = 8.8 \cdot 10^2, a_3 = 4.209$

Abaterea standard $S=1.34$, iar coeficientul de corelare $r=0.998$.

7b $a_0 = 1.014 \cdot 10^{-2}, a_1 = -9.985 \cdot 10^{-2}, a_2 = 3.902$

Abaterea standard $S=0.058$, iar coeficientul de corelare $r=0.999$.

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din cele 2 modeluri se va adăuga valoarea deschiderii inițiale db_i (Tabel 4.16)

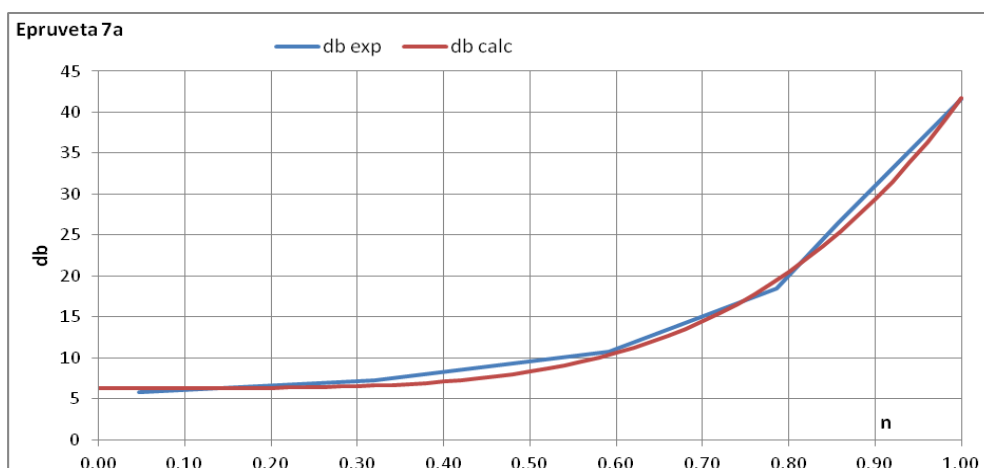


Figura 4.34 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 7a

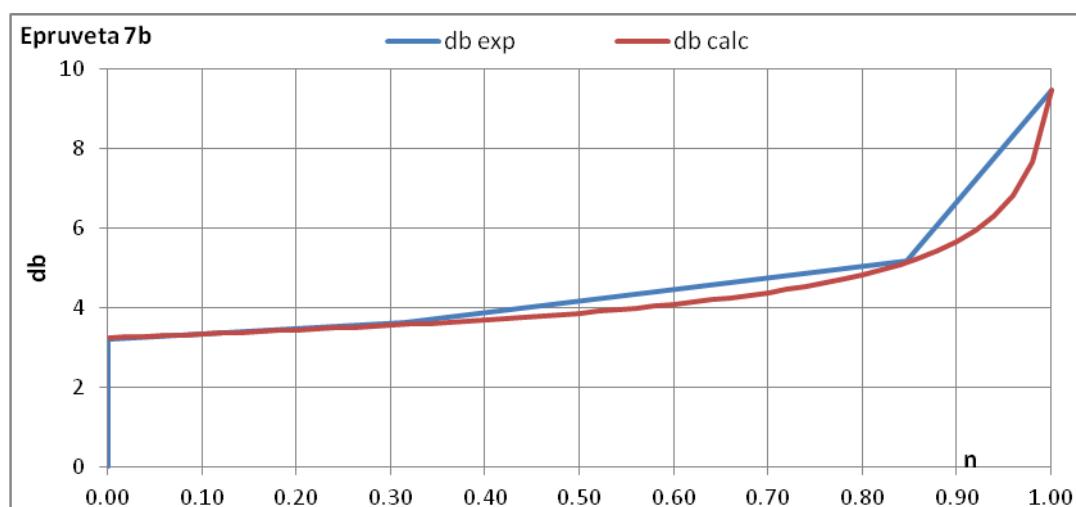


Figura 4.35 Variația deschiderii betonului db în funcție de n, epruveta 7b

Tabel 4.17 Rezultate experimentale epruveta 7^a

Epruveta	nc	n	d	f	db
7a	0				1.2487
	3222				1.4513
	4662				1.9438
	5142				2.0136
	5622				2.2556
	6102				2.5963
	6582				3.2163
	7062				3.7925
	7302				4.2869
	7496	0.00	0	0	
	7510	0.05	0.879	1.157	7.0409
	7590	0.32	1.279	8.842	8.5028
	7643	0.50	2.627	19.601	
	7670	0.59	4.279	23.535	12.0697
	7685	0.64	5.384	26.045	
	7706	0.71	6.39	30.451	
	7727	0.79	7.239	35.359	19.7132
	7748	0.86	9.525	38.948	27.7478
	7769	0.93	11.367	42.748	
	7790	1.00	14.614	50	42.8647

Tabel 4.18 Rezultate experimentale epruveta 7b

Epruveta	nc	n	d	f	db
7b	0				1.7652
	371				1.7652
	851				2.3986
	1331				2.5386
	1811				2.6482
	2291				2.9124
	2771				3.2208
	3251				3.3679
	3731				3.8362
	4178	0.00	0.0000	0	4.9710
	4211	0.31	0.4978	8.3318	5.3698
	4267	0.85	1.3805	34.091	6.9224
	4283	1.00	3.3450	50	11.2365

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** (Figura 4.36 și Figura 4.37),
 - deschidere **d** și lungime **f** fisură în asfalt și deschiderea betonului **db** (Figura 4.38 și Figura 4.39)

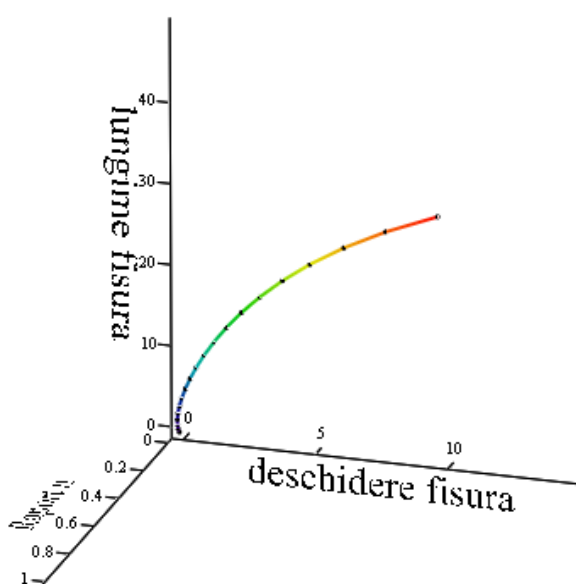


Figura 4.36 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 7a.

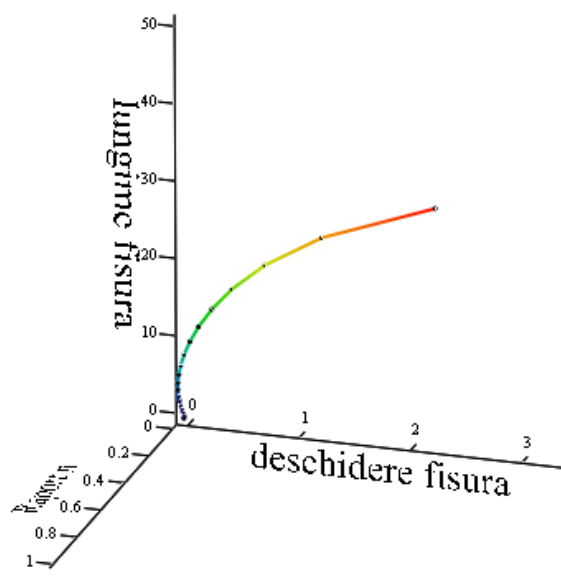


Figura 4.37 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 7b.

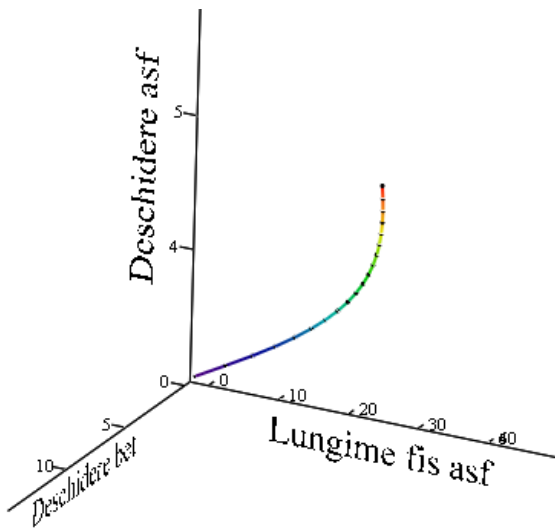


Figura 4.38 Reprezentare tridimensională d , f , db , epruveta 7a.

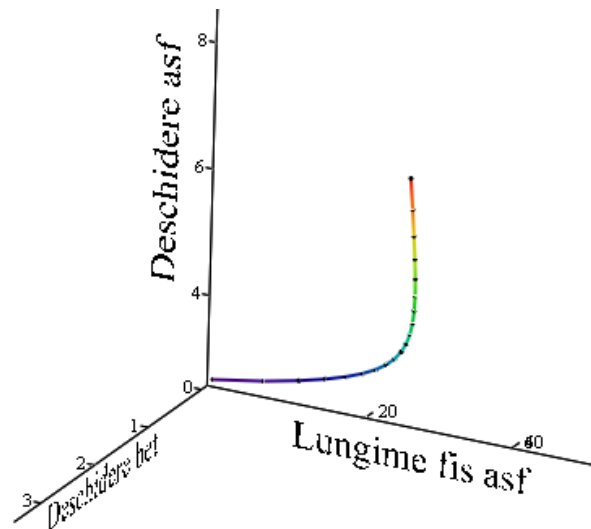


Figura 4.39 Reprezentare tridimensională d , f , db , epruveta 7b.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.40 și Figura 4.41).

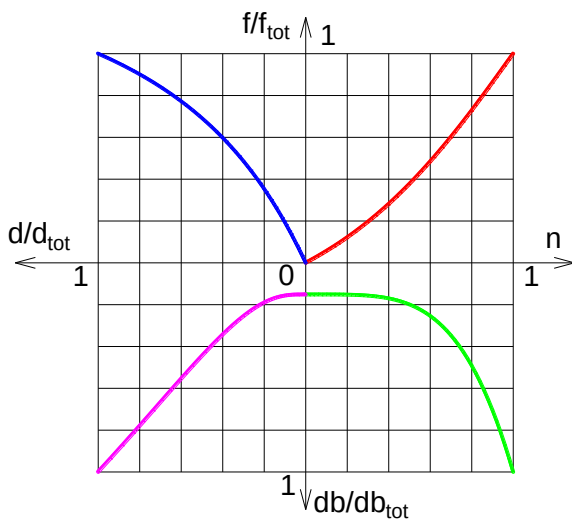


Figura 4.40 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 7a.

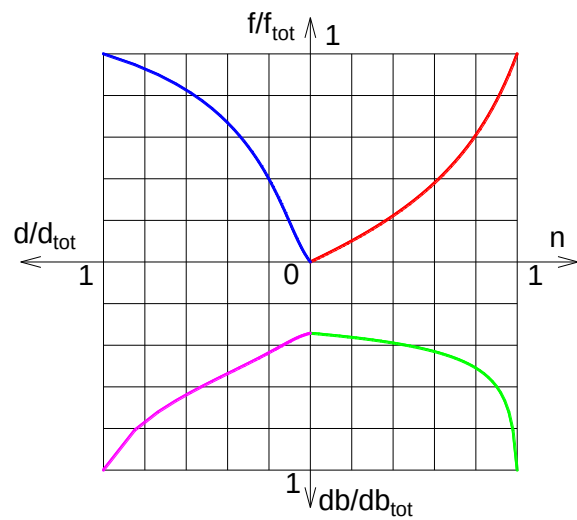


Figura 4.41 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 7b.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.42, Figura 4.43), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.44, Figura 4.45) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 4.46, Figura 4.47).

