

# **CONCEPEREA ȘI REALIZAREA UNOR STRUCTURI RUTIERE CU PERFORMANȚE RIDICATE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul INGINERIE CIVILĂ  
de către

**Ing. Paul Teodor MARC**

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Conducători științifici: | prof.dr.ing. Ion Costescu<br>prof.dr.ing. Emmanuel Antczak<br>prof.dr.ing. Florin Breabăn   |
| Referenți științifici:   | prof.dr.ing. Gheorghe Lucaci<br>prof.dr.ing. Florin Belc<br>prof.dr.ing. Mihai Iliescu<br>conf.dr.ing. Rafik Belarbi<br>conf.dr.ing. Omar Douzane |

Ziua susținerii tezei: 19.12.2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Căi de Comunicație Terestre, Fundații și Cadastru al Facultății de Construcții din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara.

Ajuns la momentul finalizării prezentei lucrări aş dori să le mulțumesc tuturor oamenilor minunați care au crezut în mine, mi-au fost alături, m-au îndrumat și sprijinit în mod necondiționat pe tot parcursul desfășurării cercetărilor și elaborării tezei, oameni deosebiți fără de care nu aş fi reușit să finalizez acest proiect.

Sincere mulțumiri doresc să îi aduc domnului prof. dr. ing. Ion Costescu, coordonatorul științific principal al lucrării, pentru profesionalismul și spiritul optimist în care a fost abordată fiecare etapă a acestui studiu, pentru indicațiile metodologice prețioase date și pentru felul în care a știut să mă călăuzească pe drumul cel bun către finalizarea cu succes a tezei.

Țin să le mulțumesc în mod deosebit domnilor prof. dr. ing. Florin Breabăn și prof. dr. ing. Emanuel Antczak, profesori la Universitatea d’Artois din Franța, pentru că au acceptat să îmi fie coordonatori în cotutelă ai tezei, le sunt recunoscător pentru generozitatea și bunăvoința cu care m-au inițiat în munca de cercetare și pentru ajutorul prompt și eficient în acest sens.

Cu deosebită recunoștință și respect vreau să îi mulțumesc pe această cale domnului prof. dr. ing. Gheorghe Lucaci, pentru faptul că a constituit un sprijin permanent și a avut un rol deosebit în dezvoltarea mea profesională. Îi mulțumesc pentru sugestiile și sfaturile prețioase, pentru încurajările optimiste, pentru implicarea în rezolvarea problemelor întâmpinate și facilitarea efectuării de studii și experimente în străinătate, precum și pentru ocaziile pe care mi le-a oferit de a prezenta rezultatele obținute în urma cercetării.

Adresez mulțumiri deosebite tuturor membrilor comisiei de evaluare științifică pentru aprecierile făcute în urma parcurgerii acestei lucrări.

Mulțumesc de asemenea întregului colectiv al catedrei pentru sugestii, recomandări și încurajări, precum și tuturor cadrelor didactice ale facultății care au contribuit la formarea mea profesională.

În mod deosebit doresc să mulțumesc întregii mele familii pentru sprijinul acordat, și mai ales soției mele pentru înțelegere și pentru suportul moral de un real necesar în momentele dificile.

Timișoara, decembrie 2011

Paul Teodor MARC

**Marc, Teodor Paul**

**Conceperea și realizarea unor structuri rutiere cu performanțe ridicate**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 87, Editura Politehnica, 2011, 245 pagini, 169 figuri, 44 tabele.

ISSN: 1842 – 581X

ISBN: 978 – 606 – 554 – 406 – 2

Cuvinte cheie:

proprietăți termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, emisivitate), proprietăți fizico-mecanice, cenușă de termocentrală, schimbări climatice, modelare matematică, deformare specifică.

Rezumat:

În prezenta teză de doctorat se analizează studierea unor factori de influență care, prin intermediul variațiilor mari de temperatură, periclitează în mod frecvent structurile rutiere cu particularizare pentru straturile din asfalt, în scopul determinării proprietăților termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate și emisivitate) și conceperii și realizării unor straturi asfaltice cu caracteristici termo-fizice și fizico-mecanice superioare.

Practic studiile evidențiate în cadrul tezei de doctorat se axează în cea mai mare parte pe determinarea caracteristicilor termice ale mixturilor asfaltice, caracteristici cu ajutorul cărora se urmărește combaterea factorilor de influență rezultați din condițiile de mediu la care sunt supuse continuu structurile rutiere în fazele de construcție, reparație, precum și în timpul duratei lor de serviciu. Datorită cunoașterii distribuției de temperatură în fiecare strat asfaltic component al structurii rutiere, solicitările ce apar datorită variațiilor de temperatură pot fi combătute. Fluctuațiile de temperatură ale aerului zilnic și sezonier, intensitatea radiației solare, materialele ce alcătuiesc straturile structurii rutiere prin geometria acestora și condițiile de suprafață sunt unii dintre cei mai importanți factori ce periclitează în mod semnificativ stabilitatea structurii rutiere.

S-au adus contribuții favorabile asupra îmbunătățirii caracteristicilor termice prin conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice în compoziția cărora s-a utilizat ca și componentă, pe lângă materialele de bază, cenușa de termocentrală, prin înlocuirea parțială și totală a fillerului. Aceasta ajută la obținerea unor proprietăți termo-fizice superioare, proprietăți ce au un efect favorabil asupra caracteristicilor fizico-mecanice.

Pe baza rezultatelor experimentale au rezultat o serie de concluzii interesante și în același timp extrem de valoroase pentru domeniul infrastructurii rutiere, care mai departe deschid o serie de oportunități pentru cercetări ulterioare în domeniu.

“Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU/6/1.5/S/13, ID6998, cofinanțat din Fondul Social European "Investește în oameni", în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013”

## CUPRINS

|   |    |
|---|----|
| 1. Generalități .....   | 9  |
| 1.1. Generalități .....   | 9  |
| 1.2. Politica de transport în România .....   | 9  |
| 1.2.1. Direcții de acțiune privind dezvoltarea rețelei naționale de transport .....   | 10 |
| 1.3. Starea drumurilor de interes național, județean și local .....   | 11 |
| 1.3.1. Structura rețelei rutiere publice de infrastructuri de transport. Considerații privind starea tehnica a acestora .....                     | 12 |
| 1.4. Integrarea infrastructurii românești în rețelele europene de transport.....  | 23 |
| 1.4.1. Geostrategia dezvoltării căilor de transport în România .....  | 25 |
| 1.4.2. Principii de dezvoltare a rețelei naționale de transporturi .....  | 26 |
| 1.4.3. Strategia de dezvoltare și întreținere a infrastructurilor de transport.....   | 27 |
| 1.5. Obiectivele tezei .....  | 28 |
| 2. Particularități privind studiul structurilor rutiere flexibile și semirigide .....   | 31 |
| 2.1. Structuri rutiere .....  | 31 |
| 2.2. Clasificarea structurilor rutiere .....  | 33 |
| 2.3. Alcătuirea structurilor rutiere suplă și mixte .....   | 38 |
| 2.4. Dimensionarea structurilor rutiere .....   | 43 |
| 2.4.1. Abordarea empirică .....   | 44 |
| 2.4.2. Abordarea teoretică.....   | 44 |
| 2.4.3. Metode practice de dimensionare.....   | 45 |
| 2.4.4. Modelele mecanicii structurilor rutiere .....  | 45 |
| 2.4.4.1. Modelul lui Boussinesq .....   | 46 |
| 2.4.4.2. Modelele bistrat .....   | 47 |
| 2.4.4.3. Modelul lui Hogg .....   | 48 |
| 2.4.4.4. Modelul lui Westergaard .....  | 50 |
| 2.4.4.5. Modelele multistrat (Burmister) .....  | 51 |
| 2.4.4.5.1. Principiul unei probleme elastice în coordonate cilindrice pentru o încărcare .....  | 53 |
| 2.5. Materiale bituminoase - componentă esențială în alcătuirea structurilor rutiere nerigide .....   | 55 |
| 2.5.1. Modulul complex.....   | 56 |
| 2.5.1.1. Rolul temperaturii și al frecvenței.....   | 57 |
| 2.5.2. Încercarea la oboseală .....   | 59 |
| 2.5.2.1. Influența temperaturii .....   | 61 |
| 2.6. Rolul schimbărilor climatice asupra dimensionării structurilor rutiere .....   | 62 |
| 2.6.1. Studiul variațiilor de temperatură în structura rutieră, analiza termică.....  | 62 |
| 2.6.2. Comportamentul structurilor bituminoase. Variația modulului în funcție de temperatură.....   | 65 |
| 2.6.2.1. Comportamentul la oboseală a unei structuri bituminoase .....  | 65 |
| 2.6.2.2. Definierea temperaturii echivalente.....   | 67 |
| 2.7. Aplicarea modelelor de calcul studiate privind funcționarea mecanică a structurilor rutiere.....   | 67 |
| 2.8. Concluzii .....  | 73 |
| 2.8.1. Observații privind influența traficului și a schimbărilor climatice asupra comportării în exploatare a structurilor rutiere nerigide ..... | 73 |

## 6 Cuprins

---

|  |     |
|--|-----|
| 3. Studiul proprietăților termo-fizice. Metode și mijloace de determinare ale acestora. Studiu experimental..... | 75  |
| 3.1. Studiu bibliografic privind proprietățile termo-fizice .....  | 75  |
| 3.1.1. Mărimile termo-fizice echivalente.....  | 76  |
| 3.1.1.1. Căldura specifică echivalentă.....  | 76  |
| 3.1.1.2. Conductivitatea termică echivalentă .....   | 76  |
| 3.2. Măsurarea parametrilor termo-fizici .....   | 78  |
| 3.2.1. Metoda de măsurare cu două fire. Principiul metodei.....  | 79  |
| 3.2.1.1. Determinarea conductivității termice .....  | 79  |
| 3.2.1.2. Determinarea difuzivității termice și a volumului de căldură.....                                       | 80  |
| 3.3. Elementele fundamentale ale radiației termice. Natura fenomenului .....                                     | 80  |
| 3.4. Funcția de transfer termic: Transmisia de căldură prin conducție .....                                      | 83  |
| 3.4.1. Relațiile de bază. Legea lui Fourier.....   | 83  |
| 3.4.1.1. Ecuația de căldură.....   | 84  |
| 3.4.1.2. Caz unidirecțional.....   | 84  |
| 3.4.1.3. Generalizarea la o structură multistrat .....   | 86  |
| 3.4.2. Impedanța termică. Definiția impedanței termice.....  | 86  |
| 3.4.2.1. Calculul impedanței termice .....   | 87  |
| 3.4.3. Cazul în care avem un mediu omogen .....  | 88  |
| 3.4.3.1. Condiția limită izotermă.....   | 88  |
| 3.4.3.2. Condiția limită semi-infinită.....  | 88  |
| 3.5. Analiza generală a sistemului constituit pentru determinarea proprietăților termo-fizice .....              | 89  |
| 3.5.1. Senzorul.....   | 89  |
| 3.5.2. Rezistența de contact .....   | 90  |
| 3.5.3. Materialul în condiția limită de semi-infinit.....  | 91  |
| 3.5.4. Impedanța globală a sistemului senzor – contact – material .....  | 91  |
| 3.5.5. Tratarea semnalului .....   | 92  |
| 3.5.5.1. Poziția problemei.....  | 92  |
| 3.5.5.2. Cazul semnalului rapid. Tratarea rezultatelor sub solicitări în „sinusuri combinate” .....              | 94  |
| 3.5.6. Determinarea mărimilor termo-fizice .....   | 95  |
| 3.6. Legile radiației termice .....  | 96  |
| 3.6.1. Legea lui Planck.....   | 96  |
| 3.6.2. Legea lui Wien.....   | 97  |
| 3.6.3. Legea lui Stefan – Boltzmann.....   | 98  |
| 3.7. Aparatura utilizată la măsurarea parametrilor termo-fizici.....   | 100 |
| 3.7.1. Senzorul de temperatură.....  | 100 |
| 3.7.2. Senzorul de flux .....  | 101 |
| 3.7.3. Calibrarea fluxmetrelor și influența condițiilor experimentale .....                                      | 102 |
| 3.7.4. Canalul de comandă și achiziție .....   | 106 |
| 3.7.4.1. Gestiunea și comanda .....  | 106 |
| 3.7.4.2. Sistemul de achiziție .....   | 107 |
| 3.8. Studiul practic al proprietăților termo-fizice asupra mixturilor asfaltice utilizate în Franța .....        | 107 |
| 3.8.1. Caracteristicile materialelor .....   | 107 |
| 3.8.1.1. Agregatele .....  | 107 |
| 3.8.1.2. Filerul .....   | 109 |
| 3.8.1.3. Cenușa de termocentrală.....  | 109 |
| 3.8.1.4. Bitumul .....   | 110 |
| 3.8.2. Caracteristicile mecanice ale mixturilor din Franța .....   | 111 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 3.9. Măsurările cu bancul de conducție .....  | 113 |
| 3.9.1. Dispozitivul experimental .....  | 114 |
| 3.9.2. Determinarea conductivității termice .....   | 115 |
| 3.9.2. Determinarea căldurii specifice .....  | 117 |
| 3.9.3. Determinarea efuzivității termice și a difuzivității termice .....   | 118 |
| 3.9.4. Determinarea emisivității .....  | 119 |
| 3.10. Rezultate experimentale obținute pe mixturile asfaltice din Franța .....  | 120 |
| 3.11. Studiu de caz. Modelarea distribuției de temperatură a mixturilor asfaltice cu ajutorul proprietăților termo-fizice pentru aplicațiile de testare din laborator ..... | 125 |
| 3.11.1. Program experimental .....  | 125 |
| 3.11.2. Ecuațiile de generare .....   | 126 |
| 3.11.3. Rezultate și interpretări .....   | 127 |
| 3.12. Concluzii .....   | 130 |
| 4. Conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice, prin studierea și utilizarea de materiale compozite .....   | 131 |
| 4.1. Studiul caracteristicilor materialelor rutiere compozite .....   | 131 |
| 4.1.1. Utilizarea cenușii de termocentrală în straturile de asfalt .....  | 132 |
| 4.2. Caracteristicile materialelor utilizate la prepararea mixturilor asfaltice .....   | 134 |
| 4.2.1. Agregatele .....   | 134 |
| 4.2.2. Filerul .....  | 136 |
| 4.2.3. Lianții puzzolanici. Cenușa de termocentrală .....   | 137 |
| 4.2.4. Bitumul .....  | 139 |
| 4.3. Stabilirea dozajelor de mixtură asfaltică înlocuind total sau parțial filerul cu cenușa de termocentrală .....   | 140 |
| 4.4. Realizarea probelor în vederea determinării proprietăților termo-fizice și fizico-mecanice .....   | 142 |
| 4.4.1. Prepararea probelor cilindrice în laborator .....  | 143 |
| 4.4.2. Prepararea plăcuțelor .....  | 143 |
| 4.4.3. Valorile proprietăților termo-fizice pe dozajele realizate în România .....  | 144 |
| 4.5. Studii experimentale privind proprietățile fizico-mecanice pentru dozajele din mixtură asfaltică ce conțin cenușă de termocentrală .....                               | 155 |
| 4.6. Rigiditatea mixturilor asfaltice realizate .....   | 165 |
| 4.6.1. Metoda de determinare a modulului de rigiditate în laborator .....   | 166 |
| 4.6.2. Măsurarea rigidității .....  | 168 |
| 4.6.3. Rezultate experimentale de laborator asupra modulului de rigiditate .....  | 169 |
| 4.7. Studiul efectelor din fluaj pentru mixturile asfaltice realizate .....   | 174 |
| 4.7.1. Factori care influențează deformațiile permanente ale mixturilor asfaltice .....   | 176 |
| 4.7.2. Tipul de încercare de laborator aplicat pentru caracterizarea mixturilor asfaltice la deformații permanente .....  | 177 |
| 4.7.3. Studiul în laborator al fluajului mixturilor asfaltice realizate prin testul de încercare la compresiune ciclică .....   | 179 |
| 4.7.3.1. Influența temperaturii asupra comportării la deformații permanente a straturilor asfaltice .....   | 180 |
| 4.7.4. Încercarea la făgășuire (ornieraj) .....   | 185 |
| 4.8. Încercarea la oboseală .....   | 187 |
| 4.9. Concluzii finale privind utilizarea cenușii de termocentrală la prepararea mixturilor asfaltice .....  | 189 |
| 5. Modelarea unor structuri rutiere realizate pe baza studiilor efectuate .....   | 193 |
| 5.1. Tipul și alcătuirea structurilor rutiere cuprinse în cadrul studiului .....  | 193 |
| 5.2. Studii teoretice privind comportarea structurilor rutiere realizate .....  | 194 |
| 5.2.1. Principiile și ipotezele aplicate în modelarea matematică .....  | 194 |

## 8 Cuprins

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.2. Factori de influență considerați în cadrul modelării.....                    | 199 |
| 6. Concluzii finale.....  | 214 |
| 6.1. Conținutul tezei de doctorat .....   | 215 |
| 6.2. Contribuții personale ale autorului și direcții pentru cercetări viitoare..... | 229 |
| Bibliografie .....  | 231 |
| Anexa 1 .....   | 237 |



# 1. GENERALITĂȚI

## 1.1. Generalități

Sistemul de transport rutier constituie în țara noastră, ca de altfel și pe plan internațional, principalul mod de transport care preia 80 % din totalul deplasărilor de mărfuri și peste 60 % din totalul călătoriilor. În acest context este absolut necesar ca drumurile să asigure condiții corespunzătoare de deplasare din punct de vedere al siguranței circulației, confortului și, nu în ultimul rând, al eficienței transporturilor.

Industria de transport reprezintă peste 7 % din produsul intern brut (PIB) al Uniunii Europene (UE), peste 5 % din forța de muncă, 40 % din investițiile Statelor Membre și 30 % din consumul de energie al UE. Acest sector a înregistrat o creștere constantă în ultimele două decenii, de 2,3 % pe an la transportul de bunuri și 3,1 % la cel de pasageri, dar în același timp a crescut presiunea exercitată de sectorul transport asupra mediului și al societății. Corelația dintre creșterea traficului rutier și a riscurilor de sănătate nu este imposibil de schimbat. Problema nu poate fi însă rezolvată printr-o singură măsură politică, ci este necesară o abordare integrată pentru a reduce efectele negative atât ale emisiilor, cât și ale zgomotului.

Peste 75 % din populația Uniunii Europene locuiește în zone urbane. Astfel, transportul urban reprezintă o componentă importantă a cererii de mobilitate, precum și a mediului construit cu un impact negativ asupra sănătății. De exemplu, o cincime din călătoriile din Uniunea Europeană sunt în mediul urban, pe distanțe mai mici de 15 km. Pentru perioada 1995-2030, se preconizează o creștere cu 40 % a numărului de kilometri parcurși în zone urbane. Autoturismul este dominant, având o cotă de 75 % din numărul de kilometri parcurși în conurbațiile Uniunii Europene. Autoturismele cauzează atât de multe blocaje, încât în unele orașe europene viteza medie în trafic este mai mică decât în vremurile trăsurilor cu cai. Creșterea utilizării autoturismelor a fost însoțită de probleme de siguranță și de mediu, precum și de colapsul investițiilor în transport public [93].

## 1.2. Politica de transport în România

Rețeaua de drumuri din România este deficitară, atât din punct de vedere al densității, cât și în ceea ce privește starea tehnică a acesteia, situație ce are un impact major asupra transporturilor rutiere, condițiile reale în care se desfășoară circulația conducând la pierderi deosebit de importante care se reflectă la nivelul agenților economici și, de asemenea, al utilizatorilor individuali.

Restructurarea politică și economică din Europa de Est în decursul ultimei decade a dus la schimbări substanțiale în sistemul de transport în zonă. Volumul transporturilor, care s-a redus semnificativ ca urmare a recesiunii economice de la începutul anilor 1990, este din nou în creștere datorită redresării economice. Balanța modală (ponderea de piață a diferitelor moduri de transport), deși este mult mai bună decât în Uniunea Europeană, se dezvoltă către un sistem axat pe transportul

## 10 Generalități

---

rutier. Rețeaua rutieră și cea feroviară nu sunt atât de dense și, din acest motiv, fragmentarea teritoriului este mai puțin pronunțată.

Conform principiilor stipulate în Strategia europeană de transport durabil „o politică de transport sustenabilă ar trebui să facă față intensității traficului și nivelelor de congestie crescânde, zgomotului și poluării și să sprijine folosirea modurilor de transport mai puțin agresive față de mediul înconjurător, precum și internaționalizarea costurilor sociale și ambientale. Este necesar să se acționeze pentru a obține o disociere semnificativă între creșterea transporturilor și creșterea economică, dezvoltarea alternativelor de transport la autovehiculul privat și transportul rutier de mărfuri și atribuirea corectă a costurilor. Un accent deosebit se pune pe necesitatea realizării unei urmăriri riguroase a comportamentului ambiental al sectorului de transport, prin consolidarea sistemului de urmărire TREM (Transport and Environment Reporting Mechanism) și prin stabilirea (atunci când este posibil) unor obiective cuantificabile la politica de transport” [86].

În România se remarcă eforturile deosebite ale guvernului în direcția promovării unor ample programe de dezvoltare a rețelei rutiere (construcția de autostrăzi, variante de ocolire a aglomerațiilor urbane), modernizarea drumurilor pietruite și din pământ, precum și de reabilitare a drumurilor cu îmbrăcăminți moderne. La aceasta se adaugă o activitate de întreținere a drumurilor care mobilizează importante resurse materiale, financiare și umane, știut fiind că un drum trebuie întreținut încă din prima zi de la darea lui în exploatare.

**Strategia pentru transport durabil pe perioada 2007 - 2013 și 2020, 2030** este documentul programatic al Ministerului Transporturilor, ce prezintă o scurtă istorie a dezvoltării transportului în România și informațiile cuprinzătoare privind starea infrastructurii de transport cu proiectele în desfășurare și cele planificate.

Obiectivul general îl reprezintă dezvoltarea echilibrată a sistemului național de transport care să asigure o infrastructură și servicii de transport moderne și durabile, dezvoltarea sustenabilă a economiei și îmbunătățirea calității vieții. Atingerea acestui obiectiv va contribui în mod direct la asigurarea dezvoltării durabile a sectorului transporturi, a economiei și a mediului, la creșterea gradului de accesibilitate a României, asigurarea inter-modalității sistemului de transport, promovarea dezvoltării echilibrate a tuturor modurilor de transport și îmbunătățirea calității și eficienței serviciilor. Obiectivele specifice avute în vedere pentru atingerea obiectivului general sunt:

- modernizarea și dezvoltarea rețelei de transport de interes european și național, creșterea condițiilor de siguranță și a calității serviciilor;
- liberalizarea pieței interne de transport;
- stimularea dezvoltării economiei și a competitivității;
- întărirea coeziunii sociale și teritoriale la nivel regional și național;
- compatibilitatea cu mediul înconjurător.

### **1.2.1. Direcții de acțiune privind dezvoltarea rețelei naționale de transport**

Direcțiile de acțiune se desfășoară în trei faze prin care se creează cadrul pentru avansarea progresivă a compatibilității sistemului național de transport cu politicile europene și principiile dezvoltării durabile, respectiv [90]:

- 2007 – 2013 – acțiuni pentru reconfigurarea rețelei naționale de transport; evaluarea și prioritizarea proiectelor de dezvoltare și modernizare a rețelei de transport de interes național și european (TEN-T) și a conexiunilor cu rețeaua națională; asigurarea condițiilor de derulare a acțiunilor demarate anterior anului 2007; evaluarea și introducerea alternativelor modale și tehnice; evaluarea și introducerea politicilor de mediu și dezvoltare durabilă;
- 2014 – 2020 – acțiuni pentru realizarea integrării graduale a rețelei și serviciilor; asigurarea condițiilor financiare și tehnice pentru implementarea graduală/etapizată a proiectelor de modernizare și dezvoltare; consolidarea tendințelor de restructurare modală; finalizarea procesului de liberalizare a pieței interne de transport; implementarea graduală a politicilor de mediu și dezvoltare durabilă;
- 2021 – 2030 – acțiuni pentru avansarea modernizării și dezvoltării rețelelor și serviciilor; asigurarea condițiilor financiare și tehnice pentru finalizarea proiectelor de modernizare și dezvoltare; construirea unui sistem integrat de transport; generalizarea implementării politicilor de mediu și dezvoltare durabilă.

### 1.3. Starea drumurilor de interes național, județean și local

Hotărârea Guvernului României nr. 540/2000 a aprobat o nouă clasificare a drumurilor publice din România. După anul 2000, în funcție de anumite interese politice, printr-un număr mare de hotărâri de guvern s-a modificat rețeaua drumurilor publice din România, care acum, la nivelul anului 2011, are următoarea clasificare:

|                                    |                  |
|------------------------------------|------------------|
| Autostrăzi                         | 322 km           |
| Drumuri naționale                  | 16 178 km        |
| Drumuri județene                   | 34 668 km        |
| Drumuri comunale                   | 27 781 km        |
| Străzi în orașe și municipii       | 22 328 km        |
| <u>Străzi în localități rurale</u> | <u>97 660 km</u> |
| Total                              | 198 937 km       |

Se precizează faptul că lungimea străzilor în localitățile din mediul rural este doar estimată, întrucât Institutul Național de Statistică nu prelucrează aceste date.

În ceea ce privește starea drumurilor din România, aceasta este necorespunzătoare, mai ales în comparație cu celelalte țări din Uniunea Europeană.

Lipsa autostrăzilor duce la intensificarea traficului pe drumurile naționale și pe o parte din cele județene. Ritmul de construcție al acestora, de la căderea comunismului din România s-a accentuat cu doar puțin peste 100 km, în timp ce în alte țări ritmul este mult mai mare. De exemplu, în Ungaria în ultimii 4 ani s-au construit peste 440 km de autostradă (în condițiile în care țara a trecut printr-o criză cruntă ce a generat inclusiv lupte de stradă), în Cehia 400 km, în Polonia

## 12 Generalități

---

200 km (deși la nivel de autostrăzi polonezii nu sunt cu mult peste noi, per total stau mult mai bine, având în vedere că la ei densitatea drumurilor publice pe kilometru pătrat este de 4 ori mai mare decât în România), iar în China se construiesc anual 2000 km de autostrăzi [13].

Pe fondul dezvoltării economiei în ultimii ani, problema infrastructurii a devenit una cronică, lipsa autostrăzilor încetinind creșterea economică și ducând la pierderea unor investiții importante. Comparativ cu anul 1990, parcul auto național s-a dublat (5,4 milioane de mașini acum, vis - a - vis de 2,2 milioane de mașini în 1990) în timp ce infrastructura s-a păstrat practic aceeași, situație care generează condiții de trafic absolut de neacceptat într-o țară care se vrea civilizată. Tot datorită infrastructurii proaste, România se află în topul european al accidentelor auto mortale, cu 749 de morți la un milion de mașini, rata care este de 6 ori mai mare decât în Germania.

Pentru a susține ritmul necesar de construcție a autostrăzilor în țara noastră, bugetul național nu va fi suficient niciodată. De aceea, singura soluție viabilă pentru construcția de autostrăzi în România, este concesionarea acestora, iar modelele în acest sens sunt suficiente în Uniunea Europeană.

În ceea ce privește drumurile naționale din România, în anul 2011, sunt în lungime totală de 16 178 km, cu 1 368 km mai mult decât în anul 2000. Începând încă din anul 1994 a existat o strategie bună pentru reabilitarea drumurilor naționale, s-a lucrat mult, dar ritmul de reabilitare al acestora a fost unul nesatisfăcător, lucru ce a generat multe probleme participanților la trafic.

În ultimii 11 ani, 1 368 km de drumuri provenite din drumuri județene, comunale și străzi sau chiar drumuri vicinale, aflate într-o stare tehnică precară, multe dintre ele fiind drumuri pietruite sau chiar din pământ au fost clasificate în categoria drumurilor naționale. Aprobarea acestor reclasificări a fost o greșeală din partea Guvernului României deoarece în urma clasificării din drumuri de categorie inferioară în drumuri naționale, asupra acestora nu s-a intervenit decât foarte puțin din punct de vedere al lucrărilor de reabilitare, fără să existe o strategie viabilă în acest sens, în timp ce în Franța, procedura privind reclasificarea rețelei de drumuri a fost inversă: din rețeaua de drumuri naționale s-au transferat aproape jumătate la autoritățile departamentale, respectând principiul democratic al autonomiei locale și în acest domeniu.

În ceea ce privește rețeaua de drumuri de interes județean și local din România (compusă din drumuri județene, drumuri comunale, drumuri vicinale și străzi în localități urbane și rurale), situația acesteia este de-a dreptul dramatică. În primul rând acest lucru se datorează faptului că administrarea acestor drumuri publice este neuniformă la nivelul întregii țări și faptului că nu există o strategie națională pentru dezvoltarea acesteia. Drumurile județene sunt în administrarea Consiliilor Județene, iar celelalte drumuri locale, comunale, vicinale și străzi sunt în administrarea Consiliilor Locale. Din păcate doar puține județe au aprobat strategii în acest domeniu, iar în ceea ce privește Consiliile Locale Municipale, Orășenești și Comunale situația este și mai precară [14].

### **1.3.1. Structura rețelei rutiere publice de infrastructuri de transport. Considerații privind starea tehnică a acestora**

Rețeaua rutieră publică din România asigură accesul motorizat în majoritatea localităților țării, densitatea rețelei fiind de 0,64 km/kmp; lungimea rețelei este de 78 949 km (exclusiv stradală) din care 16 500 km (20,90 %) drumuri

### 1.3 - Starea drumurilor de interes național, județean și local 13

naționale principale și secundare (6 228 km drumuri europene din care 322 km autostrăzi) și 62 449 km (79,10 %) drumuri județene și comunale [13].

Starea tehnică a drumurilor moderne se stabilește pe baza calificativelor acordate caracteristicilor drumului, pe tronsoanele omogene de drum. Starea tehnică a drumurilor moderne se evaluează cu ajutorul următoarelor caracteristici:

- planeitatea suprafeței de rulare, exprimată prin valoarea indicelui de planeitate, IRI;
- rugozitatea suprafeței îmbrăcăminții rutiere, exprimată prin valorile SRT sau HS;
- capacitatea portantă a complexului rutier exprimată prin valoarea deformației elastice caracteristice,  $d_{c20}$ ;
- starea de degradare a îmbrăcăminții rutiere, caracterizată prin următorii indici de degradare:
  - indicele global de degradare (IG) pentru îmbrăcămințile bituminoase;
  - indicele de degradare (ID) pentru îmbrăcămințile bituminoase și cele din beton de ciment.

Planeitatea suprafeței drumurilor este o caracteristică funcțională a drumului exprimată prin indicele de planeitate IRI (Indicele internațional de uniformitate). Indicele IRI caracterizează uniformitatea suprafeței drumurilor la evaluarea stării tehnice a drumurilor și este exprimat în m/km. Coeficientul IRI este un indicator care caracterizează oscilațiile suspensiei unui vehicul supus la solicitările date de defectele de planeitate ale drumului. Calificativul planeității se stabilește în funcție de categoria drumului și valoarea indicelui de planeitate IRI, așa cum este prezentat în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1

Indicele de planeitate, IRI

| Categorie drum                   | Indicele de planeitate, IRI [m/km] |             |             |             |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                  | REA                                | MEDIOCRĂ    | BUNĂ        | FOARTE BUNĂ |
| Drum național european           | > 5,5                              | 3,5 ... 5,5 | 2,5 ... 3,5 | < 2,5       |
| Drum național principal          | > 6,0                              | 4,5 ... 6,0 | 3,5 ... 4,5 | < 3,5       |
| Drum național secundar, județean | > 6,5                              | 5,5 ... 6,5 | 4,5 ... 5,5 | < 4,5       |
| Drum comunal                     | > 7,5                              | 6,5 ... 7,5 | 5,5 ... 6,5 | < 5,5       |

Rugozitatea suprafeței îmbrăcăminții rutiere este o caracteristică funcțională a drumului și este caracterizată de valorile SRT sau HS. Determinarea rugozității cu aparatul SRT constă în transformarea energiei cinetice a unui pendul în frecare, evidențiată de înălțimea de ridicare a pendulului dincolo de punctul de contact cu suprafața îmbrăcăminții rutiere. Determinarea rugozității prin metoda înălțimii de nisip constă în întinderea pe suprafața de încercare a unui volum dat de nisip fin, sub forma unei pete circulare, care umple golurile îmbrăcăminții până la nivelul asperităților. Convențional, înălțimea de nisip (HS) se stabilește raportând volumul de nisip la suprafața petei. Calificativul rugozității suprafeței se stabilește funcție de valorile SRT sau HS, așa cum rezultă din tabelul 1.2.

## 14 Generalități

Capacitatea portantă a complexului rutier este o caracteristică structurală a drumului exprimată prin valorile deformației elastice caracteristice (deflexiunea). Deflexiunea se măsoară cu deflectometrele cu sarcină dinamică în conformitate cu instrucțiunile proprii de utilizare sau cu deflectometrele cu pârghie Benkelman, în conformitate cu "Instrucțiunile tehnice departamentale pentru determinarea prin deflectografie și deflectometrie a capacității portante a drumurilor cu structuri rutiere suplă", indicativ CD 31-2002.

Tabelul 1.2

| Calificativ | Rugozitatea, SRT sau HS |             |
|-------------|-------------------------|-------------|
|             | SRT                     | HS          |
| REA         | < 55                    | < 0,2       |
| MEDIOCRĂ    | 55 ... 70               | 0,2 ... 0,6 |
| BUNĂ        | 70 ... 80               | 0,6 ... 0,7 |
| FOARTE BUNĂ | > 80                    | > 0,7       |

Calificativul capacității portante se stabilește în funcție de clasa de trafic și valoarea deflexiunii caracteristice conform tabelului 1.3, în cazul măsurătorilor efectuate cu sarcină dinamică și conform tabelului 1.4, în cazul măsurătorilor efectuate cu deflectometrul cu pârghie tip Benkelman.

Tabelul 1.3

| Clasa de trafic                     | Traficul de calcul [m.o.s] | Capacitatea portantă |             |             |             |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                     |                            | REA                  | MEDIOCRĂ    | BUNĂ        | FOARTE BUNĂ |
| Deflexiunea caracteristică, 0,01 mm |                            |                      |             |             |             |
| Foarte ușor                         | Sub 0,03                   | > 180                | 160 ... 180 | 140 ... 160 | < 140       |
| Ușor                                | 0,03 ... 0,10              | > 150                | 120 ... 150 | 100 ... 120 | < 100       |
| Mediu                               | 0,10 ... 0,30              | > 110                | 85 ... 110  | 70 ... 85   | < 70        |
| Greu                                | 0,30 ... 1,00              | > 80                 | 60 ... 80   | 50 ... 60   | < 50        |
| Foarte greu                         | 1,00 ... 3,00              | > 65                 | 50 ... 65   | 45 ... 50   | < 45        |
| Exceptional                         | 3,00 ... 10,00             | > 55                 | 45 ... 55   | 35 ... 45   | < 35        |

Tabelul 1.4

| Clasa de trafic                     | Traficul de calcul [m.o.s] | Capacitatea portantă |             |             |             |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                     |                            | REA                  | MEDIOCRĂ    | BUNĂ        | FOARTE BUNĂ |
| Deflexiunea caracteristică, 0,01 mm |                            |                      |             |             |             |
| Foarte ușor                         | Sub 0,03                   | > 200                | 185 ... 200 | 165 ... 185 | < 165       |
| Ușor                                | 0,03 ... 0,10              | > 175                | 145 ... 175 | 130 ... 145 | < 130       |
| Mediu                               | 0,10 ... 0,30              | > 140                | 115 ... 140 | 100 ... 115 | < 100       |
| Greu                                | 0,30 ... 1,00              | > 110                | 90 ... 110  | 80 ... 90   | < 80        |
| Foarte greu                         | 1,00 ... 3,00              | > 95                 | 80 ... 95   | 75 ... 80   | < 75        |
| Exceptional                         | 3,00 ... 10,00             | > 85                 | 75 ... 85   | 70 ... 75   | < 70        |

### 1.3 - Starea drumurilor de interes național, județean și local 15

Starea de degradare este o caracteristică structurală a drumului. Starea de degradare a îmbrăcăminții rutiere este caracterizată de indicele global de degradare (IG) determinat conform normativului AND 540 sau indicele de degradare (ID) determinat conform instrucțiunilor AND 547.

Starea de degradare a fiecărui eșantion este caracterizată prin valoarea indicelui global de degradare (IG) calculat cu relația:

$$IG = \sqrt{I.E.ST \times I.E.SU} \quad [\%] \quad (1.1)$$

unde:

- I.E.ST este indicele de evaluare structurală și reprezintă cât din suprafața îmbrăcăminții nu este afectată de degradările structurale;
- I.E.SU este indicele de evaluare a suprafeței și reprezintă cât din suprafața îmbrăcăminții nu este afectată de degradările de suprafață.

Starea de degradare pe fiecare sector omogen pentru îmbrăcămințile rutiere bituminoase este caracterizată de indicele de degradare (ID), calculat cu relația:

$$ID = \frac{S_{degr}}{S} \times 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

unde:

- S – suprafața benzii de circulație, în m<sup>2</sup>;
  - S<sub>degr</sub> suprafața degradată, în m<sup>2</sup>:
- $$S_{degr} = D_1 + 0,7D_2 + 0,7 \times 0,5D_3 + 0,2D_4 + D_5 \quad [m^2] \quad (1.3)$$

unde:

- D<sub>1</sub> – suprafața afectată de gropi și plombe;
- D<sub>2</sub> – suprafața afectată de faianțări, fisuri și crăpături multiple pe direcții diferite;
- D<sub>3</sub> – suprafața afectată de fisuri și crăpături transversale și longitudinale, rupturi de margine;
- D<sub>4</sub> – total suprafață poroasă, cu ciupituri, suprafață încrețită, suprafață șiroită, suprafață exudată;
- D<sub>5</sub> – suprafață afectată de fâgașe longitudinale;
- coeficienții 0,7 și 0,2 țin cont de ponderea defecțiunii receptive, iar coeficientul 0,5 ține cont de lățimea pe care este afectată suprafața îmbrăcăminții de degradările tip D<sub>3</sub>, pentru a fi exprimate în m<sup>2</sup>.

Starea de degradare pe fiecare sector omogen pentru îmbrăcămințile rutiere din beton de ciment este caracterizată de indicele de degradare (ID) calculat cu relația:

$$ID = \frac{N_{dd}}{N_{dt}} \times 100 \quad [\%] \quad (1.4)$$

unde:

- N<sub>dt</sub> – numărul total de dale pe banda de circulație;
- N<sub>dd</sub> – numărul de dale degradate:

$$N_{dd} = D_1 + 0,5D_2 + 0,5D_3 \times \frac{N}{S} + 0,3D_4 \quad [dale] \quad (1.5)$$

unde:

- N – numărul dalelor pe bandă;
- S – suprafața sectorului de măsurare pe bandă (m<sup>2</sup>);
- D<sub>1</sub> – număr de dale tasate;
- D<sub>2</sub> – număr de dale plombate și faianțate;
- D<sub>3</sub> – suprafață afectată de fisuri și crăpături transversale de colț, longitudinale, de formă neregulată;
- D<sub>4</sub> – suprafață exfoliată;
- coeficienții 0,5 și 0,3 aplicați degradărilor tip D<sub>2</sub> și D<sub>4</sub>, țin cont de ponderea defecțiunii respective;

## 16 Generalități

- coeficientul 0,5 aplicat degradării tip D<sub>3</sub>, țin cont de lățimea pe care este afectată suprafața îmbrăcămînții, de degradările D<sub>3</sub>, pentru a fi experimentate în m<sup>2</sup>.

Calificativul stării de degradare se stabilește în funcție de indicii de degradare conform tabelului 1.5. Clasa stării tehnice se încadrează în cinci clase pe baza caracteristicilor drumului, conform tabelelor 1.6 și 1.7 în funcție de tipul structurii rutiere [92].

Tabelul 1.5

| Calificativ | Indicele de degradare     |            |
|-------------|---------------------------|------------|
|             | Indicele de degradare (%) |            |
|             | IG                        | ID         |
| REA         | < 77                      | > 13       |
| MEDIOCRĂ    | 77 ... 90                 | 7,5 ... 13 |
| BUNĂ        | 90 ... 95                 | 5 ... 7,5  |
| FOARTE BUNĂ | > 95                      | > 5        |

Tabelul 1.6

Stabilirea stării tehnice și a lucrărilor obligatorii de întreținere periodică și de reparații curente în cazul drumurilor cu structuri rutiere suple și mixte (semirigide)

| Stare tehnică | Clasa stării tehnice | Calificativul caracteristicilor |                    |                    |                    | Lucrări de întreținere și reparații           |                       |
|---------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|-----------------------|
|               |                      | Capacitate portantă             | Stare de degradare | Planeitate         | Rugozitate         | -   | -                     |
| Foarte bună   | 5                    | F.bună                          | F.bună             | F.bună             | F.bună             | -   | Întreținere periodică |
| Bună          | 4                    | Cel puțin bună                  | Cel puțin bună     | Cel puțin bună     | Cel puțin mediocră | Tratamente bituminoase                        |                       |
|               |                      |                                 | Cel puțin mediocră | Cel puțin bună     | Bună la rea        | Straturi bituminoase f. subțiri               |                       |
| Mediocră      | 3                    | Cel puțin mediocră              | Cel puțin mediocră | Cel puțin mediocră | Foarte bună la rea | Covoare bituminoase                           |                       |
| Rea           | 2                    | Cel puțin mediocră              | Cel puțin rea      | Cel puțin rea      | Foarte bună la rea | Reciclare în situ a îmbrăcămînții bituminoase |                       |
| Foarte rea    | 1                    | Rea                             | Foarte bună la rea | Foarte bună la rea | Foarte bună la rea | Ranforsarea structurii rutiere                | Reparații curente     |

În ceea ce privește starea tehnică a drumurilor naționale, încă din anul 1991, a fost lansat un program de reabilitare și modernizare, program ce vizează aducerea drumurilor naționale la parametrii prevăzuți în AGR - Acordul european privind principalele artere internaționale de trafic rutier. În prezent încă se depun eforturi în scopul asigurării întreținerii drumurilor, iar în ceea ce privește traficul greu în localități, s-a prevăzut un program de construcție a unor variante de ocolire a orașelor mari de către Ministerul Transporturilor și Infrastructurii, variante ce



pentru unele județe au prins contur prin decongestionarea traficului. Ca urmare a finalizării unor astfel de proiecte de reabilitare și efectuării lucrărilor de reparații capitale la drumurile naționale s-au îmbunătățit parametrii tehnici, reducându-se astfel lungimea drumurilor cu durata de exploatare expirată și obținându-se o creștere a capacității de circulație și a siguranței traversării liniilor de cale ferată prin construirea de pasaje denivelate.

Tabelul 1.7  
Stabilirea stării tehnice și a lucrărilor obligatorii de întreținere periodică și de reparații curente în cazul drumurilor cu structură rutieră rigidă

| Stare tehnică | Clasa stării tehnice | Calificativul caracteristicilor |                    |                     | Lucrări de întreținere și reparații |                       |
|---------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|               |                      | Stare de degradare              | Planeitate         | Rugozitate          | -                                   | -                     |
| Foarte bună   | 5                    | Foarte bună                     | Foarte bună        | Foarte bună         | -                                   | Întreținere periodică |
| Bună          | 4                    | Foarte bună și bună             | Bună               | Foarte bună și bună | Tratamente bituminoase              |                       |
| Mediocră      | 3                    | Cel puțin mediocră              | Cel puțin mediocră | Cel puțin mediocră  | Straturi bituminoase f. subțiri     |                       |
| Rea           | 2                    | Cel puțin rea                   | Cel puțin rea      | Cel puțin rea       | Ranforsarea structurii rutiere      | Reparații curente     |
| Foarte rea    | 1                    | Rea                             | Rea                | Mediocră la rea     |                                     |                       |

Drumurile naționale constituie rețeaua majoritară a țării, pe ele desfășurându-se cca. 70 % din traficul rutier, figura 1.1. Din rețeaua de drumuri naționale, 91 % prezintă îmbrăcămînți modernizate (îmbrăcămînți asfaltice, din beton de ciment, pavele), 8 % au îmbrăcămînți nemodernizate (îmbrăcămînți asfaltice ușoare) și 1 % sunt pietruite.

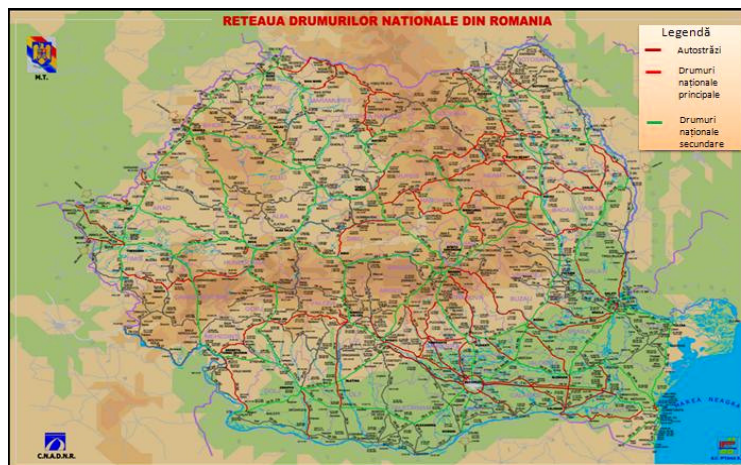


Figura 1.1. Rețeaua de drumuri naționale și autostrăzi

## 18 Generalități

Din punct de vedere al gradului de modernizare, rețeaua rutieră publică deține 33,7 % (26 609 km) drumuri modernizate, 29,4 % (18 805 km) drumuri cu îmbrăcămînți ușoare rutiere și 42,5 % (33 535 km) drumuri pietruite și de pământ, (figura 1.2).

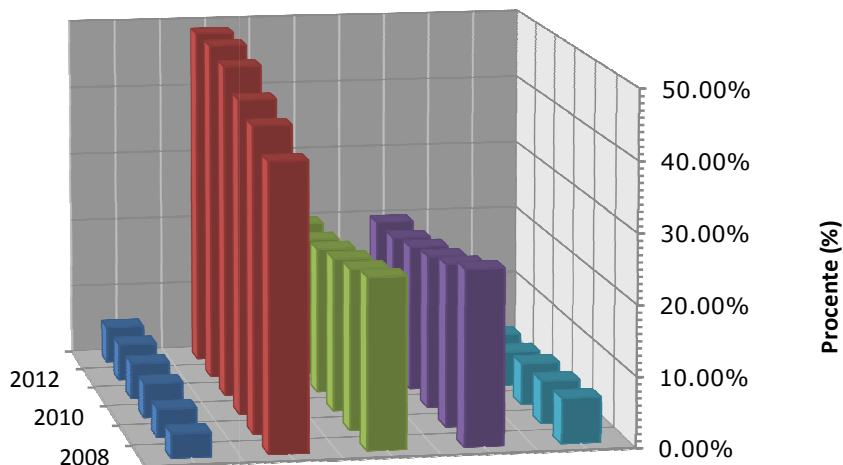
Conform datelor obținute de la Ministerul Transporturilor și Infrastructurii privind starea tehnică a drumurilor naționale din România pentru perioada 2008 – 2013, se observă faptul că starea de degradare predominantă a acestora este una bună.

În decursul anului trecut 2010, din lungimea totală de 16 178 km de drumuri naționale ce străbat teritoriul țării noastre, 809 km au prezentat o stare de degradare foarte bună, 7 296 km bună, 3 559 km mediocră, 3 543 km rea, iar 971 km au o stare de degradare foarte rea.

Evaluarea stării de degradare a fost făcută pe baza indicelui global de degradare IG, în cazul îmbrăcămînților rutiere bituminoase, respectiv indicelui de degradare ID, în cazul îmbrăcămînților rutiere din beton de ciment conform tabelului 1.5 pe sectoare omogene de drumuri.

În figura 1.3 este prezentată procentual starea de degradare curentă, actuală și de perspectivă a drumurilor naționale din România.

### Starea de viabilitate



|               | 2013   | 2012   | 2011   | 2010   | 2009   | 2008   |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ■ Foarte bună | 5.30%  | 5.30%  | 5.20%  | 5.00%  | 4.10%  | 3.50%  |
| ■ Bună        | 49.00% | 49.00% | 47.90% | 45.10% | 43.50% | 40.70% |
| ■ Mediocră    | 20.00% | 20.00% | 21.00% | 22.00% | 23.00% | 24.30% |
| ■ Rea         | 19.90% | 19.90% | 20.90% | 21.90% | 23.20% | 25.00% |
| ■ Foarte Rea  | 4.90%  | 4.90%  | 5.00%  | 6.00%  | 6.20%  | 6.50%  |

Figura 1.3. Repartiția procentuală a stării de viabilitate pe drumurile naționale din România

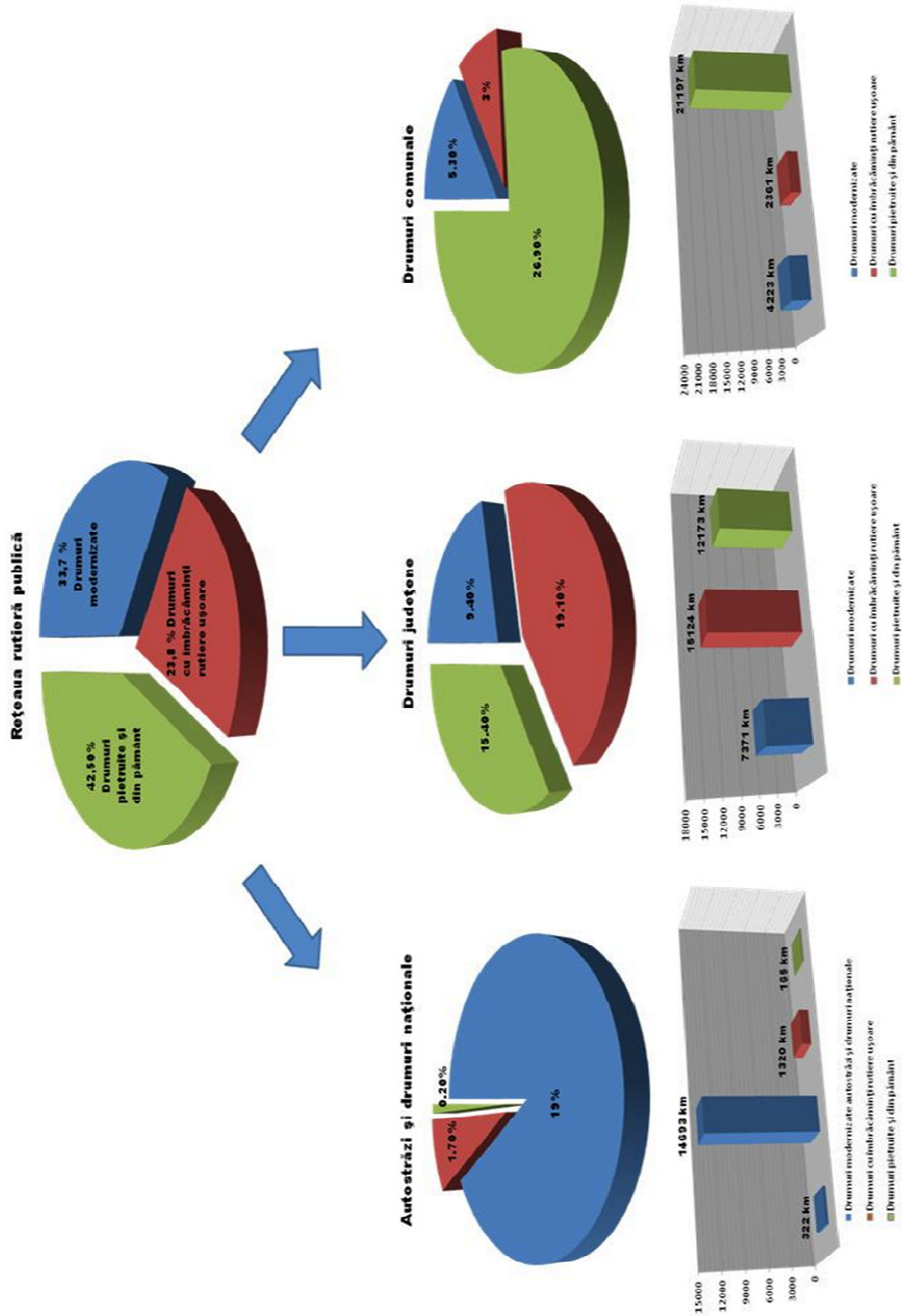


Figura 1.2. Structura rețelei rutiere publice din România

În urma cercetărilor efectuate pe drumurile județene s-au obținut date procentuale în funcție de metoda de centralizare a acestora pentru fiecare județ, cu privire la modul de alcătuire al structurii rutiere, tabelul 1.8.

Tabelul 1.8

| TIPUL ÎMBRĂCĂMINȚII                   | Lungime (km)  | %          |
|---------------------------------------|---------------|------------|
| Îmbrăcămintă asfaltică modernă        | 6 024         | 17,3       |
| Întreținere betoane de ciment         | 1 078         | 3,1        |
| Pavaje                                | 269           | 0,7        |
| Îmbrăcăminți asfaltice ușoare (I.A.U) | 15 124        | 43,7       |
| Pietruiri                             | 10 320        | 29,8       |
| Drumuri de pământ                     | 1 853         | 5,3        |
| <b>TOTAL DRUMURI JUDEȚENE</b>         | <b>34 668</b> | <b>100</b> |

Administrarea efectivă a drumurilor județene se face de către birouri, servicii sau direcții din cadrul Consiliilor Județene, încadrate cu foarte puțin personal de specialitate. Analiza făcută de administrația drumurilor județene cu privire la starea de viabilitate a acestora, este practic o analiză vizuală a stării de degradare a suprafeței de rulare.

Astfel, datele obținute au fost furnizate în mare parte de direcțiile pentru Administrarea Drumurilor și Podurilor Județene, pentru anul 2009, ele fiind prezentate în funcție de tipul îmbrăcăminții rutiere și în funcție de starea de viabilitate [14], conform figură 1.4.

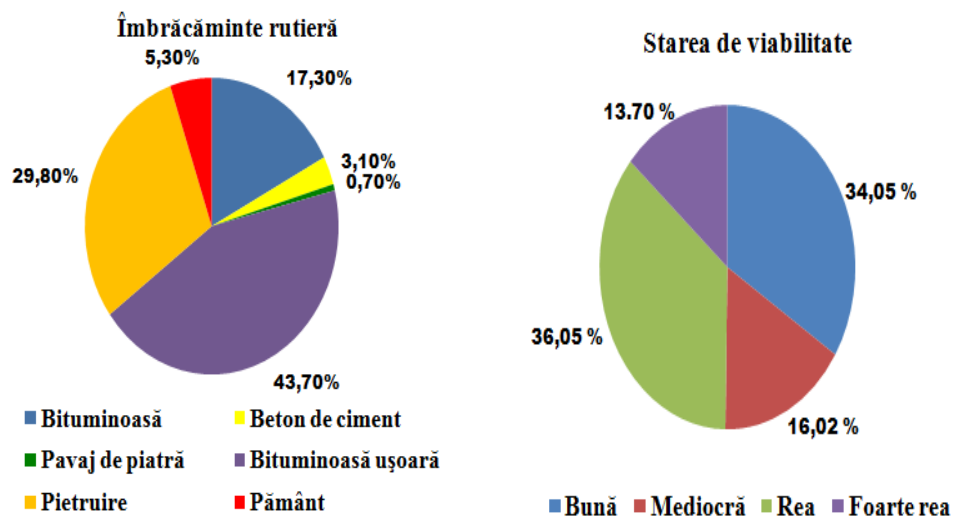


Figura 1.4. Repartiția procentuală a tipului de îmbrăcămintă rutieră și a stării de viabilitate pe drumurile județene din România

Faptul că această administrare a drumurilor județene se face diferit de la un județ la altul rezultă și din situațiile statistice transmise de la județe către Ministerul

### 1.3 - Starea drumurilor de interes național, județean și local 21

Transporturilor privind starea de viabilitate la sfârșitul anului calendaristic. Din păcate această monitorizare a datelor diferă de la un județ la altul, ea nefiind sesizată nici în cadrul Ministerului Transporturilor, acolo unde datele se centralizează, lucru ce conduce la concluzia că nici acolo nimeni nu prelucrează aceste date.

Drumurile județene, conform statisticilor transmise de județe pe tipuri de îmbrăcămînți, se prezintă după cum urmează în tabelul 1.9.

Zonele rurale din România, în cea mai mare parte a lor, sunt afectate de lipsa semnificativă a infrastructurii și a deficiențelor acesteia care afectează atât dezvoltarea economică, cât și calitatea vieții, cele mai importante nevoi fiind legate de lipsa: drumurilor comunale, rețelelor de alimentare cu apă, rețelelor de canalizare, etc.

În mediul rural, drumurile constituie ruta de transport cea mai importantă, dar calitatea, și în general, dezvoltarea acestora și a traficului este încă departe de a îndeplini standardele europene. Doar jumătate dintre comune au acces direct la rețeaua de drumuri iar din acest motiv se poate spune că rețeaua de drumuri actuală deservește doar 3/5 din totalul populației rurale. Mai mult de 25 % dintre comune nu pot utiliza drumurile în perioadele cu precipitații (Studiu Banca Mondială, 2004). Lucrările efectuate în ultimii ani s-au concentrat în special pe reparații și modernizări ale rețelei de drumuri naționale. Resursele financiare limitate au făcut ca drumurile județene și comunale să fie serios neglijate, iar calitatea și gradul lor de utilizare au scăzut dramatic.

În ceea ce privește drumurile comunale, se precizează că datele referitoare la lungimea acestora și starea de viabilitate a tipurilor de îmbrăcămînți rutiere sunt furnizate doar pentru 32 de județe, restul de 9 județe pentru care nu există date statistice. se consideră încadrate în media județelor pentru care există informații, astfel putându-se reda câteva date generale, conform tabel 1.10.

Tabelul 1.10

| <b>TIPUL ÎMBRĂCĂMINȚII</b>            | <b>Lungime (km)</b> | <b>%</b>   |
|---------------------------------------|---------------------|------------|
| Îmbrăcăminte asfaltică modernă        | 1 195               | 4,3        |
| Întreținere betoane de ciment         | 1 722               | 6,2        |
| Pavaje                                | 1 306               | 4,7        |
| Îmbrăcămînți asfaltice ușoare (I.A.U) | 2 361               | 8,5        |
| Pietruiri                             | 13 252              | 47,7       |
| Drumuri de pământ                     | 7 945               | 28,6       |
| <b>TOTAL DRUMURI COMUNALE</b>         | <b>27 781</b>       | <b>100</b> |

Analizând datele precizate mai sus, putem spune că atât drumurile județene cât și drumurile comunale, nu prezintă o situație favorabilă din punctul de vedere al modernizării, fapt datorat administratorilor acestora, excepție făcând unele drumuri care se află în administrarea Consiliilor Județene, Consiliilor Locale Orășenești și Municipale care au în cadrul Primăriilor respective Servicii de Drumuri Urbane.



### **1.4. Integrarea infrastructurii românești în rețelele europene de transport**

Integrarea infrastructurii românești în rețelele europene de transport are în vedere promovarea interconectării și interoperativității rețelelor existente prin concentrarea atenției asupra unor "artere de infrastructuri specifice" localizate pe traseul celor 10 coridoare paneuropene de transport care străbat zone geografice ale mai multor țări și leagă principalele centre economice și sociale ale acestora.

Construcția și modernizarea rețelelor de infrastructură situate pe coridoarele paneuropene de transport contribuie la integrarea graduală a țării noastre în familia țărilor continentului european și pun în valoare resursele economice și turistice de care dispunem, astfel rețelele de infrastructuri devenind adevărate artere hrănitoare ale pieței europene.

Totodată, prin dezvoltarea infrastructurii de transport se va juca un rol important în integrarea pieței interne și sprijinirea punerii în valoare a poziției geografice a României ca zonă de tranzit, aflată la intersecția Coridorului de transport pan – european IV și a Coridorului de transport pan – european IX. Localizarea României la intersecția a numeroase drumuri care leagă Europa de Vest cu cea de Est, ca și Europa de Nord cu cea de Sud, precum și situarea țării pe axele de tranzit între Europa și Asia, constituie un element de referință pentru determinarea opțiunilor strategice privind dezvoltarea și modernizarea infrastructurii de transport, astfel oportunitatea creată de Canalul Dunăre – Marea Neagră și fluviul Dunărea, poate ocupa o poziție cheie pentru atragerea fluxurilor internaționale de mărfuri în relațiile dintre Europa și celelalte continente.

Instrumentele care au stat la baza definirii coridoarelor pan – europene de transport care includ și România sunt acordurile europene dezvoltate în cadrul CEE – ONU (AGR, AGC, AGTC, TER și TEM) rezultate din cele trei conferințe Paneuropene ale Transporturilor de la Praga (1991), Creta (1994) și Helsinki (1997) și Decizia Parlamentului European și a Consiliului nr. 1692/96/EC din 23 iulie 1996 privind liniile directe pentru dezvoltarea rețelei transeuropene de transport, amendată prin Decizia Parlamentului European și a Consiliului nr. 1346/2001/EC din 22 mai 2001. Cele 9 coridoare pan – europene de transport au fost stabilite la Conferința Pan – Europeană a Transporturilor de la Creta (martie 1994). La cea de-a treia Conferință Pan – Europeană a Transporturilor de la Helsinki, s-a convenit asupra ajustării coridoarelor pan – europene de transport prin adăugarea unui nou coridor la cele 9 deja definite. La această conferință au fost definite și 4 Zone Pan – Europene de Transport. Astfel, Europa este traversată de 10 Coridoare Pan – Europene de Transport și are definite 4 Zone Pan – Europene de Transport.

Rolul acestor zece coridoare este de a crea legături între Europa de Vest și Europa de Est, cât și între statele din Europa de Est. Fiecare coridor are o componentă rutieră și una feroviară, cu excepția Coridorului VII, care este reprezentat de segmentul de Dunăre în aval de Viena.

Coridoarele formează o rețea ce se întinde de la vest (punct extrem: Nürnberg) la est (punct extrem: Nijni Novgorod) și de la nord (punct extrem: Helsinki) la sud (punct extrem: Salonic). Rețeaua formată de coridoarele pan – europene este prezentată în figura 1.5.

- **I.** ("Via Baltica") Helsinki – Tallinn – Riga – Kaunas – Varșovia și Riga – Kaliningrad – Gdansk;
- **II.** Berlin – Varșovia – Minsk – Moscova – Nizhnij Novgorod;

- **III.** Berlin – Dresda – Wrocław – Lviv – Kiev;
- **IV.** Berlin – Nurenberg – Praga – Budapesta – **Constanța** – Istanbul – Salonic;
- **V.** Veneția – Trieste – Koper – Ljubljana – Budapesta – Uzgorod – Lviv;
  - ramura A: Bratislava – Zilina – Kosice – Uzgorod;
  - ramura B: Rijeka – Zagreb – Budapesta;
  - ramura C: Ploce – Sarajevo – Osijek – Budapesta.



Figura 1.5. Coridoarele Pan – Europene

- **VI.** Gdansk – Grudziadz – Varsovia – Katowice – Zilina;
  - ramura A: Katowice – Ostrava - Coridor IV.
- **VII.** Dunărea: **Dunărea, cu brațul Sulina și Canalul Dunăre – Marea Neagră;**
- **VIII.** Durres – Tirana – Skopje – Sofia – Varna;
- **IX.** Helsinki – St.Petersburg – Moscova – Pskov – Kiev – Ljubasevka – Chișinău – **București** – Dimitrovgrad – Alexandroupolis;
  - ramura A: Odessa - Ljubasevka;
  - ramura B: Kiev – Minsk – Vilnius – Kaunas – Klaipeda – Kaliningrad.
- **X.** Salzburg – Ljubljana – Zagreb – Belgrad – Nis – Skopje – Veles – Salonic;
  - ramura A: Graz – Maribor – Zagreb;
  - ramura B: Budapesta – Novi Sad – Belgrad;
  - ramura C: Nis – Sofia – coridor IV spre Istanbul;
  - ramura D: Veles – Bitola – Florina - Via Egnatia;

Zonele Pan-Europene de Transport sunt:

- Zona Pan – Europeană de Transport a Marii Negre;
- Zona Pan – Europeană de Transport Arctic-Barents;



- Zona Pan – Europeană de Transport Marea Mediterană;
- Zona Pan – Europeana de Transport Marea Ionică-Adriatică.

România este traversată de coridoarele IV (Berlin – Nurenberg – Praga – Budapesta – **Arad – București – Constanța** – Istanbul – Salonic), VII (**Dunărea, cu brațul Sulina și Canalul Dunăre – Marea Neagră**) și IX (Helsinki – St.Petersburg – Moscova – Pskov – Kiev – Ljubasevka – Chișinău – **București** – Dimitrovgrad – Alexandroupolis).

Plecând de la definirea Coridoarelor Pan – Europene de Transport a fost definită rețeaua Pan – Europeană de Transport de pe teritoriul țărilor asociate în cadrul proiectului TINA (Evaluarea Necesităților de Infrastructură de Transport). Prin această rețea se va asigura interconectarea și interoperabilitatea între rețeaua de transport (rutieră, feroviară, căi navigabile interioare) la nivel național și european.

Prin planul de amenajare a teritoriului național aprobat prin Legea nr. 71/1996 au fost definite direcțiile de dezvoltare ale rețelelor naționale de infrastructură, traseele și etapele de construcție a infrastructurilor de transport urmând să se stabilească pe baza studiilor de fezabilitate și a priorităților definite în strategiile sectoriale [86].

În prezent este în curs de promovare un proiect de lege care preia integral prevederile Deciziei Parlamentului European și a Consiliului nr. 1692/1996/EC din 23 iulie 1996 privind liniile directoare comunitare pentru dezvoltarea rețelei transeuropene de transport. Prin respectiva lege se definește rețeaua pan – europeană de transport pe teritoriul României și dezvoltarea acesteia până în anul 2015.

#### 1.4.1. Geostrategia dezvoltării căilor de transport în România

Prin poziția sa geografică, prin tradițiile și prin spiritul deschis al politicilor sale de bună vecinătate, România, cu o suprafață de peste 237,5 mii km<sup>2</sup> și cca. 22 milioane locuitori, face parte din familia țărilor europene, angajându-se ireversibil pe calea integrării în structurile europene și euro-atlantice. Situată pe coridorul de tranzit dintre Europa de Vest și Orientul Mijlociu, cu o putere regională de producător și consumator, România, odată devenită independentă în a doua jumătate a secolului XIX, a început să își dezvolte transporturile investind resurse și muncă în crearea unor infrastructuri la nivelul tehnologic cel mai înalt al perioadei respective.

Potențialul oferit de avantajele naturale – țară riverană la Marea Neagră și țară dunăreană străbătută pe o lungime de 1 075 km de cea mai importantă cale navigabilă din Europa, fluviul Dunărea a conferit României o poziție strategică favorabilă, în zona de confluență a polilor generatori de transporturi din Europa, Balcani și Orientul Mijlociu.

Acestei poziții i s-au conferit noi valențe odată cu realizarea legăturii directe dintre Marea Neagră și Marea Nordului ca urmare a construirii Canalului Dunăre – Marea Neagră în anul 1984 și a finalizării căii navigabile Rhin – Main – Dunăre în anul 1992.

Prin poziția sa ca port la Marea Neagră și punct terminus a legăturii cu Marea Nordului, Portul Constanța reprezintă principala placă turnantă a fluxurilor de trafic din bazinul Mării Negre. Prin utilizarea Portului Constanța, rutele navigabile dintre Canalul Suez, zona de est a Mării Mediterane și Europa Centrală se scurtează cu cca. 300 km. Prin dezvoltarea infrastructurilor terestre de transport, România a devenit o punte de legătură între spațiul geografic al țărilor baltice și nordice, și spațiul geografic al țărilor riverane Mării Negre [93].

Modificările produse în spațiul fostei Iugoslavii și a fostei URSS au generat o restructurare totală a schemei tradiționale de transport din zonă și au condus la punerea în valoare a infrastructurilor de transport și a poziției geografice favorabile pe care România o deține.

Totodată, în vederea măririi gradului de atractivitate în porturile maritime și fluviale și în apropierea punctelor de trecere a frontierei au fost înființate zone libere (în prezent funcționează zonele libere Constanța Sud și Basarabi, Sulina, Galați, Brăila, Giurgiu, Curtici-Arad) care pun la dispoziția investitorilor străini toate facilitățile specifice acestora.

Deși este recunoscut că, din motive obiective, starea tehnică a infrastructurii românești nu corespunde în totalitate standardelor europene, trebuie menționată o realitate de cea mai mare importanță prin care reiese că România are o rețea de infrastructuri (drumuri, căi ferate, căi navigabile, canale navigabile, porturi maritime și fluviale, aeroporturi, căi aeriene) care asigură realizarea conectării localităților la rețeaua națională de transport și la sistemele internaționale de transport.

Prin poziția geografică și prin rețeaua de infrastructuri, România îndeplinește indiscutabil rolul de placă turnantă a transporturilor continentale și intercontinentale pe principalele traiectorii geografice Vest – Est și Nord – Sud.

#### **1.4.2. Principii de dezvoltare a rețelei naționale de transporturi**

O infrastructură de transport eficientă, conectată la rețeaua europeană de transport, contribuie la creșterea competitivității economice, facilitează integrarea în economia europeană și permite dezvoltarea de noi activități pe piața internă.

Analiza situației curente în care ne situăm cu infrastructura de transport și concluziile „Analizei SWOT”, au evidențiat faptul că situația actuală a sistemului național de transport se caracterizează prin existența unui număr redus de autostrăzi și de conexiuni la nivel de autostradă sau drum rapid, cu statele vecine și membre ale Uniunii Europene, de variante ocolitoare, de existența unei degradări avansate a infrastructurii rutiere. În aceste condiții se impune modernizarea și dezvoltarea rețelei naționale de transport în parametrii de calitate a serviciilor prestate efectiv și a satisfacerii necesităților de mobilitate a persoanelor și fluxurilor de mărfuri în ceea ce privește capacitatea, calitatea și siguranța care să asigure creșterea gradului de accesibilitate a României, precum și promovarea unei dezvoltări durabile a sistemului de transport [99].

În acest context, scopul strategiei pentru prioritatea „Dezvoltarea și modernizarea infrastructurii de transport” este de a genera o dezvoltare echilibrată a tuturor modurilor de transport prin asigurarea infrastructurilor de transport moderne și durabile împreună cu o creștere a calității serviciilor și realizarea unui sistem funcțional.

În ceea ce privește dezvoltarea infrastructurii de transport, aceasta reprezintă o condiție necesară pentru implementarea cu succes și a celorlalte priorități de dezvoltare ale României pentru perioada 2007–2013, contribuind la creșterea mobilității persoanelor și a mărfurilor, la integrarea poliilor regionali de creștere cu rețeaua trans – europeană de transport, la combaterea izolării zonelor subdezvoltate și, nu în ultimul rând, la dezvoltarea infrastructurii de transport regionale și locale.

### 1.4.3. Strategia de dezvoltare și întreținere a infrastructurilor de transport

Infrastructura rutieră, la nivelul rețelei naționale, formată din drumuri, autostrăzi, poduri, pasaje, tunele, conducte, etc. este definită, promovată și realizată pentru a prelua nivelele de solicitări externe din acțiunea traficului rutier, acțiunea factorilor climatici, pentru perioada de timp scurt, mediu și lung.

Obiectivul general și obiectivele specifice ale priorității naționale de dezvoltare, întreținere și modernizare a infrastructurilor de transport se realizează prin următoarele acțiuni:

- efectuarea lucrărilor de întreținere curentă și periodică a drumurilor și podurilor cu periodicitatea prevăzută de reglementările tehnice în vigoare, pentru asigurarea viabilității și desfășurării traficului în condiții de siguranță și confort;
- modernizarea întregii rețele de drumuri naționale prin realizarea de îmbrăcămînți asfaltice sau din beton de ciment;
- creșterea capacității portante prin realizarea de covoare și ranforsări în vederea trecerii de la sarcina pe osie de la 10 t la 11,5 t;
- îmbunătățirea performanțelor îmbrăcămînților asfaltice ale drumurilor naționale prin utilizarea de mixturi asfaltice stabilizate cu fibre și bitum modificat, pentru drumurile de clasă tehnică I, II, III, pentru a avea o comportare mai bună la acțiunea traficului greu;
- conservarea prin lucrări de întreținere a parametrilor tehnici ai structurilor existente care îndeplinesc exigențele legate de asigurarea desfășurării traficului în condiții de siguranță și confort [59];
- modernizarea și/sau reabilitarea structurilor existente ai căror parametri tehnici nu mai corespund evoluției traficului (ridicarea clasei de încărcare, creșterea lățimii părții carosabile, etc);

Infrastructura rutieră, la nivelul rețelelor județene și locale, are ca și obiective actuale de remediere a stării de viabilitate a acestora, cât și de diminuare lungimilor drumurilor pietruite și din pământ, un acord de principiu privind finanțarea programului de „ Reabilitare și modernizare a 10.000 km de drumuri județene și locale”, aprobat în septembrie 2009, acord ce prevede următoarele acțiuni:

- modernizarea drumurilor și/sau sectoarelor de drum de interes județean și de interes local care în prezent sunt din pământ, pietruite sau care prezintă o stare necorespunzătoare a îmbrăcămînții bituminoase, betonului asfaltic, betonului ciment, pavajului sau a îmbrăcămînții asfaltice;
- corecția elementelor geometrice – profiluri transversale și longitudinale, curbe, supraînălțări;
- amenajarea acostamentelor;
- amenajarea intersecțiilor cu alte drumuri;
- execuția de șanțuri colectoare și dirijare a apelor pluviale;
- construcția de podețe și poduri, ziduri de sprijin și consolidări de taluzuri.

Aceste elemente strategice vor genera coeziunea teritorială între România și statele membre ale UE, prin reducerea timpilor de călătorie către principalele destinații, atât interne, cât și externe, prin modernizarea și dezvoltarea infrastructurilor rutiere (în special autostrăzi, figura 1.6) și a facilităților feroviare, pentru a satisface traficul intensiv de mărfuri și pasageri [101].

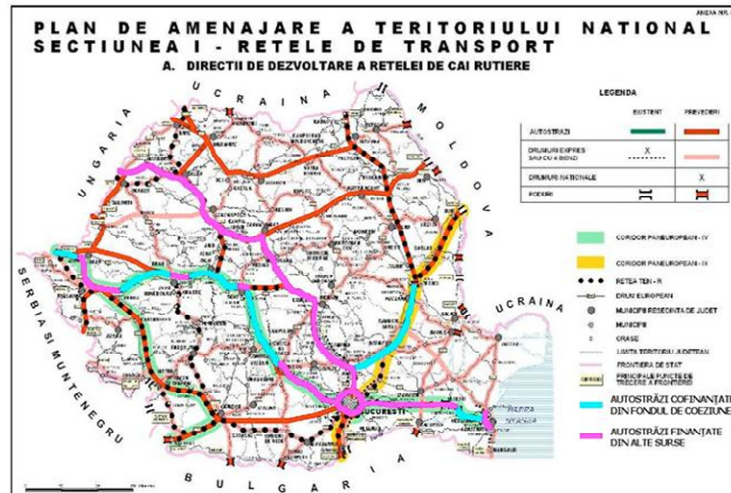


Figura 1.6. Secțiuni de autostradă pentru perioada 2007-2015

## 1.5. Obiectivele tezei

După cum am menționat anterior, dezvoltarea unei societăți depinde într-o mare măsură de eficiența și calitatea transporturilor, care la rândul lor depind de infrastructura acestora. Având în vedere strategia de realizare a infrastructurilor de transport din țara noastră ținând cont de politicile interne, externe și de direcțiile lor de acțiune privind dezvoltarea rețelelor de transport este foarte important să se acorde o atenție deosebită conceperii unor structuri rutiere cu performanțe ridicate și combaterii unor probleme de actualitate privind acțiunile asupra acestora datorate traficului și condițiilor climatice.

Plecând de la aceste considerente lucrarea de față își propune studierea unor factori de influență asupra structurilor rutiere, cu particularizare pentru straturile din asfalt, în scopul determinării proprietăților termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, emisivitate) și realizarea unor îmbrăcămînți asfaltice cu proprietăți fizico-mecanice respectiv termo-fizice superioare.

În construcția de drumuri, straturile structurii rutiere suple și mixte din mixtură asfaltică sunt cel mai mult expuse la solicitări, cauza majoră pe de-o parte fiind traficul greu și pe de altă parte condițiile climatice. Traficul afectează îmbrăcămintea asfaltică în moduri diferite vara și iarna. În timpul iernii, datorită temperaturilor scăzute pot apărea fisuri sau crăpături, iar în timpul verii îmbrăcămintea asfaltică datorită soarelui puternic se înmoaie, existând riscul ridicat ca vehiculele grele să producă deformații plastice stratului de asfalt. Din această cauză atunci când se proiectează un tip de mixtură asfaltică trebuie să se țină cont de temperatura cea mai scăzută și de cea mai ridicată a zonei, respectiv de trafic.

Din punct de vedere termic, condițiile de mediu la care sunt supuse structurile rutiere continuu în fazele de construcție și reparație, precum și în timpul duratei lor de serviciu, pot fi combătute printr-o cunoaștere aprofundată a distribuției temperaturii în fiecare strat component al acesteia. Fluctuațiile de temperatură a aerului, zilnic și sezonier, intensitatea radiației solare, materialele ce

alcătuiesc straturile structurii rutiere, geometria acestora, condițiile de suprafață și precipitațiile afectează în mod semnificativ stabilitatea structurii rutiere.

Prin urmare, succesul pe termen lung al proiectării straturilor rutiere constă într-o estimare precisă a profilului de temperatură ajutând foarte mult, în special la evaluarea deformațiilor structurii, la o estimare cât mai exactă a modului de calcul, aprecieri ale fenomenelor de îngheț-dezghet, precum și evaluarea zilnică și sezonieră a efectelor de încălzire-răcire. Stratul rutier cel mai supus acțiunii acestor factori este stratul superior, din acest motiv o cunoaștere mai aprofundată a distribuției temperaturii în acest strat permite o specificație mai sofisticată a lianților hidrocarbonați și a agregatelor prin creșterea calității acestora.

Programul de cercetare strategic al autostrăzii (SHRP) realizat în Statele Unite ale Americii și Canada, între anii 1987 și 1992, a condus la o nouă abordare a proiectului de realizare a amestecurilor de asfalt (Superpave). Noua abordare a inclus un sistem de notare pentru clasificarea performanței (PG), care propune un sistem de două numere destinate să asigure faptul că liantul folosit la alcătuirea amestecurilor asfaltice rezistă solicitărilor la temperaturi ridicate și temperaturi scăzute. Cele două numere în abordare reprezintă temperaturile ridicate și scăzute maxime preconizate pe asfalt, furnizate pe baza datelor climatice locale, pentru cea mai caldă și cea mai rece perioadă a anului [102].

Performanța Superpave privind cerințele de clasificare a amestecurilor asfaltice cu conținut de liant ridicat, precum și selectarea liantului corespunzător amestecului la cald a amestecului, solicită o înțelegere detaliată a distribuției temperaturii în strat. Multe metode care fac o predicție de temperatură în straturile structurii rutiere se bazează pe metode statistice și probabilistice dezvoltate pe baza datelor meteorologice culese la nivelul straturilor pe termen lung cu ajutorul programului (LTPP) sub SHRP. Cu toate acestea, astfel de metode statistice și probabilistice de afișare prezintă unele deficiențe în sensul că acestea tind să fie temperaturi subestimate sau supraestimate în strat, ridicând totodată întrebări cu privire la exactitatea și fiabilitatea lor.

Cumulul de energie din suprafețele artificiale de asfalt sau beton diferă considerabil de cel al solului natural la suprafață datorită proprietăților diferite ale radiației termice. Suprafețele asfaltate, respectiv betonate, absorb cantități mari de radiații în timpul zilei producându-se o încălzire a acestora la suprafață, urmând apoi a se transmite rapid la straturile inferioare ale structurii, provocând creșterea temperaturii în interiorul acesteia. Această stocare de căldură este lansată în timpul nopții în atmosferă și astfel acționează ca o căldură rezervor, figura 1.7.

Îmbrăcămintele din asfalt prezintă temperaturi mai mari de suprafață decât alte suprafețe în zilele de vară și au un potențial de eliberare a unei cantități considerabile de căldură în atmosferă prin fluxul de căldură și radiațiile infraroșii. Temperatura de suprafață la amestecurile asfaltice pe timp de vară rămâne mai mare decât temperatura aerului, și fluxul de căldură care este îndreptat în sus pe durata ciclului, cu excepția zilelor de iarnă.

O înțelegere corectă a comportamentului cumulului de energie și o determinare corectă a acestuia este de ajutor în luarea deciziilor la tehnologiile de construcție a drumurilor și la studierea fenomenului de căldură care este o problemă serioasă de mediu.

Astfel în acest scop se va studia metoda de identificare a proprietăților termo-fizice ale amestecurilor asfaltice ce permit următoarele procese evolutive complexe în timpul expunerii lor la temperaturi ridicate și temperaturi scăzute pe întreg ciclul duratei lor de viață și reducerea timpului de analiză. Această identificare a proprietăților termo-fizice este posibilă datorită dezvoltării noi a aplicațiilor tehnice

de măsurare fluxmetrică, care permit definirea modalităților simple de statut termic în plan.