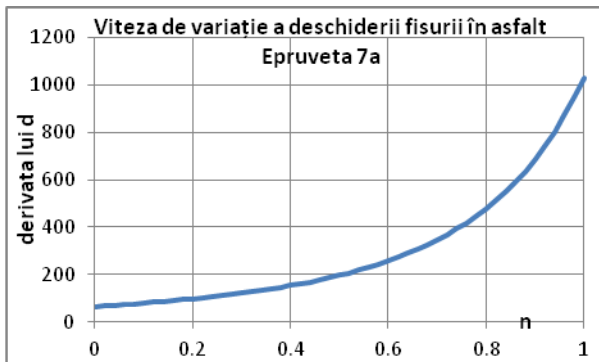


Figura 4.42 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 7a

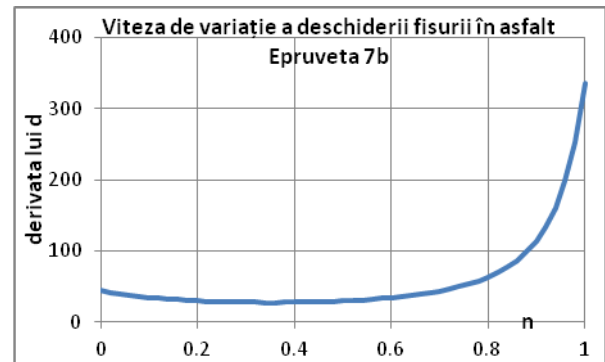


Figura 4.43 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 7b

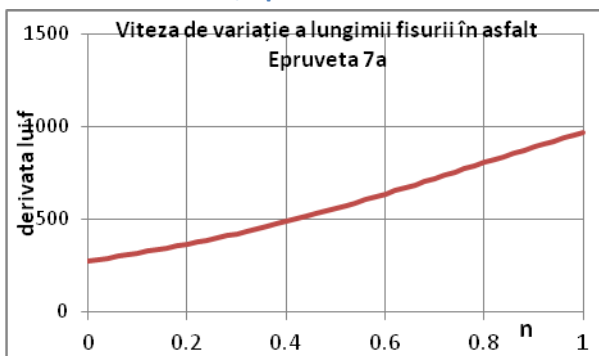


Figura 4.44 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 7a

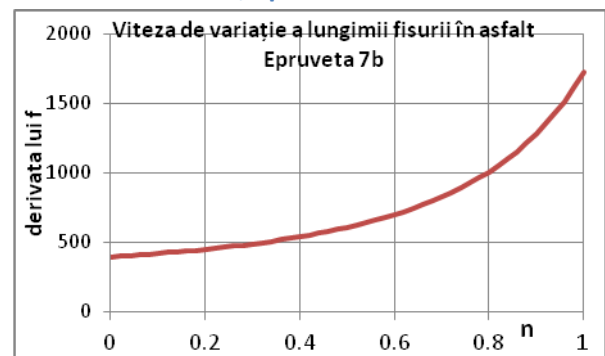


Figura 4.45 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 7b

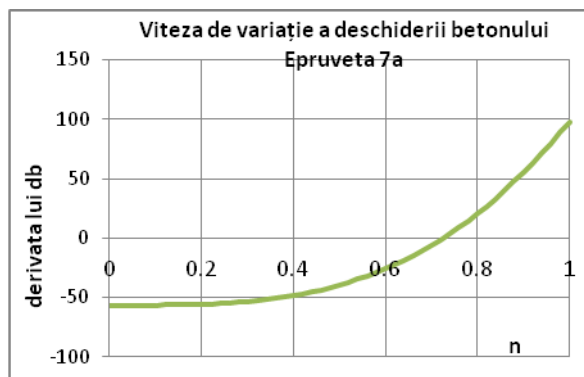


Figura 4.46 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 7a

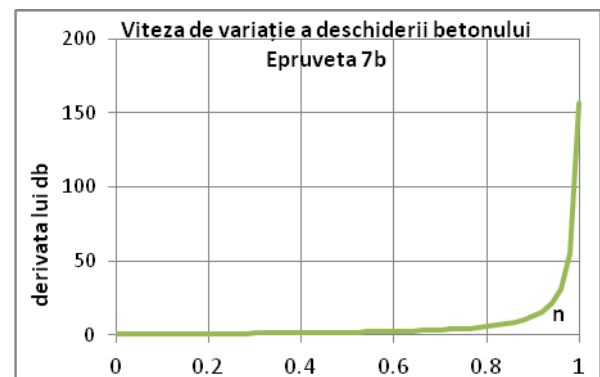


Figura 4.47 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 7b

4.5 Epruvetele 8a și 8b

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs cedarea epruvetelor este de 400daN pentru 8a și 440daN pentru 8b, numărul de cicluri fiind: fisurarea la $n_{ci8a}=10.982$ comparativ cu $n_{ci8b}=11.550$, iar ruperea la $n_{cr8a}=11338$ comparativ cu $n_{cr8b}=12081$ (Tabel 4.19). Timpul total de încercare este de 2835 secunde la 8a, respectiv 3119 secunde la 8b.

Din punct de vedere a evoluției deformației verticale în funcție de numărul de cicluri (Figura 4.48), până în momentul apariției fisurii în mixtura asfaltică, se constată că proba **8a** are o creștere mai rapidă față de **8b**. Fisura apare la un număr comparabil de cicluri, la o diferență de 568 (142 secunde), iar ruperea la 743 de cicluri (186 de secunde) la **8a** față de **8b**.

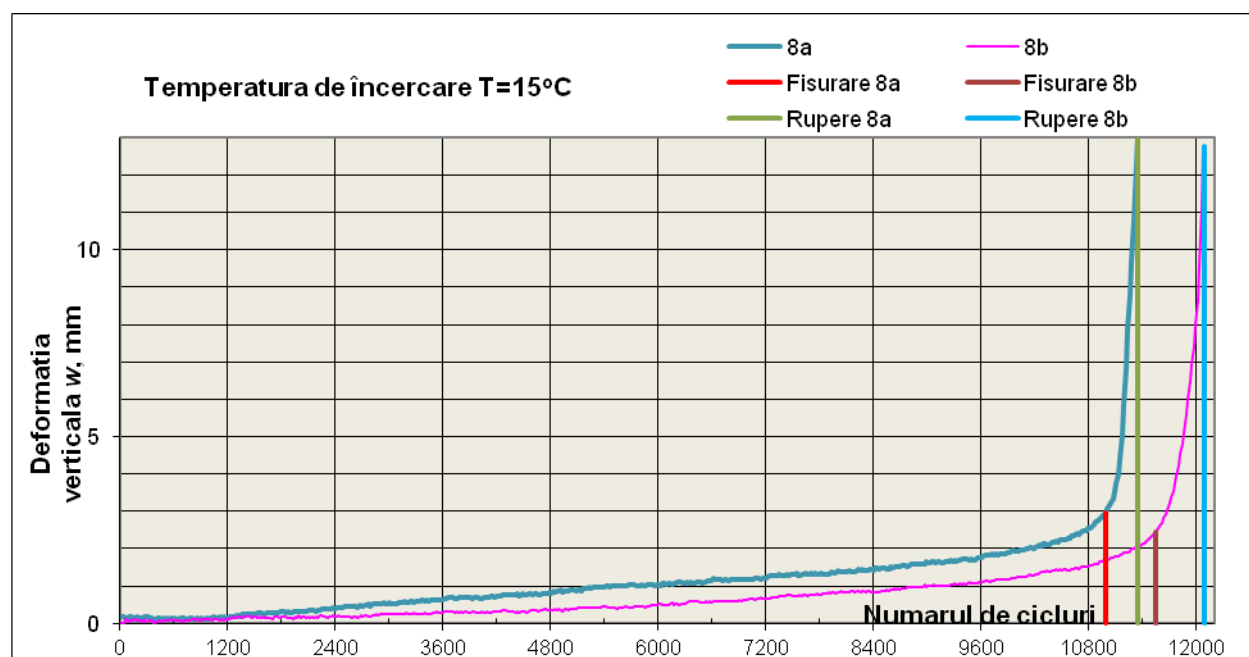


Figura 4.48 Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri, 8a și 8b

Tabel 4.19 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/ruptură, 8a și 8b

Fisurare	8a	Fisurare	8b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w
10982	2.9567	11550	2.4507
Rupere	8a	Rupere	8b
Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w
11338	13.0771	12081	12.7619

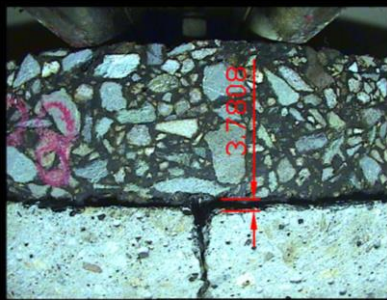
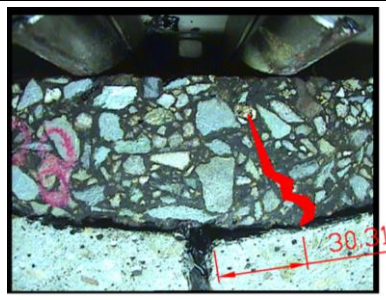
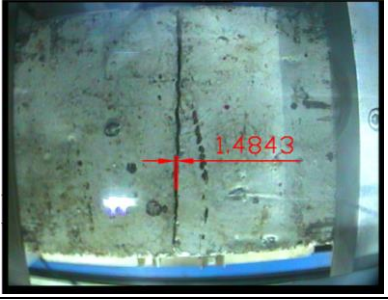
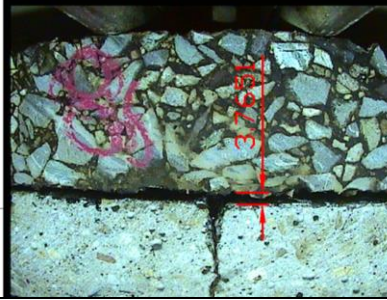
Un simplu calcul indică faptul că aproximativ 95-97% din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 3-5% din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 4.20. Indicele de fisurare a mixturii).

Tabel 4.20. Indicele de fisurare a mixturii, 8a și 8b

Epruveta	Indice de fisurare reflectivă, $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} (\%)$	Numărul de cicluri
8a	96.86%	356
8b	95.60%	531

Deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment db_i și desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton e_i sunt aproximativ egale (Tabel 4.21). De aici rezultă și diferența relativ mică între cele 2 probe.

Tabel 4.21 Valorile deschiderii inițiale db_i , desprinderii inițiale (amorsajul de bitum) e_i și ale excentricității fisurii în asfalt e_f 8a și 8b

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)	Vedere laterală fisurare e_f = excentricitatea fisurii plăcii de asfalt față de fisura betonului de ciment (mm)
8a	 $db_i=1.3547$	 $ei=3.7808$	 $e_f=30.3118$
8b	 $db_i=1.4843$	 $ei=3.7651$	 $e_f=5.2985$

Măsurătorile și prelucrările parametrilor fisurării (Tabel 4.22 și Tabel 4.23), lungimea și deschiderea fisurii în asfalt, deschiderea betonului de ciment, pentru epruvetele 8a și 8b indică:

- Variația deschiderii fisurii d , dar și a lungimii f în raport cu n , este neliniară (Figura 4.49 și Figura 4.50). Modelul de regresie este același ca la epruveta 4b:

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

Pentru $y = d$

8a $a_0 = 0.588, a_1 = -1.423, a_2 = 0.564,$

Abaterea standard $S=0.0616$, iar coeficientul de corelare $r=0.996$.