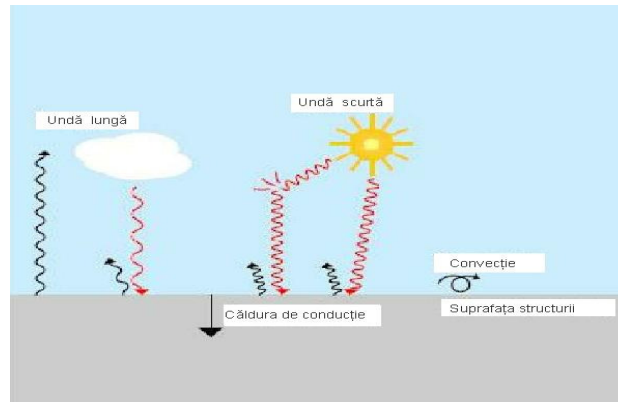


Figura 1.7. Temperatura la suprafața asfaltului afectată de radiațiile solare de undă scurtă și radiații de undă lungă, de ieșire din suprafața structurii rutiere, pierderi de convecție și căldura de conducție în asfalt (Ake Hermansson 2004)

Comportamentul și caracterizarea mixturilor asfaltice constituie una dintre problemele de actualitate provenite din cauza gradului mare de variabilitate a compoziției amestecului, de condițiile climaterice, hidrologice și de trafic. Este un mediu dificil de a studia experimentarea și măsurarea acestor proprietăți necesitând de dispunerea unor metode nedistructive suficient de fiabile și precise. Proprietățile mixturilor asfaltice variază cu timpul și nu pot fi întotdeauna descrise riguros de relațiile valabile în toate situațiile.

În cadrul tezei de doctorat pe lângă identificarea proprietăților termo-fizice ale mixturilor asfaltice s-au adus contribuții favorabile asupra îmbunătățirii caracteristicilor acestora prin realizarea unor amestecuri în compoziția cărora s-a utilizat ca și componentă, pe lângă materialele de bază ce constituie mixtura asfaltică, lianții puzzolanici (cenușa de termocentrală), acesta ajutând la obținerea unor mixturi cu conductivitate termică, căldură specifică și emisivitate net superioare, lucru benefic pentru mixtura asfaltică prin modul de evoluție superior al proprietăților fizico-mecanice.

Caracterizarea termo-fizică a materialelor se bazează pe conceptul de impedanță termică. Această magnitudine conectează suprafața materialului în domeniul spectral prin evoluțiile fluxului de căldură și a temperaturii. În cazul particular al solicitărilor rapide de mediu se comportă ca un sistem semi-infinit fiind completat și caracterizat de efuzivitatea sa termică. Această abordare a fost dezvoltată în mai multe lucrări [7], unde au fost utilizate solicitări aleatorii. Necesitatea de a avea o metodă precisă pentru determinarea caracteristicilor termo-fizice ale mixturilor asfaltice ne încurajează în utilizarea acestei abordări bazată pe noțiunea de impedanță termică.

În cele din urmă un rol fundamental asupra structurii mixturilor asfaltice sunt ciclurile de viață la care acestea sunt supuse: solicitările din trafic și condițiile de mediu. Din această cauză, pentru a răspunde acestor problematici este importantă dezvoltarea măsurătorilor termo-fizice în laborator pe diverse eșantioane de mixtură asfaltică, dar este foarte de dorit să se ia în considerare și abordările care pot duce la experimente în situ.

## 2. PARTICULARITĂȚI PRIVIND STUDIUL STRUCTURILOR RUTIERE FLEXIBILE ȘI SEMIRIGIDE

### 2.1. Structuri rutiere

Corpul drumului poate fi alcătuit din unul sau mai multe straturi, compuse din materiale cu diferite rezistențe capabile să suporte și să repartizeze patului drumului solicitările din trafic.

Numărul, grosimea și natura straturilor care alcătuiesc corpul drumului se stabilesc pe baza unui calcul tehnico-economic, în care se ține seama de o serie de factori cum ar fi: trafic, condiții climaterice, natura pământului din patul drumului, materiale locale, declivități etc.

Totalitatea straturilor rutiere alese pentru realizarea corpului unui drum formează structura rutieră a acestuia, care poate fi definită ca fiind elementul de rezistență, prevăzută și realizată pe partea carosabilă și pe benzile de încadrare, alcătuită dintr-un ansamblu de straturi executate din materiale pietroase stabilizate cu lianți, după tehnologii adecvate, și dimensionate conform anumitor norme, având în ansamblu o capacitate portantă stabilită în principal funcție de intensitatea traficului greu [58].

În ceea ce privește dimensionarea structurii rutiere, aceasta se poate face doar cu condiția de luare în considerare a corpului drumului și a zonei active din terasament, adică pământul din patul drumului până la adâncimea la care se resimt sarcinile transmise din trafic. Această zonă activă din terasament depinde de natura pământului și de greutatea vehiculelor, având, în general, valori cuprinse între 0,50 m și 1,20 m, figura 2.1.

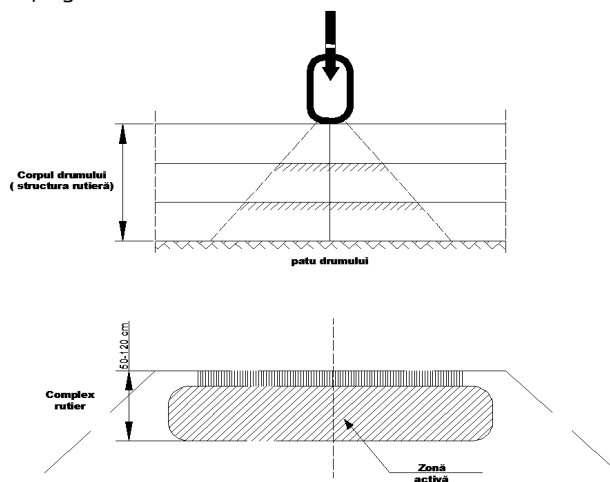


Figura 2.1. Distribuția sarcinilor din trafic asupra terenului de fundare

Cu cât grosimea structurii rutiere este mai mare, cu atât încărcarea la nivelul patului drumului se repartizează pe o suprafață mai mare și sarcinile unitare pe pat sunt mai mici [60].

Consolidarea părții carosabile se face, de regulă, printr-un sistem de mai multe straturi suprapuse din diferite materiale. Acest mod de execuție a structurii rutiere, din straturi suprapuse, este foarte vechi și constituie unul din principiile de realizare a sistemului roman de construcție a drumurilor. Pentru administrarea imensului său teritoriu, imperiul roman dispunea de aproape 100 000 km de drumuri magistrale ale căror urme mai apar și azi în unele locuri.

Ca și mod de alcătuire a structurii rutiere, drumurile romane erau compuse din următoarele straturi:

- un strat de 20 - 30 cm nisip sau balast așternut direct pe pământul natural;
- peste nisip urma un strat în grosime de 20 - 40 cm, numit *statumen* (temelia drumului), format din mai multe rânduri de lespezi de piatră așezate cu mâna și uneori, legate între ele cu mortar argilos;
- deasupra se găsea un strat, în grosime de circa 30 - 40 cm, numit *rudus*, alcătuit din moloz sau piatră spartă mare bine împănată;
- peste acest strat era așternut un altul, numit *nucleus* (strat de mijloc), în grosime de 20 - 40 cm, format dintr-o piatră spartă mai mărunță (de mărimea unei nuci), legată cu mortar de var;
- drumurile magistrale mai aveau încă un strat de uzură, numit *suma crusta* sau *pavimentum* (pavaj), alcătuit din lespezi de piatră cioplite regulat, cu o grosime de circa 30 cm și cu rosturile umplute cu mortar de var.

În ceea ce privește modul de alcătuire a drumurilor moderne din ziua de azi, trebuie menționat faptul că acestea se bazează încă pe unele strategii și moduri de execuție a drumurilor romane, mai exact în ceea ce privește realizarea structurii rutiere în straturi, figura 2.2.

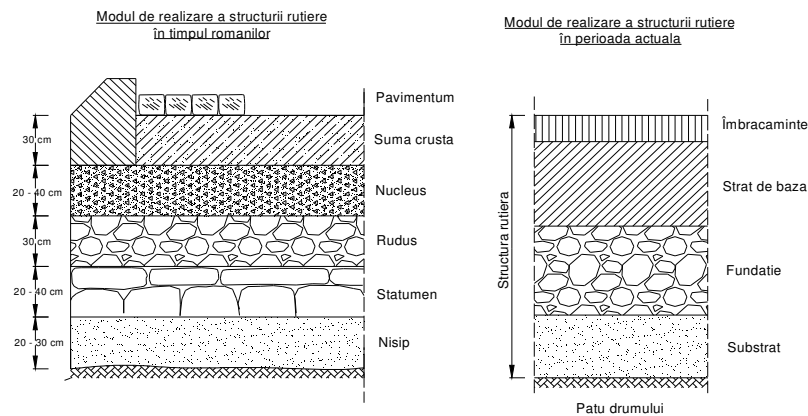


Figura 2.2. Evoluția modului de alcătuire a structurii rutiere

Structurile rutiere realizate în timpul romanilor aveau o grosime mai mare de 1,00 m iar prin calitatea materialelor și prin modul de alcătuire și executare,



drumurile romane au dovedit atâta trăinicie încât urmele lor au dăinuit până în zilele noastre.

Până la mijlocul secolului al XIII-lea nu s-a înregistrat nici o noutate demnă de remarcat în domeniul structurilor rutiere. Drumurile erau pietruite cu balast sau piatră spartă, pavate cu bolovani sau piatră cioplită, iar străzile erau podite cu dulapi de lemn [31]. Odată cu creșterea traficului și a sarcinilor pe osie, ca urmare a schimburilor comerciale, după anul 1.750 procesul de degradare al drumurilor se face tot mai simțit în întreaga Europă, însă, revoluționarea transporturilor rutiere, inclusiv a structurilor rutiere, e marcată de apariția automobilului la începutul secolului XX.

## 2.2. Clasificarea structurilor rutiere

Pentru o clasificare corectă a structurilor rutiere este necesar să se cunoască în totalitate materialele utilizabile în straturile rutiere prin caracteristicile lor care intervin în cadrul metodelor de dimensionare adoptate, precum și modul de comportare al acestora în exploatare, care poate conduce, prin studii atente și din păcate de durată, la concluzii interesante, menite de multe ori să influențeze etapele de calcul de dimensionare, tehnologiile de execuție, implementarea unor noi soluții etc [58].

Marea varietate de materiale (pământuri, agregate naturale, lianți) și tehnologii, folosite în domeniul rutier conduce implicit la apariția unei diversități largi de straturi rutiere, a căror comportare în exploatare sub acțiunea solicitărilor (trafic și condiții climaterice) trebuie corect apreciată prin calcule de dimensionare specifice, astfel marea varietate de straturi și structuri rutiere existente trebuie grupate după principii bine determinate, fiecărei grupări corespunzându-i o metodă specifică de calcul. De asemenea, și din punct de vedere al terminologiei rutiere este convenabilă o clasificare pragmatică a structurilor rutiere.

Construirea structurilor rutiere din mai multe straturi dă posibilitatea satisfacerii oricăror exigențe ale traficului, condițiilor locale etc. Prin combinarea straturilor de diferite materiale și prin dimensionarea lor corespunzătoare, se pot obține structuri rutiere care să folosească într-o măsură cât mai mare materialele locale și totodată să satisfacă și necesitățile impuse de trafic.

Pornind de la realitățile sectorului rutier din țara noastră din perioada anilor '80 (grosimi reduse de straturi bituminoase), s-a urmărit stabilirea unor principii clare, care să conducă la definiții și clasificări obiective, și concise ale structurilor rutiere, pe baza studierii comportării acestora.

Fragmentarea exagerată în clasificarea structurilor rutiere are repercusiuni însemnate asupra terminologiilor utilizate, dar mai ales asupra metodelor de dimensionare aplicate, care în mod practic trebuie să fie adaptate fiecărei categorii de structuri rutiere considerate. Ca urmare a multiplelor lucrări de îmbunătățire a stării de viabilitate a drumurilor, a lucrărilor de modernizare, reabilitare sau ranforsare, precum și a apariției și aplicării de noi materiale și tehnologii (în special diversificarea și folosirea tot mai frecventă a straturilor din agregate naturale stabilizate cu ciment sau lianți puzzolanici), s-a ajuns la o diversitate foarte mare de structuri rutiere, care nu mai puteau fi încadrate în categoriile de structuri rutiere recunoscute la acea dată.

Cercetările desfășurate au condus la necesitatea punerii în discuție a următoarelor propuneri vizând definirea și clasificarea structurilor rutiere:

- o nouă definire a structurilor rutiere și a complexelor rutiere;

- o nouă clasificare a structurilor rutiere;
- luarea în considerare, în toate cazurile, la dimensionare, ranforsare, la stabilirea strategiei de întreținere etc., a complexelor rutiere și nu numai a structurilor rutiere.

Pentru atingerea acestor obiective s-a făcut apel la concepția generală de alcătuire și proiectare a construcțiilor, care se referă la dimensionarea unei structuri de rezistență, plasată pe o fundație adusă la anumiți parametri tehnici bine stabiliți, la solicitările sigure sau posibile de-a lungul duratei de exploatare prognozate.

Dezbaterile purtate pe plan național au condus la acceptarea noii concepții vizând definirea și clasificarea structurilor rutiere și a complexelor rutiere așa cum se poate observa în continuare.

În baza acestei concepții, s-a ajuns la concluzia înlocuirii termenului de sistem rutier cu structură rutieră, care de altfel constituie elementul de rezistență al unui drum.

Structura rutieră în baza concepției menționată anterior, în cadrul definiției acesteia, se construiește pe o fundație formată din:

- terasamente, în care se include, după caz, stratul de formă;
- teren natural.

După modul de alcătuire, dar și după comportarea în exploatare, structurile rutiere se clasifică astfel:

- structură rutieră suplă, este alcătuită dintr-un ansamblu de straturi realizate din materiale stabilizate mecanic și/sau materiale stabilizate cu lianți hidrocarbonați, iar stratul de bază și îmbrăcămintea sunt executate din materiale bituminoase sau, în cazuri excepționale, dintr-o pietruire de tip macadam;
- structura rutieră rigidă, este concepută dintr-un ansamblu de straturi stabilizate sau nu cu lianți, peste care se realizează o îmbrăcăminte din beton de ciment rutier;
- structura rutieră mixtă, este constituită din straturi de agregate naturale stabilizate mecanic și cu lianți hidraulici sau puzzolanici, în care, în timp, apar fisuri din cauza contracției, iar îmbrăcămintea, și eventual stratul de bază, sunt straturi bituminoase. Stratul rutier din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici poate fi strat de fundație și/sau strat de bază.

S-a propus că straturile rutiere care alcătuiesc structurile rutiere să aibă următoarele denumiri:

- îmbrăcăminte rutieră (strat de uzură și strat de legătură, pentru structurile rutiere suple și mixte, respectiv strat de uzură și strat de rezistență pentru structurile rutiere rigide);
- strat de bază (pentru structurile rutiere suple și mixte);
- strat (sau straturi) de fundație, care s-ar putea denumi strat portant (pentru structurile rutiere rigide);
- stratul (sau straturi) de protecție.

Din alcătuirea structurilor rutiere poate să lipsească unul sau mai multe straturi, iar unele dintre straturi pot să îndeplinească unul sau mai multe roluri. Stratul de formă se definește ca fiind stratul superior al terasamentelor, amenajat pentru uniformizarea și sporirea capacității portante la nivelul patului drumului.

Având în vedere modul de alcătuire, materialele și tehnologiile folosite, metodele de dimensionare și comportarea în exploatare a structurilor rutiere realizate în România, s-a obținut clasificarea acestora în forma prezentată în figura 2.3.

În cadrul acestei concepții, împărțirea structurilor rutiere cu îmbrăcăminți bituminoase în suple (flexibile) și mixte (semirigide) este dictată de existența sau nu în alcătuirea structurii rutiere cel puțin a unui strat realizat din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolanici. Pe de altă parte, grosimea straturilor bituminoase considerată în cazul acestei abordări este relativ redusă, stratul din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici putând fi strat de fundație sau strat de bază.

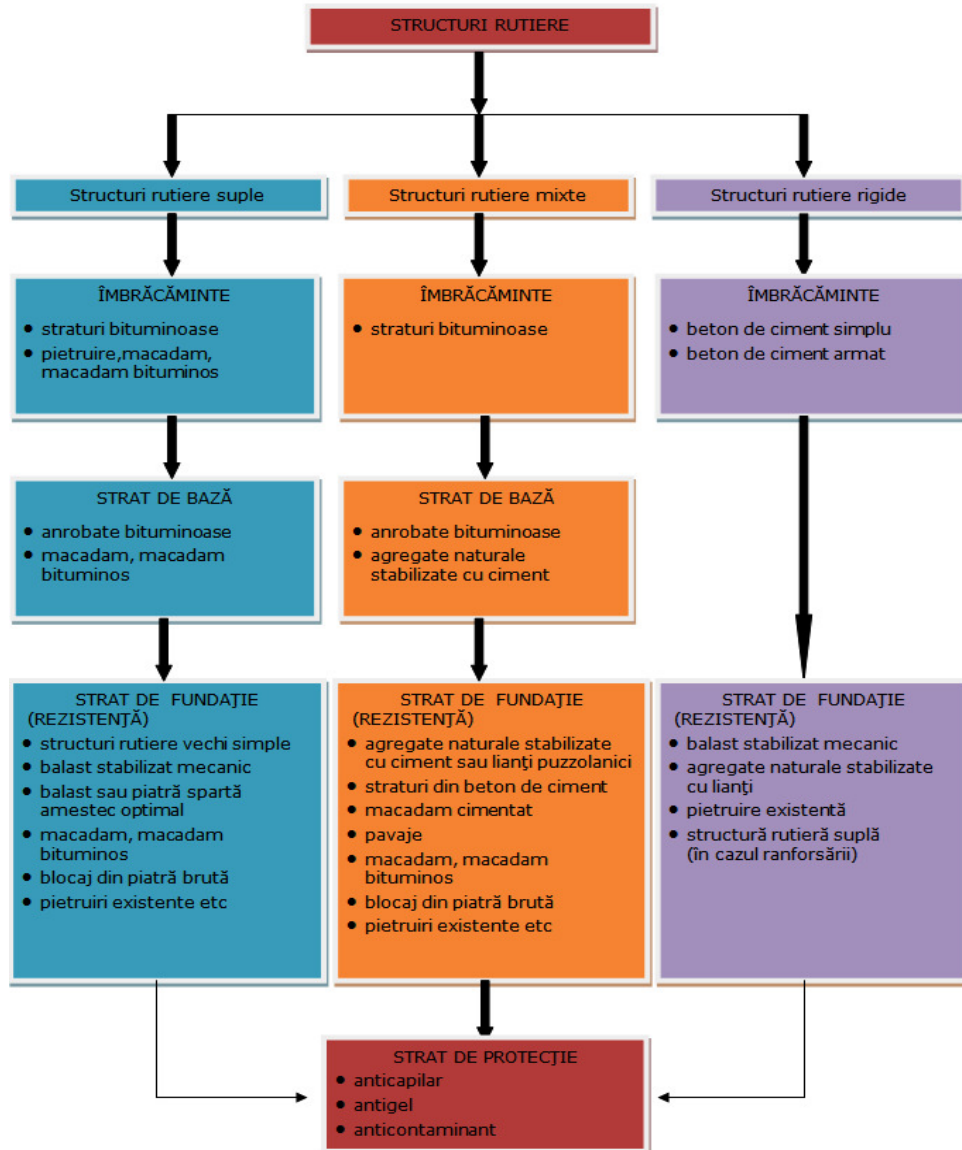


Figura 2.3. Clasificarea structurilor rutiere

Tendința formulată pe plan mondial privind alcătuirea structurilor rutiere suple și mixte are la bază conceptul realizării unor straturi de rezistență cu o capacitate portantă adecvată solicitărilor traficului de calcul, urmând ca îmbrăcămintea bituminoasă să fie constituită dintr-un covor asfaltic subțire, foarte subțire sau ultrasubțire. Acest principiu se bazează pe disocierea rolului straturilor în structura rutieră: straturile de rezistență primesc rolul structural, iar stratul de uzură rolul de asigurare a condițiilor de rulare (rol de interfață structură rutieră – vehicul). În acest sens, în tabelul 2.1 se prezintă câteva tipuri de structuri rutiere alcătuite pe baza acestui principiu, conform concepției de alcătuire și dimensionare a structurilor rutiere franceze [12].

Tabelul 2.1

Tipuri de structuri rutiere bazate pe disocierea rolului stratului în structura rutieră

| Tip structură rutieră          | Straturi de rezistență   | Îmbrăcămintă rutieră   |
|--------------------------------|--|--|
| Suplă                          | Mixturi asfaltice pentru straturi de rezistență (max. 15 cm)<br>Materiale granulare nestabilizate cu lianți (20...50 cm)   | Covor asfaltic subțire (4...5 cm), foarte subțire (2...3 cm) sau ultrasubțire (1,0...1,5 cm) |
| Bituminoasă                    | Mixturi asfaltice pentru straturi de rezistență (15...40 cm)   | Covor asfaltic subțire (4...5 cm), foarte subțire (2...3 cm) sau ultrasubțire (1,0...1,5 cm) |
| Semirigidă                     | Materiale granulare stabilizate cu lianți hidraulici (20...50 cm)  | Îmbrăcămintă bituminoasă din mixturi asfaltice (6...14 cm)                                   |
| Mixtă                          | Mixturi asfaltice pentru straturi de rezistență (10...20 cm)<br>Materiale granulare stabilizate cu lianți hidraulici (20...40 cm)  | Covor asfaltic subțire (4...5 cm), foarte subțire (2...3 cm) sau ultrasubțire (1,0...1,5 cm) |
| Inversă                        | Mixturi asfaltice pentru straturi de rezistență (10...20 cm)<br>Materiale granulare nestabilizate cu lianți (cca 12 cm)<br>Materiale granulare stabilizate cu lianți hidraulici (15...50 cm) | Covor asfaltic subțire (4...5 cm), foarte subțire (2...3 cm) sau ultrasubțire (1,0...1,5 cm) |
| Rigidă cu dale armate continuu | Mixturi asfaltice pentru straturi de rezistență (5 cm)<br>Nisip stabilizat cu lianți hidraulici  | Beton de ciment armat continuu (18...24 cm)  |

Se remarcă faptul că straturile rutiere inferioare, contrar concepției românești actuale, pot fi realizate din materiale pietroase stabilizate cu diferiți lianți, renunțându-se la conceptul că aceste straturi de fundație trebuie să asigure implicit și drenarea apelor de infiltrație spre exteriorul corpului drumului. Celelalte roluri de protecție ale unui strat inferior de fundație (anticontaminator, anticapilar) nu mai sunt necesare în condiția unei corecte realizări a infrastructurii până la patul drumului, iar rolul antigel poate fi asigurat și de materialele compozite [24].

În acord cu această concepție, straturile de rezistență (de fundație și/sau de bază) pot fi realizate din materiale care se încadrează în una din grupele următoare:

- agregate naturale nestabilizate;
- mixturi asfaltice adaptate pentru realizarea straturilor de rezistență;
- agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici (ciment) sau puzzolanici (zgură granulată, cenușă de termocentrală etc.).

Referitor la mixturile asfaltice pentru straturile de rezistență se pot remarca următoarele tendințe, care diferă semnificativ de cele practicate în țara noastră, pentru realizarea, de exemplu, a anrobateelor bituminoase:

- granulozitatea scheletului mineral este continuă, dar dimensiunea maximă a granulei din amestec este 20 mm (frecvent 14 sau 10 mm), spre deosebire de țara noastră unde dimensiunea maximă este de 25 mm;
- bitumul utilizat frecvent este de tip 20/30, pur, cu tendința creșterii ponderii utilizării de bitum tip 10/20 sau 15/25. Se poate utiliza bitum modificat sau bitum special. La noi în țară bitumul folosit este același ca și pentru îmbrăcăminte: D 80/10 în zone climatice reci și D 60/80 în zone climatice calde;
- grosimea de punere în operă este de 6...8 cm pentru o granulozitate 0-10, de 8...14 cm pentru o granulozitate 0-14 și de 10...16 cm pentru un schelet mineral 0-20. Pentru anrobatele bituminoase utilizate în țara noastră grosimea minimă a stratului realizat este de 5(6) cm, fără a se preciza și o dimensiune maximă de punere în operă;
- dozajul de liant (raportat la masa scheletului mineral) este 4,0...5,5 %, în timp ce la anrobatele bituminoase românești se utilizează un dozaj de 3,3...5,4 % (raportat la masa mixturii asfaltice), echivalent cu 3,4...5,7 % raportat la masa scheletului mineral.

Pentru astfel de mixturi asfaltice se obțin moduli de rigiditate de 9 000...14 000 MPa, în timp ce pentru anrobatele bituminoase românești se mizează la dimensionare pe un modul de elasticitate dinamic de 5 000...5 600 MPa. Straturile rutiere respective se caracterizează prin rigiditate și rezistență ridicată la oboseală, capabile să joace rolul de rezistență în cadrul structurii rutiere.

În noile condiții, îmbrăcămintea bituminoasă se poate reduce la un singur covor asfaltic cu grosimea de 1...5 cm (excepție făcând structurile rutiere mixte la care grosimea straturilor bituminoase poate ajunge la 14 cm), care urmează să îndeplinească aproape exclusiv exigențele impuse de un contact pneu - îmbrăcăminte corespunzător, și anume: rugozitate și implicit aderență foarte bună, capacitate de drenare rapidă spre exteriorul părții carosabile a apelor din precipitații, uniformitate corespunzătoare și reducere a zgomotului de rulare.

Straturile bituminoase subțiri se realizează din betoane asfaltice pentru straturi subțiri sau din betoane asfaltice drenante.

Betoanele asfaltice pentru straturi subțiri se caracterizează în principal prin:

- granulozitatea scheletului mineral 0-10 sau 0-14, discontinuă 2-6;
- dozajul de bitum pur (rar modificat sau special) tip 40/50 sau 60/70 de 5,4...5,8 % (raportat la masa scheletului mineral);
- grosimea stratului 3...4 cm pentru granulozitatea 0-10 și 3,5...4 cm pentru granulozitatea 0-14.

Betoanele asfaltice drenante se caracterizează prin:

- granulozitate 0-10, discontinuă 2-6, sau 0-6, discontinuă 2-4;
- bitum puternic modificat cu polimeri în dozaj de 4,4...4,8 % din agregatul natural;
- grosime de 3...4 cm pentru granulozitatea 0-6, respectiv 4...5 cm pentru granulozitatea 0-10. Volumul de goluri remanent este de 20...30 %.

Straturile bituminoase foarte subțiri se realizează din betoane asfaltice adaptate acestei necesități, materiale care se caracterizează în mod deosebit prin:

- granulozitatea scheletului 0-6 sau 0-10 (foarte rar 0-14), cu discontinuități bine determinate. Dozajul de nisip 0-2 este de 20...30 %;

- bitum modificat cu polimeri sau bitum cu fibre (modul de conținut 3,5);
- grosimea stratului de 2...3 cm și volum de goluri remanent de 12...25 %.

Straturile bituminoase ultrasubțiri se realizează din betoane asfaltice caracterizate prin:

- granulozitatea scheletului 0-6 (discontinuuă 2-4) sau 0-10 (discontinuuă 2-6), cu un dozaj de nisip 0-2 este de 20...25 %;
- bitum modificat cu polimeri în proporție de 5,2...5,5 % din masa agregatului total;
- grosimea stratului de 1,5...2 cm.

La noi în țară soluțiile aproape unanime de proiectare a îmbrăcăminților bituminoase noi prevăd realizarea a două straturi din betoane asfaltice cu grosimea de minimum 4 cm (fără a se preciza și grosimea maximă în care se pot realiza acestea), cu agregate naturale cu granulozitate continuă, cu dimensiunea maximă a granulei de 16 (sau 25) mm, cu bitum pur D 80/100 (zone climatice reci) și D 60/80 (zone climatice calde), cu dozaje de liant în general mai ridicate decât cele menționate anterior. Se constată pentru țara noastră o rămânere în urmă evidentă față de noile tendințe de pe plan mondial, atât în conceperea alcătuirii structurilor rutiere suple și mixte noi, cât și în ceea ce privește tipurile de materiale și tehnologiile utilizate pentru realizarea straturilor rutiere.

Structurile rutiere rigide cu îmbrăcăminte din beton de ciment armate continuu constituie o soluție care se impune ca urmare a rentabilității ei deosebite. Această tehnologie se pretează pentru drumuri cu trafic foarte intens și pondere importantă a vehiculelor grele datorită lucrărilor de întreținere foarte reduse și a comportării foarte bune la preluarea solicitărilor traficului greu, fiind practic insensibile la deformații plastice. Durata de exploatare foarte mare (până la 40...50 ani) compensează costurile de investiție superioare, asigurând o eficiență evidentă a acestora.

### 2.3. Alcătuirea structurilor rutiere suple și mixte

Straturile de bază și de fundație alcătuite din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau cu lianți puzzolanici sunt caracterizate printr-o rigiditate mult mai mare decât cea a celorlalte straturi.

Comportarea diferită în exploatare a structurilor rutiere care au în alcătuire straturi din agregate naturale stabilizate cu acești lianți, față de cea a structurilor rutiere cu alcătuire "clasică", a determinat clasificarea diferitelor alcătuirii ale structurilor rutiere cu îmbrăcăminți bituminoase în următoarele tipuri [38]:

- structuri rutiere suple;
- structuri rutiere mixte (semirigide).

În contextul tehnicii rutiere din România, aceste tipuri de structuri rutiere sunt caracterizate în mod succint, astfel:

- structurile rutiere suple, numite și flexibile, comportă o îmbrăcăminte bituminoasă pe straturi de bază și de fundație alcătuite în general din agregate naturale;
- structurile rutiere semirigide, comportă o îmbrăcăminte bituminoasă și au în alcătuire cel puțin un strat din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolanici.

Variantele de alcătuire a structurilor rutiere suple și mixte, în conformitate cu prevederile STAS 6400, sunt date în tabelul 2.2.

Tipul de structură rutieră se stabilește în funcție de materialele preponderente în regiune și anume:

- agregate naturale de carieră, care au o pondere importantă în structurile rutiere suple (tabelul 2.3);
- agregate naturale de balastieră, care au o pondere importantă în structurile rutiere mixte (tabelul 2.4).

Alcătuirea structurii rutiere se stabilește luând în considerare următoarele:

- grosimile minime ale diferitelor straturi rutiere, conform tabelelor 2.3 și 2.4;
- grosimile maxime ale diferitelor straturi rutiere, ținând cont de anumite constrângeri specifice tehnologiilor de execuție;
- reducerea numărului de straturi, respectiv de interfețe, în scopul micșorării riscului apariției unor defecțiuni privind aderența între straturi;
- stabilirea alcătuirii stratului de formă astfel încât, grosimea acestuia să poată fi luată în considerare în dimensionarea structurii rutiere la acțiunea fenomenului de îngheț-dezghet, conform STAS 1709/2;
- asigurarea unei protecții suficiente față de manifestarea procesului de fisurare reflectivă.

Tabelul 2.3

Grosimi minime ale straturilor structurilor rutiere suple

| Straturi de fundație  |  | Strat de bază                              |                   | Îmbrăcămintă bituminoasă |    |      |     |    | Grosimi minime cm                    |
|---|--|--|-------------------|--------------------------|----|------|-----|----|--------------------------------------|
| Mod de alcătuire  | Grosimi minime, cm   | Mod de alcătuire                           | Grosimi minime cm | Clasa tehnică            |    |      |     |    |                                      |
|   |  |  |                   | I                        | II | II I | I V | V  |                                      |
| Balast  | 15   | Macadam                                    | 8                 | -                        | -  | -    | da  | da | 4 la covor<br><br>8 în două straturi |
|   |  | Mixtură asfaltică                          | 5                 | -                        | -  | -    | da  | da |                                      |
| Un strat inferior din balast sau din pământ stabilizat mecanic și un strat superior din balast amestec optimal          | 10 pentru stratul inferior<br>10 pentru stratul superior   | -  | -                 | -                        | -  | -    | da  | da |                                      |
|   |  | Macadam                                    | 8                 | -                        | -  | -    | da  | da |                                      |
|   |  | Macadam semipenetrat sau penetrat cu bitum | 8                 | -                        | da | da   | da  | -  |                                      |
| Un strat inferior din balast și un strat superior din piatră spartă mare, sort 63-90 sau piatră spartă, amestec optimal | 10 pentru stratul inferior<br>12 pentru stratul superior   | -  | -                 | -                        | -  | -    | da  | da |                                      |
|   |  | Macadam                                    | 8                 | -                        | -  | -    | da  | da |                                      |
|   |  | Macadam semipenetrat sau penetrat cu bitum | 8                 | -                        | da | da   | da  | -  |                                      |
|   |  | Mixtură asfaltică                          | 5                 | da                       | da | da   | da  | -  |                                      |
| Un strat inferior din balast, un strat mijlociu din blocaj de piatră brută și un strat de egalizare din piatră spartă   | 10 pentru stratul inferior<br>21 pentru stratul mijlociu (inclusiv nisip)<br>6 pentru stratul de egalizare | -  | -                 | -                        | -  | da   | -   | -  |                                      |
|   |  | Macadam                                    | 8                 | -                        | da | da   | -   | -  |                                      |
|   |  | Mixtură asfaltică                          | 5                 | -                        | da | da   | -   | -  |                                      |

Tabelul 2.4

## Grosimi minime ale straturilor structurilor rutiere semirigide

| Straturi de fundație   |                            | Strat de bază  |                   | Îmbrăcămintă bituminoasă |    |      |    |    |  |
|--|----------------------------|--|-------------------|--------------------------|----|------|----|----|--|
| Mod de alcătuire   | Grosimi minime, cm         | Mod de alcătuire   | Grosimi minime cm | Clasa tehnică            |    |      |    |    | Grosimi minime, cm   |
|  |                            |  |                   | I                        | II | II I | IV | V  |  |
| Balast   | 15                         | Agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolani | 12                | -                        | -  | da   | da | da | 8* pentru clasele IV, V<br>10* pentru clasele III                          |
| Un strat inferior din balast și un strat superior din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolani | 10 pentru stratul inferior | Mixtură asfaltică  | 5                 | da                       | da | da   | da | da | 8* pentru clasele IV, V<br>10* pentru clasele III                          |
|  |                            | Piatră spartă împănată cu split bitumat                          | 9                 | -                        | -  | da   | da | da | 8*   |
|  | 12 pentru stratul superior | Agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolani | 12                | da                       | da | da   | da | -  | 8* pentru clasele IV<br>10* pentru clasele III<br>13* pentru clasele I, II |

Notă: \* cu riscul manifestării fisurării reflexive

Tabelul 2.5

## Clasificarea tehnică a drumurilor publice

| Clasa tehnică a drumului public | Denumirea intensității traficului | Caracteristicile traficului       |                   |                              |                   | Tipul drumului recomandat            |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
|                                 |                                   | Intensitatea medie zilnică anuală |                   | Intensitatea orară de calcul |                   |                                      |
|                                 |                                   | Exprimare în număr vehicule       |                   |                              |                   |                                      |
|                                 |                                   | Etalon (Autoturism)               | Efective (Fizice) | Etalon (Autoturism)          | Efective (Fizice) |                                      |
| 0                               | 1                                 | 2                                 | 3                 | 4                            | 5                 | 6                                    |
| I                               | Foarte intens                     | > 21 000                          | > 16 000          | > 3 000                      | > 2 000           | Autostrăzi                           |
| II                              | Intens                            | 11 001 – 21 000                   | 8 001 – 16 000    | 1 401 – 3 000                | 1 000 – 2 200     | Drumuri cu patru benzi de circulație |
| III                             | Mediu                             | 4 501 – 11 000                    | 3 501 – 8 000     | 550 – 1 400                  | 400 – 1 000       | Drumuri cu două benzi de circulație  |
| IV                              | Redus                             | 1 000 – 4 500                     | 750 – 3 500       | 100 – 550                    | 75 – 400          |                                      |
| V                               | Foarte redus                      | < 1 000                           | < 750             | < 100                        | < 75              |                                      |



Tabelul 2.2

Alcătuirea structurilor rutiere suple și mixte (semirigide)

| CLASE DE TRAFIC  | FOARTE UȘOR  |                    | UȘOR   |                                | MEDIU  |                                   | GREU   |     | FOARTE GREU  |     |  |  |  |  |
|--|--|--------------------|--|--------------------------------|--|-----------------------------------|--|-----|--|-----|--|--|--|--|
|  | NR. TOTAL DE VEHICULE/ZI<br>NR. DE VEHICULE >80T/ZI<br>NR. ECHIVALENT DE VEHICULE DE<br>CALCUL A1(9,10)/ZI | <200<br><60<br><50 | 200-500<br>60-150<br>50-150  | 500-3000<br>150-800<br>150-700 | 500-3000<br>150-800<br>150-700   | 3000-7500<br>800-3000<br>700-2500 | >7500<br>>3000<br>>2500  |     |  |     |  |  |  |  |
| MAJORITATE DE DEFORMANTE<br>ECHIVALENTA NECESARĂ (an/cm²)  | 300  | 350                | 400  | 450                            | 500  | 550                               | 600  | 650 | 700  | 750 | 800  |  |  |  |
| ÎN REGIUNI CU BALAST   |  |                    |  |                                |  |                                   |  |     |  |     |  |  |  |  |
| BETON ASFALTIC<br>COYOZ BITUMINOS (MORTAR ASFALTIC SAU BETON ASFALTIC SĂLAC ÎN CRIBLURĂ)<br>BINDER<br>MIXTURĂ BITUMINOASĂ<br>BALAST SAU NISIP STABILIZAT CU CIMENT<br>BALAST (AMESTEC OPTIMAL)<br>BALAST (E=600) (cm²) | <b>STRUCTURĂ TIP 1</b><br>a<br><br>b<br><br>7 10 16 12 12 35<br>7 10 18 20 20 39,5                         |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |  |  |
|  | <b>STRUCTURĂ TIP 2</b><br>a<br><br>b<br><br>3,5 8 13 12 12 36,5<br>3,5 8 13 12 12 36,5                     |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
|  | <b>STRUCTURĂ TIP 3</b><br>a<br><br>b<br><br>10 10 12 12 34<br>10 10 12 12 34                               |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
| ÎN REGIUNI CU PIATRĂ SPARTĂ  |  |                    |  |                                |  |                                   |  |     |  |     |  |  |  |  |
| BALAST NISIPOS (E=450-500) (an/cm²)<br>MACADAM CU TRATAMENT (EMBRACAMINTE)<br>MACADAM (STRAT DE BAZĂ)<br>PIASTRĂ SPARTĂ (AMESTEC OPTIMAL)<br>PIASTRĂ SPARTĂ  | <b>STRUCTURĂ TIP 4</b><br>a<br><br>b<br><br>3,5 8 13 12 12 37<br>3,5 8 13 12 12 37                         |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
|  | <b>STRUCTURĂ TIP 5</b><br>a<br><br>b<br><br>6 12 15 12 35<br>6 12 15 12 35                                 |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
|  | a<br><br>b<br><br>3 4 4 4 16 16 25 25 12 12 54<br>3 4 4 4 16 16 25 25 12 12 54                             |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
|  | a<br><br>b<br><br>3 4 4 4 14 14 22 22 15 15 56<br>3 4 4 4 14 14 22 22 15 15 56                             |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |
|  | a<br><br>b<br><br>3 4 4 4 12 12 15 15 12 12 59<br>3 4 4 4 12 12 15 15 12 12 59                             |                    | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |                                   | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |     | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  | a<br><br>b<br><br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5<br>2,5 2,5 9 10 18 18 12 12 41,5 41,5 |  |

Referitor la variantele de alcătuire a structurilor rutiere în funcție de clasa tehnică a drumului, definită în conformitate cu prevederile Normelor tehnice privind stabilirea clasei tehnice a drumurilor publice, pentru proiectarea lucrărilor de modernizare, de îmbunătățire a condițiilor de circulație, precum și pentru proiectarea construcțiilor noi de drumuri, clasificarea tehnică se face după intensitatea traficului de perspectivă, în conformitate cu tabelul 2.5. Perioada de perspectivă recomandată este de 15 ani.

La stabilirea numărului de straturi rutiere și a grosimilor acestora este necesar să fie luate în considerare și următoarele aspecte:

- problemele tehnologice de realizare a unor straturi rutiere cu grosimi minime sau maxime, legate de compactitatea materialelor sau de planeitatea suprafețelor de rulare;
- încetinirea procesului de transmitere a fisurilor de contracție termică spre suprafață, ale straturilor din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolanici (structuri rutiere mixte);
- necesitatea micșorării numărului de straturi rutiere, în scopul reducerii riscurilor de deficiențe ale aderenței și conlucrării dintre straturi.

Alegerea tipului de structură rutieră face parte integrantă din studiul optimizării strategiei de investiție și de întreținere a drumului respectiv, în cadrul rețelei de drumuri. Complexitatea unui astfel de studiu conduce la precizarea câtorva aspecte tehnice și economice care ar putea facilita luarea unor decizii.

Este foarte important de observat faptul că, structurile rutiere suple și mixte, dacă ar fi supuse aceleiași intensități de trafic pe perioada de perspectivă, nu pot fi echivalente din punct de vedere al evoluției stării lor tehnice în timp, deoarece sunt alcătuite din materiale cu caracteristici mecanice sensibil diferite.

Este de remarcat faptul că structurile rutiere suple prezintă o stare inițială corespunzătoare, care însă, de cele mai multe ori, tinde să se înrăutățească relativ repede sub solicitările din trafic, ceea ce face ca acest tip de structură să fie recomandat pentru drumurile de clase tehnice III...V. Imposibilitatea asigurării caracteristicilor funcționale, corespunzătoare unui trafic în condiții de siguranță și confort pe întreaga durată de perspectivă, determină necesitatea unor lucrări de întreținere intense, explicate și prin faptul că investiția inițială este relativ redusă comparativ cu celelalte tipuri de structuri rutiere.

Comportarea în exploatare a structurilor rutiere mixte depinde în mare măsură de grosimea totală a straturilor bituminoase. În cazul acestor structuri rutiere starea tehnică evoluează relativ lent, de aceea ele sunt recomandate la drumurile de clase tehnice I...III. Caracteristicile acestor tipuri de structuri rutiere sunt investițiile inițiale relativ ridicate, urmate însă de lucrări de întreținere reduse, de tip preventiv.

Nu este de neglijat aspectul transportului de materiale, care, având în vedere cantitățile mari de materiale care trebuie transportate, poate influența decisiv costul final al investiției. În acest sens se recomandă ca la alegerea tipului de structură rutieră să se țină seama de materialele de construcție disponibile situate la distanțe cât mai reduse de obiectiv.

Împărțirea structurilor rutiere cu îmbrăcăminți bituminoase în suple și mixte este dictată de existența sau nu în alcătuirea structurii rutiere a cel puțin unui strat realizat din agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici sau puzzolanici.

Straturile rutiere obținute prin stabilizarea agregatelor naturale cu ciment sau cu lianți puzzolanici, dacă lucrează ca elemente monolit, posedă o rigiditate ridicată care sporește continuu până la o anumită vârstă și trebuie dimensionate la oboseală.

În cazul unor astfel de straturi rutiere se manifestă contracții primare, care cuprind contracția dinaintea întăririi și contracția hidrolică. Acestea sunt responsabile

de primele contracții lente ale materialului după punerea sa în operă și se produc chiar dacă materialul este puțin rezistent. Pe lângă contracțiile primare la straturile rutiere din materiale stabilizate se întâlnesc contracții termice, care sunt asociate fie variațiilor de temperatură zilnice (20...30 °C), fie celor anuale (50...60 °C). Con tracția materialelor stabilizate crește în timp, iar capacitatea lor de deformare (fără fisurare) scade o dată cu vârsta și numărul de solicitări suportate.

Sub efectul contracțiilor, straturile rutiere de acest tip fisurează, fisurile transversale echidistante care apar având în permanență tendința de propagare prin straturile bituminoase superioare, sub efectul traficului și al variațiilor de temperatură.

Dacă straturile rutiere din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici nu funcționează ca un element monolit, ci ca un element microfisurat, nu se dimensionează la oboseală, iar comportarea lor în exploatare este intermediară între straturile monolit și cele obținute din agregate naturale stabilizate mecanic.

Din alt considerent, apariția straturilor rutiere din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici a determinat necesitatea luării în considerare a unor noi criterii de dimensionare și, implicit, apariția unei noi categorii de structuri rutiere, și anume a structurilor rutiere mixte. Apariția acestor noi structuri rutiere trebuie privită ca o consecință a următoarelor realități:

- costurile scăzute ale materialelor locale, subproduselor de carieră sau industriale, care se pot găsi în cantități suficiente în zona de amplasament a drumului și care, prin stabilizare cu ciment sau cu lianți puzzolanici, pot depăși deficiențele inițiale de calitate pentru a fi folosite în straturi rutiere;
- aspectul ecologic pe care îl ridică depozitele nevalorificate de astfel de materiale;
- realizarea unor importante economii de materiale prin construcția unor straturi rutiere mai subțiri, dar cu o capacitate portantă ridicată;
- economisirea lianților tradiționali (mai scumpi) prin înlocuirea lor, totală sau parțială, cu lianți puzzolanici.

În cadrul structurilor rutiere mixte, se presupune că straturile rutiere din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici sunt straturi monolit.

Referitor la structurile rutiere flexibile sunt interesante câteva din concluziile materializate în urma observațiilor efectuate asupra unor astfel de structuri rutiere (experiența franceză) [24] și anume:

- în peste 40 % din cazuri grosimea totală a straturilor rutiere este de 40...60 cm;
- suprafața îmbrăcăminții rutiere prezintă deformații permanente (65 % din cazuri) și este fisurată (60 % din cazuri), cu toate că în peste 50 % din cazuri, ultimul strat bituminos nu este mai vechi de 3...5 ani;
- deflexiunea medie pe aceste structuri rutiere este de circa 0,70 mm și nu depășește 1,00 mm decât în cca 20 % din cazuri.

## 2.4. Dimensionarea structurilor rutiere

Datorită faptului că abordarea generală de a dimensiona o structură rutieră nu este fundamental diferită de dimensionarea structurilor pentru construcțiile civile (în ceea ce privește examinarea determinării constrângerilor de materiale și compararea acestora cu deformațiile admisibile), dimensionarea structurilor rutiere prezintă numeroase particularități, pe care această abordare le-ar accentua.

Pentru simplitate, putem distinge două abordări foarte diferite pentru dimensionarea structurilor rutiere:

- abordarea empirică;
- abordarea teoretică.

#### 2.4.1. Abordarea empirică

În cadrul acestei abordări, se observă comportamentul real al carosabilului sub trafic din date experimentale. Abordarea acestei metode empirice constă în primul rând în stabilirea criteriilor pentru definirea expirării duratei de viață a drumului și determinarea perioadei de viață a sectoarelor urmărite.

Din numeroasele sectoare experimentale, se vor stabili în general prin metode statistice de regresie multiplă, relațiile dintre durata de viață, caracteristicile geometrice ale structurii rutiere (grosime de straturi) și proprietățile mecanice ale materialelor, sau dintre durata de viață, o măsură globală a proprietăților mecanice ale structurii rutiere și pământul de fundare.

Această abordare pur empirică prezintă un număr necunoscut de dezavantaje [1], [56]:

- pentru a cunoaște, pentru un astfel de traseu influența mai multor parametri, cum ar fi grosimea diferită a straturilor rutiere și proprietățile mecanice ale materialelor, trebuie realizate un număr foarte mare de sectoare experimentale, lucru ce ar presupune costuri ridicate;
- timpul de răspuns este foarte lung, deoarece nu există nici un efect de accelerare a traficului, iar în timpul exploatării este foarte riscant;
- în cele din urmă, rezultatele obținute în acest mod, prin analiza regresiei statistice, se aplică numai pentru un material considerat în mediul de experimentare.

#### 2.4.2. Abordarea teoretică

În cadrul acestei abordări, trebuie să se stabilească un model care reproduce cât mai aproape funcționarea mecanică a structurii rutiere. Folosind acest model se determină solicitările suportate de materialele din structura rutieră și patul drumului sub efectul traficului. Aceste solicitări sunt comparate apoi cu solicitările admisibile. Prin urmare, este o abordare ce folosește o anumită ramură particulară a mecanicii de medii continue, numită și mecanica drumurilor.

O primă parte a modelului are ca și scop determinarea tensiunilor și deformațiilor în materialele ce alcătuiesc structura rutieră și patul drumului (stratul suport), acest lucru fiind posibil datorită unor modele matematice, care au făcut progrese mari în ultimii ani prin dezvoltarea mijloacelor de calcul și a celor informatice. Cu toate acestea, programele dezvoltate pe baza acestor progrese atrag o atenție care nu constituie o parte prea dificilă și importantă la dimensionare; la modelarea comportamentului materialelor ce alcătuiesc structura rutieră și la stratul suport, care ridică în prezent mai multe probleme, precum solicitările mecanice și condițiile de mediu. Verificarea din punct de vedere mecanic poate fi făcută din două puncte:

- vizavi de ruperea la oboseală: se verifică dacă ruperea la oboseală nu se produce înainte de finalul duratei de viață dorită pentru un drum, sau dacă ruperea din oboseală apare într-un strat dat, să nu se manifeste la suprafață înainte de sfârșitul duratei de viață;
- vizavi de deformațiile permanente ale suprafeței drumului: se verifică deformațiile permanente în straturile structurii rutiere care pot prezenta (materiale fără lianți sau cu lianți hidrocarbonați) și în pământul de fundare, să nu conducă la apariția deformațiilor excesive pe suprafață, producând fgașe sau denivelări inacceptabile.

În realitate, aceste două abordări, empirică și teoretică, nu sunt la fel de dezarticulate, deoarece includ amândouă o fază experimentală și nu conțin o metodă semi-empirică, cum ar fi metoda CBR. În plus, metodele care sunt descrise ca fiind teoretice păstrează un anumit grad al empirismului lor, necesitând încă o dată o „sincronizare”, prin raportarea la comportarea structurii rutiere în realitate.

### 2.4.3. Metode practice de dimensionare

În ceea ce privește metodele practice de dimensionare, în plus față de dimensionarea propriu-zisă a structurilor rutiere, mai trebuie ținut cont de două etape esențiale:

- la început, de modul de concepere al structurii rutiere;
- la final, de modul de prezentare a rezultatelor pentru a le face disponibile tuturor proiectanților.

Metodele de dimensionare ale structurii rutiere stabilite nu sunt doar metode de verificare ale acestora. Există prin urmare o fază esențială și anume cea de concepere a structurii. În această fază trebuie să se stabilească cel mai bun aranjament posibil al diferitelor materiale disponibile, luându-se în considerare rezistența lor la acțiunile din trafic și mediu, precum și particularitățile lor de aplicare. Ținând cont de aceste criterii, în faza respectivă apar unele întrebări, cum ar fi:

- de ce grosimea straturilor realizate cu hidrocarburi și tratate cu lianți hidraulici trebuie protejată?
- putem admite apariția fisurilor de contracție la suprafața părții carosabile?
- putem admite straturi de fundație netratate prin adăugarea unui liant, sau ar trebui tratat stratul de bază și stratul de fundație?
- la ce nivel are loc cea mai bună legătură dintre interfețe, între stratul de bază și stratul de fundație, mai ales dacă acestea sunt două tipuri diferite de materiale (în cazul unei structurii rutiere mixte)?

Tot în această fază de concepere a structurii rutiere trebuie să se ia în considerare următoarele:

- stratul de fundație stabilizat, suportă fără a fisura încărcările din trafic nefiind necesară construcția de straturi superioare?
- ar trebui redus numărul de straturi ale structurii rutiere pentru a diminua numărul de interfețe, care constituie puncte slabe, sau contrar, ar trebui crescut numărul de straturi pentru a obține o suprafață mult mai bună?

Pentru această fază preliminară de concepere, metodele de dimensionare, nu vor fi de mare ajutor, cu o excepție poate pentru degajarea unor tendințe noi, deoarece este aproape imposibil să se verifice toate concepțiile sau metodele existente, mai mult, unele dintre problemele menționate putând fi abordate prin calcul, iar altele mai importante putând fi alese ca o politică de drum.

Modul în care o metodă de dimensionare a unei structurii rutiere este prezentată potențialilor utilizatori este esențială pentru succesul și aplicarea acesteia.

### 2.4.4. Modelele mecanicii structurilor rutiere

Domeniul mecanicii structurilor rutiere este limitat de două ambiții: înțelegerea modului de funcționare a diverselor tipuri de structuri rutiere și definirea regulilor de dimensionare. Ca și pentru structurile de construcții civile, dimensionarea constituie toate abordările de evaluare a nivelului de solicitare a structurii (ce ridică problema de definire a unui număr de parametri care semnifică funcționarea sa mecanică). Acest nivel de solicitări este apoi confruntat cu parametrii limită ai diferitelor materiale din

componența structurii rutiere. Limitele materialelor dezbătute în acest caz sunt limite de oboseală, adică sub încărcări repetate (numărul acestor solicitări poate atinge valori de aproximativ  $10^6 - 10^7$ , într-o perioadă de 10 până la 20 de ani, pentru un drum foarte circulat).

Nivelul de solicitări al structurii este evaluat cu ajutorul unui model, care în urma cererilor pentru reprezentarea ecuației model este suficient de realist astfel încât interacțiunea dintre diverșii parametri să guverneze funcționarea structurii.

Pentru a putea rămâne realiste, aceste modele au evoluat odată cu dezvoltarea structurilor rutiere, evoluția lor fiind una naturală, deoarece modelele utilizate trebuiau să fie reprezentative la funcționarea structurii rutiere studiate, și probabil nu ar fi fost la fel de profunde dacă generalizarea utilizând calculatorul ar fi ajutat la rezolvarea problemelor fizice de o complexitate mare, sau ajutorul metodelor numerice (diferențe finite, elemente finite), sau chiar redescoperind modele analitice care nu au avut o dezvoltare de cunoaștere mare în trecut, pentru obținerea unor rezultate care necesitau o multitudine de calcule manuale.

Modelele utilizate se pot clasifica după diferite criterii:

- clasificare cronologică;
- clasificare potrivit problemelor fizice abordate (adică prin natura structurii rutiere);
- clasificare prin utilizarea modurilor de rezoluție matematică.

Este posibil ca aceste clasificări diferite să se suprapună destul de mult, deoarece modul de rezoluție matematică este în funcție de problemele fizice ridicate pentru tipul de structură utilizată. Deși nu s-a intenționat să se facă o analiză exhaustivă a tuturor abordărilor teoretice ale acestei probleme, se prezintă etapele cele mai caracteristice ale evoluției de idei.

#### 2.4.4.1. Modelul lui Boussinesq

Presiunea  $q_0$  (de la aproximativ 0,2 – 0,7 MPa), exercitată de anvelope nu poate fi în totalitate susținută de stratul suport din pământ natural. Rolul structurii rutiere este de a repartiza această presiune pe o suprafață corespunzătoare astfel încât presiunea exercitată să poată fi adusă la un nivel compatibil cu ceea ce poate susține stratul suport din pământ. În cazul în care corpul drumului nu este prea diferit de terenul natural (scheletul mineral spre exemplu), este rezonabil să se presupună că presiunea de repartitie transversală a corpului drumului este distribuită pe întreaga suprafață în același mod ca și la pământ. Acest lucru conduce la definirea unei metode simpliste de dimensionare [15]:

- sarcina aplicată la suprafața structurii rutiere este reprezentată prin presiunea  $q_0$  sub forma unui cerc de rază  $a$ ;
- stratul suport se presupune elastic (modulul lui Young  $E_2$ , coeficientul lui Poisson  $\nu_2$ ). El nu poate rezista fără o deformare exagerată datorită compresiunii verticale  $(\sigma_z)_{ad}$  inferioară presiunii  $q_0$ ;
- cercetarea terenului în adâncime  $H$ , astfel încât presiunea verticală difuzată să fie suficientă pentru a nu depăși  $(\sigma_z)_{ad}$ ;
- se poate asimila grosimea  $H$  cu grosimea structurii rutiere făcând o corespondență între ele  $H' < H$  printr-o regulă simplă, ținând seama de modulul de elasticitate  $E_1$  pentru straturile granulare și modulul  $E_2$  pentru stratul suport (patul drumului).

Echivalarea  $H'$  cu  $H$  se face asimilând  $E_1$  cu  $E_2$ .

De asemenea pentru realizarea acestei dimensionări mai este necesar să se cunoască exact distribuția presiunii verticale, în interiorul solidului ( $E_2, \nu_2$ ), figura 2.4.

Această problemă a fost rezolvată de Boussinesq la sfârșitul secolului XX.

Efortul vertical  $\sigma_z$  este maxim direct deasupra inelului de sarcină, la o adâncime  $z$ , el putând lua valoarea :

$$\sigma_z = q_0 \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] = q_0 \left[ 1 - \frac{(z/a)^3}{(1 + z^2/a^2)^{3/2}} \right] \quad (2.1)$$

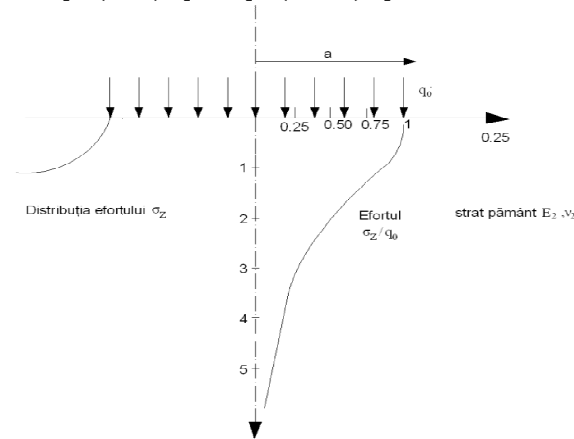


Figura 2.4. Distribuția de presiune în terenul de fundare (Boussinesq)

Ca și observații se poate remarca faptul că:

- $\sigma_z$ , este proporțional cu  $q_0$  și independent cu modulul de elasticitate  $E_2$  al terenului de fundare;
- grosimea  $H$  a structurii este proporțională cu raza cercului încărcat;
- dacă efortul admisibil  $\sigma_z$  pe suprafața solidă este foarte mic în comparație cu presiunea aplicată  $q_0$ , acesta poate conduce la adoptarea unei grosimi foarte puternice a structurii (în cazul în care modulul de elasticitate al materialului care constituie corpul drumului nu este prea îndepărtat de cel al stratului suport).

Ca și exemplu de evidențiat se poate arăta că pentru o trecerea de la valoarea  $q_0/10$  la valoarea  $q_0/20$ , grosimea  $H$  trece de la 55 cm la 85 cm.

Modulul de elasticitate  $E_1$  al straturilor granulare fiind mai mare decât modulul de elasticitate  $E_2$  al stratului suport, grosimea  $H'$  a structurii este dată astfel:

$$H' = H \times f\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \text{ sau } f\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \leq 1 \quad (2.2)$$

Determinarea funcției  $f$  presupune că se dispune de modele bistrat ( de exemplu așa numitele modele Burmister).

Ceea ce se constată din modelul lui Boussinesq este faptul că pentru o gamă uzuală de module pentru straturile granulare ( $E_1 \sim 2$  la  $4 E_2$ ) aflate în componența structurii rutiere, funcția  $f$  nu este foarte departe de 1. Același lucru nu este sigur în cazul în care modulul de elasticitate  $E_1$  este mai mare în raport cu modulul  $E_2$  (straturi conexe).

#### 2.4.4.2. Modelele bistrat

Când eforturile verticale pe stratul suport (pământ) sunt limitate la o valoare foarte mică ( $1/10$  sau  $1/20$ , din presiunea exercitată pe suprafață), este costisitoare

realizarea distribuției presiunii prin intermediul straturilor granulare (grosimea  $H$  fiind prea mare). Pentru a diminua această grosime, solicitările pe stratul suport din pământ sunt constante, motiv suficient pentru a crește raportul modulului dintre stratul structurii rutiere  $E_1$  și stratul suport din pământ  $E_2$ . Acest rezultat poate fi obținut cu ajutorul unor lianți hidraulici (ciment, zgura de furnal înalt etc.) sau lianți hidrocarbonați.

Dacă modulul  $E_1$  a stratului structurii rutiere este mare (de exemplu, pentru o fundație tratată cu lianți hidraulici), se poate obține o presiune mică pe stratul suport fără a da o importanță deosebită grosimii structurii rutiere. Această grosime nu poate fi totuși foarte scăzută, de aceea crescând modulul de elasticitate al stratului structurii rutiere se schimbă complet funcționarea sa mecanică. Stratul structurii rutiere sub sarcina aplicată se încovoie, acest declin fiind însoțit de solicitări de întindere, care produc la bază deflexiuni (figura 2.5.). Dimensionarea în acest caz a structurii constă în verificarea a două criterii ce condiționează comportamentul în timp:

- efortul vertical pe stratul suport trebuie să fie inferior unei valori limită în funcție de natura terenului suport și în funcție de numărul de sarcini (cicluri) luate în considerare  $\sigma_z \leq (\sigma_z)_{ad}$ ;
- efortul de întindere prin încovoiere la baza stratului structurii trebuie să fie inferioară valorii limită în funcție de natura materialului din care este constituit respectivul strat și de numărul de cicluri,  $\sigma_T \leq (\sigma_{Tz})_{ad}$ .

Având fundația tratată cu lianți hidraulici, primul criteriu de dimensionare este satisfăcut în general atunci când este îndeplinit și al doilea, prin urmare este suficient să se verifice numai cel de-al doilea criteriu. Dimensionarea unui strat rutier diferă considerabil de dimensionarea unei fundații, cum este deseori practică în mecanica solurilor, acest prim criteriu (presiune pe stratul de fundație), fiind în general predominant.

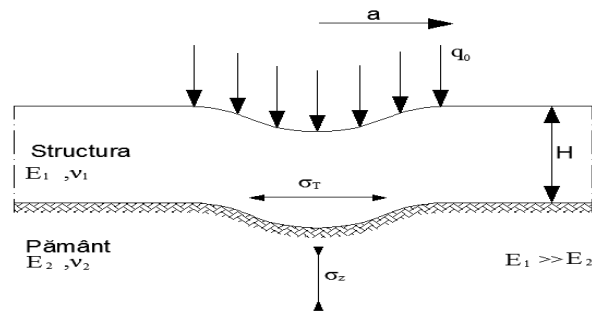


Figura 2.5. Comportarea la încovoiere a unui strat legat

Studiul unei astfel de probleme nu se poate face numai cu ajutorul modelului Boussinesq, de aceea este necesară utilizarea modelului bistrat.

#### 2.4.4.3. Modelul lui Hogg

Problema bistrat fiind foarte dificilă de rezolvat, modelul lui Hogg încearcă să o simplifice [48].

Se știe că, dacă rezolvarea ecuațiilor de elasticitate poate fi foarte dificilă în cazul general, problemele de flexiune (îndoire) se pretează la un anumit număr de ipoteze simplificatoare (ipoteza lui Navier pentru plăci subțiri). Acest lucru conduce la presupunerea că în stratul structurii rutiere:



- planul mediu coincide cu axa neutră;
- secțiunile transversale rămân plane în timpul deformației;
- tensiunile normale dezvoltate în direcție transversală pot fi neglijate.

Deplasările pe verticală  $w$  ale axei neutre pentru o suprafață plană (placă) considerată pot fi rezolvate cu ajutorul ecuației Lagrange pentru plăci subțiri:

$$D \cdot \Delta^2 \cdot w = \rho \text{ cu } D = \frac{E_1 \times H^3}{12 \times (1 - \nu_1^2)} \quad (2.3)$$

În această ecuație,  $D$  reprezintă caracteristica de rigiditate a plăcii,  $w$  reprezintă deplasarea pe verticală a axei neutre și  $\rho$  desemnează suma presiunilor verticale, sau  $\rho = \sigma_z - q_0$ , unde  $q_0$  reprezintă încărcarea la baza cercului iar  $\sigma_z$  în exteriorul cercului.

Operatorul diferențial  $\Delta^2$  desemnează dublu laplacian în coordonate polare:

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} + \frac{d}{dr} \right)^{(2)} \quad (2.4)$$

Modelul lui Hogg este schematizat în figura 2.6. Structura rutieră în acest caz reprezentată conform ipotezei lui Navier, se tratează ca fiind o placă plasată peste un solid infinit de tip Boussinesq ( $E_2, \nu_2$ ). În această situație nu se discută metoda de rezolvare a problemelor din punct de vedere matematic, care indică numai principiul, ci se ia în evidență faptul că problema prezintă două necunoscute care sunt: deplasarea pe verticală a plăcii și  $\sigma_z$ , efortul vertical pe suprafața solidă. Ecuația lui Lagrange prevede o relație între aceste două necunoscute. Există de asemenea o a doua relație de egalare a deplasărilor verticale ale axei neutre a plăcii cu mișcările verticale ale solidului, acestea fiind exact legate de presiunea pe solid prin formulele lui Boussinesq.

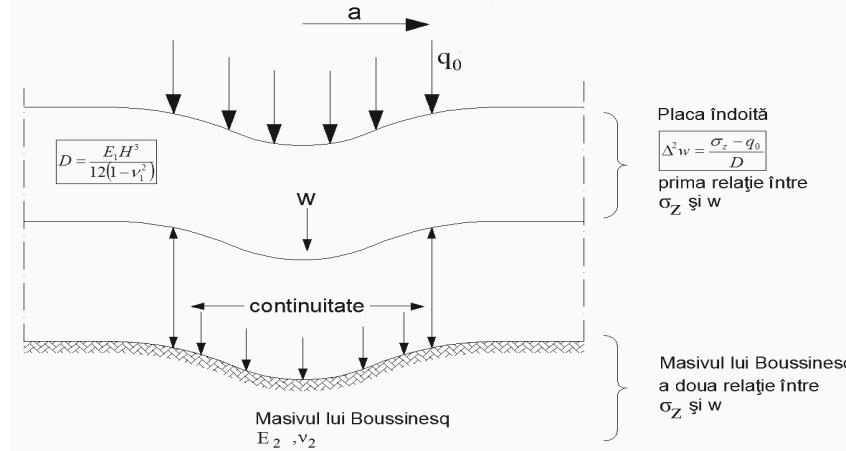


Figura 2.6. Modelul lui Hogg

În momentul flambării plăcii (și în urma efortului de tracțiune  $\sigma_t$  din placă) sunt deduse deplasările verticale  $w$ , prin formulele uzuale aplicate plăcilor.

Presupunând faptul că în cazul structurilor rutiere, stratul rutier alunecă perfect pe stratul suport, s-a găsit pentru exprimarea efortului ce apare la bază, următorul argument ( $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ ).

$$\sigma_T = \frac{1+\nu}{2} q_0 \frac{H}{a} \frac{E_1}{E_2} \int_0^\infty \frac{x J_1(x) dx}{1 + \frac{1}{6} \frac{H^3}{a^3} \frac{E_1}{E_2} x^3} \quad (2.5)$$

unde  $J_1(x)$  descrie funcția Bessel.

Se reține că efortul de tracțiune poate fi scris:

$$\sigma_T = \frac{1}{H^2} \frac{1+\nu}{2} q_0 a^2 F\left(\frac{E_1}{E_2} \frac{H^3}{a^3}\right) \quad (2.6)$$

sau prin introducerea încărcării  $P = nq_0 a^2$ :

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} \frac{1+\nu}{2n} F\left(\frac{E_1}{E_2} \frac{H^3}{a^3}\right) \quad (2.7)$$

subliniind astfel importanța cantității  $\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}$  care exprimă rigiditatea plăcii în raport cu stratul său suport; efortul la baza plăcii  $\frac{P}{H^2}$  apare ca produs al unei funcții de rigiditate a stratului rutier exprimat de către  $\frac{E_1}{E_2} \cdot H^3$ . Atunci când raportul modulelor  $E_1/E_2$  este mare, această funcție de rigiditate a structurii variază relativ lent cu  $\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot H^3\right)$ .

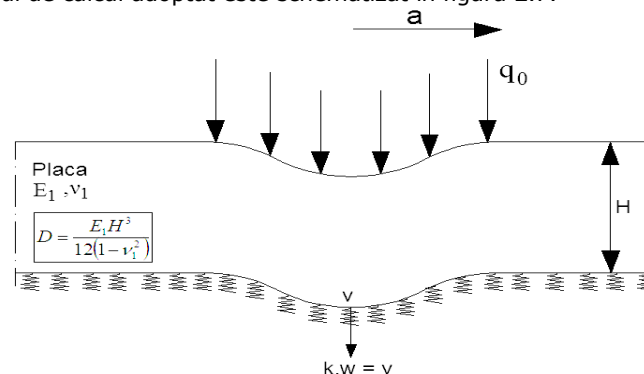
#### 2.4.4.4. Modelul lui Westergaard

Acest model este anterior celui lui Hogg care într-adevăr este un model logic bazat pe modelul Boussinesq, în timp ce modelul Westergaard conduce la o abordare destul de diferită. Complexitatea relativă a modelului lui Hogg vine, de fapt, din însăși natura terenului care suportă structura rutieră, conform modelului lui Boussinesq.

Presupunând că ipoteza lui Boussinesq pentru stratul suport al structurii rutiere nu a fost în niciun caz o ipoteză simplificată (comportamentul real al terenului de fundare este infinit), Westergaard a adoptat pentru terenul de fundare o altă ipoteză simplificatoare, care a avut drept scop facilitarea calculului [78].

În afară de ipoteza plăcii subțiri pentru stratul rutier, modelul Westergaard include următoarele ipoteze pentru stratul suport: este asimilat cu un ansamblu resort a cărui deplasare pe verticală într-un punct ( $w$ ) este proporțională cu presiunea verticală  $v$  în acest punct.

Modelul de calcul adoptat este schematizat în figura 2.7.



$v$ : efortul vertical pe masiv;  
 $w$ : deplasarea pe verticală a plăcii;  
 $k$ : modulul de reacție a stratului suport.

Figura 2.7. Modelul lui Westergaard

Acest model este relativ simplu pentru rezolvarea ecuației, astfel ecuația Lagrange pentru plăci subțiri se scrie:  $\Delta^2 w = \frac{p(r)}{D}$ , unde  $p$  reprezintă suma eforturilor de flexiune la distanța  $r$  de centrul plăcii:

$$\Delta^2 = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \right) \quad (2.8)$$

Sub sarcină:  $p(r)=v(r)-q_0$  și  $p(r)=v(r)$  la exterior. Acestea conduc la definirea sarcinii aplicate pe suprafață pentru care funcția  $q(r)$  este:  
 $q(r)=q_0$  dacă  $r \leq a$  și  $q(r)=0$  dacă  $r \geq a$ .

Atunci ecuația Lagrange poate fi scrisă:

$$\Delta^2 w(r) = \frac{v(r)-q(r)}{D} \quad (2.9)$$

unde  $\left(D = \frac{E_1 H^3}{12(1-\nu_1^2)}\right)$  sau, având în vedere ipoteza de comportament solid care se scrie:

$v(r)=kw(r)$ ,  $\Delta^2 w(r) + \frac{k}{D} w(r) = \frac{q(r)}{D}$ , ecuație diferențială de ordinul 4 în  $w(r)$ .

Pentru a rezolva această ecuație diferențială, se poate efectua pentru variabila  $r$  (distanța de la centrul de încărcare) o transformare fără a manipula mărimile dimensionale.

Astfel:  $r=lx$ , unde  $l = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{E_1 H^3}{12(1-\nu_1^2)k}}$ ,  $l$  reprezintă dimensiunea lungimii și se

numește rază de rigiditate a stratului rutier. Atunci ecuația Lagrange se scrie:

$$\Delta^2 w(x) + w(x) = \frac{q(x)}{k} \quad (2.10)$$

Pentru a rezolva această ecuație este convenabil a se efectua asupra variabilelor o transformare cunoscută sub numele de Henkel (oarecum analog transformării Fourier).

Ca și concluzie, este de remarcat faptul că acest model a fost și este utilizat încă pe scară largă. Întrădeavă ipotezele simplificatoare care s-au folosit pentru abordarea altor probleme decât cele dezbătute de către Hogg și Burmister nu se pot rezolva, în special problemele de încărcare la margine și colțul suprafeței.

#### 2.4.4.5. Modelele multistrat (Burmister)

Modelele bistrat pe care tocmai le-am prezentat sunt interesante, deoarece ele permit determinarea tendințelor majore de variație a grosimii, a raportului dintre modulele straturilor și a influenței razei de încărcare. Totuși este foarte interesant de analizat faptul că modelele constituite din  $n$  straturi, facilitează în mare măsură ca schematizarea structurii să fie reprezentată doar de un sistem de trei straturi terenul de fundare, straturile de fundație și îmbrăcăminte [18].

Burmister a tratat problema generală a  $n$  straturi schematizate ca în figura 2.8.

Conform modelului lui Burmister au fost formulate următoarele ipoteze:

- toate straturile sunt asimilate cu solide elastic-lineare, omogene, izotrope, caracterizate de un modul de elasticitate  $E_i$  și un coeficient al lui Poisson  $\mu_i$ , de dimensiuni infinite în plan și de grosime  $h_i$ ;
- interfețele între straturi sunt fie lipite, fie glisante, și aceeași structură poate avea interfețe cu frecare și fără frecare;
- cazurile de încărcări multiple (cuplate, osii duble sau triple, remorci), pot fi tratate suplimentând efectele încărcărilor elementare.

Cea mai importantă limitare a acestui model constă în faptul că, la fel ca în modelul Boussinesq sau Hogg, straturile sunt în planul infinit. Modelul nu permite o abordare a condițiilor de margine (încărcarea la marginea fisurată sau marginea structurii). Se remarcă totuși că marginile sunt în general bine separate de benzile de rulare, astfel că ipoteza de straturi infinite poate fi adoptată (acest lucru nu este posibil de aplicat în cazul dalelor din beton de ciment pentru care este necesar să se efectueze un calcul pentru încărcările de margine și unghiul dalei).

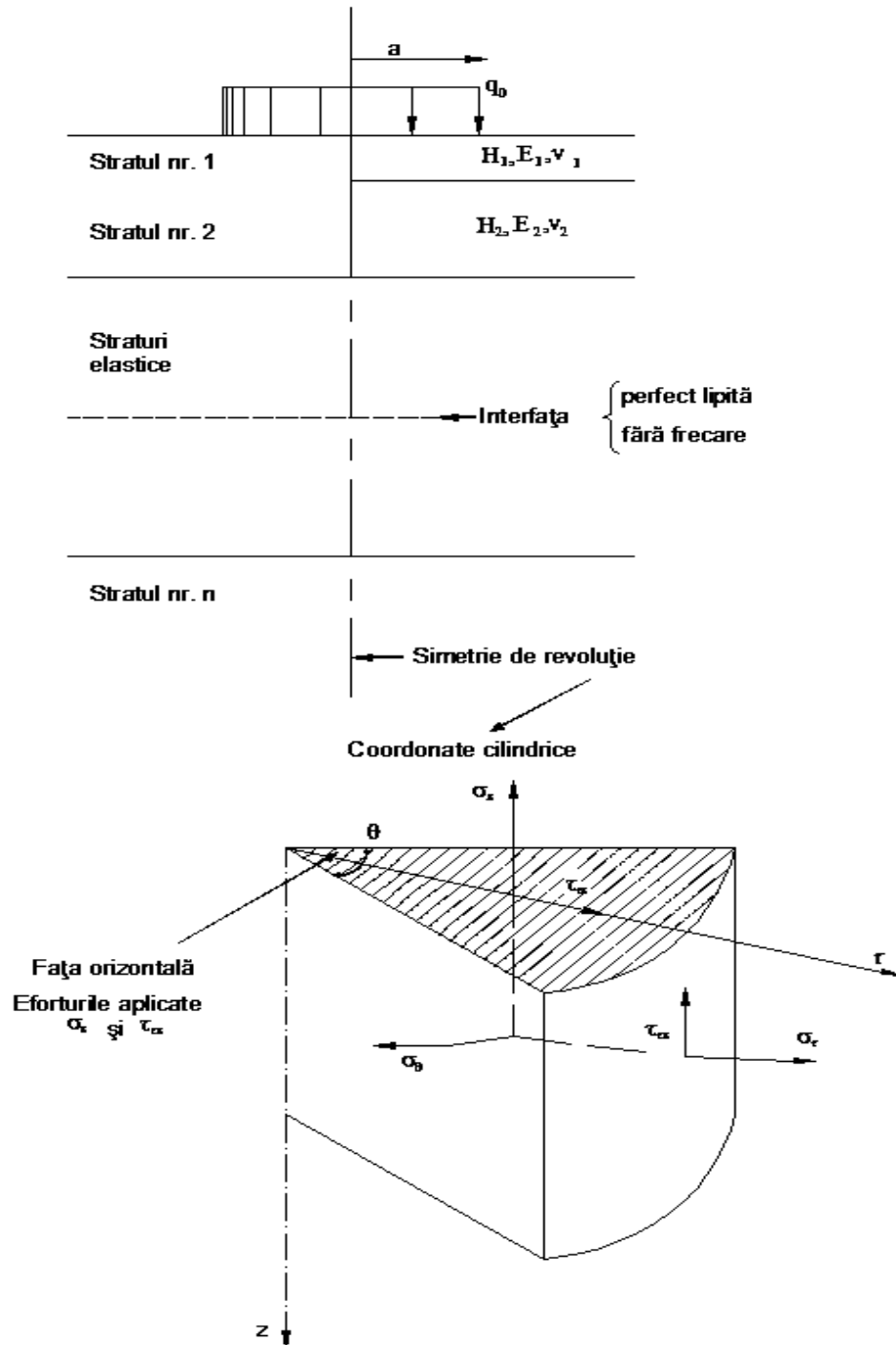


Figura 2.8. Modelul lui Burmister

Ipoteza plăcilor infinite în plan permite o simplificare a problemei: astfel, dacă încărcarea aplicată este circulară, atunci problema posedă o simetrie de revoluție și poate fi deci rezolvată în coordonate cilindrice. Aceasta justifică a patra ipoteză:

- încărcările sunt circulare, adică pot fi asimilate unor cercuri sau discuri.

Pe baza modelului lui Burmister care permite calculul sub o încărcare circulară, a tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor în diferite puncte ale masivului semi-infini multistrat a fost conceput programul de dimensionare a structurilor rutiere Alizé. Astfel structura poate fi modelată prin straturi elastice lineare izotrope și omogene infinite în plan, de grosime finită, cu excepția terenului de fundare care se consideră semi-infini, iar solicitările date de pneuri sunt asimilate cu încărcări circulare statice, exercitate ca eforturi verticale (greutatea vehiculului) sau orizontale (forța de frecare pneu-carosabil).

#### 2.4.4.5.1. Principiul unei probleme elastice în coordonate cilindrice pentru o încărcare

Acest principiu de rezolvare al modelului lui Burmister se rezumă la găsirea funcției soluției a ecuației:

$$\Delta^2 \varphi(r, z) = 0, \quad \Delta^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2 \quad (2.11)$$

Problematika echilibrului unui mediu elastic liniar izotrop sub încărcări exterioare ține cont de faptul că:

- Mecanica Mediului Continuu furnizează relații între tensiuni și deformații în toate punctele unui solid elastic liniar izotrop.

În coordonate cilindrice aceste relații se scriu sub următoarea formă:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu) \frac{\partial u}{\partial r} + \nu \left( \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu) \frac{u}{r} + \nu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu) \frac{\partial w}{\partial z} + \nu \left( \frac{u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \\ \tau_{rz} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ecuațiile de echilibru trebuie să se verifice în toate punctele solidului elastic linear izotrop:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Soluția problemei a fost dată de către Love în termeni de deplasare și în funcție de coeficientul lui Poisson:

$$u = -\frac{1+\nu}{E} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} \right), \quad w = \frac{1+\nu}{E} \left[ 2(1-\nu) \Delta \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] \quad (2.14)$$

cu  $\varphi$  funcție de variabilele  $r$  și  $z$ :  $\varphi = \varphi(r, z)$

Se dovedește că relațiile de echilibru sunt verificate atunci când soluțiile pe care le au, verifică relația:

$$\Delta^2 \varphi(r, z) = 0 \quad (2.15)$$

adică  $\varphi$  este o funcție biarmonică.

Rezolvarea acestei ecuații este simplificată dacă efectuăm în prealabil o transformare Henkel, care este definită în modul următor [76]:

$$f(r, z) \rightarrow f^*(m, z) = \int_0^{+\infty} r J_0(mr) f(r, z) dr,$$

iar transformarea inversă se scrie:

$$f^*(m, z) \rightarrow f(r, z) = \int_0^{+\infty} m J_0(mr) f^*(m, z) dm$$

Notăm cu:

$\varphi^*(m,z)$  transformata funcției  $\varphi(r,z)$ ;

$\sigma^*(m,z)$  transformata funcției  $\sigma(r,z)$ ;

$w^*(m,z)$  transformata funcției  $w(r,z)$ .