8b $a_0 = 0.996, a_1 = -0.956, a_2 = 0.0536,$

Abaterea standard $S=1116$, iar coeficientul de corelare $r=0.993$.

Pentru $y = f$

8a $a_0 = 21.34, a_1 = -1.315, a_2 = 0.746,$

Abaterea standard $S=1.4606$, iar coeficientul de corelare $r=0.9986$.

8b $a_0 = 32.11, a_1 = -0.7691, a_2 = 0.3971,$

Abaterea standard $S=1.5353$, iar coeficientul de corelare $r=0.995$.

Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$):

- 8a $-n_{cf} = 11186$ cicluri ($n = 0.57$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 57% din durata totală a propagării acesteia).
- 8b $-n_{cf} = 11620$ cicluri ($n = 0.54$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 54% din durata totală a propagării acesteia).

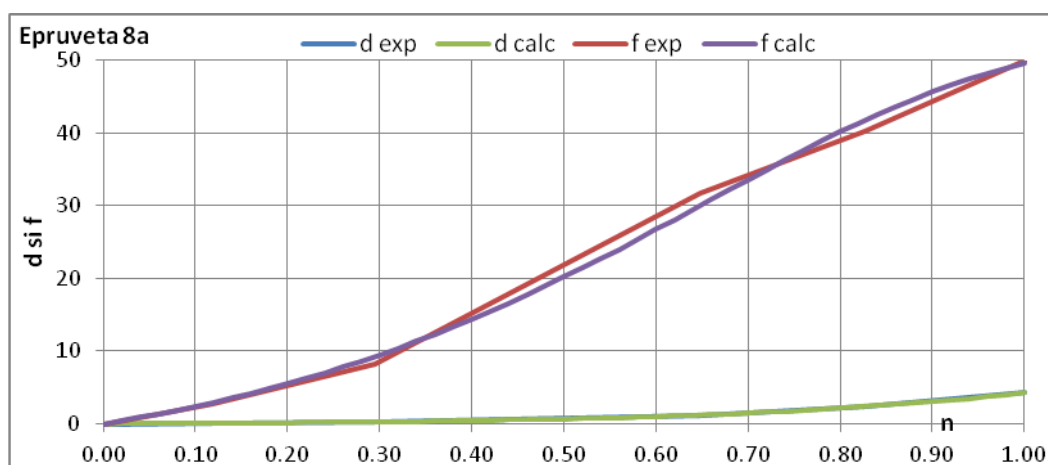


Figura 4.49 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 8a.

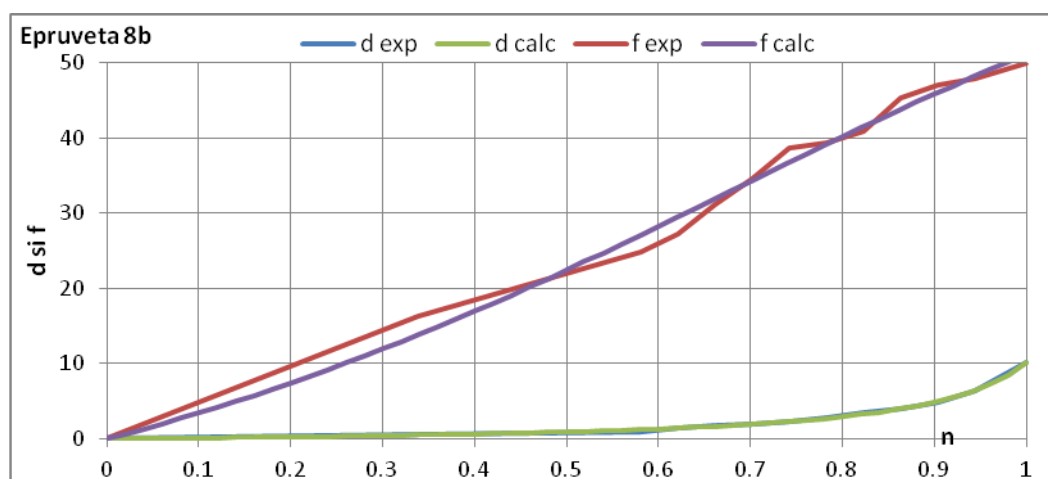


Figura 4.50 Variația deschiderii d și lungimii fisurii f în funcție de n , epruveta 8b.

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului **db** în raport cu **n** este modelul MMF pentru 8a și Bleasdale pentru 8b, Figura 4.51 și Figura 4.52:

$$8a - db = \frac{a_0 \cdot a_1 + a_2 \cdot n^{a_3}}{a_1 + n^{a_3}}$$

$$8b - db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{\frac{1}{a_2}}$$

8a $a_0 = 1.551, a_1 = 3.875, a_2 = 4.69 \cdot 10^{-2}, a_3 = 5.023$

Abaterea standard S=0.127, iar coeficientul de corelare r=0.9998.

8b $a_0 = 2.488 \cdot 10^{-2}, a_1 = -2.446 \cdot 10^{-2}, a_2 = 3.515$

Abaterea standard S=0.062, iar coeficientul de corelare r=0.999.

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din cele 2 modeluri se va adăuga valoarea deschiderii inițiale **db_i** (Tabel 4.21)

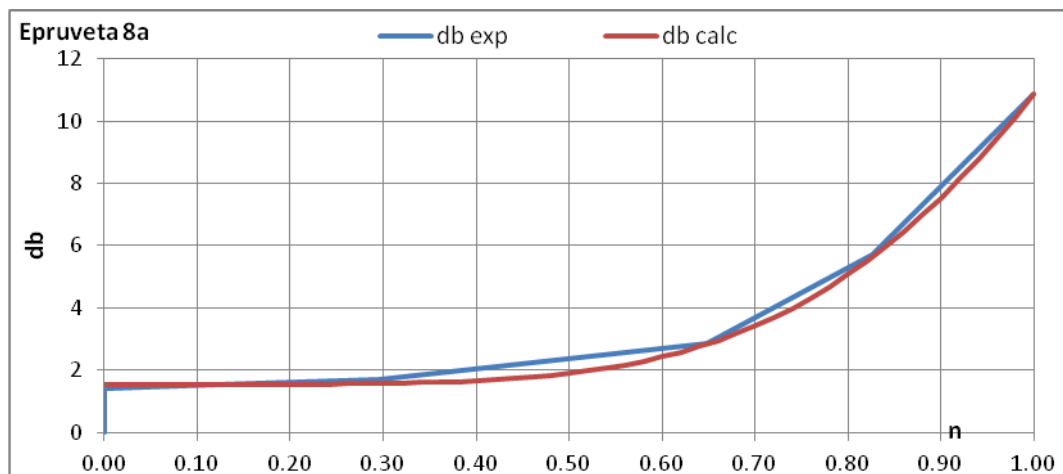


Figura 4.51 Variația deschiderii betonului db în funcție de n, epruveta 8a

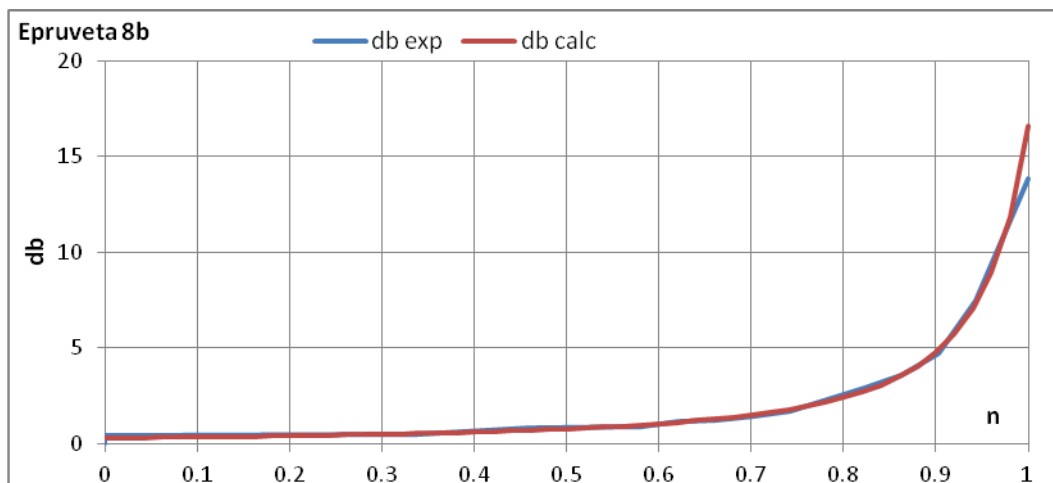


Figura 4.52 Variația deschiderii betonului db în funcție de n, epruveta 8b

Tabel 4.22 Rezultate experimentale epruveta 8a

Epruveta	nc	n	d	f	db
8a	0				1.3547
	2386				1.5404
	8386				1.7762
	9586				2.1488
	10738				2.4022
	10858				2.4674
	10982	0.00	0.00	0	2.7843
	11024	0.12	0.14	2.68	2.9045
	11087	0.29	0.34	8.13	3.0611
	11213	0.65	1.17	31.67	4.1977
	11276	0.83	2.39	40.23	7.0812
	11338	1.00	4.31	50.00	12.2109

Tabel 4.23 Rezultate experimentale epruveta 8b

Epruveta	nc	n	d	f	db
8b	0				1.48
	3089				1.48
	6689				1.61
	9089				1.69
	10289				1.71
	10689				1.82
	11089	0	0.00	0.000	1.93
	11425	0.33871	0.50	16.347	1.93
	11545	0.459677	0.81	20.596	2.31
	11665	0.580645	0.97	24.916	2.36
	11705	0.620968	1.46	27.313	2.61
	11745	0.66129	1.81	31.132	2.69
	11785	0.701613	2.03	34.598	2.91
	11825	0.741935	2.29	38.785	3.18
	11865	0.782258	2.75	39.450	3.77
	11905	0.822581	3.41	40.994	4.40
	11945	0.862903	4.03	45.384	5.04
	11985	0.903226	4.85	47.025	6.19
	12025	0.943548	6.43	47.875	8.91
	12081	1	10.20	50.000	15.33

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** (Figura 4.53 și Figura 4.54),

- o deschidere **d** și lungime **f** fisură în asfalt și deschiderea betonului **db** (Figura 4.55 și Figura 4.56)

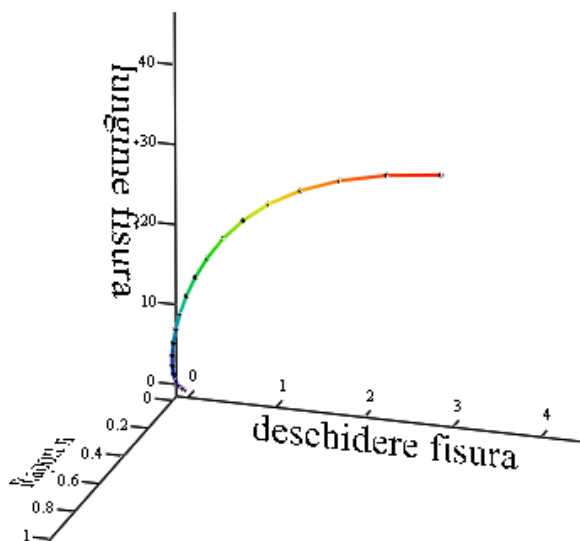


Figura 4.53 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 8a.

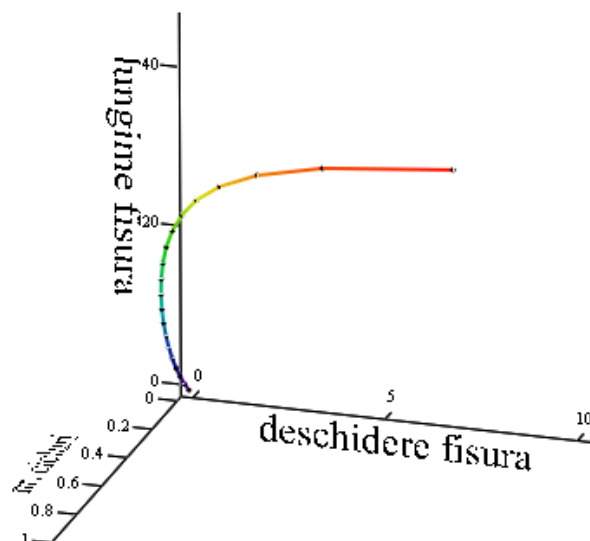


Figura 4.54 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 8b.

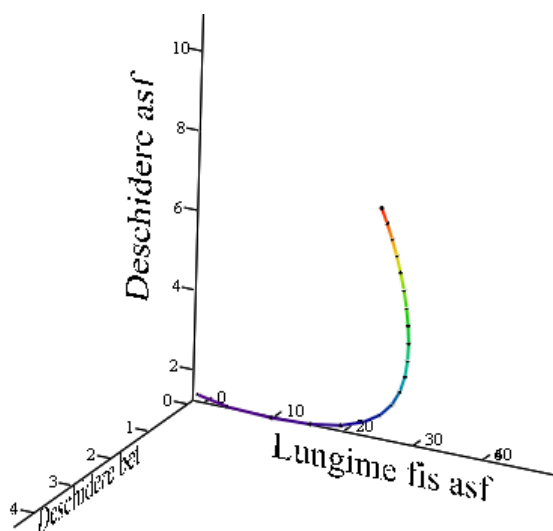


Figura 4.55 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 8a.

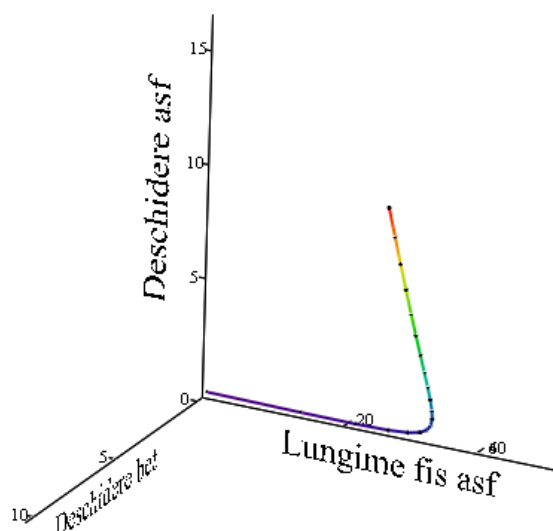


Figura 4.56 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 8b.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.57 și Figura 4.58).

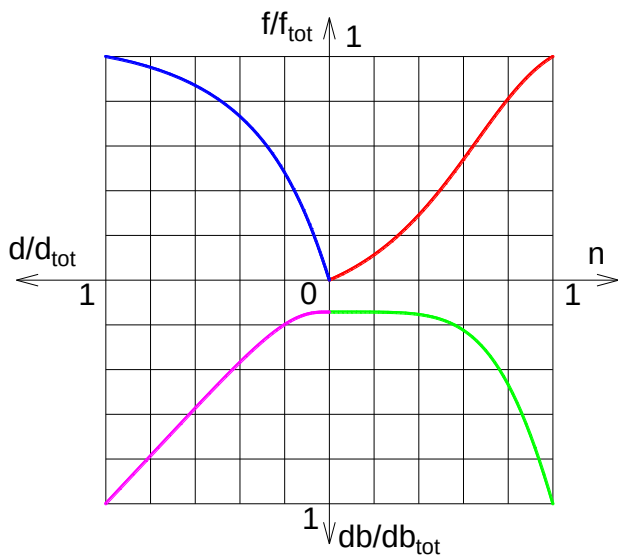


Figura 4.57 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 8a.

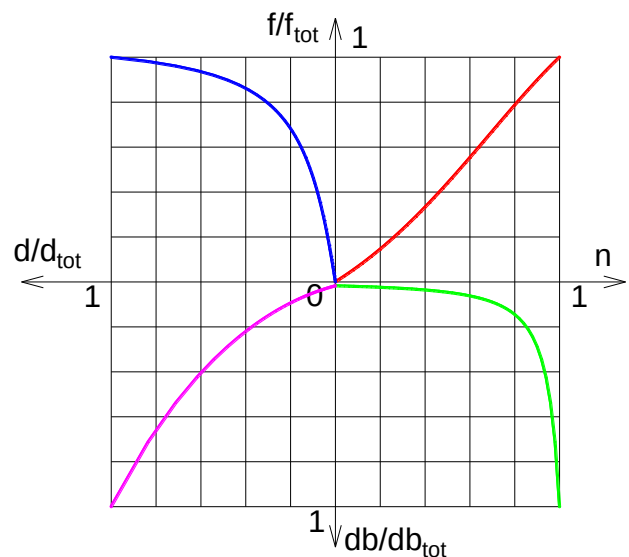


Figura 4.58 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 8b.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.28 și Figura 4.60), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.61, Figura 4.62) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 4.63, Figura 4.64).

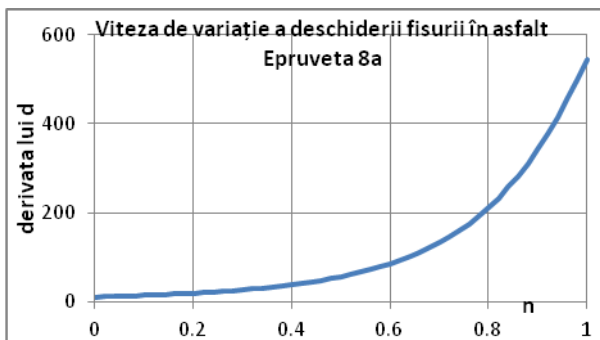


Figura 4.59 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 8a

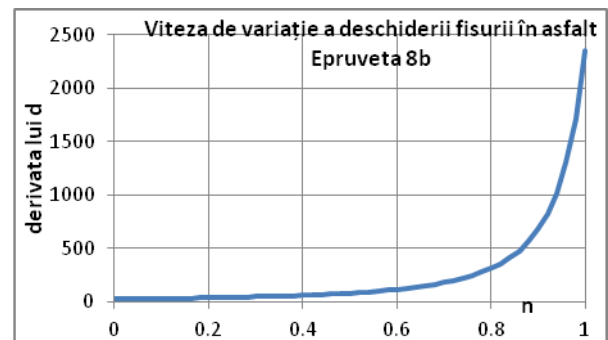


Figura 4.60 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 8b

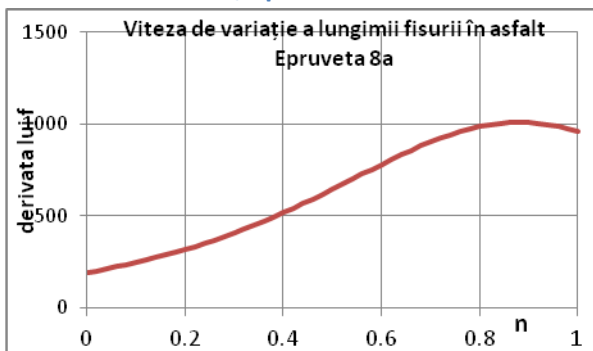


Figura 4.61 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 8a

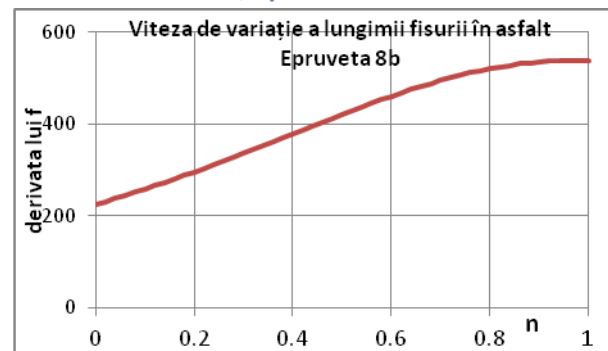


Figura 4.62 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 8b

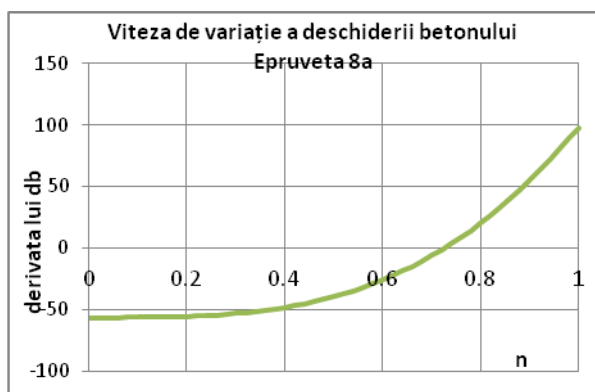


Figura 4.63 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 8a

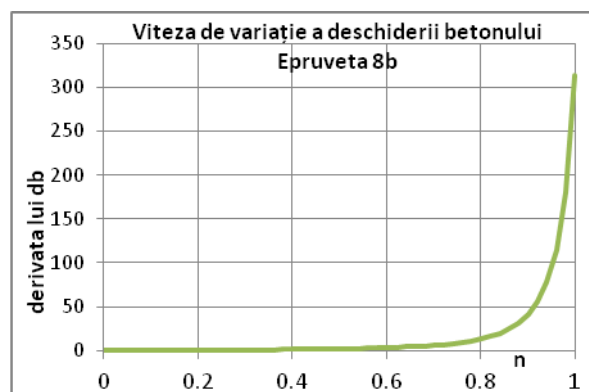


Figura 4.64 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 8b

4.6 Epruvetele 9a și 9b

Forța la care s-a transmis fisura din betonul prefisurat în stratul de protecție și s-a produs cedarea epruvetelor este de 400-440daN pentru 9a și 400-480daN pentru 9b, numărul de cicluri fiind: fisurarea la $n_{ci9a}=11.972$ comparativ cu $n_{ci9b}=11.612$, iar ruperea la $n_{cr9a}=12.536$ comparativ cu $n_{cr9b}=14.552$ (Tabel 4.24). Timpul total de încercare este de 3134 secunde la 9a, respectiv 3638 secunde la 9b.

Din punct de vedere a evoluției deformației verticale în funcție de numărul de cicluri (Figura 4.65), până în momentul apariției fisurii în mixtura asfaltică, se constată că probele **9a** și **9b** au o creștere asemănătoare. Fisura apare la un număr comparabil de cicluri, la o diferență de 360 (90 secunde) $9a > 9b$, iar ruperea la 2016 de cicluri (504 de secunde) $9a < 9b$.