Scopul acestei transformări este acela de a reduce ecuația (2.15) la o formă mult mai simplă, lucru posibil în planul  $(m,z)$ :

$$\left(\frac{\delta^2}{\delta z^2} - m^2\right)^2 \cdot \varphi^*(m,z) = 0 \quad (2.16)$$

Soluțiile acestei ecuații (2.16) sunt de forma:

$$\varphi^*(m,z) = y(m) \{ [A(m) + zB(m)] \cdot e^{mz} - [C(m) + zD(m)] e^{-mz} \}$$

unde  $y(m)$  este luată egală cu transformarea Henkel de ordinul 0 a funcției de încărcare, pe care o notăm cu  $p(r)$ :  $y(m) = p^*(m,z)$

Prin transformarea inversă se deduce valoarea funcției  $\varphi(r,z)$ ,

$$\varphi^*(m,z) \rightarrow \varphi(r,z) = \int_0^{+\infty} m J_0(mr) \varphi^*(m,z) dm$$

Cunoscând  $\varphi$ , este posibil de determinat deplasările  $u$  și  $w$ , apoi tensiunile conform relațiilor următoare:

$$\sigma_z = \frac{\delta}{\delta z} \left[ (2-\nu) \Delta \varphi - \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} \right] \quad (2.17)$$

$$\sigma_r = \frac{\delta}{\delta z} \left[ \nu \Delta \varphi - \frac{\delta^2 \varphi}{\delta r^2} \right] \quad (2.18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\delta}{\delta z} \left[ \nu \Delta \varphi - \frac{1}{r} \frac{\delta^2 \varphi}{\delta r} \right] \quad (2.19)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\delta}{\delta r} \left[ (1-\nu) \Delta \varphi - \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} \right] \quad (2.20)$$

Astfel se obțin expresiile integrale ale tensiunilor  $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$  și  $\tau_{rz}$

În cazul structurilor compuse din  $n$  straturi de caracteristici elastice diferite, se caută un număr de  $n$  funcții  $\varphi_i$  definite pentru fiecare strat  $i$  prin:

$\Delta^2 \varphi_i(r,z) = 0$ , și condițiile la limită (între fețele interioare și superioare).

Aplicând transformarea lui Henkel definită precedent, pentru fiecare strat se obțin valorile tensiunilor și deplasărilor conform relațiilor anterioare (2.17) ... (2.20), exprimate sub forma integrală a funcției  $\varphi_i^*(m,z)$ .

Pentru fiecare dintre straturile  $i$ , determinarea tensiunilor și deformațiilor este legată de cunoașterea a patru necunoscute:  $A_i(m)$ ,  $B_i(m)$ ,  $C_i(m)$ , și  $D_i(m)$ .

Prin urmare, rezolvarea problemei pentru întreg ansamblul structurii rutiere necesită existența unui număr de  $4n$  condiții la limită, care se descompun în felul următor:

- la suprafața structurii rutiere: două condiții;
- la infinit: două condiții;
- la  $(n-1)$  interfețe:  $4(n-1)$  condiții.

După înlocuirea în ecuațiile celor  $4n$  condiții la limită a tensiunilor și deplasărilor, rezolvarea sistemului de ecuații dă valoarea necunoscutelor  $A_i(m)$ ,  $B_i(m)$ ,  $C_i(m)$ , și  $D_i(m)$ .

În final se obține starea de tensiuni și deformație într-un reper axial-simetric:

- deplasările orizontale  $u(r,z)$  și verticale  $w(r,z)$ ;
- tensiunile  $\sigma_r(r,z)$ ,  $\sigma_z(r,z)$ , și  $\tau_{rz}(r,z)$ ;
- deformațiile corespunzătoare.

În cazul masivelor bistrat Burmister a fost totuși în măsură să dea rezultate numerice, prezentate sub formă de abace. În acest caz particular masivul lui Burmister are două straturi, astfel calculul putând fi efectuat manual.

Deoarece Hogg a avut ideea de a pune o placă pe un masiv Boussinesq pentru a calcula pentru prima dată bistraturile, Jeuffroy și Bachelez au avut ideea de a calcula placa așezată pe un masiv bistrat de tip Burmister. Datorită acestui procedeu ei au putut calcula primele trei straturi ale structurii și astfel lansând un set complet de diagrame.

Metodele similare cu cele ale lui Burmister pentru rezolvarea problemei masivului multistrat supus la o presiune verticală  $q_0$  pe un cerc de rază  $a$ , permit egalarea și rezolvarea unor probleme de acest tip la care același solid este supus la o suprafață de forfecare. Această forfecare poate fi de tipul  $(\tau_{rz})$  [11], și anume îndreptată de-a lungul razelor cercului de încărcare, sau poate fi de asemenea, de tipul  $(\tau_{xz})$ , îndreptată de-a lungul unei direcții date (figura 2.9). Primul caz simulează un efect de rigiditate al anvelopei, iar al doilea caz simulează o forță de frânare distribuită uniform pe zona amprentată.

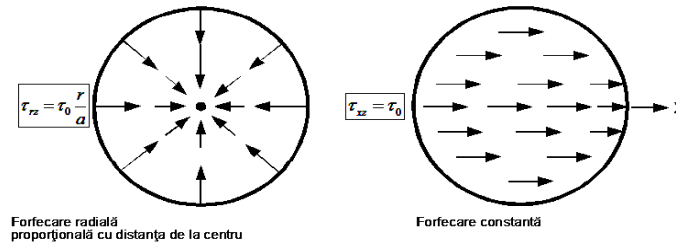


Figura 2.9. Tipul de forfecare luat în considerare

## 2.5. Materiale bituminoase - componentă esențială în alcătuirea structurilor rutiere nerigide

Aceste materiale sunt caracteristice alcătuirii structurilor rutiere datorită faptului că pentru un nivel de solicitări fixate, deformațiile depind de timp. O analogie a mecanicii solid-elastice este implicată în acest caz printr-un ansamblu de arcuri sau un ansamblu de arcuri și amortizoare.

Se spune că comportamentul unor astfel de materiale este vâsco-elastic. Această proprietate duce la dependența modulului de frecvență aplicată încărcării: modulul este mare atunci când materialul este supus unei solicitări rapide (de exemplu materialul este supus tranziției unui vehicul cu o viteză normală), iar modulul este scăzut sau foarte scăzut atunci când materialul este supus unei solicitări lente (vehiculul are o viteză scăzută sau staționează) [39].

A doua variabilă care afectează modulul unei îmbrăcămînți este temperatura, aceasta joacă un rol simetric cu cel al frecvenței: la temperaturi ridicate corespunde un modul mic, care crește foarte repede atunci când temperatura scade. Pe lângă acești factori, alții care mai pot influența modulul îmbrăcămînți asfaltice sunt: compoziția amestecului, compactitatea și natura bitumului [55].

Fundamentarea teoretică a dimensionării structurilor rutiere se face pe baza analizei eforturilor și deformațiilor unui sistem multistrat elastic. Calculul practic, necesită printre altele, cunoașterea exactă a parametrilor care caracterizează comportarea mecanică a materialelor ce intră în alcătuirea diferitelor straturi ale complexului rutier. Materialele pur elastice pot fi caracterizate prin două componente: modulul lui Young și coeficientul lui Poisson.

Materialele care au în componența lor lanți hidrocarbonați, în speță mixturile asfaltice, nu pot fi caracterizate doar prin acești doi parametri având în vedere comportarea lor reală. Prezența bitumului conferă mixturii asfaltice o comportare vâsco-elastică și termoplastică a cărei caracteristică principală este că atât proprietățile elastice, cât și cele vâscoase depind de temperatură și de viteza de aplicare a forțelor exterioare. Consecința acestui fapt este că parametrii ce caracterizează materialele elastice sunt înlocuiți în acest caz prin două funcții complexe (modulul complex și numărul lui Poisson) [39].

Fără a intra în unele detalii în acest capitol asupra tuturor factorilor care influențează îmbrăcămintile bituminoase, este interesant de studiat și prezentat câteva tendințe privind schimbările climatice și efectul acestora asupra dimensionării structurilor rutiere, după ce pe scurt se va defini noțiunea de modul complex pentru un material vâsco-elastic.

### 2.5.1. Modulul complex

Modulul complex este un număr complex care definește relația între efort și deformație pentru un material linear vâsco-elastic supus unei sarcini sinusoidale sub formă de undă în funcție de timpul  $t$ . Experimental, modulul complex al mixturilor asfaltice se poate determina prin încercarea la oboseală a unei epruvete supusă la încovoiere dinamică. În cadrul încercării de încovoiere, efortul impus  $\sigma(t)$  este de forma:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t \quad (2.21)$$

unde:  $\sigma_0$  – amplitudinea efortului;  
 $\omega$  – viteza unghiulară.

Având în vedere caracterul vâsco-elastic al materialului, deformația rezultă în urma efortului, rezultat care se traduce prin expresia unghiului de defazaj  $\varphi$  este:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (2.22)$$

unde:  $\varepsilon_0$  – amplitudinea deformației;  
 $\varphi$  – unghiul de defazaj dintre tensiune și deformație.

Unghiul de defazaj este, pentru un material pur elastic,  $\varphi = 0^\circ$ , iar pentru un material pur vâscos,  $\varphi = 90^\circ$ , figura 2.10.

Componenta elastică a modulului complex are următoarea formă:

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos(\varphi)}{\varepsilon_0} \quad (2.23)$$

iar componenta vâscoasă:

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin(\varphi)}{\varepsilon_0} \quad (2.24)$$

În notație imaginară modulul se scrie:

$$E^*(i\omega) = |E^*| e^{i\omega} = E_1 + iE_2. \quad (2.25)$$

Acest modul complex poate fi caracterizat prin două componente:

$$- |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \text{ modulul de rigiditate;}$$

$\varphi$  unghi de defazaj, care relevă caracterul vâscos sau elastic al materialului.

Pentru materialele vâsco-elastice, cum sunt mixturile asfaltice, modulul complex ( $E^*$ ) este folosit pentru reprezentarea rigidității acestui material. Modulul complex are o componentă elastică și una vâscoasă. Componenta elastică se referă la capacitatea materialului de a stoca energie, în timp ce componenta vâscoasă este responsabilă pentru pierderea energiei din sistem. Cele două componente, la fel ca și modulul complex, variază cu temperatura și nivelul încărcării.



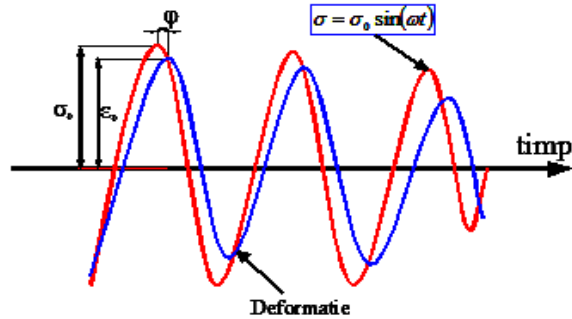


Figura 2.10. Efortul și deformația în cazul încărcării dinamice

Interpretarea statistică a numeroase rezultate experimentale obținute prin încercări asupra epruvetelor de mixturi asfaltice cu compoziții diferite și cu bitum de diverse tipuri, a condus la concluzia că modulul de rigiditate este influențat de fiecare dintre cei doi componenți ai mixturii asfaltice. Încercarea de încovoiere dinamică care definește modulul complex se realizează pe epruvete trapezoidale încastrate la bază [40].

### 2.5.1.1. Rolul temperaturii și al frecvenței

În figura 2.11. sunt reprezentate curbele izoterme ale modulului complex, din acestea reiese că influența frecvenței de încărcare este mult mai mare pentru temperaturi ridicate decât pentru temperaturi scăzute.

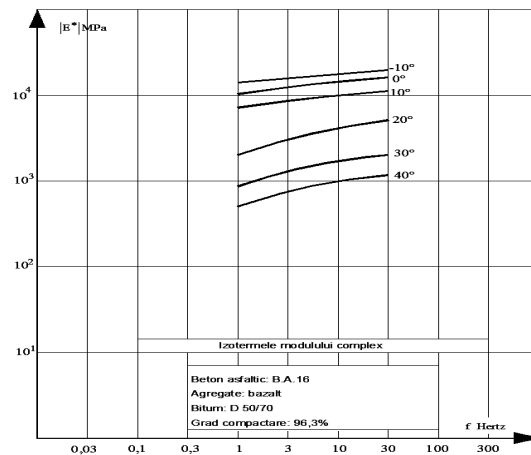


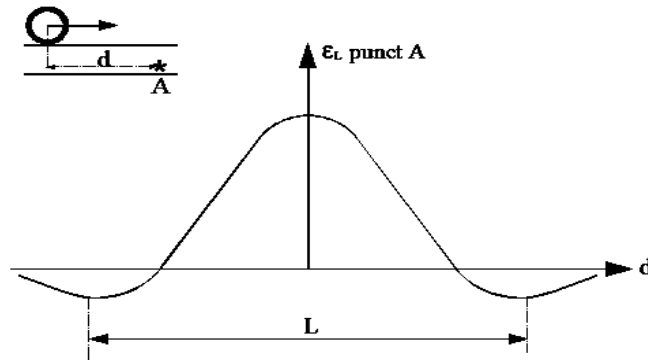
Figura 2.11. Curbele izoterme ale modulului complex pentru un material bituminos

Influența temperaturii asupra modulului este de asemenea foarte importantă deoarece modulul se împarte la 10 în cazul în care temperatura variază de la 10 °C la 40 °C. Se observă că, pentru a asocia un modul unui material bituminos, trebuie aleasă o temperatură și o frecvență de calcul [39]:

– la alegerea unei temperaturi de calcul se efectuează o analiză a daunelor ce pot apărea în structuri pentru un ciclu anual de temperatură (în România temperatura de calcul este de ordinul a 15 °C, lucru ce nu mai poate corespunde cu noile schimbări climatice);

– alegerea frecvenței se realizează din studiul variațiilor de deformare  $\varepsilon$  la un punct A în timp (curba  $\varepsilon(t)$  din figura 2.12), la trecerea unei încărcări dinamice.

Frecvența solicitărilor depinde de distanța dintre cele două extremități L și de viteza de încărcare. Acestea sunt prezentate în tabelul 2.6, ca și valori găsite pentru două tipuri de straturi și pentru două viteze de încărcare. Pentru o temperatură medie de 15 °C, se observă variațiile modului în funcție de frecvență, tabelul 2.7.

Figura 2.12. Alegerea frecvenței  $f$ 

Tabelul 2.6

| Viteza vehicul                       | 10 m/s                      | 25 m/s                        |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Tipul îmbrăcăminții                  |                             |                               |
| Îmbrăcămintă subțire<br>$L = 0.50$ m | $T = 0,05$ s<br>$F = 20$ Hz | $T = 0,02$ s<br>$F = 20$ Hz   |
| Îmbrăcămintă groasă<br>$L = 2.00$ m  | $T = 0,02$ s<br>$F = 5$ Hz  | $T = 0,08$ s<br>$F = 12,5$ Hz |

Tabelul 2.7

|                |      |      |       |
|----------------|------|------|-------|
| Frecvența (Hz) | 5    | 20   | 80    |
| Modulul (MPa)  | 6000 | 8000 | 10000 |

Datele colectate la diverse temperaturi pot fi translatate pe axa frecvenței, astfel încât diverse curbe (modul de rigiditate funcție de frecvență) pot fi aliniate astfel încât să formeze o singură curbă, denumită "curbă directoare". Din punct de vedere al definiției, curba directoare reprezintă răspunsul unei mixturi asfaltice la o temperatură de referință, într-un interval lărgit al frecvențelor [23].

Pentru a construi o curbă directoare, datele colectate la diferite temperaturi se translatează pe axa frecvențelor încărcării, astfel că toate curbele modul de rigiditate – frecvență se aliniază și formează o singură curbă directoare. Curbă directoare poate fi construită folosind o temperatură de referință arbitrară  $\theta_0$  la care toate datele sunt translatate.

Introducând următorii termeni  $a_T \cdot F$ , unde  $a_T$  este un factor de translație funcție de temperatură  $\theta$  și  $F$  frecvența, curba care descrie îmbrăcămintea asfaltică reprezintă variația modului complex în funcție de parametrii  $a_T \cdot F$ . Termenul  $a_T$  definește translația pe orizontală necesară unei curbe de modul la o anumită frecvență, pentru a fi supusă parțial peste curba corespunzătoare temperaturii de referință și este de tipul:

$$a_T(\theta, \theta_0) = e^{\lambda \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \right)} \quad (2.26)$$

unde  $\theta_0$  este temperatura de referință (°K).

Pe curbele reprezentate în figura 2.13. temperatura de referință este de 10 °C, pentru aceasta se poate citi modulul direct în funcție de frecvență. Pentru alte temperaturi trebuie să se restabilească funcția  $a_T$ .

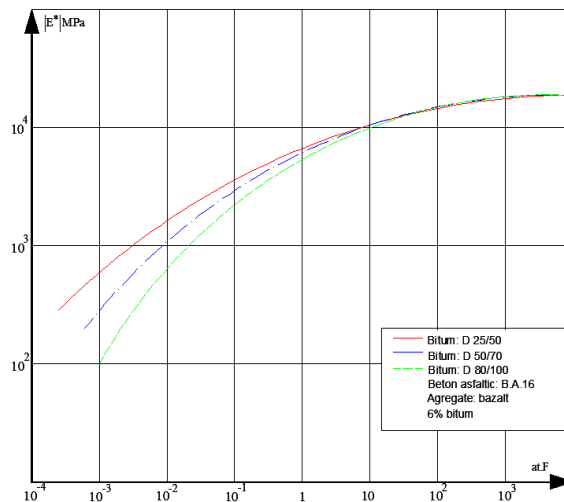


Figura 2.13. Curbele modului complex pentru diferite materiale bituminoase

Interesul acestor curbe este de a pune în evidență rolurile simetrice ale frecvenței și temperaturii, astfel modulul dinamic poate fi obținut la orice temperatură și frecvență de încărcare pe baza curbelor și a factorilor de translație, ceea ce permite ca modulul de elasticitate care se ia în calculele de dimensionare a unei structuri rutiere flexibile și semirigide să poată varia, funcție de temperatură, viteză și adâncimea la care se află în cadrul complexului rutier.

### 2.5.2. Încercarea la oboseală

Solicitările din trafic generează la baza îmbrăcăminților bituminoase întinderi orizontale repetate (figura 2.14.) care pot conduce la degradarea acestora prin oboseală [33]. În principiu, oboseala se manifestă prin reducerea în timp a modului de rigiditate al mixturilor asfaltice, datorită solicitărilor repetate. Aceasta are drept consecință creșterea deformațiilor de întindere care, în condițiile depășirii deformațiilor admisibile conduc în prima fază la fisurarea îmbrăcămintei bituminoase și în continuare, dacă nu se iau măsuri corespunzătoare de remediere, la evoluarea acestor defecțiuni în unele mai grave, de tipul faianțării.

În condiții reale de exploatare, în îmbrăcămințile bituminoase apar eforturi unitare și deformații complexe, cu caracter aleatoriu, care practic sunt imposibil de

reconstituit în laborator. În condițiile acceptării ipotezei de rupere prin oboseală datorită întinderilor orizontale repetate la baza straturilor bituminoase, prin încercări de laborator, se poate determina durata de exploatare a mixturilor asfaltice din îmbrăcămințile rutiere bituminoase (exprimată prin numărul de solicitări).

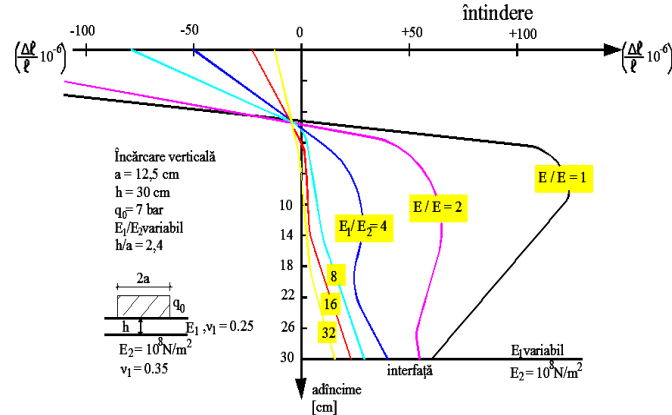


Figura 2.14. Repartiția deformațiilor într-un bistrat, în funcție de adâncime, pentru diferite rapoarte  $E_1/E_2$

Aceste încercări sunt efectuate la tracțiune prin îndoire pe epruvete trapezoidale încastrate la bază, supuse la un nivel de solicitări repetate până la ruperea probei. Temperatura de testare este de 10 °C și frecvența de 25 Hz. Există 2 tipuri de încercări:

- încercarea poate fi efectuată prin exercitarea unui efort  $F_0$  la partea superioară a epruvetei care se menține constant pe tot parcursul încercării. În acest caz, având în vedere deteriorarea probei, deplasarea părții superioare a epruvetei crește constant pe toată durata testului. În acest caz se poate spune că testul se efectuează la efort constant, figura 2.15;

- încercarea poate fi efectuată prin plasarea unei deplasări  $\delta_0$  la partea superioară a epruvetei care se menține constantă pe toată durata încercării. Efortul exercitat  $F$  descrește continuu în timpul testului, figura 2.16.

Deci se poate spune că încercarea este efectuată la efort constant. Din figurile 2.15 și 2.16 rezultă o evoluție rapidă a distrugerii epruvetei în cazul încercării la efort constant, în timp ce în al doilea caz această evoluție este mai lentă, ceea ce demonstrează că mecanismul de producere a oboselii nu este același în ambele variante ale încercării. Pentru două niveluri de solicitări inițiale identice, încercarea la efort constant este mult mai severă decât încercarea la deformație constantă, adică ruperea probei are loc după un număr mai mic de cicluri [75]. Acest lucru este firesc deoarece încercarea la deformație constantă adoptă un efort de la "proba solidă".



Figura 2.15. Evoluția deformației în încercarea cu efort constant

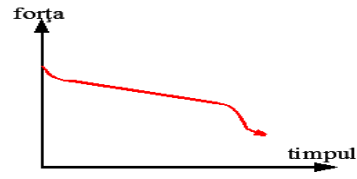


Figura 2.16. Evoluția forței în încercarea cu deformație constantă

Această adoptare a efortului în timpul încercării are două consecințe:

- rupura nu este de fapt observată la finalul testului, dar se va defini o rupură convențională atunci când deplasarea capătului superior al epruvetei atinge o valoare dublă celei ce a fost la începutul încercării;
- încercarea la oboseală ce conduce la deformație constantă, este mai dispersată ca încercarea la oboseală ce conduce la efort constant. Deviația standard a logaritmului numărului de cicluri pentru un nivel de solicitări conduce în medie la  $10^6$  cicluri, având un efect de ordinul 1 pentru o încercare efectuată la efort constant (ca și în cazul straturilor stabilizate cu lianți hidraulici, pentru care testul se face de asemenea la efort constant). Pentru o încercare realizată la deformație constantă această abatere standard este de 0,4.

În Franța, testele de oboseală sunt efectuate în general la deformație  $\epsilon$  constantă. Curba de oboseală este liniară într-o scară logaritmică, putându-se spune că  $\lg \epsilon$  este funcție liniară a logaritmului numărului de cicluri. Prin urmare se poate scrie expresia:

$$\epsilon = AN^{-b} \quad (2.27)$$

unde:

- N reprezintă numărul de cicluri de solicitare la care se rupe epruveta;
- coeficientul  $1/b$  reprezintă panta curbei de oboseală, el este de ordinul 5 pentru toate tipurile de mixturi asfaltice;
- A parametru de corelare statistică.

În cazul structurilor tradiționale, deformația  $\epsilon$  la baza îmbrăcăminții asfaltice este proporțională cu deflexiunea. Diverse studii de cercetare au căutat înlocuirea curbelor de deflexiune limită în funcție de numărul de cicluri care au fost elaborate pentru analiza comportamentului acestor structuri, cu curbele de deformație limită în funcție de numărul de cicluri. Așa se explică faptul că încercările la oboseală se realizează la deformație constantă.

### 2.5.2.1. Influența temperaturii

Proprietățile materialelor bituminoase sunt foarte strâns legate de temperatură, este interesant de știut cum evoluează performanțele acestora la oboseală atunci când proprietățile variază [72].

Cele mai frecvente încercări sunt efectuate la temperaturi de 10 °C, 15 °C dar altele sunt efectuate și pentru alte temperaturi. Aceste studii au arătat că deformația  $\epsilon_6$  care conduce la rupere la  $10^6$  cicluri a fost efectiv funcție de temperatură.

Funcția  $\epsilon_6(\theta)$  este în general o funcție crescătoare, cel puțin în cazul în care temperatura  $\theta$  rămâne superioară și are o valoare de 0°C (figura 2.17). De asemenea se observă faptul că într-un interval mare de temperaturi produsul  $\epsilon_6(\theta) \sqrt{E(\theta)}$  rămâne aproape constant.

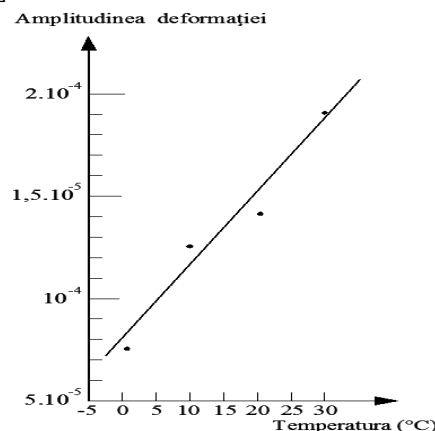


Figura 2.17. Deformațiile admisibile a  $N=10^6$  în funcție de temperatură

## 2.6. Rolul schimbărilor climatice asupra dimensionării structurilor rutiere

Condițiile climaterice care pot interveni în dimensionarea și comportarea structurilor rutiere sunt variate. Ele pot fi:

- abundența de precipitații în legătură cu drenajul;
- efectul ciclurilor sezoniere de temperatură privind comportarea structurilor rutiere care au în componență straturi din asfalt, sensibile la variațiile de temperatură;
- acțiunea de îngheț-dezghet.

Prima condiție menționată mai sus este luată în considerare în mod indirect în cadrul dimensionării, atunci când pentru a calcula structura rutieră adoptăm un modul pentru stratul suport. De asemenea se poate face o selecție a modelelor de calcul în funcție de variațiile sezoniere, variații pentru care se adoptă un modul pentru stratul suport, mai puțin în cazurile în care stratul este sensibil la apă. Problema este de fapt destul de complicată, deoarece parametrii de interacțiune sunt numeroși: evaporare, natura stratului suport, variațiile în adâncime ale apei etc.

Studiul ultimelor două aspecte enumerate evocă necesitatea unui calcul de distribuție a temperaturilor în interiorul structurii rutiere. Acestea necesită prin urmare o analiză termică detaliată.

### 2.6.1. Studiul variațiilor de temperatură în structura rutieră, analiza termică

Ecuatiile de bază ale acestei analize sunt furnizate de către legile de propagare a căldurii (legea lui Fourier):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (2.27)$$

unde:  $\theta(x,t)$  = temperatura la valoarea  $x$  și la timpul  $t$ ;

$\lambda$  = conductivitatea termică;

$\rho$  = densitatea;

$c$  = căldura specifică.

În unele cazuri particulare soluțiile ecuației lui Fourier sunt bine cunoscute, mai ales atunci când se pot face următoarele simplificări [41]:

- se consideră prezența unui masiv infinit;
- temperatura la suprafața masivului este o funcție sinusoidală de timp.

Aceste ipoteze simplificatoare oferă o viziune clară asupra evoluției temperaturii atunci când se studiază ciclurile sezoniere sau zilnice la diferite adâncimi (figura 2.18 și 2.19).

Să presupune spre exemplu, că temperatura la suprafața carosabilului este de următoarea formă:

$$\theta(0,t) = \theta_m + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (2.28)$$

la valoarea  $x$ , temperatura este de forma:

$$\theta(x,t) = \theta_m + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2} \cdot \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} - ux \right) \cdot e^{-ux} \quad (2.29)$$

Cu toate acestea se remarcă faptul că, dacă ne uităm la schimbările de temperatură de zi cu zi, temperaturile la suprafața carosabilului sunt influențate de mulți alți parametri care nu intervin în formula lui Fourier (culoarea carosabilului de

exemplu). Numeroși autori au încercat să adapteze formula lui Fourier prin introducerea unui termen de corecție bazat pe experiență.

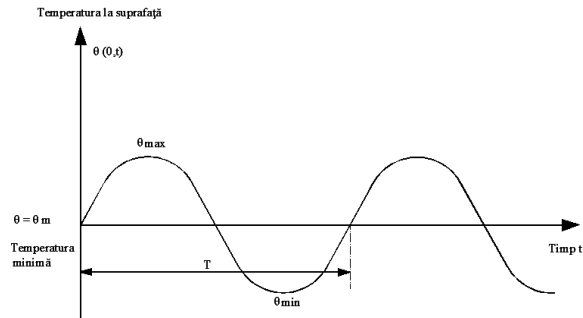


Figura 2.18. Temperatura la suprafață (funcție de timp)

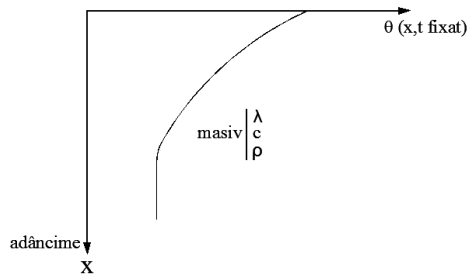


Figura 2.19. Repartiția temperaturilor în funcție de adâncime (la un moment dat)

În această relație  $u$  este egal cu  $\sqrt{\frac{\rho c p}{T}}$ , factor care guvernează amortizarea sinusoidală. În figura 2.20, sunt prezentate spre exemplu câteva rezultate obținute cu ajutorul acestei formule; putem constata un bun acord între valorile calculate și cele măsurate.

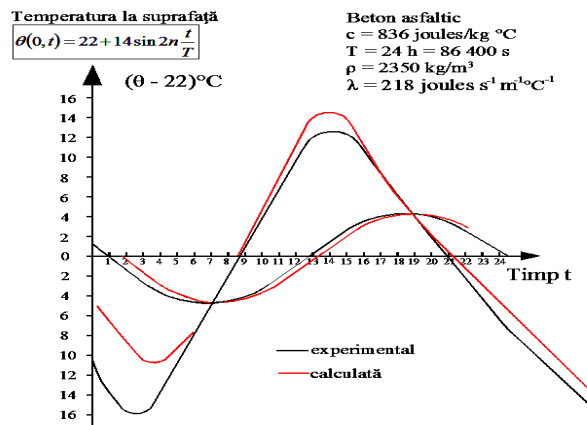


Figura 2.20. Exemplu real

În ceea ce privește problemele de îngheț-dezghet, soluția ecuației lui Fourier este mai puțin evidentă din următoarele motive:

- ciclul de temperatură la suprafața carosabilului în timpul iernii nu poate fi considerat ca sinusoidal;
- deoarece structura rutieră are în componență mai multe straturi (se poate prezice când frontul de îngheț a ajuns la stratul suport);
- condițiile limită ale problemei care intervin asupra poziției frontului de îngheț trebuie să descrie schimburile de căldură latentă de îngheț ale apei conținute de structura rutieră și în special de stratul suport, acest termen în soluționarea problemei are o influență foarte mare.

Multe soluții aproximative ale acestei probleme au fost găsite încă din trecut, utilizându-se formula lui Berggren. Această formulă prevede adâncimea de îngheț într-un masiv în funcție de:

- indicele de îngheț la suprafața masivului;
- conductivitatea termică și căldura specifică a masivului.

Adaptările acestei formule sunt posibile doar în cazul masivelor multistrat. Totuși această abordare a formulei lui Berggren a fost abandonată în Franța deoarece Serviciul de Matematică al LCPC [23], a stabilit o schemă originală și precisă de rezolvare numerică a problemei.

Programul GEL stabilit pentru această schemă de rezolvare permite calculul distribuției temperaturii în fiecare moment, într-o structură rutieră alcătuită din mai multe straturi (modelarea structurii este similară cu cea utilizată în calculele structurilor sub încărcări, dar numărul de parametri implicați în fiecare strat sunt foarte importanți: căldura specifică a stratului, densitatea în stare uscată, conținutul de apă, conductivitatea termică a materialului înghețat și dezghetă). Se reține faptul că tot acest program calculează de asemenea umflarea stratului suport atunci când este geliv. Ecuațiile problemei tratate sunt prezentate în figura 2.21 [19].

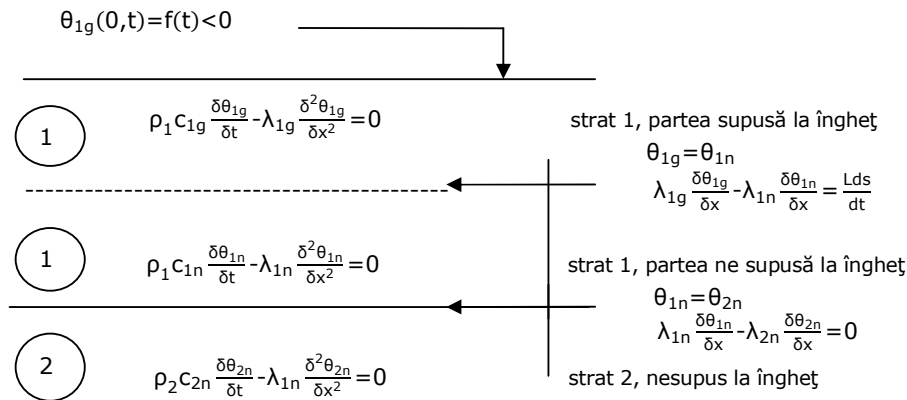


Figura 2.21. Ecuațiile programului GEL – exemplu pentru o structură bistrat

Se remarcă de asemenea faptul că cercetarea cu ajutorul acestui program este posibilă în Franța datorită progreselor foarte importante în domeniul cunoașterii conductivității termice a materialelor ce constituie structura rutieră a unui drum, și în special a modelelor care permit calculul conductivității termice pe baza conductivităților materialelor compozite constituente [16].



### 2.6.2. Comportamentul structurilor bituminoase. Variația modului în funcție de temperatură.

După cum s-a văzut proprietățile materialelor bituminoase sunt în mare parte influențate de temperatură, această sensibilitate se reflectându-se în special prin:

- un răspuns elastic la solicitări foarte scurte și temperaturi scăzute;
- curgere la încărcări ușoare și temperaturi ridicate.

În figura 2.22, se prezintă variația modului de rigiditate în funcție de frecvența de încărcare precum și în funcție de mai multe temperaturi. Aceasta prezintă variații mai sensibile la temperatură ca frecvență de solicitări (cel puțin în intervalul analizat).

Această variație a modului în funcție de temperatură produce, pentru o structură rutieră suplă sau mixtă, comportamente diferite, atât la nivelul deformațiilor ce apar în straturi ( $\varepsilon=f(\theta)$ ), cât și asupra următorilor parametri deplasări, rază de curbura.

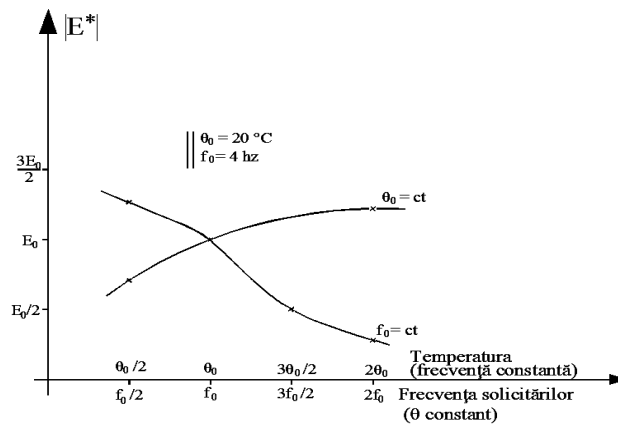


Figura 2.22. Sensibilitatea modului de rigiditate la temperatură și frecvență

Pentru calculul structurilor există în acest stadiu o primă dificultate în alegerea modului de rigiditate pe care trebuie să îl luăm în considerare. O a doua dificultate apare la comparația între valorile calculate și valorile admisibile. Aceste valori rezultă în urma testelor efectuate în laborator și în special din încercarea la oboseală a materialului.

#### 2.6.2.1. Comportamentul la oboseală a unei structuri bituminoase

Rezultatele acestei încercări sunt prezentate sub formă de diagramă, numită curbă de oboseală (încercările sunt efectuate la deformații controlate, temperatură și frecvență constantă) asimilând coordonatele ( $\lg \varepsilon$ ,  $\lg N$ ).

Atunci când testul de oboseală se realizează pentru mai multe temperaturi, curbele corespunzătoare se deplasează în diagrama  $\lg \varepsilon$ ,  $\lg N$  (figura 2.23). Cu cât temperatura este mai ridicată, cu atât și deformația permanentă de a ajunge la același

număr de cicluri  $N$  este mai mare. S-a constatat totuși că aceste curbe sunt aproape paralele, ceea ce permite să se grupeze prin adoptarea la scară redusă a deformațiilor:

$$\lg \frac{\varepsilon(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)} = -b \lg N \quad (2.30)$$

$\varepsilon_0$  este o proprietate a materialului ce variază în funcție de temperatură ( $\varepsilon_0(\theta)$ ), (figura 2.24).

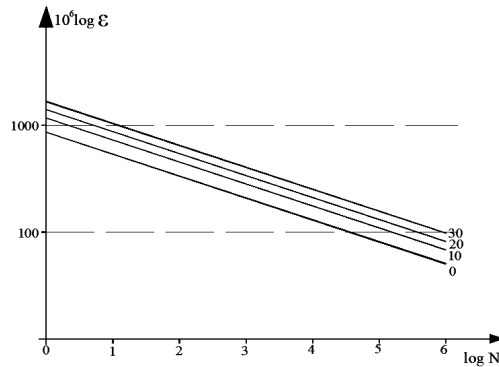


Figura 2.23. Influența temperaturii asupra curbei de oboseală

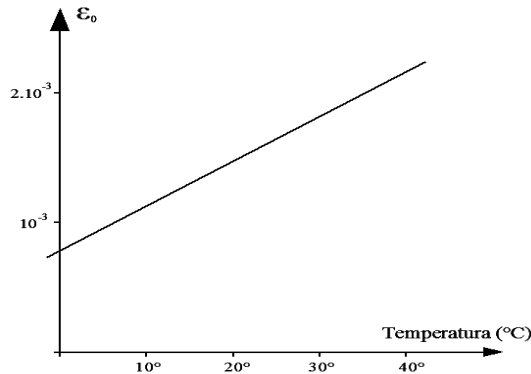


Figura 2.24. Variația  $\varepsilon_0$  în funcție de temperatură

Dacă  $\varepsilon(\theta)$  este deformația aplicată efectiv într-un strat bituminos la o temperatură  $\theta$  în cazul în care structura este încărcată, numărul de cicluri până la rupere se exprimă prin:

$$\lg \frac{\varepsilon(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)} = -b \lg N \quad (2.31)$$

Raportul  $\varepsilon(\theta)/\varepsilon_0(\theta)$  depinde, în cazul general de temperatura și de numărul de cicluri până la rupere, astfel temperatura poate avea următoarea expresie:

$$N(\theta) = \left[ \frac{\varepsilon(\theta)}{\varepsilon_0(\theta)} \right]^{-1/b} \quad (2.32)$$

Sensul variației  $N(\theta)$  nu este unic. El depinde de dispunerea și de natura straturilor constitutive ale structurii precum și de materialele din straturile examinate:

- $\varepsilon_0(\theta)$  nu depinde de material;
- $\varepsilon(\theta)$  depinde de material și de dispunerea straturilor.

### 2.6.2.2. Definirea temperaturii echivalente

Pentru a calcula această temperatură echivalentă se pornește de la legea lui Minier, care reglementează cumulum de daune suportate de material ca urmare a efectului de solicitări repetate. Dacă pentru un nivel de solicitări  $\varepsilon_i$  numărul de cicluri la rupere este  $N_i$  daunele produse de fiecare sarcină sunt:  $d_i = \frac{1}{N_i}$ .

Ținând cont de legile de oboseală ale materialului, prejudiciul  $d_i$  creat de trecerea unei încărcări pe structură la temperatura  $\theta_i$  este egal cu:

$$d_i = \frac{1}{N_i} = \left[ \frac{\varepsilon(\theta_i)}{\varepsilon_0(\theta_i)} \right]^{1/b} \quad (2.33)$$

Dacă  $t_i$  reprezintă numărul de încărcări produse în cursul unui an asupra structurii rutiere la temperatura  $\theta_i$ , daunele corespunzătoare vor fi  $t_i d_i$ . Daunele cumulate în curs de un an vor fi egale cu:

$$\sum_i t_i d_i = \sum_i [\varepsilon(\theta_i)/\varepsilon_0(\theta_i)]^{1/b} t_i \quad (2.34)$$

Temperatura echivalentă  $\theta_{eq}$  rezultă din relația (2.31):

$$d_{eq} \sum_i t_i = \sum_i t_i d_i \quad (2.35)$$

$$\text{sau} \quad \left( \varepsilon(\theta_{eq})/\varepsilon_0(\theta_{eq}) \right)^{1/b} \sum_i t_i = \sum_i [\varepsilon(\theta_i)/\varepsilon_0(\theta_i)]^{1/b} t_i \quad (2.36)$$

calculul  $\theta_{eq}$  necesită prin urmare:

- cunoașterea raportului  $\varepsilon(\theta)/\varepsilon_0(\theta)$ ;
- histograma de temperaturi pentru straturile în cauză (supusă traficului uniform repartizat pe tot anul).