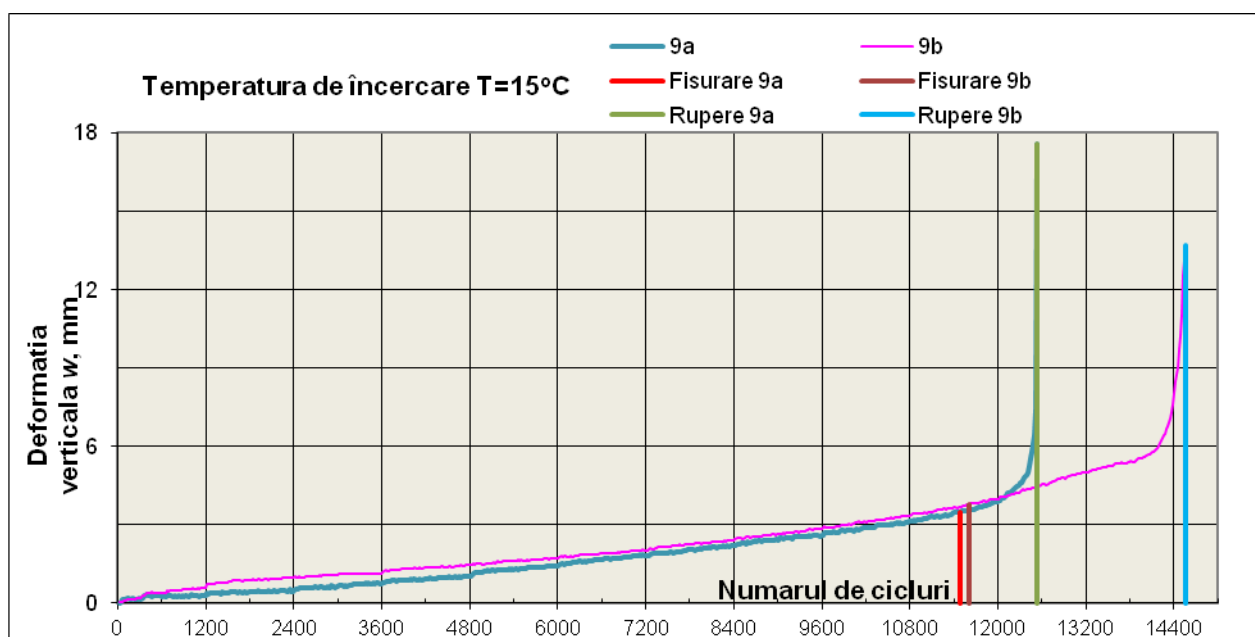


Figura 4.65 Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri, 9a și 9b

Tabel 4.24 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/ruptură, 9a și 9b

Fisurare	9a	Fisurare	9b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w
11972	3.8478	11612	3.7641
Rupere	9a	Rupere	9b
Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_{cR}	Deformația verticală, w
12536	17.5802	14552	13.6902

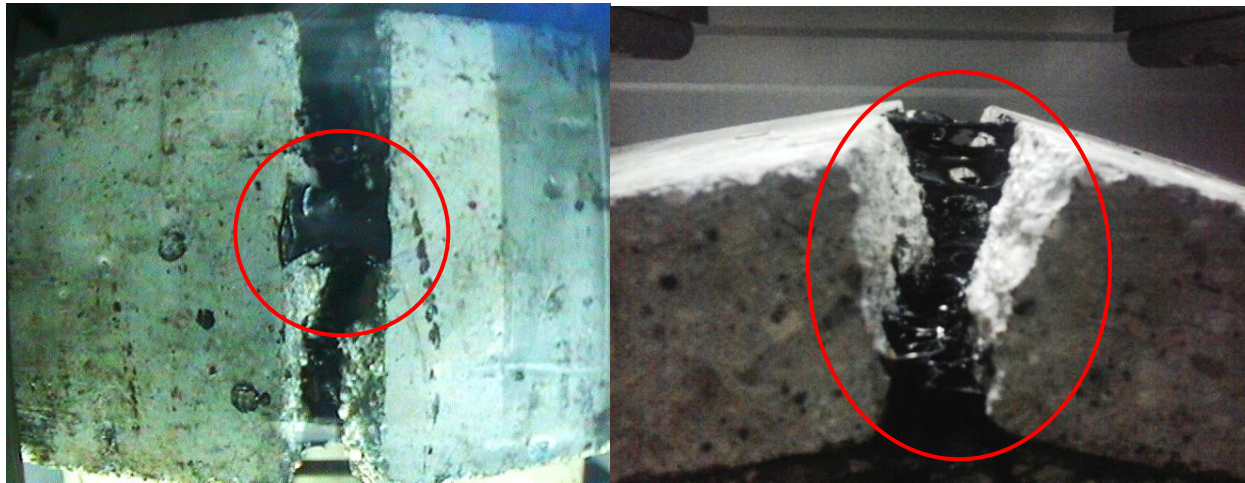
Calculul procentual arată că 95.5% (9a), respectiv 80% (9b) din durata de viață a mixturii se consumă până în momentul apariției fisurii și 4.5% (9a), respectiv 20% (9b) din timp îl reprezintă propagarea fisurii prin placa de asfalt (Tabel 4.25). Se observă o creștere considerabilă a comportării statului de protecție după apariția fisurii în acesta la epruveta 9b.

Tabel 4.25 Indicele de fisurare a mixturii, 9a și 9b

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

Dacă pentru 9a și 5a, 5b, 7a, 7b, 8a, 8b, indicele de fisurare I_f este de minim 95%, în cazul epruvetei 9b se remarcă o creștere semnificativă a numărului de cicluri de la fisurarea mixturii și până la ruperea acesteia (20% din durata totală a încercării). Acest lucru se datorează unei modificări a modului de preparare a epruvetei.

În momentul în care cele 2 părți ale betonului prefisurat s-au alăturat, între acestea s-a turnat, pe o suprafață de aproximativ 3cm pe 5cm, același bitum cu care s-a făcut lipirea pentru amorsarea mixturii de beton (Figura 4.66). Această situație are loc și în realitate în cazul unei crăpături în beton (fisura cu deschiderea inițială mai mare de 5mm), când bitumul lichid pătrunde și în această crăpătură, modificând practic efectul de transfer.



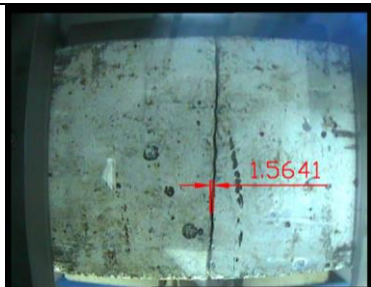
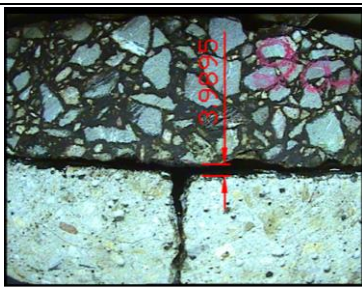
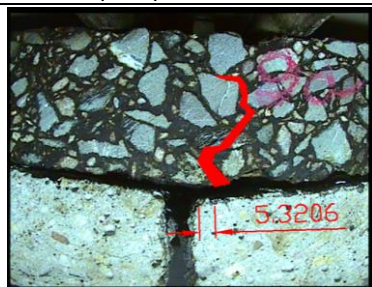
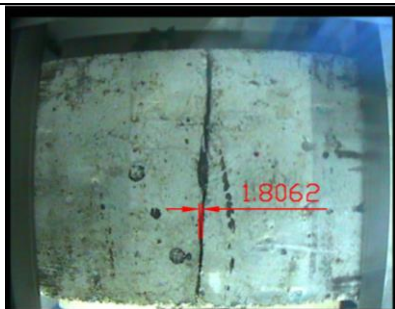
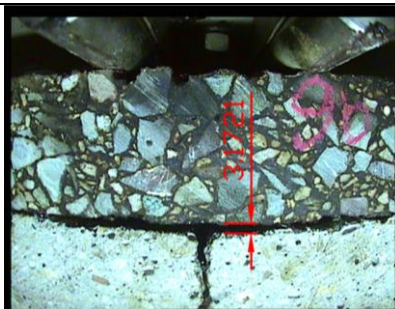
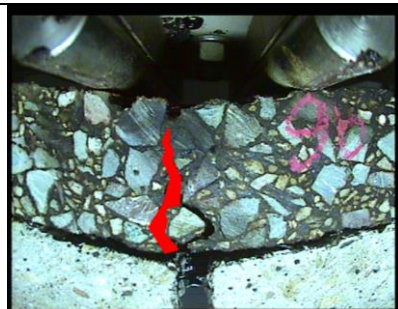
Vedere de sus

Vedere laterală

Figura 4.66 Bitumul turnat între plăcile de beton de ciment, epruveta 9b.

Deschiderea inițială a fisurii betonului de ciment db_i este mai mică pentru 9a, iar desprinderea inițială a stratului de asfalt de placa de beton e_i este mai mică la 9b (Tabel 4.26). În acest caz, parametrul db_i este un bun indicator al numărului de cicluri mai mare pentru 9a, până la propagarea fisurii prin mixtură.

Tabel 4.26 Valorile deschiderii inițiale db_i , desprinderii inițiale (amorsajul de bitum) e_i și ale excentricității fisurii în asfalt e_f . 9a și 9b

Epruveta	Vedere sus	Vedere laterală	Vedere laterală fisurare
	db_i = deschiderea inițială a betonului (mm)	e_i = desprinderea inițială a plăcii de asfalt de betonul de ciment (mm)	e_f = excentricitatea fisurii plăcii de asfalt față de fisura betonului de ciment (mm)
9a	 $db_i=1.5641$	 $ei=3.9895$	 $e_f=5.3206$
9b	 $db_i=1.8062$	 $ei=3.1721$	 $e_f=0$

Măsurătorile și prelucrările parametrilor fisurării (Tabel 4.27), lungimea și deschiderea fisurii în asfalt, deschiderea betonului de ciment, pentru epruveta 9a indică:

- Variația deschiderii fisurii **d**, dar și a lungimii **f** în raport cu **n**, este neliniară (Figura 4.67). Modelul de regresie este același ca la epruveta 4b:

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

Pentru $y = d$

$$a_0 = 2.544, a_1 = 6.294, a_2 = -6.89,$$

Abaterea standard $S=0.277$, iar coeficientul de corelare $r=0.9885$.

Pentru $y = f$

$$a_0 = 54.28, a_1 = 2.79, a_2 = -2.677,$$

Abaterea standard $S=1.098$, iar coeficientul de corelare $r=0.9976$.

Putem astfel determina la ce număr de cicluri ajunge propagarea fisurii la jumătate din grosimea plăcii de asfalt de protecție ($h=50\text{mm}$): $n_{cf} = 12260$ cicluri ($n = 0.74$, sau putem spune că lungimea fisurii a ajuns la $h/2$, la 74% din durata totală a propagării acesteia).

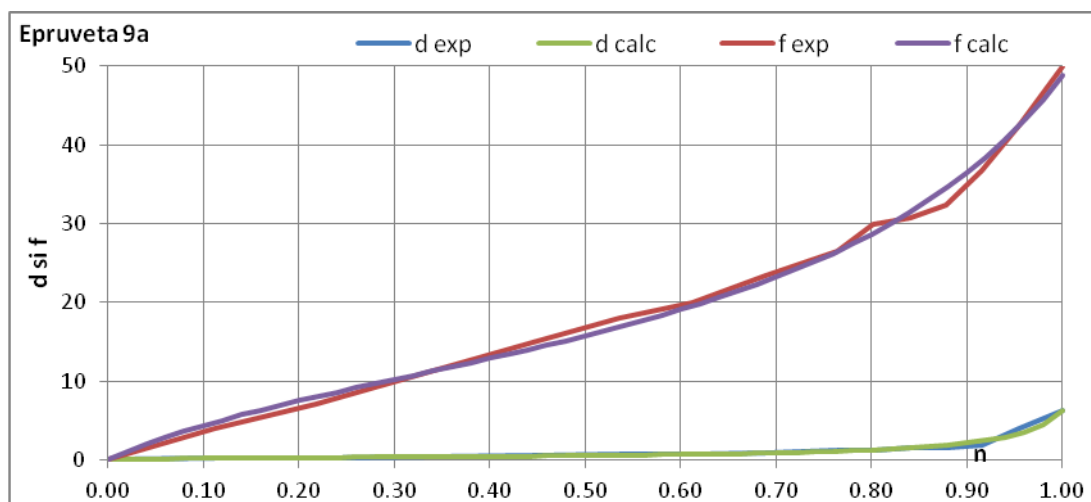


Figura 4.67 Variația deschiderii **d** și lungimii fisurii **f** în funcție de **n**, epruveta 9a.

- Modelul de regresie găsit pentru evoluția deschiderii betonului **db** în raport cu **n** este modelul Bleasdale, Figura 4.68:

$$db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{-\frac{1}{a_2}}$$

$$a_0 = 3.42 \cdot 10^{-1}, a_1 = -3.322 \cdot 10^{-1}, a_2 = 1.58$$

Abaterea standard $S=0.876$, iar coeficientul de corelare $r=0.984$.

Pentru a afla cât este deschiderea reală a betonului de ciment într-un punct, la valoarea rezultată din modelul Bleasdale se va adăuga valoarea deschiderii inițiale db_i (Tabel 4.26)

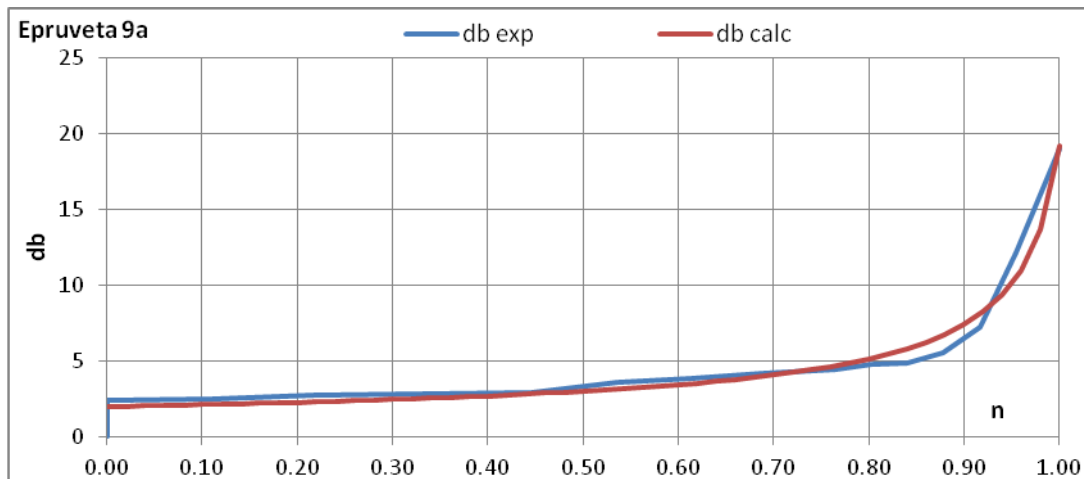


Figura 4.68 Variația deschiderii betonului db în funcție de n , epruveta 9a

Tabel 4.27 Rezultate experimentale epruveta 9a

Epruveta	nc	n	d	f	db
9a	0				1.5641
	2011				1.6671
	4411				1.8963
	6811				2.0757
	8867				2.4163
	9107				2.7275
	9867				3.1849
	10347				3.4245
	10827				3.6831
	11235				3.7647
	11486	0.00	0.0000	0	3.9272
	11603	0.11	0.1435	3.9033	4.0345
	11715	0.22	0.2758	7.0546	4.2811
	11955	0.45	0.4660	14.8568	4.5004
	12051	0.54	0.6720	17.971	5.1369
	12131	0.61	0.7161	19.9293	5.3992
	12211	0.69	0.8645	23.4324	5.7360
	12291	0.76	1.1917	26.5155	5.9985
	12331	0.80	1.2641	29.9217	6.3616
	12371	0.84	1.5583	30.7796	6.4132
	12411	0.88	1.5873	32.3692	7.1251
	12451	0.92	1.7793	36.7255	8.8406
	12491	0.95	3.9477	42.5254	13.7419
	12539	1.00	6.2260	50	20.5973

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** (Figura 4.69),
 - deschidere **d** și lungime **f** fisură în asfalt și deschiderea betonului **db** (Figura 4.70)

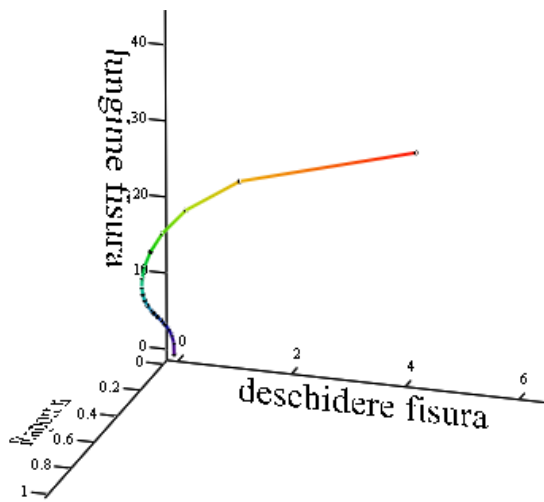


Figura 4.69 Reprezentare tridimensională d, f, n, epruveta 9a.

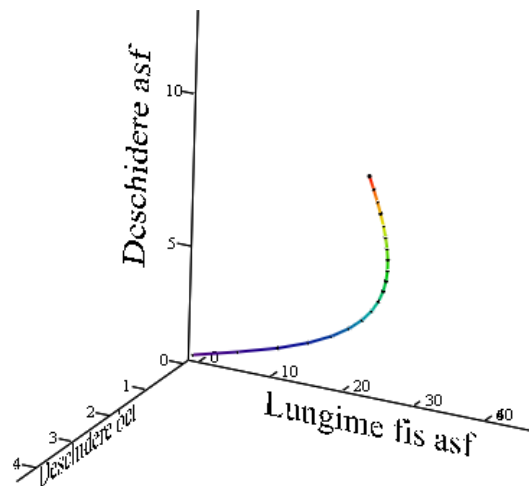


Figura 4.70 Reprezentare tridimensională d, f, db, epruveta 9a.

- în același plan a tuturor celor 4 parametri (Figura 4.71).

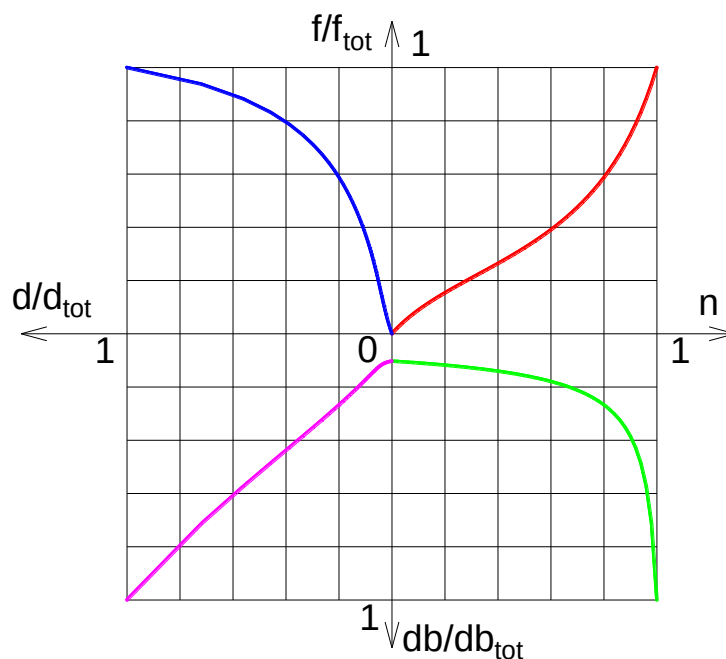


Figura 4.71 Graficul celor 4 parametri în plan, epruveta 9a.

- Vitezele de variație a deschiderii fisurii (Figura 4.72), a propagării (lungimii) fisurii (Figura 4.73) prin asfalt, respectiv a deschiderii betonului de ciment (Figura 4.74).

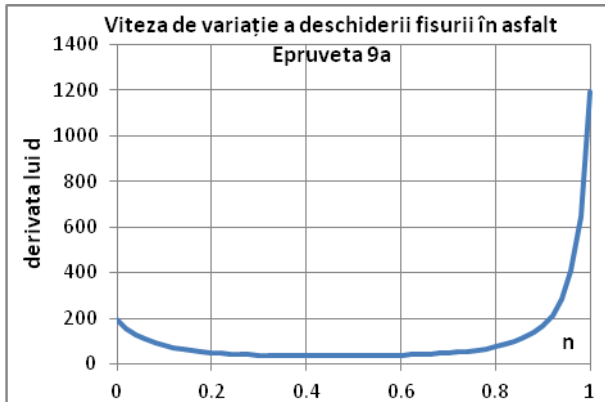


Figura 4.72 Viteza de variație a deschiderii fisurii d, epruveta 9a

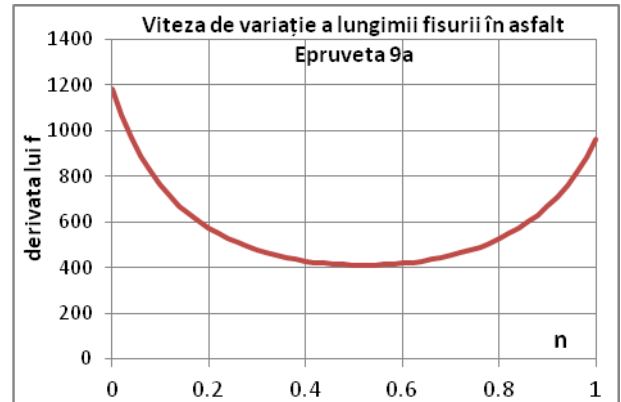


Figura 4.73 Viteza de variație a lungimii fisurii f, epruveta 9a

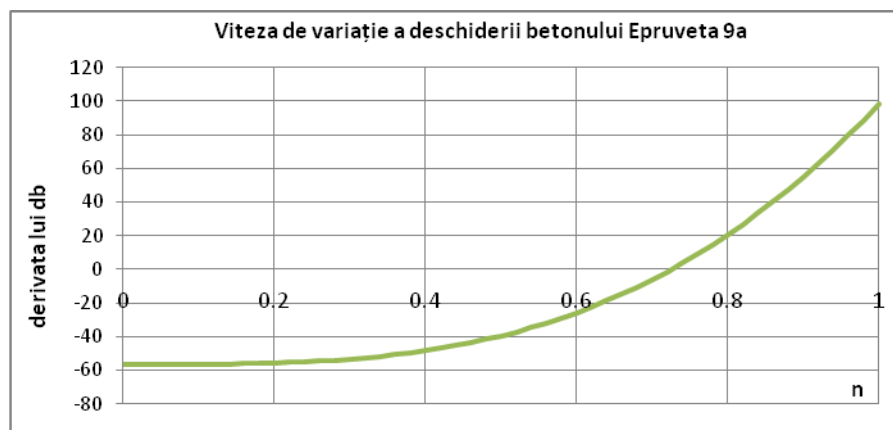


Figura 4.74 Viteza de variație a deschiderii betonului db, epruveta 9a

5 PARAMETRII FISURĂRII

În cadrul acestui raport de cercetare am identificat și interpretat prin testele efectuate pe Fisurometrul Termostatat, următorii parametri ai fisurării reflective prin covorul asfaltic de protecție a unei îmbrăcăminți rutiere rigide degradate prin fisurare:

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_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)
- Excentricitatea poziției fisurii din asfalt fata de poziția fisurii din stratul de baza e_f .