## 2.7. Aplicarea modelelor de calcul studiate privind funcționarea mecanică a structurilor rutiere

Pentru a evidenția diferențele semnificative care apar între criteriile de dimensionare adoptate la calculul structurilor rutiere suple și mixte, se va prezenta în continuare, pe baza unor modele bistrat și tristrat, modul de lucru a celor două tipuri de structuri rutiere sub acțiunea solicitărilor din trafic [58]

Pentru modelarea structurii rutiere se poate folosi un model tristrat (teren de fundare, strat din agregate naturale și îmbrăcămintă bituminoasă), iar dacă îmbrăcămintă este foarte subțire, se poate recurge chiar la un model bistrat (figura 2.1). Modulul  $E_2$  al stratului din agregate naturale este determinat în funcție de modulul terenului de fundare  $E_3$ , deoarece acest strat rutier nu poate suporta eforturi unitare de tracțiune și nu are un modul propriu.

$$E_2 = k \times E_3 \text{ [daN/cm}^2\text{]} \quad (2.37)$$

în care coeficientul  $k = 2 \dots 4$

Calculul de dimensionare constă în compararea deformației relative  $\varepsilon_z$  a terenului de fundare cu cea calculată în funcție de trafic  $\varepsilon_{zN}$ .

$$\varepsilon_{zN} = 21\,000 \times 10^{-6} \times N^{-0.24} \text{ [microdeformații]} \quad (2.38)$$

în care:

- $N$  este numărul de cicluri care solicită structura rutieră;
- $\varepsilon_{zN}$  - valoarea admisibilă a deformației relative pe terenul de fundare.

În figura 2.25 se prezintă variația deformației relative  $\varepsilon_z$  a terenului de fundare în funcție de valoarea coeficientului  $k$  și a grosimii stratului din agregate naturale  $h$ , pentru două tipuri de teren de fundare diferențiate prin valorile

modulului de deformare  $E_3$  și pentru o solicitare corespunzătoare unei roți duble de 65 kN (sarcina pe osie 115 kN).

În figura 2.26 se prezintă variația grosimii stratului din agregate naturale în funcție de numărul de cicluri. Se constată influența foarte importantă pe care o are terenul de fundare asupra grosimii stratului rutier din agregate naturale și se poate reține că în condițiile în care terenul de fundare este de o bună calitate ( $E_3 = 1000 \text{ daN/cm}^2$ ), o structură rutieră care are straturi din agregate naturale cu grosimi semnificative poate suporta un trafic foarte important.

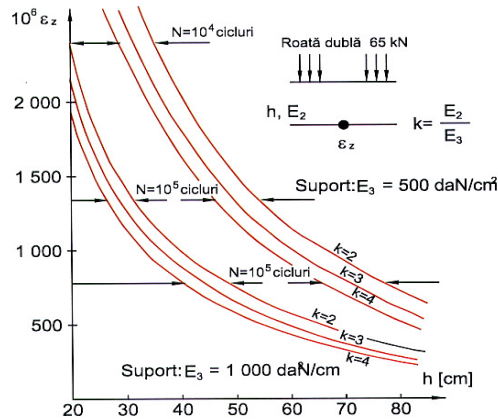


Figura 2.25. Variația lui  $\varepsilon_z$  funcție de coeficientul  $k$  și grosimea stratului din agregate naturale ( $h$ )

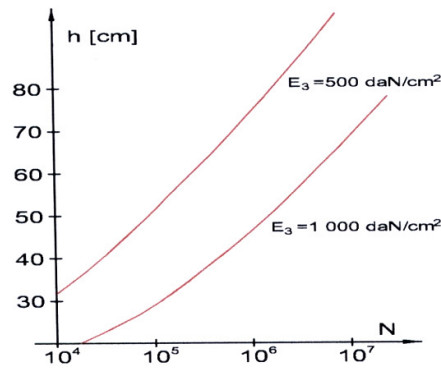


Figura 2.26. Variația grosimii stratului din agregate naturale ( $h$ ) funcție de numărul de cicluri  $N$

În cazul unei modelări tristrat, criteriul deformației relative  $\varepsilon_z$  la nivelul patului drumului nu mai este suficient pentru reprezentarea modului de lucru al structurii rutiere sub solicitările din trafic. Pentru a lua în considerare comportarea sub încărcări a îmbrăcăminții, este necesar să se verifice în plus și deformația relativă  $\varepsilon_T$  la baza stratului bituminos, valoare care este influențată de mărimea traficului. Astfel, pentru o îmbrăcămințe bituminoasă cu modulul  $E_1 = 50\,000 \text{ daN/cm}^2$ , deformația relativă limită pentru  $10^6$  cicluri de încărcare (osii de 130 kN) este  $\varepsilon_T = 160 \cdot 10^{-6}$ .

În aceste condiții, în figura 2.27 este prezentată variația lui  $\varepsilon_z$  în funcție de grosimea stratului din agregate naturale  $h$ , pentru două tipuri de straturi suport ( $E_3 = 500 \text{ daN/cm}^2$  și  $E_3 = 1\,000 \text{ daN/cm}^2$ ), un coeficient  $k = 3$  și pentru două grosimi ale îmbrăcăminții bituminoase ( $e = 0$  și  $e = 6 \text{ cm}$ ). Rezultă că pentru diferite valori  $\varepsilon_z$ , influența celor 6,0 cm ai îmbrăcăminții bituminoase se traduce prin micșorarea grosimii stratului din agregate naturale cu 12...16 cm.

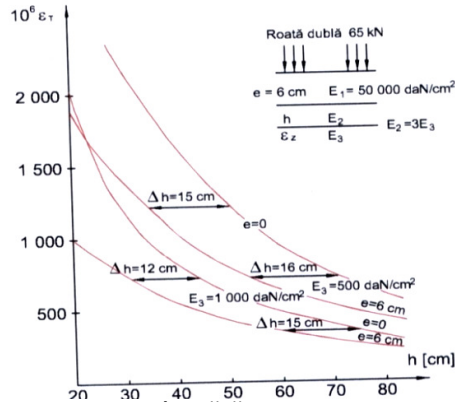


Figura 2.27. Influența grosimii îmbrăcăminții bituminoase asupra valorilor  $\varepsilon_z$

Pe de altă parte, pentru aceleași condiții, în figura 2.28 este prezentată variația lui  $\varepsilon_T$  în funcție de grosimea stratului din agregate naturale  $h$ . Rezultă că deformația relativă  $\varepsilon_T$  de la baza îmbrăcăminții bituminoase este practic independentă de grosimea stratului din agregate naturale.

În cazul *structurilor rutiere mixte*, se pot distinge două cazuri:

- structuri rutiere mixte cu îmbrăcăminte bituminoasă subțire;
- structuri rutiere mixte cu straturi bituminoase a căror grosime este mare:

$$\frac{H_{MA}}{H_{SR}} \geq \frac{1}{3} \quad (2.39)$$

în care:

- $H_{MA}$  este grosimea straturilor bituminoase;
- $H_{SR}$  - grosimea totală a structurii rutiere.

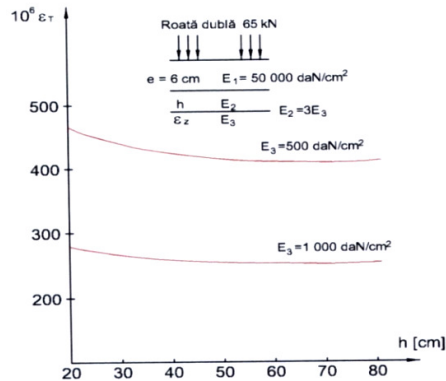


Figura 2.28. Influența grosimii stratului din agregate naturale asupra valorilor  $\varepsilon_T$

În primul caz, atunci când relația 2.39 nu este îndeplinită, structura rutieră poate avea în alcătuire un strat sau două (strat de fundație și strat de bază) din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici. Având în vedere rigiditatea importantă a acestor straturi, efortul unitar  $\varepsilon_z$  pe terenul de fundare este redus, motiv pentru care criteriul de dimensionare folosit constă în verificarea eforturilor unitare de întindere din încovoiere  $\sigma$  sau a deformațiilor relative de întindere  $\varepsilon$  de la baza straturilor din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici. În baza acestui principiu, procedeul de dimensionare folosit este cel prezentat în figura 2.29. Etapele care trebuie parcurse sunt, în principal, următoarele:

- determinarea cu ajutorul unui model de calcul a eforturilor unitare (deformațiilor relative) de întindere din încovoiere la baza stratului din agregate naturale stabilizate cu ciment. Pentru aceasta, modelarea structurii rutiere trebuie să fie realistă și trebuie considerată ipoteza a lunecării sau nu a straturilor rutiere unele față de altele;
- efortul unitar (deformația relativă) calculat trebuie comparat cu valoarea limită, care, la rândul ei, depinde de natura materialului și de nivelul de trafic prognozat (legea de oboseală);
- dimensionarea trebuie să țină seama de dispersiile de calitate și de grosime ale materialelor pe șantier.

Dacă există două straturi din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici (strat de fundație și strat de bază), există pericolul unei slabe legături între ele. O desprindere completă a celor două straturi implică verificarea eforturilor unitare (deformațiilor relative) de întindere la baza fiecărui strat.

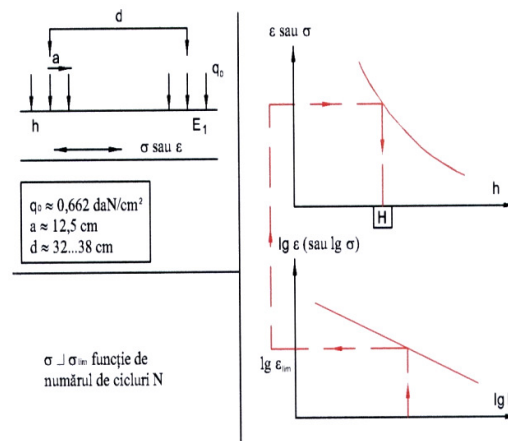


Figura 2.29. Procedeul de dimensionare a straturilor din agregate naturale stabilizate cu ciment

Pentru calcularea grosimii stratului bituminos se recomandă folosirea modelării tristrat. O modelare bistrat poate fi acceptată în următoarele situații:

- îmbrăcămintea bituminoasă este desprinsă de stratul stabilizat și se calculează starea de eforturi și de deformații în structură cu neglijarea îmbrăcăminții; utilizarea acestui model nu permite calcularea deformațiilor la baza stratului bituminos;

– îmbrăcămintea bituminoasă este lipită de suportul său, dar în cadrul modelului bistrat se mărește grosimea stratului stabilizat cu grosimea corespunzătoare stratului bituminos, prin echivalare:

$$h = (h_2 + h_1) \times \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad [cm] \quad (2.40)$$

în care:

- $h$  - grosimea stratului echivalent;
- $h_1$  - grosimea straturilor bituminoase;
- $h_2$  - grosimea straturilor din materiale stabilizate;
- $E_1$  - modulul la baza straturilor bituminoase;
- $E_2$  - modulul la baza straturilor din agregate naturale stabilizate cu ciment sau cu lianți puzzolanici.

În al doilea caz, când grosimea straturilor bituminoase este mare, adică inegalitatea 2.39. este satisfăcută, structura rutieră mixtă poate lucra sub solicitările din trafic, cu sau fără conlucrarea dintre straturi.

În figura 2.30 este reprezentată variația deformației relative  $\varepsilon_T$  în funcție de grosimea totală a straturilor bituminoase ( $H_{MA} = 20$  cm), precum și în funcție de grosimea totală a straturilor stabilizate ( $H_S = 20$  cm). Pentru aceleași două situații, în figura 2.31 este reprezentată variația efortului unitar de întindere  $\sigma$  de la baza straturilor stabilizate.

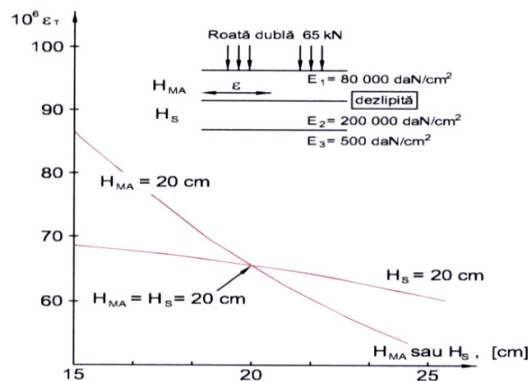
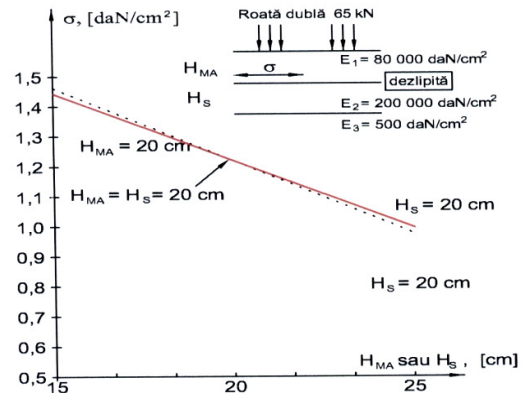


Figura 2.30. Variația deformației relative  $\varepsilon_T$  în funcție de  $H_{MA}$  și  $H_S$

Se constată că deformația relativă de la baza straturilor bituminoase  $\varepsilon_T$  este mai sensibilă la o variație de grosime a straturilor stabilizate cu ciment decât la o variație a grosimii totale a straturilor bituminoase. Pe de altă parte, efortul unitar de întindere  $\sigma$  la baza straturilor stabilizate cu ciment este mai sensibil la o variație a grosimii straturilor bituminoase decât la o variație a grosimii stratului de fundație.

Dimensionarea constă în verificarea valorilor deformației relative  $\varepsilon_T$  și efortului unitar  $\sigma$ , calculate cu valorile limită corespunzătoare, care țin seama și de intensitatea traficului prognozată și de coeficienții de siguranță. Coeficienții de siguranță care vor afecta valorile  $\varepsilon_T$  trebuie să fie mai mari decât cei folosiți pentru valorile  $\sigma$ , deoarece pentru această situație (straturi dezlipite), fisurile din stratul de fundație se vor transmite mai greu prin stratul de bază, iar în al doilea rând, orice pierdere de capacitate portantă a stratului de fundație se traduce prin creșterea deformațiilor relative  $\varepsilon_T$  de la baza straturilor bituminoase și la cedarea rapidă prin oboseală a acestora.

Figura 2.31. Variația deformației relative  $\sigma$  în funcție de  $H_{MA}$  și  $H_S$ 

Structura rutieră în alcătuirea căreia cele două straturi rutiere sunt lipite are o capacitate portantă mai ridicată decât în cazul precedent. Această situație conduce la eforturi unitare mai mici de întindere la baza straturilor stabilizate cu ciment și la o propagare a fisurilor din stratul de fundație prin straturile bituminoase mai accentuate decât în cazul precedent.

Este interesant de studiat care sunt solicitările suplimentare care apar în straturile bituminoase ca urmare a prezenței fisurilor în stratul de fundație, solicitări care provin din trafic și din variații de temperatură, precum și modul și durata de propagare a fisurilor prin straturile bituminoase superioare.

Alegerea unuia dintre cele două tipuri de structuri rutiere impune luarea în considerare a următoarelor aspecte determinante [38]:

- structurile rutiere suple și semirigide, fiind alcătuite din materiale cu caracteristici mecanice diferite, nu pot fi strict echivalente din punct de vedere al evoluției în timp a stării tehnice, chiar dacă în dimensionare a fost implicat un același trafic de calcul;

- structurile rutiere suple prezintă o stare tehnică inițială corespunzătoare, dar care tinde adesea să se înrăutățească repede sub solicitările traficului, lucru ce nu este compatibil cu necesitatea de a se asigura caracteristicile funcționale corespunzătoare unui trafic în condiții de siguranță și confort. Acest tip de structură rutieră corespunde drumurilor din clasele tehnice III ... IV, în cadrul unei strategii de investiție inițială redusă, urmată de o întreținere de tip curativ;

- structurile rutiere semirigide prezintă o evoluție lentă a stării tehnice, determinată de grosimea totală a straturilor bituminoase care joacă un rol deosebit în asigurarea etanșeității structurii rutiere. Caracteristicile lor mecanice și evoluția lentă a stării tehnice determină ca acest tip de structură rutieră să corespundă drumurilor din clasele tehnice I ... III, în cadrul unei strategii de investiție mare, urmată de o întreținere de tip preventiv;

- costul ridicat al transporturilor determină utilizarea materialelor de construcție rutieră situate la distanțe cât mai reduse. În acest sens, utilizarea unor materiale locale (deșeuri de carieră, zgură de haldă, cenușă de termocentrală) sau a tehnicilor de stabilizare a agregatelor naturale cu lianți puzzolanici (zgură granulată, cenușă de termocentrală sau tuf vulcanic măcinat) trebuie să capete alte dimensiuni.



## 2.8. Concluzii

Structurile rutiere flexibile și semirigide sunt cele mai răspândite, atât la noi în țară, cât și pe plan mondial, astfel încât este necesar un studiu complex al acestor structuri ce presupun combinații de straturi din diverse materiale, cu proprietăți diferite supuse la încărcări provenite din diverși factori (trafic, condiții climatice).

În ceea ce privește dimensionarea structurilor rutiere, aceasta cunoaște o evoluție continuă, de succes, având ca punct de pornire anii 1940 – 1960, fapt ce implică observarea modului de interacțiune a structurii rutiere cu pământul din stratul suport, cu schimbările climatice și cu diversele clase tehnice de trafic. Studiind literatura de specialitate referitoare la modul de funcționare mecanică a structurilor rutiere se remarcă faptul că, pentru estimarea comportării în exploatare a unei structuri rutiere, este necesară, pe lângă toate aceste aspecte, cunoașterea și înțelegerea proprietăților fundamentale ale mixturii asfaltice.

Datorită faptului că intensitatea traficului rutier crește din ce în ce mai mult, iar sarcinile pe osie și presiunile în pneuri ale vehiculelor sunt tot mai mari, problema dimensionării structurilor rutiere capătă o mai mare importanță. Datorită acestui fapt se pune problema realizării unor structuri rutiere care să preia în bune condiții sarcinile din trafic și în același timp să prezinte un preț de cost cât mai redus. Aceste inconveniente impun pe de o parte determinarea cât mai exactă a tuturor factorilor care influențează comportarea structurilor rutiere în exploatare, iar pe de altă parte adoptarea unei ipoteze de calcul pe baza funcționării mecanice a structurilor rutiere, care să permită modelarea cât mai exactă a comportării reale sub solicitările traficului și ale factorilor climaterici (temperatură, umiditate etc.). De asemenea, pentru materialele bituminoase ce intră în alcătuirea acestor structuri rutiere nerigide este foarte importantă cunoașterea exactă a legilor de comportare în exploatare (caracteristici elastice, legi de oboseală, fluaj etc.). Acest deziderat poate fi atins doar prin cercetarea sistematică în laboratoare de specialitate dotate corespunzător.

### 2.8.1. Observații privind influența traficului și a schimbărilor climatice asupra comportării în exploatare a structurilor rutiere nerigide

Diversitatea mare a tipurilor de autovehicule cât și a variațiilor de temperatură rezultate în ultimii 20 de ani, creează o reală dificultate în luarea în considerare la dimensionarea structurilor rutiere suplă și mixte a solicitărilor.

Conform modelelor mecanice de funcționare a structurilor rutiere, cât și a metodelor de calcul de dimensionare elaborate până în prezent, autovehiculele cu diverse sarcini pe osie sunt transformate într-un număr echivalent de autovehicule etalon, cu o anumită sarcină pe osie, pe baza unor factori de echivalare stabiliți după anumite criterii teoretice sau experimentale. Stabilirea acestor coeficienți de echivalare presupune gruparea pe tipuri a autovehiculelor (după sarcina pe osie) și determinarea pentru fiecare grupă de autovehicule a coeficientului de echivalare, pe baza caracteristicilor unui vehicul reprezentativ. Aceasta presupune o abatere de la solicitarea reală, având în vedere caracteristicile diferite ale autovehiculelor dintr-o anumită grupă, precum și ponderea fiecărui tip în cadrul grupării respective.

În ceea ce privește schimbările climatice în calculul de dimensionare a structurilor rutiere nu se ține cont de acestea decât la verificarea de îngheț-dezghet, o verificare foarte importantă în vederea stabilirii modului de alcătuire a structurii rutiere. Datorită acestui fapt, atunci când se dimensionează o structură rutieră, mai ales pentru

îmbrăcămintele asfaltice ar fi bine să se țină cont și de valorile pozitive ale acestor variații de temperatură. Deoarece aceste variații de temperatură au un efect negativ asupra comportării în exploatare a structurilor rutiere, ar trebui luate măsuri de reducere a acestora, prin tratarea sau realizarea unor îmbrăcăminți asfaltice care să nu absoarbă în totalitate variațiile de temperatură ale mediului la care sunt supuse.

Un alt aspect important este luarea în considerare a proprietăților reologice ale materialelor utilizate. În acest sens, se ia în considerare comportarea la solicitări repetate de oboseală a straturilor bituminoase, dar este foarte important să se țină cont, tot în cadrul acestei solicitări, și de restul straturilor rutiere, inclusiv de pământul din patul drumului. Datorită faptului că solicitările reale asupra structurii rutiere suportă în general modificări din schimbări climatice și tendințe de majorare a traficului de perspectivă, oboseala se produce mai repede la încărcare constantă decât la deformare constantă. Modul real de solicitare al complexului rutier ar impune o analiză a comportării la oboseală a diverselor tipuri de materiale care intră în alcătuirea acestora atât pentru solicitări variabile, cât și pentru deformări variabile.

În cazul structurilor rutiere semirigide care au în componență existența unor straturi de fundație tratate cu lianți hidraulici, îmbrăcămintea asfaltică ar trebui analizată din prisma a două considerente: vara, când se pune problema stabilității asfaltului și iarna, când în urma contracțiilor din fundație există posibilitatea transmiterii fisurilor în îmbrăcămintea bituminoasă. Aceste două ipoteze sunt direct legate de proprietățile reologice ale liantului bituminos și de variabilitatea comportării sale în raport cu variațiile de temperatură.

Proprietățile materialelor bituminoase sunt foarte strâns legate de temperatură, astfel încât este interesantă analiza variației rezistenței la oboseală a acestor materiale în funcție de temperatură. După cum s-a prezentat în acest capitol, studiile efectuate în acest sens au arătat că deformarea care determină ruperea materialului după un anumit număr de cicluri este într-adevăr dependentă de temperatură. Această funcție ce caracterizează deformarea este una liniară și crescătoare, cel puțin pentru valori pozitive ale temperaturii.

Referitor la rezistența la oboseală a îmbrăcămintilor rutiere asfaltice, luându-se în considerare separat numărul de cicluri de solicitare raportat la numărul total de cicluri, când se propagă fisura la suprafața carosabilului, se pot face următoarele observații: viteza de propagare a fisurii este mai lentă la solicitarea din trafic față de cea din temperatură în faza inițială, iar situația se inversează în faza finală.

Influența factorilor climaterici asupra comportării complexelor rutiere se manifestă inclusiv la nivelul terenului de fundare. Datorită acestui considerent, ideală ar fi conceperea și realizarea unor structuri rutiere flexibile și semirigide la care straturile superioare din beton asfaltic să prezinte un modul de elasticitate ridicat pentru temperaturile specifice sezonelor calde, astfel crescând stabilitatea îmbrăcăminții asfaltice.

### **3. STUDIUL PROPRIETĂȚILOR TERMO-FIZICE. METODE ȘI MIJLOACE DE DETERMINARE ALE ACESTORA. STUDIU EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Studiu bibliografic privind proprietățile termo-fizice**

Caracteristicile termo-fizice ale unui material conductor implică de obicei determinarea mai multor parametri. Pentru a defini proprietățile termice ale unui material se determină conductivitatea termică, căldura specifică, difuzivitatea, efuzivitatea și emisivitatea. Din nefericire nu există metode suficient de multe care să determine aceste caracteristici ale materialelor. Identificarea conductivității termice conduce la încercări de lungă durată. Marea majoritate a încercărilor implică condiții limită, stricte și perfect controlate.

Comportamentul mecanic al betonului asfaltic depinde foarte mult de temperatură, el se extinde odată cu creșterea temperaturii și se contractă odată cu scăderea temperaturii, rezultatele fiind interpretate sub denumirea de cracare termică. La temperaturi ridicate betonul asfaltic este relativ moale și sensibil la fâgășuire (deformații permanente), în conformitate cu încărcările repetate din trafic, în timp ce la temperaturi joase este relativ fragil și sensibil la cracare termică. Din aceste motive ample de cercetare au fost efectuate măsurători care să prezică temperatura în asfalt în situ și s-au dezvoltat diverse modele și aplicații referitoare la a anticipa variația temperaturii cu timpul a betonului asfaltic [45].

Proprietățile termice ale materialelor au un efect semnificativ asupra distribuției și variației temperaturii într-un corp. Aceste proprietăți sunt necesare pentru modelarea relației timp - temperatură la orice solide, cum ar fi și betonul asfaltic. Proprietățile termice ale betonului asfaltic, ca de exemplu conductivitatea termică, difuzibilitatea și căldura specifică au fost studiate de către mulți cercetători, iar ASTM C177-85 descrie un test standard ce măsoară proprietățile termice care utilizează ca metodă dimensională fluxul termic. Cu toate acestea, este practic dificil să se îndeplinească cerințele pentru o grosime care nu depășește o treime din dimensiunea liniară maximă a regiunii contorizate, cum este și betonul asfaltic.

Pe baza unei mulțimi de teste pe betoane asfaltice la Ohio State, capacitatea termică de 920 J/kg·°C a fost recomandată drept valoarea medie pentru betonul asfaltic [79]. Highter și Wall [46] au efectuat teste de laborator folosind metoda standard pe patru mixturi asfaltice, cu diferite conținuturi de bitum și agregate. Pe baza rezultatelor de testare și valorilor raportate de către alți cercetători [47], [66], [74], valorile pentru betonul asfaltic privind proprietățile termice sunt:

- conductivitatea termică 0,74 – 2,88 W/m·°C;
- căldura specifică 879 – 1364 J/kg·°C .

Luca și Marwira [57] au efectuat un test de laborator pe o probă folosind un nou fascicul de mici dimensiuni care măsoară 60 mm (lungime) x 20 mm (lățime) x 10 mm (înălțime), considerând ca și conducție căldura tranzitorie pentru determinarea proprietăților de transfer termic pe amestecuri Superpave dense, la care proprietățile termice sunt:

- conductivitatea termică 1,40 – 1,80 W/m·°C;

- căldura specifică 1116 – 1364 J/kg·°C.

Pentru capturarea proprietăților mecanice caracteristice betonului asfaltic există diferite teste de laborator. De obicei, aceste teste sunt efectuate la un interval de temperaturi, iar temperatura pentru fiecare test trebuie să fie controlată datorită dependenței ridicate a proprietăților la temperatură a betonului asfaltic. În general se folosește o probă de bază (manechin) care întotdeauna este lângă modelul de testare real și la care temperatura în centru este folosită pentru a decide dacă exemplarul supus testării este la temperatura de echilibru țintă înainte de începerea încercării. Toleranța care este permisă este de obicei  $0 \pm 0,10$  °C. Ajungerea la temperatura de testare stabilă, uneori poate fi consumatoare de timp și pot apărea erori și datorită diferențelor dintre modelul de bază (manechin) și proba supusă testării.

### 3.1.1. Mărimile termo-fizice echivalente

Studiul de transfer termic prezintă dificultăți speciale prin prisma a două puncte. Primul punct este natura, mediile sunt constituite din mai multe faze, iar mărimile termice accesibile nu pot fi un reprezentant al fazei solide din betonul asfaltic, care este predominantă, dar integră la contribuțiile altor mărimi constitutive. Al doilea punct se referă în mod special la fenomenul de transport fluid în betonul asfaltic. În acest fel mediile poroase care conțin apă pot fi reprezentate sub diferite forme dar datorită migrației de apă schimbarea statutului se face sub efectul de gradient termic, acesta fiind susceptibil de a afecta în mod semnificativ echilibrul energetic și parametrii globali care pot fi deduși. Acești parametri depind de natura diferitelor faze din betonul asfaltic și de evoluția lor în timp [42], [53].

#### 3.1.1.1. Căldura specifică echivalentă

Expresia de căldură specifică a unui mediu poros poate fi determinată în funcție de fazele pe care le constituie:

$$C_0 = C_{\text{sec}} + \sum_i (d_i \cdot w_i \cdot C_i) \quad (3.1)$$

unde  $d_i$  este masa volumică a materialului  $i$ ,  $w_i$  este conținutul constitutiv  $i$  și  $C_i$  este căldura specifică corespunzătoare.

Cele două fluide există în general în prezența aerului și a apei. Prin compararea capacității cu căldura ( $1,21 \cdot 10^3$  J/K·m<sup>3</sup> pentru aer la 20 °C și 1 bar și  $4,18 \cdot 10^6$  J/K·m<sup>3</sup> pentru apă la 20 °C), putem neglija faza gazoasă cu alți termeni. Căldura specifică din beton este legată de faza solidă și conținutul său de apă ca în relația:

$$C_0 = C_{\text{sec}} + d_i \cdot w_i \cdot C_{\text{apa}} \quad (3.2)$$

#### 3.1.1.2. Conductivitatea termică echivalentă

Problema determinării conductivității echivalente este complexă. Aceasta poate fi abordată în două moduri, una este legată de proprietățile fizice ale mediului și anume, caracteristicile elementelor sale de bază constitutive și proporțiile lor relative, iar cealaltă ia în considerare modul de cuplare cu transferul de masă datorită migrării de apă care este îndepărtată prin evaporarea părții fierbinți pentru a fi recuperată prin condensarea părții reci.

Primul aspect al problemei poate fi tratat prin omogenitatea mediilor poroase [29]. Multe modele au fost dezvoltate în acest scop.

Aceste modele pot fi clasificate astfel:

– modele care conduc la o rezolvare a legii lui Fourier, ca model de De Vries. Acest model corespunde rezolvării ecuației termice aplicată unui mediu descris ca elipsoid de solide dispersat într-o fază fluidă.

Conductivitatea termică echivalentă se poate exprima ca:

$$\lambda_0 = \sum_i d_i \cdot w_i \cdot k_i \quad (3.3)$$

unde  $k_i$ , este un factor de corecție cu privire la constituență.

Acest model poate să înțeleagă corect evoluția conductivității termice a mediilor poroase în zone relativ mari, cu conținut mare de apă. Dezavantajul principal al acestei metode este de a solicita o simplificare puternică a geometriei de materiale pentru a putea rezolva ecuația lui Fourier. În mod similar subestimează conductivitatea termică pentru conținutul de apă scăzut, deoarece ipotezele nu iau în considerare datele de contact solid/solid [21].

– modele prin analogie electrică care rezolvă ecuația termică prin legea lui Ohm. Această metodă constă în a considera mediul studiat ca o suprapunere de straturi avion, cu alternanță de faze solide și faze lichide. În acest caz sunt posibile două configurații de bază, cea ce conduce fie la o modelare de transfer de căldură în „serie”, fie la o modelare de căldură în „paralel”.

$$\lambda_0^s = \frac{\lambda_f \cdot \lambda_s}{n\lambda_s + (1-n)\lambda_f} \quad \text{model în serie} \quad (3.4)$$

$$\lambda_0^p = \lambda_s(1-n) + n\lambda_f \quad \text{model în paralel} \quad (3.5)$$

unde  $n$  reprezintă porozitatea,  $\lambda_s$  și  $\lambda_f$  reprezintă conductivitatea termică, respectiv faza solidă și faza lichidă.

Cu toate astea, aceste două modele simple oferă doar un minim și maxim absolut conductivității termice echivalente.

– modele empirice sau semi-empirice care au ca scop reprezentarea datelor obținute din date experimentale.

Unul dintre cele mai cunoscute modele la care se conectează conductivitatea termică  $\lambda$  este fie densitatea în stare uscată  $d$ , fie conținutul ponderal de apă  $w$ , ca în relațiile:

$$\lambda_{sec} = A \cdot 10^{B \cdot d} \quad (3.6)$$

$$\lambda_{umiditate} = C \cdot \ln(w) + D \quad (3.7)$$

unde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  și  $D$  sunt constante ce depind de material.

Aceste modele empirice duc la legile de comportament al materialelor care nu sunt de loc generalizabile cu toate stările. Este posibil să se obțină o relație care să lege conductivitatea termică de conținutul de apă prin apropierea bazată pe rezultate experimentale măsurând parametrii de bază ai valorilor cunoscute prin alte metode [22].

Dacă vom considera un mediu umed poros, inițial în echilibru termic și apă, care are impus un gradient de temperatură, apa din acest mediu va tinde să își modifice distribuția inițială. În cazul în care mediul nu este saturat, conținutul de apă crește pe partea rece. Acest fenomen este denumit „termomigrare”, el corespunzând deplasării apei în mediile poroase supuse gradientilor de temperatură. Parametrii termici sunt dependenți de conținutul de apă, rezultând clar că aceste mișcări de umiditate pot influența puternic măsurătorile. Masumoto [64], a arătat că

în cazul în care temperatura suprafeței probei și cea a mediului diferă, atmosfera internă nu depășește 6 °C și efectul mișcării de umiditate pentru conductivitatea termică măsurată este neglijabil.

Dificultățile care apar la definirea parametrilor ce reprezintă transferul termic de căldură în medii poroase pot fi combătute folosind o abordare globală care să conducă la un procedeu de omogenizare și să integreze efectele diferitelor fenomene: schimbare de fază, transfer de masă etc.

Rezultatele unor astfel de proceduri se pot face printr-un transfer de căldură global într-o formă simplă, identică cu cea utilizată pentru mediile omogene, dar această aparență simplă poate fi înșelătoare și poate conduce la erori grave. Este important să se conștientizeze faptul că dimensiunile aparente astfel definite pot depinde de mai mulți parametri cum ar fi: conținutul de apă, temperatura medie, gradientul termic etc. Acești parametri sunt, în cazul general al sistemelor evolutive, funcții de timp. Aceste preocupări sunt importante mai ales când vine vorba de procedura de selectare a unei tehnici de măsurare.

### 3.2. Măsurarea parametrilor termo-fizici

Identificarea parametrilor termo-fizici ai amestecurilor asfaltice într-un mediu echivalent cu perturbări minime de echilibru a temperaturii este obiectivul esențial, fiind vorba de mai multe constrângeri, cum ar fi: temperatura medie a încercării trebuie să rămână aproape de temperatura camerei și gradientul termic trebuie să fie limitat.

Metodele de măsurare de echilibru clasice sunt folosite pentru a caracteriza materialele. Principiul de măsurare cel mai frecvent utilizat este de a impune un sistem de flux de căldură cunoscut constant și măsurarea schimbărilor de temperatură rezultate în regim de stabilizare. Cunoașterea acestor două mărimi ajută la calculul rezistenței termice cu ajutorul căreia se poate deduce conductivitatea termică. Testul este cunoscut ca o plită încinsă păzită, ceea ce conduce la determinarea conductivității termice a materialelor printr-o procedură standard [28].

Metodele în regim tranzitoriu pentru problemele de față au un avantaj fundamental. Ele fac posibilă limitarea timpului de măsurare și reduc astfel perturbările impuse materialului. Testele clasice constau în impunerea unui sistem de solicitări impulsionale deterministe și în identificarea parametrilor doriți să suporte funcția de răspuns măsurată.

Cea mai frecventă metodă de a exploata răspunsul temperaturii atunci când impunem un flux de solicitare este metoda "Flash" care este probabil cea mai cunoscută. Pe baza acestei metode au fost dezvoltate studii și aplicații multiple [30]. Această metodă se bazează pe calcularea de conductivitate termică și efuzivitate termică, de la măsurarea difuzibilității termice știind căldura specifică și densitatea.

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c \quad (3.8)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (3.9)$$

Încălzirea este în general produsă de o radiație care este absorbită de către materialul studiat. Detectarea temperaturii materialului oferă acces la difuzibilitatea termică a mediului. Eșantionul poate fi plasat într-un cuptor care permite măsurători

la temperaturi ridicate, această metodă fiind utilizată pe scară largă. De toate acestea este nevoie în cazul unei analize „spate”, iar o putere substanțială de energie în față permite o variație semnificativă a temperaturii în planul de măsurare. Cantitatea de căldură generată și timpul necesar pentru utilizare ar trebui să conducă la folosirea acestei metode cu precauție și rezervări mai ales pentru mediile poroase. Există multe metode pe bază de solicitări impulsionale de testare cum ar fi: sonde filiforme, circulare sau plăt. Toate aceste metode sunt deosebit de potrivite pentru măsurători pe probe de laborator, dar problema nerezolvată rămâne la rezistența de contact, căldura specifică proprie constituind o nouă constrângere de integrare.

### 3.2.1. Metoda de măsurare cu două fire. Principiul metodei

Această metodă se bazează pe studiul evoluției temperaturilor de mediu atunci când e supus la un nivel de flux termic.

Modul de operare constă în a elimina un curent electric într-un conductor metallic (panglică sau direct din sârmă) în materialul supus studiului, într-un interval de timp. Elementul de încălzire produs prin efect Joule în material înconjoară un câmp de temperatură. Analiza răspunsului temperaturii rezultate de la același conductor sau de la un punct vecin, poate fi dedusă în timp ca un caz particular de proprietate termo-fizică a materialului înconjurător. Ansamblul de bază este prezentat în figura 3.1.

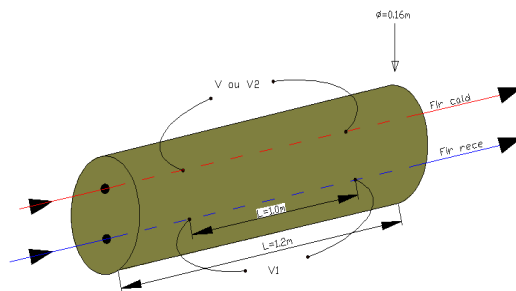


Figura 3.1. Schema generală

#### 3.2.1.1. Determinarea conductivității termice

Analiza evoluției temperaturii unui fir de sârmă drept în timpul său de încălzire oferă acces la conductivitatea materialului înconjurător. Analiza evoluției de temperatură pentru al doilea fir paralel cu primul și neîncălzit, ajută la determinarea difuzivității termice a materialului din jur și la determinarea densității de căldură. Precizia de difuzivitate obținută, din păcate, este limitată. Sfârșitul infinit al firului disipează la momentul  $t = 0$  cu o putere constantă  $P/L$  (în  $W/m$ ) în mijloc. Rezolvarea ecuației de căldură prevăzută în coordonate cilindrice, exprimă temperatura  $\theta(r, t)$  la o distanță  $r$  de fir la momentul  $t$ .

Pentru firul de sârmă neîncălzit, distanța aleasă a fost de 15 mm. Durata de încălzire  $t_0$  este tratată de suprapunerea densităților de flux  $+(P/L)$  de la  $t = 0$  și

–(P/L) de la  $t = t_c$ . Astfel poate fi realizată măsurarea căldurii de tensiune, în funcție de timpul  $t$  și  $t_c$  avem:

$$\theta = \frac{P}{4\pi \lambda L} \cdot \ln \frac{t}{t - t_c} \quad (3.10)$$

și:

$$\lambda = \frac{P}{4\pi L} \cdot \frac{\Delta \left( \ln \frac{t}{t - t_c} \right)}{\Delta \theta} \quad (3.11)$$

cu:

- $P = VI$ , presupus aproximativ constantă,
- $V$ , diferența de potențial între bornele firelor,
- $I$ , intensitatea curentului de căldură prin fir.

### 3.2.1.2. Determinarea difuzivității termice și a volumului de căldură

Evoluția temperaturii firului de sârmă secundar paralel cu primul, neîncălzit, permite determinarea difuzivității termice, precum și densitatea de căldură,

unde:

$$\rho \cdot c = \frac{P}{en \cdot Lr^2} \left( \frac{\Delta t}{\Delta \theta} \right) \quad (3.12)$$

Având în vedere un interval de căldură  $t_c$ ,  $\theta(t)$  trece printr-un maxim pentru abscisa  $t_m$ , de unde se poate determina difuzivitatea  $a$ :

$$a = \frac{r^2 t_c}{4t_m(t_m - t_c) \cdot \ln \frac{t_m}{t_m - t_c}} \quad (3.13)$$

Cele două cantități determinate cu relațiile 3.11, 3.12 și 3.13 pot fi legate de relația:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3.14)$$

### 3.3. Elementele fundamentale ale radiației termice. Natura fenomenului

Toate corpurile cu o temperatură superioară temperaturii de  $T = 0$  K emit energie sub formă de radiații. Radiația are un dublu caracter ondulatoriu și corpuscular. Energia și impulsul sunt conținute în *fotoni*, iar probabilitatea de a se găsi într-un punct oarecare din spațiu este caracterizat de *unde*. Rezultă că radiația este caracterizată de lungimea sa de undă  $\lambda^*$  sau frecvența  $\nu$ , legătura dintre cele două mărimi fiind:



$$v = c / \lambda^* \quad (3.15)$$

unde  $c$  este viteza luminii ( $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s).

Emisiile de radiații termice ale unei suprafețe solide sau lichide depind de temperatură, lungimea de undă, dar și de un factor cuprins între 0 și 1 numit *emisivitate*.

Schimbul de căldură prin radiație și măsurătorile de temperatură prin pirometrie necesită cunoștințe ale acestui factor care depinde de însăși natura materialului, unghiul emițător de polarizare a radiației emise și în cele din urmă de natura suprafeței.

Radiația termică este rezultatul transformării energiei interne a corpurilor în energie cu lungimi de undă cuprinse între  $\lambda^* = 0,1 - 100 \mu\text{m}$ , incluzând o porțiune din radiațiile ultraviolete și spectrele radiațiilor vizibile și infraroșii în întregime.

Mărimile fizice care descriu radiația sunt caracterizate de două criterii independente: compoziția spectrală și distribuția spațială (direcțională).

În funcție de compoziția spectrală, mărimile fizice se pot referi la tot spectrul de radiații și se numesc totale, sau la o anumită lungime de undă, acestea numindu-se monocromatice.

Mărimile se numesc emisferice dacă se referă la toate direcțiile în care o suprafață emite sau primește radiație, și direcționale dacă caracterizează o direcție dată de propagare a radiației.

Fluxul termic radiant emis total,  $Q_e$  [W], reprezintă energia emisă de un corp în unitatea de timp, în tot spațiul.

Fluxul radiant  $Q$  care cade pe o suprafață poate fi absorbit de aceasta (QA), reflectat (QR) sau trece prin suprafață (QD), figura 3.2, [9].

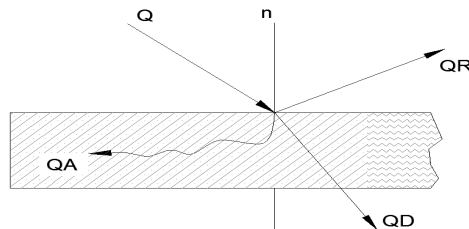


Figura 3.2. Distribuția energiei radiante

$$Q = QA + QR + QD \quad [W] \quad (3.16)$$

$$A + R + D = 1 \quad (3.17)$$

unde:  $A$  - coeficientul de absorbție ;

$R$  - coeficientul de reflexie;

$D$  - coeficientul de difuzie.

Coeficienții  $A$ ,  $R$ ,  $D$  pot avea valori cuprinse între 0 și 1, în funcție de natura corpului, starea suprafeței, spectrul radiației incidente și temperatură.

**Corpul negru** absoarbe toată radiația incidentă , astfel că:  $A = 1$ ,  $R = D = 0$ .

**Corpul alb** reflectă toată radiația incidentă:  $R = 1$ ,  $A = D = 0$ .

**Corpul diaterm** este transparent pentru radiația incidentă:  $D = 1$ ,  $A = R = 0$ .

Suprafața unui corp este lucie dacă reflectă radiația incidentă într-o singură direcție, unghiul de incidență fiind egal cu cel de reflexivitate și este mată dacă reflectă radiația incidentă în toate direcțiile.

Dacă considerăm o suprafață elementară  $dS$ , care emite radiația în direcția unei suprafețe  $dS_n$ , caracterizată în coordonate sferice de unghiul zenital  $\theta$  și azimutal  $\varphi$ , (figura 3.3), se definește intensitatea de radiație monocromatică  $I_{e,\lambda}(\lambda, \theta, \varphi)$ , cu relația:

$$I_{e,\lambda}(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{dQ_e}{dS_1 \cos\theta \, d\Omega \, d\lambda} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})] \quad (3.18)$$

unde:  $\Omega$  este unghiul solid sub care se vede suprafața  $dS_n$  din centrul suprafeței  $dS_1$ .

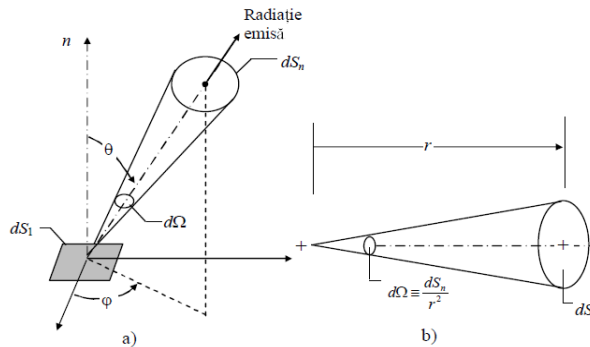


Figura 3.3. Definierea intensității de radiație (a) și a unghiului solid (b)

Unghiul solid  $d\Omega$  este definit de relația:

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} \quad [\text{sr}] \quad (3.19)$$

Intensitatea totală a radiației emise,  $I_e(\theta, \varphi)$  reprezintă fluxul radiant emis pe toate lungimile de undă în direcția  $(\theta, \varphi)$  de unitatea de suprafață a unui corp, în unghiul solid  $d\Omega$ , care conține direcția  $(\theta, \varphi)$ :

$$I_e(\theta, \varphi) = \frac{dQ_e}{dS_1 \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})] \quad (3.20)$$

Iradiația reprezintă radiația incidentă pe o suprafață care provine din emisia sau reflexia altor suprafețe, figura 3.4.

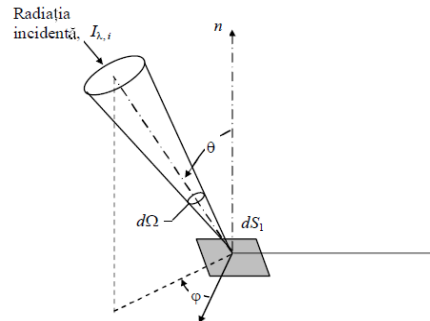


Figura 3.4. Natura direcțională a iradiației

Iradiația totală va fi :

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.21)$$

Radiozitatea caracterizează toată energia radiată de o suprafață care include emisia proprie și emisia datorată iradiației reflectate, figura 3.5.

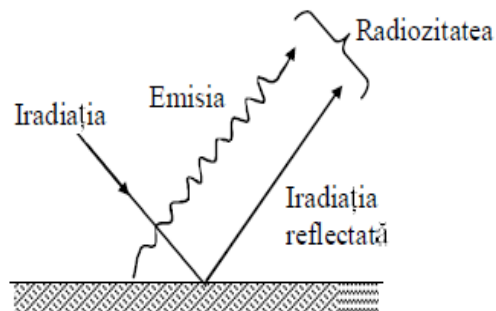


Figura 3.5. Radiozitatea unei suprafețe

Radiozitatea totală va fi:

$$J = \int_0^{\infty} J_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.22)$$

### 3.4. Funcția de transfer termic: Transmisia de căldură prin conducție

#### 3.4.1. Relațiile de bază. Legea lui Fourier

Relațiile fundamentale ce descriu fenomenul de transfer termic sunt: legea lui Fourier și ecuația de căldură.

Pentru un mediu omogen, izotrop și staționar, există o relație liniară între densitatea fluxului de căldură și gradientul de temperatură. În orice punct al unui mediu izotrop densitatea fluxului de căldură instantanee este proporțională cu conductivitatea termică  $\lambda$  în  $[W/m \cdot K]$  a mediului și cu gradientul de temperatură.

$$\bar{\varphi}(x, y, z, t) = -\lambda \cdot \text{grad } T(x, y, z, t) \quad (3.23)$$

Pentru un mediu izotrop, conductivitatea termică  $\lambda$  este o mărime scalară pozitivă caracteristică mediului. Când diferențele de temperatură nu sunt prea mari, putem considera cu o exactitate suficientă, că conductivitatea termică  $\lambda$  este ca o constantă pentru un mediu dat.

### 3.4.1.1. Ecuația de căldură

Ecuația de căldură descrie difuzia într-un mediu:

$$\frac{\delta \cdot T(x, y, z, t)}{\delta \cdot t} = a \cdot \Delta T(x, y, z, t) \quad (3.24)$$

Mărimile termo-fizice a difuzivității termice se exprimă în  $[m^2/s^2]$ . Cunoașterea ei este importantă pentru studiul transferului de căldură prin conducție de echilibru. Ținând cont de condițiile inițiale, și anume de caracteristicile câmpului de temperatură în momentul  $t=0$ , este permisă rezolvarea acestei ecuații și determinarea stării termice în orice punct definit de temperatură și densitatea fluxurilor.

Caracterizarea termică a unui material conductiv implică de obicei determinarea parametrilor acestuia. Aceștia pot fi: efuzivitatea, difuzivitatea, conductivitatea și căldura specifică. Foarte general, parametrii cercetați pot fi determinați prin diferite încercări. Identificarea conductivității termice conduce de asemenea la încercări de o durată mare.

### 3.4.1.2. Caz unidirecțional

În cazurile limită de transfer unidirecțional, liniile de flux pot fi ilustrate prin linii paralele cu direcția de propagare și suprafețe izoterme de planuri perpendiculare pe această direcție.

În acest caz legea lui Fourier se exprimă sub următoarea formă:

$$\varphi(x, t) = -\lambda \cdot \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \quad (3.25)$$

și ecuația de căldură se rezumă la:

$$\frac{\delta T(x, t)}{\delta t} = a \cdot \frac{\delta^2 T(x, t)}{\delta x^2} \quad (3.26)$$

Considerăm un „strat” pasiv gros  $l$ , (figura 3.6), în regim tranzitoriu fără sursă internă și echilibru termic la momentul inițial. Dacă izolăm două planuri izoterme, notate cu  $e$  și  $s$  pentru intrare respectiv ieșire, fiecare plan individual este caracterizat printr-un vector de statut termic ce definește temperatura și fluxul ce îl traversează.

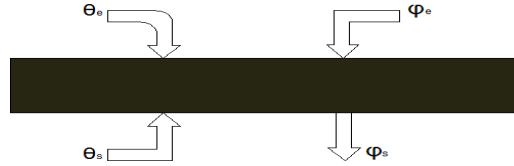


Fig 3.6. Sistem conductiv unidirecțional omogen

În acest caz, vectorii de statut în spațiul Laplace sunt legați printr-o relație matriceală simplă:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(0,p) \\ \varphi_e(0,p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s(l,p) \\ \varphi_s(l,p) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

unde  $\theta_e(0,p)$  și  $\varphi_e(0,p)$  reprezintă transformata lui Laplace de temperatură și de flux la fața de intrare (superioară), iar  $\theta_s(l,p)$  și  $\varphi_s(l,p)$  reprezintă transformata lui Laplace de temperatură și de flux la fața de ieșire (inferioară) a stratului.

Matricea  $[M] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  se numește matrice de transfer a sistemului.

În acest caz în care mediul cuprins între planul de intrare și planul de ieșire este constituit dintr-un singur strat de material, sistemul este omogen și matricea poate lua valoare particulară:

$$[M] = \begin{bmatrix} \cosh\left(l\sqrt{\frac{p}{a}}\right) & \frac{1}{b\sqrt{p}} \sinh\left[l\sqrt{\frac{p}{a}}\right] \\ b\sqrt{p} \sinh\left[l\sqrt{\frac{p}{a}}\right] & \cosh\left(l\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

În această relație,  $b$  reprezintă efuzivitatea termică a materialului, ea fiind egală cu  $b = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ , iar  $l$  reprezintă distanța dintre cele două planuri, planul de intrare  $e$ , respectiv planul de ieșire  $s$ .

Dacă ne-am limita la regimul sinusoidal menținut, putem înlocui variabila Laplace  $p$  de puls complex  $j\omega = 2\pi f$  și atunci ecuațiile (3.27) și (3.28) se scriu sub următoarea formă:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(\omega) \\ \varphi_e(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) & \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \sinh\left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] \\ b\sqrt{j\omega} \cdot \sinh\left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] & \cosh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s(\omega) \\ \varphi_s(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

### 3.4.1.3. Generalizarea la o structură multistrat

Presupunem o structură care rezultă prin stabilirea unui contact perfect a  $n$  medii omogene, figura 3.7.

Pentru fiecare dintre cele  $n$  straturi omogene, se poate scrie o relație similară cu (3.28). Această operație dă  $n$  relații matriceale de legătură între vectorii care stau la interfața mediilor. De exemplu pentru mediul 1 și  $n$ :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \varphi_1 \end{bmatrix} = [Mp_1] \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

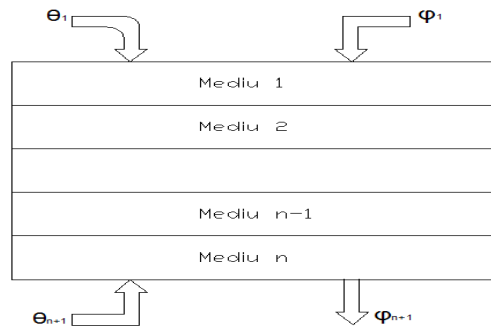


Figura 3.7. Sistem conductiv unidirecțional a  $n$  straturi constituite

$$\begin{bmatrix} \theta_n \\ \varphi_n \end{bmatrix} = [Mp_n] \begin{bmatrix} \theta_{n+1} \\ \varphi_{n+1} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$[Mp_i]$  reprezintă matricea elementară legată de fiecare mediu.

Un produs în cascadă de matrici elementare de transfer se poate lega direct de vectorii 1 și  $n+1$ .

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \varphi_1 \end{bmatrix} = [ [Mp_1] [Mp_2] \dots [Mp_n] ] \begin{bmatrix} \theta_{n+1} \\ \varphi_{n+1} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Matricea  $\begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} = [ [Mp_1] [Mp_2] \dots [Mp_n] ]$ , este matricea de transfer a sistemului global.

Această formulă poate fi generalizată la sisteme de conducție unidirecționale multistrat.

### 3.4.2. Impedanța termică. Definiția impedanței termice

Un sistem conductiv unidirecțional poate fi caracterizat printr-o matrice de transfer. Aceasta exprimă dependența între vectorul de statut definit în planul de acces al stratului și strat. Din componentele unui vector de statut s-a definit impedanța termică locală ca fiind raportul dintre temperatură și densitatea de flux.

Dacă considerăm un plan perpendicular pe direcția de propagare, mărimile densității fluxurilor și a temperaturii, care definesc vectorul de statut termic în acest plan, sunt legate în spațiul de frecvență printr-o relație care implică impedanța termică. Această relație a fost definită în următorul mod:

$$\theta_s(\omega) = Z_s(\omega) \cdot \varphi_s(\omega) \quad (3.33)$$

unde:  $\theta_s(\omega)$  și  $\varphi_s(\omega)$  sunt transformatele lui Fourier, respectiv temperatura și densitatea de flux în planul de eliberare iar  $Z_s$  este impedanța termică de ieșire a sistemului definită în acel plan.

În cazul în care suntem interesați de planul de localizare a unui mediu conductor, am definit impedanța de intrare a sistemului  $Z_e$ , figura 3.8.

$$Z_e(\omega) = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} \quad (3.34)$$

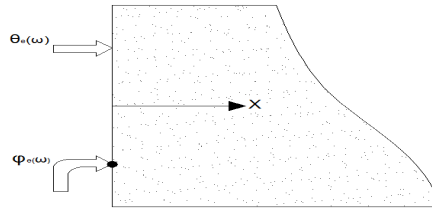


Figura 3.8. Planul de acces al sistemului conductiv

### 3.4.2.1. Calculul impedanței termice

Obiectivul acestui paragraf este de a găsi o formulă adaptată pentru determinarea impedanței de intrare, a unui sistem. După cum s-a observat, vectorii de intrare, respectiv de ieșire ai sistemului conductiv unidirecțional au fost determinați cu ajutorul următoarei ecuații matriciale:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(\omega) \\ \varphi_e(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s(\omega) \\ \varphi_s(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Trecerea în domeniul frecvențial de ecuații conduce la următoarea relație:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(\omega) \\ \varphi_e(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) & \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \sinh\left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] \\ b\sqrt{j\omega} \cdot \sinh\left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] & \cosh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s(\omega) \cdot \varphi_s(\omega) \\ \varphi_s(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Dezvoltând această relație matriceală rezultă:

$$\theta_e(\omega) = E \cdot Z_s(\omega) \cdot \varphi_s(\omega) + G \cdot \varphi_s(\omega)$$

$$\varphi_e(\omega) = H \cdot Z_s(\omega) \cdot \varphi_s(\omega) + F \cdot \varphi_s(\omega)$$

Rezultă expresia impedanței termice:

$$Z_e(\omega) = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} = \frac{E \cdot Z_s(\omega) + G}{H \cdot Z_s(\omega) + F} \quad (3.37)$$

Acest raport definește impedanța termică de intrare a sistemului, notată cu  $Z_e(\omega)$ . Ultima relație (3.37) pune în evidență faptul că, cantitățile de intrare a unui sistem sunt influențate de condițiile limită impuse.

### 3.4.3. Cazul în care avem un mediu omogen

Pentru a determina impedanța termică a unui mediu omogen doar înlocuim termenii E, F, G și H în relația (3.37).

Aceasta rezultă sub forma:

$$Z_e = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} = \frac{1 + \frac{Z_s(\omega) \cdot \tanh\left(l \sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right)}{b\sqrt{j\omega}}}{b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh\left(l \sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) + Z_s(\omega)} \quad (3.38)$$

#### 3.4.3.1. Condiția limită izotermă

Condiția izotermă limită este utilizată atunci când temperatura de ieșire a sistemului rămâne constantă, indiferent de variațiile produse de densitatea fluxului corespunzătoare unei impedanțe de ieșire egală cu zero. Ea se realizează prin menținerea temperaturii constante în spate, în contact cu un radiator.

Astfel impedanța de intrare este definită prin relația:

$$Z_{e \text{ izoterm}}(\omega) = \frac{\tanh\left(\frac{l\sqrt{j\omega}}{a}\right)}{b\sqrt{j\omega}} \quad (3.39)$$

unde  $\tanh$  reprezintă tangenta hiperbolică.

#### 3.4.3.2. Condiția limită semi-infinită

Când apar frecvențe suficient de mari se subliniază faptul că acestea sunt atenuate rapid de materialul omogen. Ele nu sunt supuse sub influența condițiilor de eliberare. Mărimile termice la intrare evoluează ca în cazul în care căldura este difuzată într-un mediu semi-infinit. Impedanța în acest caz este independentă în timp de natura materialului. În acest caz, impedanța de intrare poate fi scrisă:

$$Z_e(\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \quad (3.40)$$

Aici, remarcăm faptul că efuzivitatea  $b$  este singurul parametru care caracterizează propagările în material.



Condițiile limită semi-infinite ale impedanței de intrare corespund cazului în care termenul  $\tanh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right)$  tinde către 1. Această ipoteză a fost emisă pentru a valida condițiile de mediu semi-infinit. Validitatea acestor aproximări depind de valoarea cantității  $\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right)$ .

Grosimea stratului poate fi definită de relația:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{a}{nf}} \quad (3.41)$$

Această grosime corespunde distanței care a fost parcursă în materialul omogen de către o solicitare sinusoidală de frecvență  $f$ , având în vedere că amplitudinea s-a redus cu un factor  $e^1$ .

În practică la o frecvență dată, considerăm că grosimea materialului  $l$  este mai mare de  $3\varepsilon$ , în timp ce pe termen mediu poate fi considerată ca infinită:

$$\varepsilon \leq \frac{1}{3} \text{ sau } \sqrt{\frac{a}{nf}} \leq \frac{1}{3} \quad (3.42)$$

Această condiție este determinată pentru frecvențe:

$$f \geq \frac{9a}{nl^2} \quad (3.43)$$

Determinarea impedanței conduce la măsurarea termenilor de intrare, fluxul de căldură și temperatură. Constrângerile care impun durata de testare și prin urmare gamele de frecvență, sunt determinate de prezența unor captori (senzori) care devin perturbatori și nu pot fi neglijați. Sistemul de analiză globală este apoi constituit prin legarea în serie a senzorului situat sub planul de măsurare a rezistenței de contact senzor-material și a materialului semi-infinit [36].

### 3.5. Analiza generală a sistemului constituit pentru determinarea proprietăților termo-fizice

#### 3.5.1. Senzorul

Senzorul este un mediu complex compus din straturi subțiri de Kapton, cupru și conductoare de căldură care permit crearea de gradienti tangențiali. Un astfel de model este dificil din punct de vedere al fineții de modelare. O soluție este de a trata senzorul ca și un strat omogen. Este interesant de observat că o parte a senzorului luată în considerare are o grosime foarte subțire, de aproximativ 130 – 200  $\mu\text{m}$ . Pentru frecvențele de lucru care sunt sub 0,1 Hz arată ca un mediu omogen, iar grosimea poate fi tratată ca și o rezistență termică cu capacitate localizată.

A fost demonstrat că grosimea stratului omogen  $l$ , efuzivitatea  $b$  și difuzivitatea  $a$ , pot fi asociate cu matricea de transfer dată de relația (3.13).

Pentru valori foarte reduse ale grosimii  $l$ , la frecvențe joase se pot face următoarele aproximări:

$$\cosh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \approx 1 \text{ și } \sinh\left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \approx \left(l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right) \quad (3.44)$$

matricea de transfer rezultă sub forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] \\ b\sqrt{j\omega} \cdot \left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

unde,  $\frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] = \frac{1}{b\sqrt{a}} = R$  și  $b\sqrt{j\omega} \cdot \left[l\sqrt{\frac{j\omega}{a}}\right] = j\omega \cdot \frac{lb}{\sqrt{a}} = jC_f$

Acestea conduc la următoarea matrice de transfer:

$$\begin{bmatrix} 1 & R_f \\ jC_f \omega & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

unde  $R_f$  și  $C_f$  reprezintă rezistența, respectiv capacitatea fluxmetrului.

Capacitatea senzorului  $C_f$  poate fi determinată experimental. Metoda cu care s-a determinat dimensiunea senzorului este prezentată în partea experimentală. Măsurarea rezistenței proprii a senzorului nu este direct accesibilă deoarece este foarte scăzută. La orice măsurare senzorul este cuplat la o rezistență de contact. În scopul de a stabili o valoare nominală a simulării, s-a recurs la estimarea rezistenței componentelor elementare ale senzorului. Este puțin probabil ca valoarea calculată să corespundă cu valoarea reală, dar ca ordin de mărime este suficientă pentru a discuta despre influența ei. Rezistența  $R_f$  poate fi estimată printr-o procedură experimentală indirectă.

### 3.5.2. Rezistența de contact

Neregularitatea dintre suprafața de contact a senzorului și proba supusă determinării poate să rezulte o rezistență de contact necorespunzătoare.

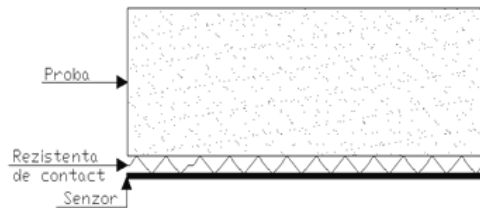


Figura 3.9. Rezistența de contact

Dacă pentru senzor, condiția ce privește suprafața este ca senzorul să fie de calitate bună, suprafața materialului prin caracterizarea rugozității poate fi mai mult sau mai puțin importantă, (figura 3.9). Rezistența ce apare între senzor și probă provoacă o scădere a temperaturii între ele. Asociind valoarea rezistenței de contact  $R_c$ , matricea de transfer se va scrie sub următoarea formă:

$$\begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Valoarea rezistenței de contact depinde de materialele cu care face contact și de natura contactului. În cazul mediilor conductoare comprimate,  $R_c$  poate lua valori între  $10^{-3}$  și  $10^{-5} \text{ K/(W/m}^2\text{)}$ . În cazul nostru, asfaltul este compactat, dar ca statut al suprafeței prezintă o oarecare rugozitate, în acest caz rezistențele de contact au mai puțin de  $10^{-5} \text{ K/(W/m}^2\text{)}$ .

### 3.5.3. Materialul în condiția limită de semi-infinit

Materialul studiat va fi considerat ca și condiție limită semi-infinit. El este caracterizat la suprafață de impedanța caracteristică proprie:

$$\varphi_m(\omega) = b_m \sqrt{j\omega} \cdot \theta_m(\omega) \quad (3.48)$$

### 3.5.4. Impedanța globală a sistemului senzor – contact – material

Aici avem trei straturi omogene, pentru care putem scrie o relație analogică cu relația (3.28), obținând astfel relațiile matriceale care leagă vectorii de strat la interfața mediilor. Produsul în cascadă al matricelor de transfer elementare ajută la conectarea directă a vectorilor de bază ai celor trei medii, care ne permit să avem o matrice de transfer a sistemului global din matrici elementare legate fiecare de aceste trei medii. Ansamblul perturbator senzor și rezistența de contact pot fi caracterizate printr-o matrice de transfer global  $M_g$  care este:

$$M_g = \begin{bmatrix} 1 & R_f \\ jC_f\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_c + R_f \\ jC_f\omega & jR_c C_f \omega^{+1} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Rezultă  $R_t$ , rezistența totală senzor – contact:

$$R_t = R_c + R_f \quad (3.50)$$

și:

$$r = \frac{R_f}{R_c} \quad (3.51)$$

Rezultă matricea de transfer:

$$\begin{bmatrix} 1 & R_t \\ jC_f\omega & jR_t(1-r)C_f\omega + 1 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Pentru a determina expresia impedanței globale a sistemului senzorzistență de contact-material, utilizăm relația (3.49). Impedanța  $Z_s$  corespunde în acest caz cu impedanța materialului semi-infinit prin relația:

$$Z_e(\omega) = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} = \frac{(1 + b\sqrt{j\omega} \cdot R_t)}{(jC_f\omega + b\sqrt{j\omega} \cdot (1 + jR_t(1-r)C_f\omega))} \quad (3.53)$$

### 3.5.5. Tratarea semnalului

Metodologiile de caracterizare a sistemului de conducție duc la determinarea unei impedanțe experimentale din semnalele măsurate de flux și temperatură. Una dintre cheile succesului metodei prezentate în această lucrare este calitatea de estimare a impedanței termice. Evoluțiile semnificative ale tehnologiei pot fi evidențiate încă de la începutul lucrării lui Defer [27], până la teza lui Shen [71].

Diferitele etape de prelucrare au condus de la o procedură de abordare foarte clasică direct bazată pe transformatele Fourier la proceduri de elaborare bazate pe modelarea sistemului.

Estimarea unui semnal printr-un calcul direct al transformării numerice Fourier prezintă probleme legate de variația mare a aceluia estimator. Prin urmare, determinarea funcției de transfer nu este realizată atât de ușor în raport cu transformatele lui Fourier. Această metodologie de caracterizare a conducției utilizează tehnici care implică estimatori mai stabili.

#### 3.5.5.1. Poziția problemei

Pentru ambele aplicații avute în vedere, această abordare necesită determinarea funcției de transfer a unui sistem liniar. În teoria sistemelor liniare [65], se arată că există în mod convențional două moduri de a caracteriza un sistem.

Prima abordare pare una mai simplă, ea constând în observarea răspunsului în timp la o solicitare a sistemului. Această problemă este prezentată în figura 3.10, în care se reprezintă sistemul a cărui semnal de intrare este  $u(t)$  și de ieșire  $y(t)$ .

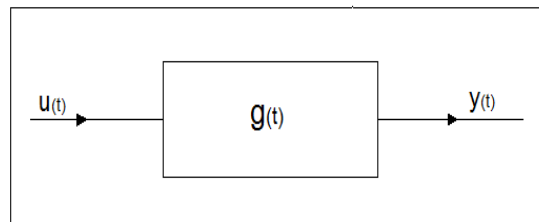


Figura 3.10. Schema problemei

Putem arăta că, caracterizarea unui sistem în domeniul timpului identificat prin funcția  $g(t)$ , se numește impuls de răspuns al sistemului. În cazul în care  $u(t)$

și  $y(t)$  reprezintă o solicitare a unui sistem, respectiv răspunsul acelei solicitări, ecuația de convoluție obligă la amplificarea impulsului de răspuns  $g(t)$ .

$$y(t) = g(t) \otimes u(t) \quad (3.54)$$

Identificând sistemul în domeniul timpului, revenind la  $u(t)$  și la răspunsul  $y(t)$ , operația de deconvoluție este teoretic posibilă, dar rezultatul acesteia depinde foarte mult de calitatea informației, adică mai exact de nivelul zgomotului măsurat în semnale. Ca parte a efortului depus, a fost una din constrângerile limitate a puterii injectate în sistem. Semnalele măsurate au fost prin urmare nepotrivite pentru o eventuală deconvoluție [49].

Conceptul de impedanță este direct legat de conceptul de filtrare care poate fi tradus după cum urmează: un semnal filtru la intrarea lui într-o solicitare  $\varphi(t)$  (flux) furnizează un semnal de ieșire  $\theta(t)$  (temperatură) dat de ecuația:

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot \varphi(t - \tau) d\tau \quad (3.55)$$

care o notăm:

$$\theta(t) = h(t) \otimes \varphi(t) \quad (3.56)$$

unde  $h(t)$  reprezintă răspunsul impulsional al sistemului.

Răspunsul impulsional  $h(t)$  caracterizează complet sistemul. În cazul nostru,  $\varphi(t)$  reprezintă o solicitare a densității fluxului și  $\theta(t)$  reprezintă răspunsul de evoluție a temperaturii de suprafață. Caracterizarea unui sistem în domeniul timpului, adică determinarea răspunsului impulsional  $h(t)$  poartă numele de proces de identificare a problemei.

Al doilea mod de caracterizare a unui sistem liniar constă în plasarea acestuia în domeniul de frecvență, figura 3.11.

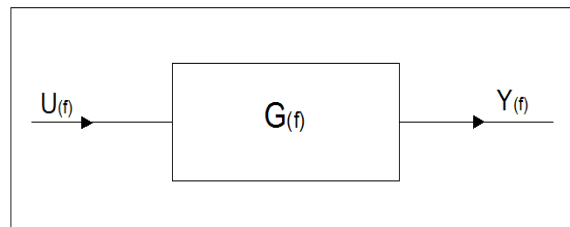


Figura 3.11. Schematizarea problemei

Dacă vom nota cu  $U(f)$  și  $Y(f)$  transformatele frecvenței de semnal temporal  $u(t)$  și  $y(t)$ , acestea apar, în conformitate cu teorema Wiener Hopf, ca mărimi de intrare și ieșire legate de un produs simplu, care implică funcția de transfer  $G(f)$  din sistem.

$$Y(f) = G(f) \cdot U(f) \quad (3.57)$$

$$\text{cu: } \left\{ \begin{array}{l} Y(f) \Leftrightarrow y(t) \\ U(f) \Leftrightarrow u(t) \\ G(f) \Leftrightarrow g(t) \end{array} \right\} \text{ unde simbolul „} \Leftrightarrow \text{” reprezintă o transformare.}$$

### 3.5.5.2. Cazul semnalului rapid. Tratarea rezultatelor sub solicitări în „sinusuri combinate”

Unul dintre obiectivele esențiale este de a arăta că fereastra de frecvențe aleasă este utilizabilă pentru determinarea efuzivității dintr-un material și că este capabilă de a reduce durata încercărilor la câteva minute pentru a propune o metodă de caracterizare rapidă a efuzivității. Problema de confruntare apărută în acest caz este de estimare a impedanței pentru frecvențele corespunzătoare perioadelor de același ordin, ca și mărime, cu durata testului. Perioadele care oferă un compromis bun (numărul de perioade în timpul încercării)/(sensibilitatea efuzivității), pentru acest tip de studiu se extind în general de la 400 s la 50 s. Numărul de perioade care sunt disponibile în timpul încercării se limitează la câteva unități. În acest caz s-a adoptat o abordare care este armonică, adică s-a limitat studiul impedanței la câteva componente excitate în mod artificial. Semnele de flux și temperatura măsurată sunt combinații liniare de funcții sinusoidale. Acest tip de semnal permite concentrarea puterii pe componentele studiate și astfel îmbunătățește raportul semnal pe zgomot. Procesul de caracterizare presupune stabilirea coeficienților de combinație liniară pentru fiecare semnal brut primit. Pentru determinarea valorilor impedanței, semnalul este proiectat succesiv pe solicitări sinusoidale acordate cu frecvențe excitate. Acest lucru se ridică la operarea selectivă a filtrării fiecărei componente prin determinarea coeficienților lui Fourier, care este de fapt un caz particular al transformatei lui Fourier discretă.

Semnalul funcționează după cum urmează:

$$\text{– pentru flux la frecvența } f_0: C_{\text{flux}}^{f_0} = \sum_{k=1}^{k=K} \text{flux}(k) \cdot e^{j2\pi \cdot f_0 \cdot k} \quad (3.58)$$

$$\text{– pentru temperatură la frecvența } f_0: C_{\text{temp}}^{f_0} = \sum_{k=1}^{k=K} \text{temp}(k) \cdot e^{j2\pi \cdot f_0 \cdot k} \quad (3.59)$$

Coeficienții sunt complecși. Modulul raportului lor corespunde cu modulul impedanței la frecvențe considerate. Estimarea cea mai bună este atunci când testul este împărțit în mai multe încercări brute și rezultatele sunt medii. Această metodă dă naștere la o reprezentare de evoluție medie în funcție de numărul de calcule efectuate.

Semnalul generat de calculator este o combinație sinusoidală care corespunde ecuației (3.59). Cele trei perioade diferite ale sinusurilor sunt combinate, 110 s, 250 s, 400 s, și alegerea acestor trei perioade se ia în considerare în ipoteza mediului semi-infinit.

S-a realizat o combinație de sinusuri utilizând următoarea ecuație:

$$P(t) = (p_1 + p_2 + p_3) + \sum_{i=1}^3 p_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (3.60)$$

S-a optimizat fluxul de măsură prin ecuația:

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^3 A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (3.61)$$

Optimizarea permite cunoașterea amplitudinii și fazei pentru flux și a amplitudinii și fazei pentru temperatură. În figura 3.12, se prezintă un exemplu de măsură a fluxului în funcție de durata încercării (15 min). Aceeași procedură a fost aplicată și pentru optimizarea temperaturii. Din datele măsurate se poate calcula impedanța experimentală pentru fiecare frecvență.

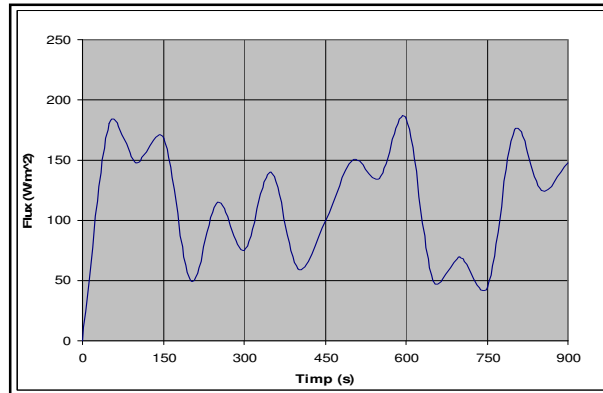


Figura 3.12. Fluxul măsurat pentru perioadele 110 s, 250 s, și 450 s în funcție de timp

### 3.5.6. Determinarea mărimilor termo-fizice

Condiția de semi-infinit este îndeplinită prin alegerea grosimii eșantionului. Impedanța termică se exprimă sub următoarea formă:

$$Z_e(\omega) = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} = \frac{(1 + b\sqrt{j\omega} \cdot R_t)}{(jC_f\omega + b\sqrt{j\omega} \cdot (1 + jR_t(1-r)C_f\omega))} \quad (3.62)$$

Impedanța sistemului este o funcție de frecvență care depinde de patru parametri dintre care trei sunt legați de metrologie.

Procedurile optimizate permit a cunoaște:

- amplitudinile și fazele pentru flux
- amplitudinile și fazele pentru temperatură.

Impedanța experimentală pentru fiecare frecvență este:

$$Z_{i\text{exp}} = \frac{\text{Amplitudinea temperaturii}}{\text{Amplitudinea pentru flux}} \quad (3.63)$$

Studiul de sensibilitate a parametrilor impedanței pune în evidență preponderența efuzivității  $b$  a materialului și a rezistenței totale ( $R_t = R_c + R_f$ ), introdusă prin senzor și rezistența de contact.

Acești doi parametri sunt obținuți prin calibrarea impedanței teoretice pe impedanța experimentală calculată din mărimile raportate.

Impedanța teoretică este o funcție neliniară de frecvență și de  $n$  parametri termo-fizici și geometrici care caracterizează sistemul. Acest lucru se pretează la rezolvarea unui sistem de ecuații cu mai multe frecvențe selectate. Rezolvarea acestui sistem este complexă și implică utilizarea unei metode iterative. Metodele clasice de tipul Gauss-Newton, sau Levenberg-Marquard au fost programate utilizând ca punct de plecare logica Matlab, figura 3.13.

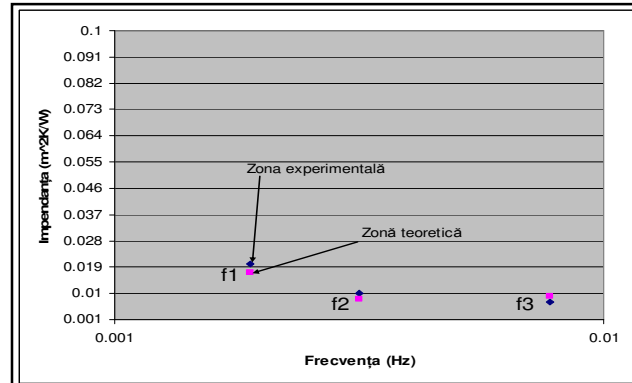


Figura 3.13. Impedanța experimentală și optimizarea ei în funcție de frecvență

Se constată că, curba teoretică aproximează punctele experimentale și justifică modelul experimental ales.

### 3.6. Legile radiației termice

Majoritatea legilor radiației termice se referă la **corpul negru**.

Acesta este un corp care îndeplinește următoarele cerințe:

- absoarbe în întregime toată radiația incidentă;
- emite radiația difuză independent de direcție;
- pentru o temperatură și o lungime de undă dată, emite energie mai mult decât orice alt corp.

Mărimile referitoare la corpul negru se vor nota cu indicele 0.

#### 3.6.1. Legea lui Planck

Legea lui Planck reprezintă legea de distribuție a intensității de radiație  $I_{\lambda}^*$

în funcție de lungimea de undă și temperatură, care este de forma [9]:

$$I_{\lambda}^* (\lambda^*, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^{*5} [\exp(hc_0/\lambda KT) - 1]} \quad [W/(m^2 \cdot \mu m)] \quad (3.64)$$

unde:  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  J·s și  $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$  J/K sunt constantele universale ale lui Planck, respectiv Boltzmann;  $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$  m/s – viteza luminii;  $T$  – temperatura absorbantă a suprafeței, în K,  $\lambda^*$  – lungimea de undă, în m. Puterea de emisie va fi atunci:



$$E_{\lambda^*0}(\lambda^*, T) = \pi I_{\lambda^*0}(\lambda^*, T) = \frac{C_1}{\lambda^{*5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad [W/(m^2 \cdot \mu m)] \quad (3.65)$$

Relația (3.65) este cea mai cunoscută formă a legii lui Planck. Aici:

$$C_1 = 2\pi h c_0^2 = 2,742 \cdot 10^8 \frac{W \cdot \mu m^4}{m^2};$$

$$C_2 = (h c_0/k) = 1,439 \cdot 10^4 \mu m \cdot K, \text{ sunt constantele radiației lui Planck.}$$

Reprezentarea grafică a legii lui Planck este prezentată în figura 3.14.

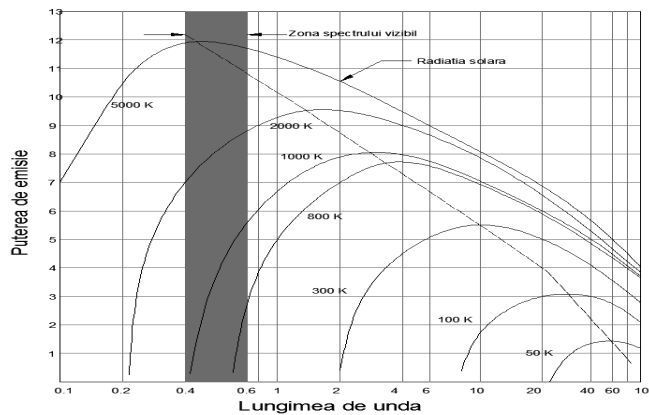


Figura 3.14. Puterea de emisie spectrală a corpului negru [50]

Din analiza distribuției spectrale a puterii de emisie se pot face următoarele observații:

- puterea de emisie variază continuu cu lungimea de undă;
- puterea de emisie monocromatică tinde către 0 când  $\lambda^* \rightarrow 0$  și  $\lambda^* \rightarrow \infty$ , având un maxim pentru fiecare temperatură;
- puterea de emisie crește cu temperatura pentru o lungime de undă dată;
- mare parte a puterii de emisie a soarelui care poate fi aproximată cu un corp negru cu temperatura 5800 K se emite în zona vizibilă a radiațiilor, în schimb pentru corpuri cu temperatura  $T \leq 800$  K, toată radiația se face în spectrul infraroșu.