Epruveta 4b reprezintă proba pentru calibrarea încercării, întrucât și din prelucrarea imagistică a rezultat că toți cei parametri de analiză (n_c , db, d, f) au evoluat prin interdependență, iar variația lor este una proporțională. (Figura 4.4 și Figura 4.5)

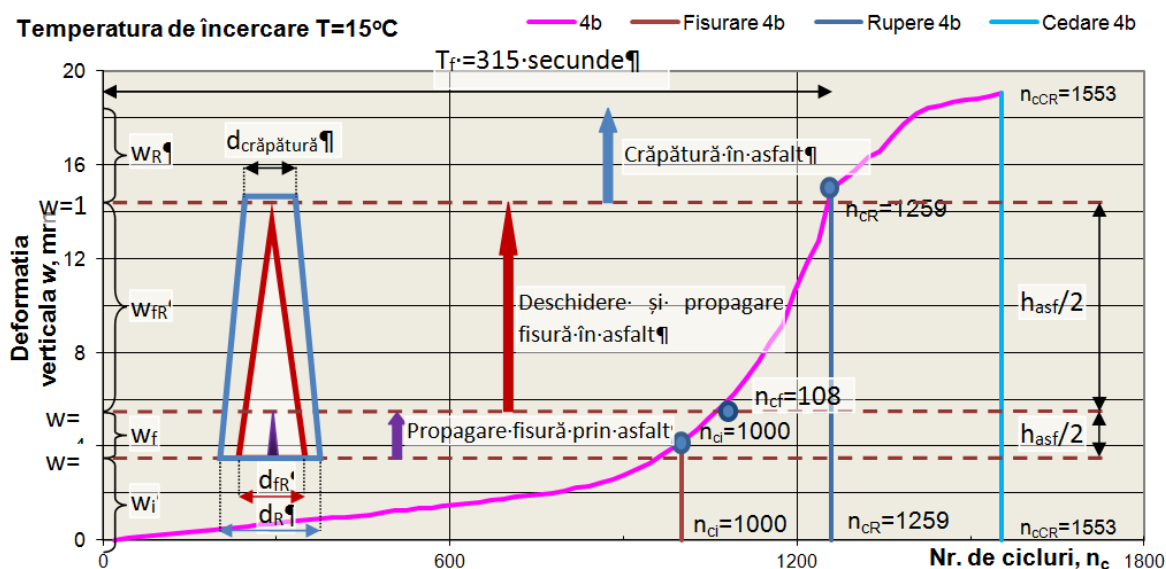


Figura 4.1. Creșterea deformației verticale în funcție de numărul de cicluri pentru 4b

Tabel 4.1 Numărul de cicluri și deformația verticală la fisurare/rupture/cedare, epruveta 4b

Fisurare	4b	Cedare (crăpătura)	4b
Numărul de cicluri, n_{ci}	Deformația verticală, w	Numărul de cicluri, n_c	Deformația verticală, w
$n_{ci}=1000$	4.3086	$n_{cCR}=1553$	19.0684
		Propagare fisura	4b
		Rupere	
		$n_{cR}=1259$	12.768

6 INTERPRETARE MULTICRITERIALĂ A PROCESULUI DE FISURARE REFLECTIVĂ

Interpretarea multicriterială este definită de o serie de criterii de influență a fenomenului de fisurare reflectivă a stratului de asfalt, care are rolul de protecție a unui strat din beton de ciment prefisurat (degradat în perioada de serviciu ca veche îmbrăcămintă rutieră).

Fiind vorba de o structură rutieră compozită (la care fiecare strat are o comportare diferită la preluarea sarcinilor din trafic în perioada de exploatare a drumului), propagarea reflectivă a fisurii din stratul din beton de ciment în covorul asfaltic de protecție, depinde de parametrii enunțați în cadrul acestui raport de cercetare, care trebuie analizați prin suprapunere de efecte.

Principalii parametri care influențează fisurarea reflectivă sunt:

- Solicitări dinamice care simulează efectul traficului rutier, materializate în studiul de laborator prin intensitatea forței (F) și a frecvenței de aplicare a acesteia, frecvență constantă în cazul fisurometrului termostatat;
- Efectul transferului la fisură, din fisura existentă a stratului din beton de ciment, materializat prin analiza parametrului db (deschiderea fisurii din stratul suport din beton de ciment);
- Conlucrarea asfalt-beton de ciment, prin evaluarea acrosajului prin amorsarea interfeței dintre cele două straturi cu caracteristici fizico-mecanice diferite, materializată prin analiza parametrilor e_i , e_f , respectiv desprinderea asfaltului de pe suportul din beton de ciment în raport cu creșterea deformației verticale (w) a modelului experimental;
- Inițierea fisurii și propagarea ei prin stratul asfaltic, prin deschiderea (d) și lungimea (f) fisurii, care depind de caracteristicile fizico-mecanice ale mixturilor bituminoase din care este executat stratul asfaltic.

Prin consecință, 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 ciclice I_{nc} (Tabel 6.1 Indicele parametrului de solicitări ciclice I_{nc} Tabel 6.1),

- indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment I_{db} (Tabel 6.2),
- indicele de deschidere a fisurii reflectivă în stratul asfaltic I_d ,
- indicele de propagare a fisurii prin stratul asfaltic I_f .

Tabel 6.1 Indicele parametrului de solicitări ciclice I_{nc}

db_i	Epruveta	n_{cR}	n_{ci}	$n_{cR} - n_{ci}$	$I_{nc} = \frac{n_c - n_{ci}}{n_{cR} - n_{ci}}$
1.1480	6a	10520	9974	546	
1.2487	7a	7790	7496	294	
1.3547	8a	11338	11100	238	
1.4843	8b	12081	11550	531	
1.5641	9a	12536	11972	564	
1.7432	5b	12429	12116	313	
1.7652	7b*	4283	4183	100	
1.8062	9b***	14552	11612	2940	
2.1008	5a	12556	12200	356	
3.0088	4b**	1259	1000	259	

Notă:

S-a notat cu n_c –numărul de cicluri la care se dorește calcularea lui I_{nc} ($n_c \geq n_{ci}$).

Indicele I_{nc} reprezintă de fapt raportul n utilizat la prelucrarea rezultatelor experimentale (graficele de variație a deschiderii, lungimii fisurii în asfalt, respectiv a deschiderii fisurii din betonul de ciment).

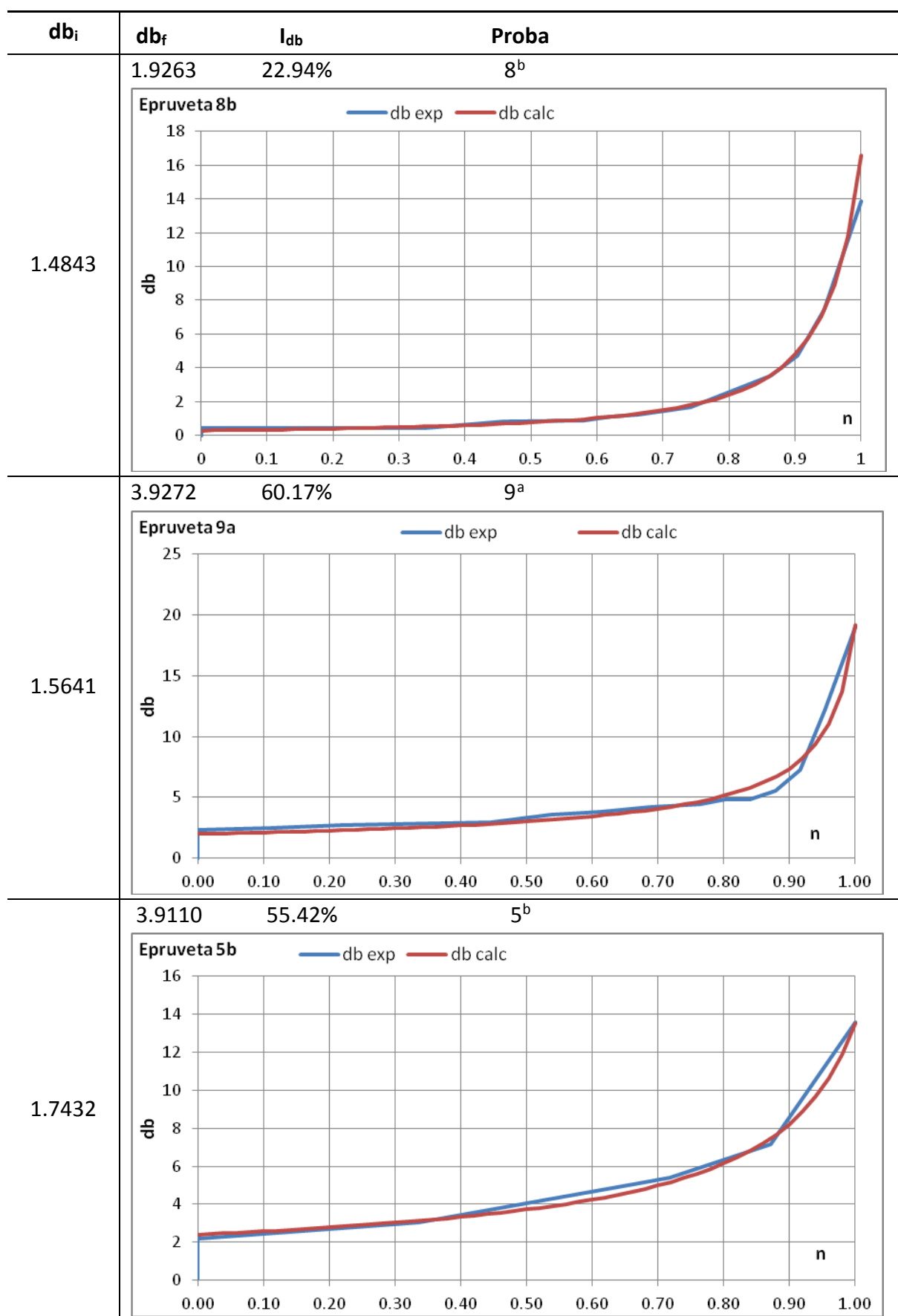
Din Tabel 6.1 se rețin valorile între 238 și 564. Celelalte epruvete se exclud ca având valori în afara domeniului, respectiv proba 7b, la care numărul de cicluri este redus până la apariția fisurii reflectivă, fiind o problemă de rețetă a mixturii asfaltice (a se vedea și proba 7a), Proba 9b, la care transferul la fisură din placa din beton prefisurat a fost modificat de prezența bitumului utilizat la amorsaj și proba 4b, utilizată pentru calibrarea măsurătorilor pe Fisurometrul Termostatat și a avut și deschiderea fisurii de 3mm.

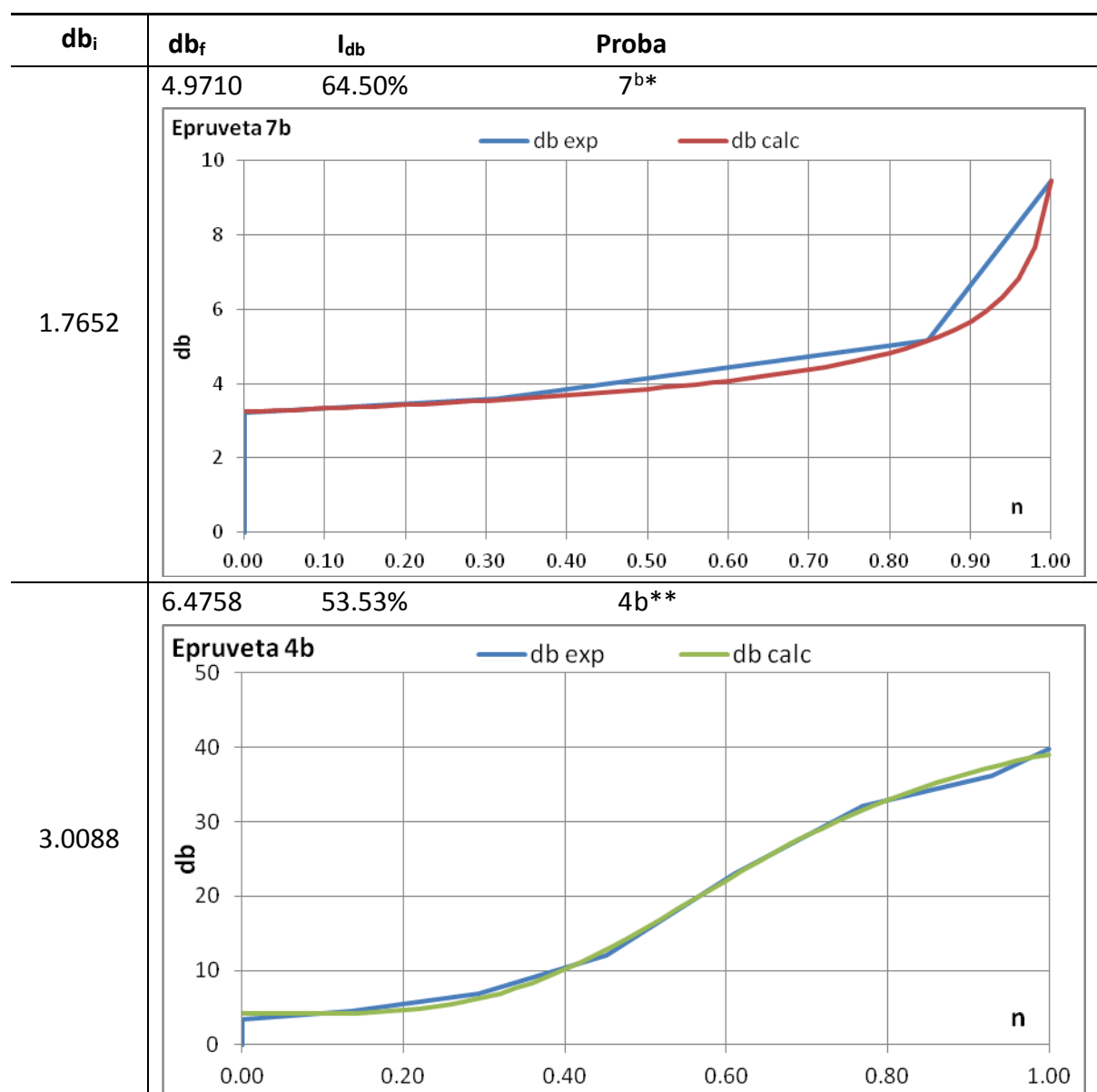
Numărul de cicluri (n_c) la care epruvetele (strat de protecție din MASF16, lipit de aceeași placă de beton de ciment) cedează este între 10500 și 12500. Forța la care are loc ruperea mixturii (F_R) este între 360 și 440daN.

Prin indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment I_{db} se pune în evidență uzura pereților fisurii pe măsura creșterii numărului de solicitări la încercările succesive ale epruvetelor asfaltice la care s-a utilizat practic același suport din beton de ciment prefisurat.

Tabel 6.2 Indicele parametrului de variație a deschiderii în timp a fisurii existente din suportul din beton de ciment I_{db}

db_i	db_f	I_{db}	Proba
1.1480	4.1328	72,2%	6 ^a
Epruveta 6a			
1.2487	7.0409	82,26%	7 ^a
Epruveta 7a			
1.3547	2.7843	51.35%	8 ^a
Epruveta 8a			





Deschiderea inițială a fisurii în betonul de ciment (db_i) are valori între 1.2 și 2.0mm, excepție făcând epruveta 4b (3mm) a cărei evoluție diferă față de celelalte probe tocmai din această cauză (Tabel 6.1).

Timpul în care fisura se transmite de la beton la mixtură reprezintă 95-98% din durata totală de viață (la rupere) a epruvetei, și este cuprins între 100-564, excepție făcând epruvetele 4b și 9b (Tabel 6.3).

Timpul în care se propagă fisura pe întreaga grosime a mixturii asfaltice este de 2-5% (Tabel 6.3), de la momentul inițierii fisurii.

Tabel 6.3 Indicii de fisurare reflectivă.

Epruveta	Indicele de fisurare reflectivă $I_f = \frac{n_{ci}}{n_{cR}} (\%)$	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%

Dacă în procesul de amorsare, bitumul este suficient de lichid astfel încât să pătrundă în fisurile existente în stratul vechi din beton de ciment, atunci se modifică și transferul la fisură prin “lipirea pereților fisurii”. Este cazul probei 9b, unde timpul în care fisura se propagă prin mixtură crește la 20% (față de cele 5% la celelalte epruvete) din durată totală a încercării.

7 CONCLUZII

7.1 Parametrii fisurării reflective

Principalii parametri care influențează fisurarea reflectivă sunt:

- Solicitări dinamice care simulează efectul traficului rutier, materializate în studiul de laborator prin intensitatea forței (F) și a frecvenței de aplicare a acesteia, frecvență constantă în cazul fisurometrului termostatat;
- Efectul transferului la fisură, din fisura existentă a stratului din beton de ciment, materializat prin analiza parametrului **db** (deschiderea fisurii din stratul suport din beton de ciment);
- Conlucrarea asfalt-beton de ciment, prin evaluarea acrosajului prin amorsarea interfeței dintre cele două straturi cu caracteristici fizico-mecanice diferite, materializată prin analiza parametrilor **e_i**, **e_f**, respectiv desprinderea asfaltului de pe suportul din beton de ciment în raport cu creșterea deformației verticale (**w**) a modelului experimental;

- Inițierea fisurii și propagarea ei prin stratul asfaltic, prin deschiderea (**d**) și lungimea (**f**) fisurii, care depind de caracteristicile fizico-mecanice ale mixturilor bituminoase din care este executat stratul asfaltic.

Prelucrările matematice a datelor experimentale indică:

- Variația deschiderii fisurii **d**, dar și a lungimii **f**, în raport cu **n** este descrisă pentru toate epruvetele de o funcție rațională de forma:

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

- Variația deschiderii fisurii din betonul de ciment **db**, în raport cu **n** este descrisă de modelele MMF sau Bleasdale:

$$\text{MMF} \quad db = \frac{a_0 \cdot a_1 + a_2 \cdot n^{a_3}}{a_1 + n^{a_3}}$$

$$\text{Bleasdale} \quad db = (a_0 + a_1 \cdot n)^{\frac{1}{a_2}}$$

7.2 Mixtura asfaltică

În ceea ce privește **mixtura asfaltică** utilizată în cadrul acestor experimente se poate concluziona că:

- Fisurarea reflectivă (transmiterea fisurii din betonul de ciment în stratul de protecție) are loc la 95% din durata încercării. Dacă în urma investigațiilor realizate pe teren se determină momentul aproximativ la care se transmite fisura în stratul de asfalt, știind cât timp a trecut de la așternerea acestuia, se poate aprecia când trebuie intervenit asupra covorului asfaltic cu costurile cele mai mici.
- Dacă în procesul de amorsare, bitumul este suficient de lichid astfel încât să pătrundă în fisurile existente în stratul vechi din beton de ciment, atunci se modifică și transferul la fisură prin “lipirea pereților fisurii”. Aceasta a dus la mărirea timpului în care fisura se propagă prin stratul de protecție de la 5% la 20% în cazul probei 9b.

7.3 Fisuriometru Termostatat

Fisuriometru Termostatat reprezintă un instrument important pentru a determina în laborator modul de comportare a diferitelor rețete de mixtură asfaltică utilizate peste un beton de ciment prefisurat.

Trebuie făcute însă câteva modificări în ceea ce privește atât metodologia de preparare a epruvetelor, cât și metodologia de lucru cu aparatul:

- Un control mai bun asupra modului în care se face amorsarea suprafeței (prin controlarea cantității și modului de distribuire pe suprafața plăcii de beton a bitumului utilizat)
- Un control mai bun asupra modului de așezare a epruvetei astfel pregătite astfel încât distanța dintre marginile acesteia și reazemele aparatului să fie egale. Se micșorează astfel excentricitatea cu care fisura se transmite din betonul de ciment în stratul de asfalt.
- Modul în care se face măsurarea parametrilor fisurării (deschiderea, lungimea fisurii în asfalt, deschiderea fisurii din beton) printr-o prelucrare imagistică după terminarea experimentului. Prelucrarea trebuie făcută pe imaginile înregistrate în timpul experimentului, astfel încât să avem cât mai multe valori ale acestora (un timp mai mic la care pozele se salvează în calculator).

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] S. Jercan, «Mecanismul conlucrării și prevenirea fisurării îmbrăcăminților asfaltice pe fundație din beton de ciment,» de *A IX-a Conferință Națională de Drumuri și Poduri, Volumul 1 Drumuri*, Constanța, 1994.
- [2] M. Dicu, Preocupări în domeniul analizei procesului de fisurare la îmbrăcăminți rutiere, București: Conspress, 2012.
- [3] University of Minesota, Department of Civil Engineering, «Load testing of instrumented pavement sections,» Minesota, 1999.
- [4] M. Dicu, Îmbrăcăminți rutiere. Investigații și interpretări, Conspress, 2000.
- [5] V. Goanță, Mecanica Ruperii, Iași: Performantica, 2006.
- [6] T. Anderson, Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications. Second Edition, CRC Press, 1995.
- [7] D. Laveissiere, «Modelisation de la Remontee de Fissure en Fatigue dans le Structures Routieres par Endommagement et Macro-Fissuration,» Ecole Doctorale STS, L'universite de Limoges, Faculte des Sciences, Limoges, 2002.

- [8] J. R. Rice, «A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration at notches and cracks,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [9] J. A. Begley y J. D. Landes, «The J-Integral as a fracture criterion,» ASTM, Philadelphia, 1972.
- [10] «PD177-2001, Normativ pentru dimensionarea sistemelor rutiere suple și semirigide (Metoda analitică),» 2001.
- [11] M. M. Elseifi y I. L. Al-Qad, «A Simplified Overlay Design Model against Reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction,» de *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting*, Washington, D.C., 2003.
- [12] C. Romanescu y C. Răcănel, *Reologia lianților bituminoși și a mixturilor asfaltice*, București: Matrix Rom, 2003.
- [13] J. C. Pais y P. A. Pereira, «Prediction of existing reflective cracking potential of flexible pavements,» de *Fourth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements - Research in Practice*, 2000.
- [14] F. Zhou y L. Sun, «Lab asphalt testing evaluation of reflective cracking,» de *Accelerated Pavement Testing International Conference*, Reno, Nevada, 1999.
- [15] P. F. Jimenez, M. R. M. A. B. R y V. G, «New procedures and criteria for asphalt mixes and pavements design regarding fatigue failure and thermal stresses,» de *24th World Road Congress Proceedings: Roads for a Better Life: Mobility, Sustainability and Development*, Mexico, 2011.
- [16] M. L. Nguyen, C. Sauzeat, H. Di Benedetto y L. Wendling, «Investigation of cracking in bituminous mixtures with a 4PBT,» de *6th RILEM International Conference. Cracking in Pavements*, Chicago, 2008.
- [17] H. L. Von Quintus, J. Mallela, W. Weiss, S. Shen y R. L. Lytton, «Techniques for Mitigation of Reflective Cracks,» Auburn University, Alabama, 2009.