### 3.6.2. Legea lui Wien

Ea se obține în cazul în care  $\lambda^* T \ll C_2$ , astfel că în relația (3.65) se poate neglija unitatea din paranteza dreaptă. Astfel se obține:

$$E_{\lambda^*0} = \frac{C_1}{\lambda^{*5}} e^{-C_2/\lambda^* T} \quad [W/(m^2 \cdot \mu m)] \quad (3.66)$$

Pentru determinarea valorii lui  $\lambda^*$  pentru care  $E_{\lambda^*0}$  are un maxim, se egalează cu zero derivata ecuației (3.66) și se obține:

$$\lambda_{\max T} = C_3 = 2897.8 \quad [\mu\text{m}\cdot\text{K}] \quad (3.67)$$

Rezultă că la creșterea temperaturii maximul puterii spectrale de emisie se deplasează către lungimi de undă mai mici.

### 3.6.3. Legea lui Stefan – Boltzmann

Legea lui Stefan–Boltzmann, care reprezintă legea fundamentală a radiației termice se poate determina analitic prin integrarea legii lui Planck (3.65) pe întregul spectru de lungimi de undă. Ea se formulează astfel:

Puterea totală de emisie a corpului negru este proporțională cu temperatura absolută a acestuia la puterea a patra:

$$E_0 = \sigma T^4 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3.68)$$

unde:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  și  $C_0 = 5,67 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)]$  reprezintă coeficienții de radiație a corpului negru.

Pentru corpurile cenușii puterea totală de emisie se calculează cu relația:

$$E = \varepsilon(T) \cdot E_0 = \varepsilon(T) \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3.69)$$

unde:  $\varepsilon(T)$  este factorul de emisie total al corpului.

Se poate defini și un factor de emisie spectral (monocromatic):

$$\varepsilon(\lambda^*, T) = \frac{E_{\lambda^*}(\lambda^*, T)}{E_{\lambda^*_0}(\lambda^*, T)} \quad (3.70)$$

În figura 3.15, este prezentată variația factorului de emisie spectral în funcție de lungimea de undă pentru diverse materiale, iar în figura 3.16, se poate observa variația cu temperatura a factorului de emisie total.

Valorile orientative ale factorului de emisie total pentru diferite tipuri de materiale sunt prezentate în figura 3.17.

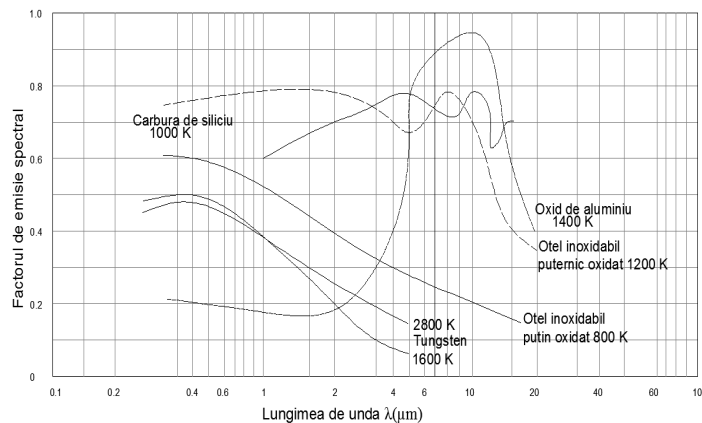


Figura 3.15. Variația factorului de emisie spectral cu lungimea de undă [50]

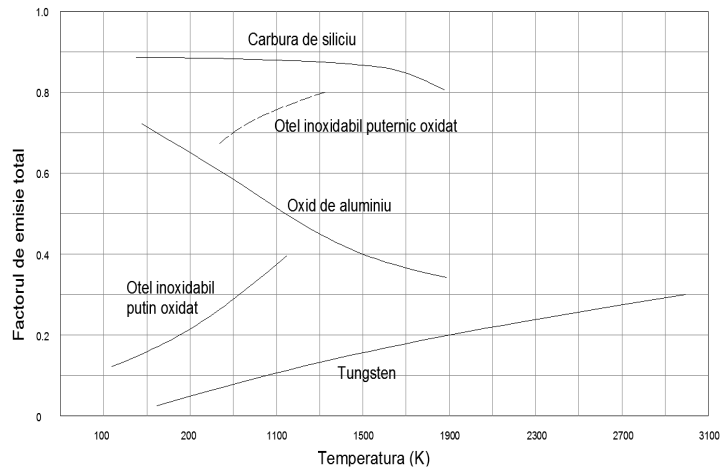


Figura 3.16. Variația factorului de emisie total cu temperatura [50]

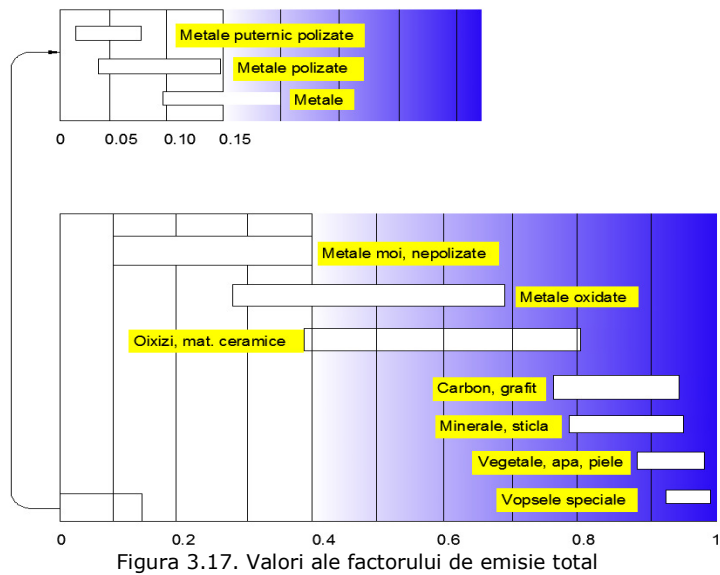


Figura 3.17. Valori ale factorului de emisie total

Din analiza datelor din figura 3.17, rezultă o serie de observații:

- factorul de emisie a metalelor este în general mic, el crescând cu prezența oxizilor pe suprafața acestora;
- factorul de emisie pentru materialele nemetale, categorie din care face parte și mixtura asfaltică are valori mai ridicate, superioare de obicei valorii de 0,6;
- pentru metale,  $\epsilon$  crește cu temperatura, iar pentru nemetale putem avea creșteri sau descreșteri a factorului de emisie cu temperatura;
- factorul de emisie depinde puternic de natura suprafeței, metodele de fabricație, tratamentele termice, reacțiile chimice cu mediul înconjurător.

### 3.7. Aparatura utilizată la măsurarea parametrilor termo-fizici

În acest subcapitol vor fi prezentate caracteristicile principale ale echipamentelor utilizate și procedurile de calibrare pentru punerea în aplicare a senzorilor de măsurare. Vor fi detaliate operațiunile care au fost efectuate pentru a caracteriza fluxmetrele de căldură, acestea permițând evaluarea perturbațiilor senzorilor introduși în sistemul studiat. Diversele componente constituente ale lanțului de achiziție și de control sunt selectate în funcție de particularitatea studiului, iar performanțele acestora vor fi descrise în acest subcapitol.

Obiectivele acestei lucrări vor lua în considerare dificultățile experimentale esențiale:

- materialul este complex și evaluativ;
- solicitările termice sunt complexe;
- instrumentele de măsurare sunt perturbatoare.

#### 3.7.1. Senzorul de temperatură

Măsurătorile de temperatură pot fi realizate folosind termocupluri de tip T (cupru-constant) sau (crom-aluminiu). Termocuplurile sunt confecționate din fire simple învelite în teflon (0,05 mm diametru). Termocuplurile au un diametru finit de aproximativ 0,1 mm.

Atunci când se efectuează o măsurare simultană de flux și temperatură termocuplul poate fi integrat în fluxmetru prin depunere electrolică a cuprului pe o pistă constantă. Acesta permite o măsurare a temperaturii în termeni de măsurare a fluxului cu o perturbare neglijabilă.

În aplicații s-au folosit conexiuni diferențiale, asta însemnând că pentru fiecare măsurare a temperaturii sunt utilizate două termocupluri. Unul este direct plasat în centrul de măsurare al fluxmetrului, iar celălalt este plasat în afara sistemului, figura 3.18. Cu ajutorul acestora s-a determinat diferența de temperatură între cele două puncte de contact prin măsurarea tensiunii, figura 3.19. În cazul în care o jonctiune este la o temperatură cunoscută (0 °C ca și temperatură de referință) se va ajunge la altă temperatură de jonctiune.

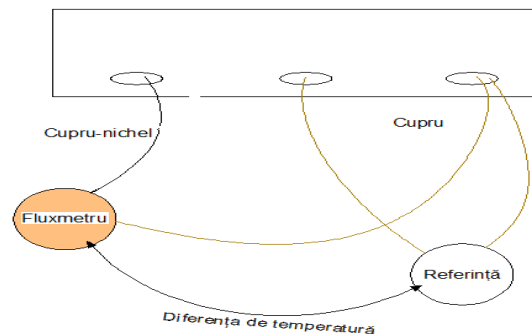


Figura 3.18. Branșament diferențial de termocupluri

Teoria impedanței termice aplicată în această lucrare, nu necesită măsurarea temperaturii absolute, ci numai variația amplitudinii temperaturii la suprafața materialului. O referință a cărei temperatură este foarte stabilă, dată fiind inerția termică ridicată, a fost folosită în timpul testelor efectuate pentru o durată de câteva minute.

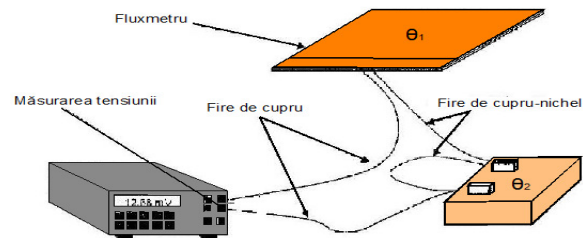


Figura 3.19. Dispozitiv de măsurare a diferenței de temperatură  $\theta_1 - \theta_2$

### 3.7.2. Senzorul de flux

Există mai multe tipuri de fluxmetre: cu pereți auxiliari, cu disipare electrică, cu entalpie. Sensorii sunt proiectați pentru a măsura schimbul de energie la suprafața materialului între un mediu conductor și mediul său. Fluxmetrele termice utilizate aici sunt de tip gradient tangențial. Sensorul fiind plan, forma și dimensiunile lui pot fi variate (pătrat, circular).

Din punct de vedere general acest senzor se prezintă sub forma unui strat subțire, a cărui grosime este de ordinul a zeci de milimetri. Acești senzori au fost dezvoltati în urma unor ani de muncă pentru diverse aplicații în laborator. Ei măsoară simultan debitul și temperatura în același plan.

Principiul lor de funcționare este de a stabili diferențele de temperatură la bornele de joncțiuni termoelectrice plane, acest lucru provocând micro-constricție de linii a fluxului termic ce traversează senzorul.

Un senzor de flux este constituit de legătura în serie a celulelor termoelectrice identice. O secțiune mărită a acestui senzor de flux este reprezentată în figura 3.20.

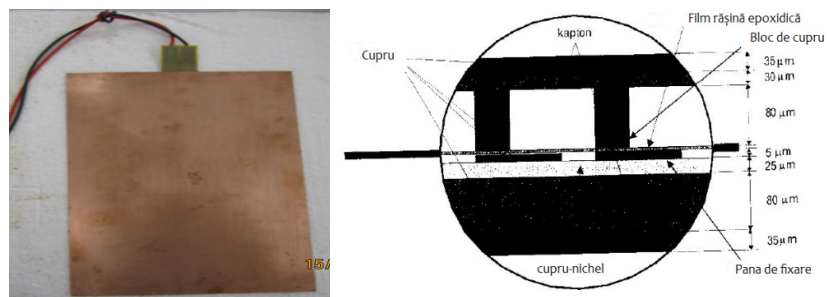


Figura 3.20. Detaliu dintr-o celulă a fluxmetrului

Procesele tehnologice în materie de fotolitografie, gravură chimică și micro-tehnologie au schimbat posibilitățile de fabricare a fluxmetrelor, ele permițând

producerea de fluxmetre de toate dimensiunile și forme diferite, cu sensibilități în continuă creștere. Principalul avantaj al acestui tip de senzor este că are o grosime foarte scăzută (0,5 mm), care reduce la minim perturbațiile cauzate de prezența sa în sistemul studiat. Putem de asemenea preciza că, din cauza grosimii scăzute, ele sunt capabile să detecteze fluxul de căldură cu un timp de răspuns inferior unei secunde.

Conceptul se bazează pe un cuplaj termoelectric într-un strat bimetalic, prin utilizarea de circuite imprimare. Depunerea de blocuri și pene de cupru pe o bandă continuă de cupru-nichel provoacă contracția liniilor de flux, oferindu-le pasaje privilegiate având în vedere conductivitatea termică foarte ridicată a cuprului. Acoperirea metalică de cupru, foarte subțire și foarte conductoare, dispusă pe ambele părți ale fluxmetrului, asigură uniformitatea temperaturilor de suprafață în planul de intrare și de ieșire a senzorului. Un inel de protecție având aceeași structură sensibilă ca senzorul, a fost realizat astfel încât să se extindă la suprafața instrumentului de măsură eliminând efectele de la marginea suprafeței sensibile. Aceste prevederi sunt necesare pentru a asigura fluxul de căldură unidirecțional prin fluxmetru și independența sensibilității sale cu privire la caracteristicile termo-fizice ale materialului pe care este instalat. În cadrul laboratorului măsurătorile sunt realizate în principal cu fluxmetre de mărimea 13 cm x 13 cm echipate cu inele de protecție care să conducă senzorul până la dimensiuni de 25 cm x 25 cm.

Gâtuirea (contractia) este cauza instituirii unui gradient de temperatură de-a lungul penei de cupru. Pentru efectul Seebeck, o forță electromotoare este generată la bornele celulei. Aceasta este direct legată de valoarea fluxului ce traversează întreaga celulă. Conexiunea celulelor în serie poate fi asemănată cu o conexiune în serie de generatoare elementare, acționate de densitatea de flux ce traversează senzorul. Gradientii sunt stabiliți perpendicular pe liniile de flux, spre deosebire de fluxmetrele cu pereți auxiliari unde gradientul este paralel cu direcția de curgere.

### **3.7.3. Calibrarea fluxmetrelor și influența condițiilor experimentale**

Mărimea livrată de fluxmetru este o diferență de potențial direct proporțională cu fluxul ce îl traversează.

Măsurarea fluxului necesită cunoașterea funcției ce leagă două cantități. Prin urmare este necesar să se cunoască bine comportamentul senzorilor plasați în cadrul măsurării.

Un proces de calibrare este esențial pentru a permite interpretarea tensiunii furnizate de senzori și a o converti în flux termic. În acest context, este necesar să se stabilească gradul de sensibilitate al fluxmetrelor și, mai general, comportamentul față de acești senzori vizavi de condițiile de măsurare (presiune, temperatură, direcția fluxului etc).

În acest context sunt mai multe metode posibile. Procedura aleasă în cadrul laboratorului este numită „Flux zero”, și este prezentată schematic în figura 3.21.

Fluxmetrul care urmează să fie calibrat se poziționează pe un radiator. Solicitarea fluxului este asigurată cu ajutorul unei rezistențe de căldură plană de aceeași dimensiuni ca senzorul. Pe întregul sistem există un izolator și a mai fost pus un fluxmetru auxiliar pentru determinarea părții de energie disipată în sus sub formă de scurgeri. A doua rezistență de căldură controlată de un regulator permite compensarea acestor pierderi prin anularea fluxului ce traversează fluxmetrul auxiliar.

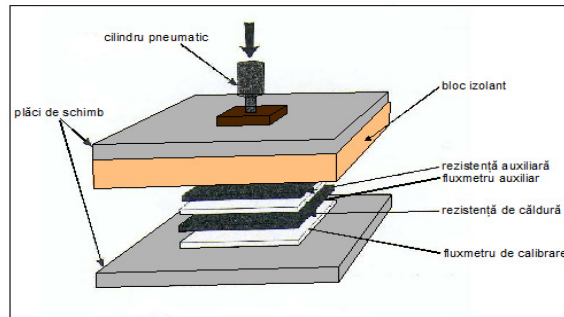


Figura 3.21. Dispozitiv de etalonare a fluxmetrului

Atunci când tensiunea măsurată la al doilea senzor este zero, fluxmetrul de calibrare este traversat în totalitate de puterea  $P$ , emisă de prima rezistență.

Alimentarea se face cu ajutorul unei surse stabilizate ce oferă rezistenței o tensiune continuă ce disipează puterea electrică  $P$  prin efectul joule. Dacă măsurăm la capetele fluxmetrului o diferență de potențial  $V$ , sensibilitatea  $K$  poate fi aproximată prin următoarea relație:

$$K = \frac{V \cdot S}{P} \quad (3.71)$$

unde:

- $P$  este puterea furnizată de rezistența de încălzire,  $P = U \cdot I$ ,
- $S$  este suprafața rezistenței.

Această procedură se repetă pentru mai multe puteri, astfel încât să acopere o gamă reprezentativă de valori care sunt des întâlnite în aplicațiile de inginerie civilă. Rezultatele obținute sunt reprezentate în figurile 3.22 și 3.23. Aceste rezultate permit verificarea liniarității de răspuns a fluxmetrului pe întreaga gamă de puteri testate. Sensibilitatea obținută a senzorului este  $K = 16,99 \mu\text{V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ , pentru o suprafață sensibilă de 13 cm x 13 cm.

Se constată că răspunsul tensiunii fluxmetrului este proporțional cu densitatea de flux ce trece prin el.

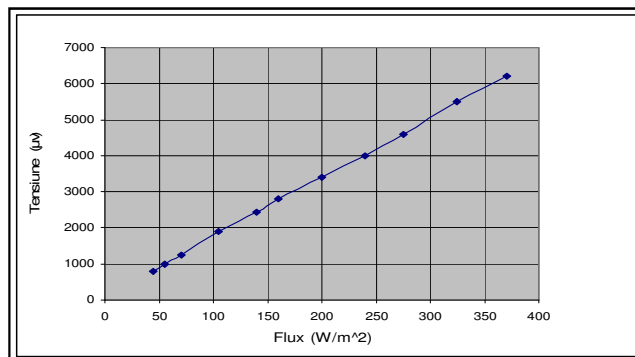


Figura 3.22. Mărima tensiunii în funcție de densitatea fluxului

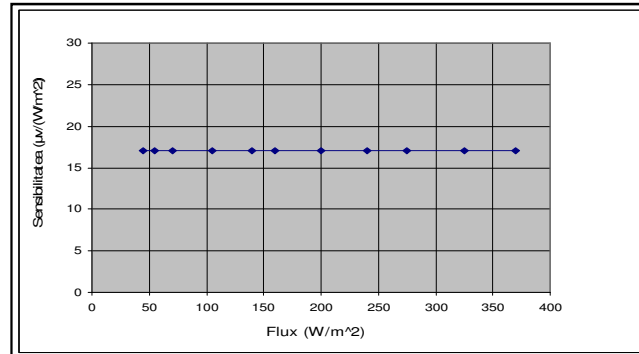


Figura 3.23. Evoluția sensibilității sensorului în funcție de puterea disipată

Sensibilitățile astfel obținute au fost în general validate în faza a doua de măsurare a rezistenței termice pe probe etalon.

➤ **Simetria**

Prin rotirea fluxmetrului în dispozitiv am putut verifica independența sensibilității sensorului vizavi de direcția fluxului, variațiile înregistrate fiind neglijabile.

➤ **Influența presiunii**

Efectul de presiune a fost studiat cu ajutorul sistemului de plăci asociate cu cilindru pneumatic. Sensibilitatea fluxmetrului a fost determinată pentru o presiune aplicată variată de la 0,5 bar până la 6 bar. Variațiile maxime de 2 % au fost înregistrate ca și variații aproape de maxim.

➤ **Influența temperaturii**

Efectul temperaturii a fost studiat și realizat la variații de temperatură a plăcilor de schimb între +18 °C și +60 °C. Sensibilitatea sensorului nu s-a schimbat semnificativ în timpul acestor încercări, ceea ce a permis asimilarea unei constante în cadrul diferitelor configurații experimentale studiate în cursul acestei lucrări. Acest lucru permite luarea în considerare a unor măsuri fără a trebui să se introducă funcția de corecție particulară a sensorului de temperatură.

➤ **Perturbațiile de măsură induse de senzor**

Pentru stratul cuprins între suprafața sensibilă a sensorului și planul materialului studiat ce face parte din sistem, este necesar să se cunoască influența sa asupra transferului termic. Sensorii sunt necesari pentru a identifica sistemele pe care aceștia sunt aplicați, prezența lor deranjând mai mult sau mai puțin măsurătorile efectuate. Astfel, în cazul în care se modifică evoluția mediului studiat prin dispunerea lor pe suprafață, se pare că această perturbare depinde de contextul în care fluxmetrele sunt utilizate.

Acest studiu pe care l-am evidențiat, a subliniat necesitatea de a lua în considerare efectele rezistiv legate de prezența sensorului. Sensorul se comportă ca un filtru în cazul de joasă frecvență, provocând o perturbare minimă.

În toate încercările prezentate în această lucrare, transferurile de căldură analizate sunt asimilate cu transferurile de conducție. Sensorii sunt proiectați în vederea măsurării fluxului termic, fără ca natura materialului cu care vin în contact să modifice sensibilitatea lor. În cazul mixturii asfaltice fluxmetrele sunt "lipite" de material cu o peliculă subțire de unsoare siliconată.

După cum s-a descris mai sus, un fluxmetru este un sistem eterogen complex foarte dificil ca model din punct de vedere termic. În această lucrare,



senzorul este asimilat cu un material omogen echivalent ale cărui caracteristici termo-fizice sunt rezistența termică  $R_f$  și capacitatea termică  $C_f$ . Perturbările care riscă să fie generate în cadrul încercărilor pot fi apreciate prin cunoașterea acestor date.

Antczak [5] a definit în lucrarea sa de teză două proceduri experimentale pentru accesarea acestor date. Semnalul emis de către un fluxmetru este relativ un flux termic care traversează un plan de măsură situat în inima senzorului. Prezența fluxmetrului modifică sistemul studiat prin adăugarea a două rezistențe termice pe traseul urmat de căldură. Prima rezistență corespunde cu rezistența proprie a senzorului, iar a doua rezistență este legată cu un contact imperfect între fluxmetru și materialul suport, figura 3.24. Această rezistență este puternic legată de statutul suprafeței materialului cu care vine în contact (rugozitate, porozitate etc).

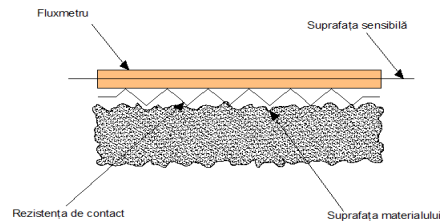


Figura 3.24. Rezistența de contact fluxmetru, material

Când se adaugă stratul de unsoare din silicon, acesta ajută la îmbunătățirea contactului dintre senzor și sistem, dar mai ales la închiderea golurilor de aer de la suprafața materialului. Din punct de vedere practic, este imposibil să se obțină două valori distincte pentru aceleași rezistențe. Senzorul este de fapt un mediu complex eterogen, rezistența de contact fiind foarte variabilă în funcție de condițiile experimentale.

Mărima  $R_f$  este dificil de calculat. Pentru a face acest lucru și datorită influenței sale scăzute (după studiul sensibilității), s-a integrat valoarea  $R_c$  (rezistența de contact). Acest lucru conduce la faptul că rezistența totală ( $R_t = R_c + R_f$ ) este formată din rezistența termică a senzorului și rezistența de contact.

În cadrul laboratorului în care s-au efectuat încercările este posibilă și determinarea rezistenței globale pe probe ce au grosime variabilă, acestea introducându-se între două fluxmetre. Ansamblul este amplasat între două plăci de schimb menținute la temperaturi diferite și producătoare astfel de transmiterea fluxului termic prin sistemul studiat. Rezistența de contact dintre materialul supus încercării și fluxmetre este redusă prin introducerea unui strat subțire de unsoare siliconată, evident fiind faptul că nu este strict reproductibilă.

Principiul de măsurare este clasic, această metodă este descrisă și utilizată în mod repetat în cadrul încercărilor validate.

Valoarea capacității termice cu ajutorul fluxmetrului poate fi determinată experimental, procedura de bază fiind similară cu cea utilizată pentru estimarea rezistenței termice. Probele introduse între cele două fluxmetre sunt supuse la un nivel de temperatură. Acestea necesită un sistem de trecere de la starea termică

izotermă (temperatura =  $\theta_0$ ) la o altă stare izotermă (temperatura =  $\theta_1$ ). Balanța fluxurilor de schimb determină atunci capacitatea totală  $C_t$ .

$$Q = \int_{t_{INI}}^{t_{FIN}} \Lambda \varphi \cdot dt = C_t (\theta_1 - \theta_0) \quad (3.72)$$

Capacitatea senzorului este singurul parametru care joacă un rol important în comportamentul perturbator al lui. În cazul în care caracterizarea sistemului este scăzută în frecvență, rezistența de contact și capacitatea senzorului sunt neglijabile pentru o probă de mixtură asfaltică. Folosind un senzor subțire acesta permite măsurarea fluxului în regim variabil și introduce perturbări aproape neglijabile. Valoarea capacității senzorului poate, la rândul ei, să fie atașată la o valoare nominală, influența sa fiind sub estimările valorii efuzivității.

Partea senzorului cuprinsă între planul de măsurare și planul de ieșire este constituită dintr-un strat de kapton și cupru.

### 3.7.4. Canalul de comandă și achiziție

Principiul aparatului de achiziție de date, reprezentat în figura 3.25 rămâne același indiferent de experiment.

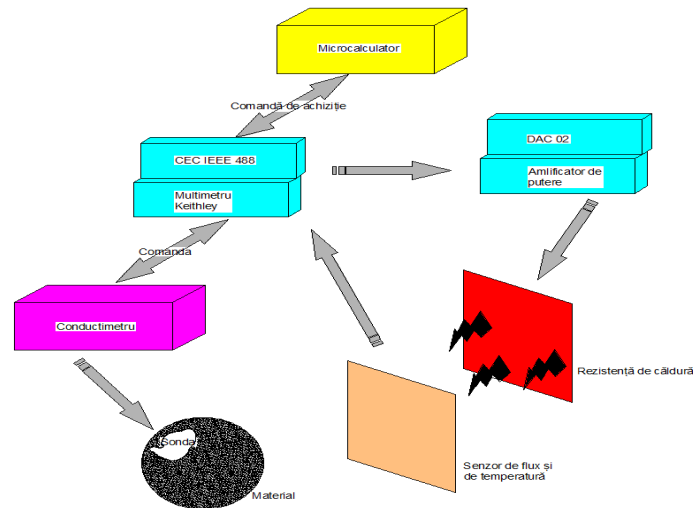


Figura 3.25. Schema de principiu de comandă și achiziție a datelor

#### 3.7.4.1. Gestiunea și comanda

Primul canal de instrumente pentru comandă în acest caz gestionează printre altele și senzori de o anumită scadență impusă de sistemul de încălzire. Un tip de card METRABYTE D.A.C. 02 instalat în microcalculator, permite transformarea semnalelor digitale în semnale analogice. Acest tip de card METRABYTE D.A.C. 02 dispune de două tensiuni de ieșire DC. Tensiunile colectate de la 0 la 10 volți sunt

amplificate de un amplificator de putere pentru determinarea rezistențelor electrice plane de câteva zecimi de milimetru grosime, pentru a crea diferite solicitări termice de tip sinusoidal. Alimentarea rezistenței se efectuează prin intermediul unui amplificator de putere (ieșire continuă proporțională de la 0 la 30 volți).

#### **3.7.4.2. Sistemul de achiziție**

Al doilea canal pentru achiziția de date este gestionat de un microcalculator cu un card de interfață IEEE (CEC 488), care permite gestionarea simultană a mai multor aparate intermediare BUS (GBIP). Această interfață gestionează achizițiile și permite transferul de date către memoria calculatorului.

Tot în cadrul acestui sistem de achiziții, se mai folosește un multimetru digital de tip KEITHLEY 2000 echipat cu un scaner, cu o rezoluție de 0,1  $\mu$ V de tensiune continuă ce afișează 6 cifre. Acest aparat dispune de două până la zece canale de măsură și este integrat în interfața IEEE 488. Interfața permite controlul aparatului prin intermediul GPIB și realizează achiziții automate conduse de microcalculator. Avantajul multimetrului utilizat este de a permite o drumuire foarte rapidă și de a reduce astfel intervalul de timp dintre achiziții. În partea experimentală realizată timpul de achiziție a fost din 30 în 30 de secunde.

### **3.8. Studiul practic al proprietăților termo-fizice asupra mixturilor asfaltice utilizate în Franța**

#### **3.8.1. Caracteristicile materialelor**

##### **3.8.1.1. Agregatele**

Forma agregatelor în cea mai mare parte generează tipul suprafeței materialului. Aceste tipuri sunt folosite în funcție de natura geologică în diferite moduri. Testarea de agregate în vederea utilizării acestora în mixturile asfaltice pentru construcția de drumuri a rămas relativ neschimbată timp de mulți ani. Comparativ cu evoluțiile din ultimele decenii în evaluarea de bitum și amestecuri bituminoase, cele mai multe țări din întreaga lume continuă să se bazeze pe metode simpliste, care datează încă din secolul XX.

Agregatele utilizate la realizarea mixturilor asfaltice ca și proveniență sunt din cariere de roci masive de pe teritoriul Belgiei (Dompierre). Agregatele care constituie aproximativ 85 % din masa totală a structurii rutiere, ca și la noi, respectă aceleași caracteristici tehnice și principii de încercare.

Datele privind calitatea agregatelor utilizate la realizarea mixturilor asfaltice pe care s-au determinat proprietățile termo-fizice, prezentate au fost furnizate de către societatea Eurovia din Franța și sunt conform stasurilor franceze. În funcție de natura rocii din care provin, ele sunt utilizate în straturile rutiere astfel:

- Porphyre Lessienne CUP (Belgia), aceste agregate se utilizează la realizarea stratului de rulare (uzură);
- Calcaire Dompierre, aceste agregate se utilizează la realizarea stratului de legătură și de bază.

Scheletul mineral este obținut prin recombinarea de nisip 0/2 sau 0/4 și cribluri, sorturile 2/4, 2/6, 4/6, 4/10, 10/14, 10/20, obținute de la aceeași carieră.

Caracteristicile de bază ale agregatelor sunt în concordanță cu specificațiile standardului XP P 18-540, și sunt definite în tabelul 3.1, de mai jos.

Tabelul 3.1  
Caracteristici de bază ale agregatelor utilizate în mixturile asfaltice franceze

| Tipul de mixtură              | Traficul | Caracteristicile de bază normale | Formă unghiulară |
|-------------------------------|----------|----------------------------------|------------------|
| Macadam<br>0/14 - 0/20        | ≥ T0     | C III a                          | Bază: Ic ≥ 100   |
|                               | T1 - T2  | D III a                          | Fundație Ic ≥ 60 |
|                               | T3       |                                  | Bază: Ic ≥ 60    |
| Beton asfaltic 0/6            | ≥ T0     | -                                | -                |
|                               | T1 - T2  | -                                | -                |
|                               | T3       | C III a                          | Ic ≥ 60          |
| Beton asfaltic<br>0/10 - 0/14 | ≥ T0     | B III a                          | Rc = 2           |
|                               | T1 - T2  |                                  | Ic = 100         |
|                               | T3       | C III a                          | Ic ≥ 60          |
| Beton asfaltic la<br>rece     | ≥ T0     | B II a                           | Rc ≥ 2           |
|                               | T1 - T2  | B III a                          | Ic ≥ 100         |
|                               | T3       | C III a                          | Ic = 60          |
| Anrobat cu modul<br>ridicat   | ≥ T0     | C III a                          | Rc = 2           |
|                               | T1 - T2  | D III a                          | Ic = 100         |
|                               | T3       |                                  | Ic ≥ 60          |

Agregatele care au contribuit la realizarea mixturilor asfaltice pe lângă caracteristicile tehnice ce trebuie să fie respectate, nu au prezentat nici un semn de materie organică. Calcarul de Dompierre este un calcar dur, de culoare gri care se utilizează cel mai mult în construcțiile de drumuri, la realizarea stratului de bază și de fundație.

Ca și caracteristici tehnice cunoscute pe aceste agregate sunt:

- rezistența la uzură, LA ≤ 16 %;
- rezistența la uzură, Micro - Deval, MDE ≤ 11 %;
- rezistența la polisaj, PSV ≤ 55 % (PSV ≥ 60 %).

Prophyre Lessiene CUP, agregatele de acest tip sunt o venă a rocii magmatice, care prezintă cristale mari de feldspat încorporate într-o matrice afanitică (în care predomină rocile magmatice a căror por nu este vizibil cu ochiul liber), parte a grupului de andezite, și care se prezintă sub următoarele forme:

- Prophyre antic roșu, care este un andezit;
- Prophyre antic verde, care este un andezit paleovulcanic;
- Prophyre antic albastru.

Acest tip de agregate, în Franța, se utilizează cel mai mult la realizarea stratului de uzură și a stratului de legătură. Ca și caracteristici tehnice și metode de încercare pe aceste agregate s-au realizat:

- rezistența la uzură, LA ≤ 11 %;
- rezistența la uzură, Micro - Deval, MDE ≤ 10 %;
- rezistența la polisaj, PSV ≥ 60 %.

### 3.8.1.2. Filerul

Filerul de calcar folosit la realizarea probelor este un produs obținut prin măcinare uscată a pietrei de calcar cu un conținut mare de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3 > 95 \%$ ) și sortare gravitațională. În funcție de proveniență, acest tip de filer poartă denumirea de „filler calcaire Piketty”.

Filerul utilizat are următoarele caracteristici:

- conținutul de părți fine 0,09 mm ( $\geq 80 \%$ );
- conținutul de argilă determinat prin metoda valorii de albastru (max. 2 %);
- coeficientul de hidrofilie (max. 1 %);
- minimul de particule fine sub 0,02 mm ( $\leq 20 \%$ ).

### 3.8.1.3. Cenușa de termocentrală

Pe lângă determinarea proprietăților termo-fizice pe mixturile asfaltice realizate în Franța, unul dintre obiective era acela de îmbunătățire a acestor proprietăți termo-fizice prin utilizarea în masa mixturii a cenușii de termocentrală. Această utilizare este posibilă prin înlocuirea totală sau parțială a filerului.

În ceea ce privește utilizarea cenușilor de termocentrală în amestecurile de asfalt sunt puține studii care scot în evidență caracterul benefic al acestora. În acest scop în urma unui studiu amplu asupra mixturilor asfaltice desfășurat în cadrul stagiului de doctorat de la Universitatea d’Artois din Franța, referitor la pierderea stabilității mixturii asfaltice la temperaturi ridicate, am remarcat faptul că pe plan mondial se încearcă combaterea acestor temperaturi ridicate datorate schimbărilor climatice prin utilizarea diferitor componente în straturile de asfalt cum ar fi: pudra de grafit sau pulbere de mină [80]. Utilizarea acestor componente în masa mixturii asfaltice au drept scop îmbunătățirea proprietăților termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică etc.).

Cenușile de termocentrală se formează din impuritățile argiloase, din carburi ce se ard în focarele termocentralelor unde se topesc și sunt antrenate de gazele fierbinți spre coș. Picăturile parțial topite se solidifică și sunt cooptate de filtrele de praf la ieșirea din coș. Cenușile se prezintă sub formă de granule parțial amorfe, parțial cristalizate, cu finețe de 3000-6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Cenușa utilizată la realizarea dozajelor din mixtură asfaltică provine din nordul Franței, iar ca și compoziție chimică ea are următoarea structură:  $\text{SiO}_2 = 40\text{...}60 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25\text{...}35 \%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 7\text{...}10 \%$ ,  $\text{CaO} = 1\text{...}5 \%$  și în cantități mai mici  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ .

Cenușile sunt de tipul silico – aluminoase la care raportul:

$$\frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3} > 2 \quad \text{și} \quad \% \text{CaO} < 5 \%$$

Această cenușă de termocentrală a fost utilizată în proporție de 10 %, 15 %, în masa mixturii asfaltice, cu scopul de a urmări evoluția proprietăților termo-fizice.

Probele de mixtură asfaltică ce au în compoziția lor cenușă de termocentrală au fost realizate în cadrul laboratorului Eurovia din Lille, figura 3.26.



Figura 3.26. Realizarea probelor de mixtură asfaltică cu cenușă de termocentrală

### 3.8.1.4. Bitumul

Bitumul rutier pur din Franța există în patru clase: 35/50, 50/70, 70/100 și 160/220. Acest bitum rutier provine din prelucrarea fracțiunii grele de țiței. Pe lângă aceste clase de bitum pur mai există și bitumurile modificate de clasă: 10/20, 20/30, bitumuri cu care au fost realizate câteva eșantioane pe care am determinat proprietățile termo-fizice.

Aceste tipuri de bitum sunt fiecare destinate aplicațiilor rutiere uzuale pentru realizarea straturilor de fundație, straturilor de bază, straturilor de legătură și de uzură a drumurilor. Ele sunt aplicabile pentru toate ansamblurile tehnice puse în aplicare.

Caracteristicile acestor clase de bitum sunt prezentate în tabelul 3.2 și în figurile 3.27, 3.28.

Tabelul 3.2

Caracteristicile fizico - chimice

|  | Unități  | Metode       | 35/50 | 50/70 | 70/100 | 160/220 |
|--|----------|--------------|-------|-------|--------|---------|
| Penetrația la 25 °C                        | x 0.1 mm | EN 1426      | 35/50 | 50/70 | 70/100 | 160/220 |
| Punctul de înmuiere                        | °C       | EN 1427      | 50/58 | 46/54 | 43/51  | 35/43   |
| Conținut de parafină                       | %(m/m)   | EN 12606 - 2 | ≤4.5  | ≤4.5  | ≤4.5   | ≤4.5    |
| Solubilitatea în toluen                    | %(m/m)   | EN 12592     | ≥99.0 | ≥99.0 | ≥99.0  | ≥99.0   |
| Rezistența la îmbătrânire RTFOT la 163 °C: |          | EN 12607 - 1 |       |       |        |         |
| - Variația de masă (+ sau -)               | %        | EN 12607 - 1 | ≤0.5  | ≤0.5  | ≤0.8   | ≤1.0    |
| - Penetrația după îmbătrânire              | %        | EN 1426      | ≥53   | ≥50   | ≥46    | ≥37     |
| - Creșterea punctului de înmuiere          | °C       | EN 1427      | ≤8    | ≤9    | ≤9     | ≤11     |
| - Punctul de înmuiere după îmbătrânire     | °C       | EN 1427      | ≥52   | ≥48   | ≥45    | ≥37     |

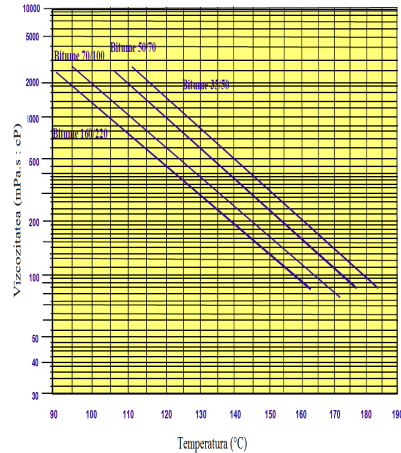


Figura 3.27. Vâscozitatea bitumului în funcție de temperatură

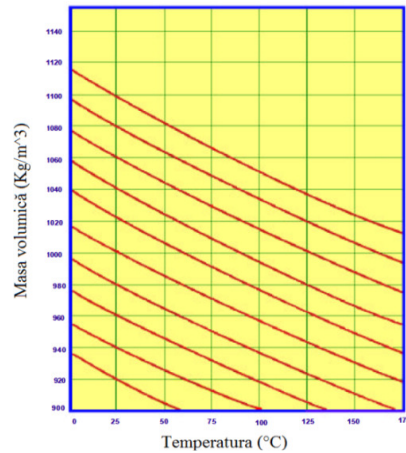


Figura 3.28. Masa volumică în funcție de temperatură

### 3.8.2. Caracteristicile mecanice ale mixturilor din Franța

Conform standardelor de produs, sau în plus față de normele standard, mixturile asfaltice, în temeiul realizării lor, trebuie să prezinte performanțe minime conform tabelului 3.3, de mai jos:

Tabelul 3.3

Caracteristicile fizico-mecanice ale mixturilor din Franța

|  | <b>BBUM<br/>0/6</b> | <b>BBTM<br/>0/10</b>        | <b>BBSG0/14</b>           | <b>EME</b>           | <b>GB</b>                 | <b>BB la<br/>rece</b> |
|--|---------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|
| Încercarea Duriez la 18 °C (NF P 98-251-1)<br>Rezistența la compresiune în starea uscată R<br>- cu bitum 80/100<br>- cu bitum 60/70<br>- cu bitum 40/50<br>După raportul imersie / R în stare uscată   | -<br>-<br>≥ 0,7     | ≥ 5<br>≥ 6<br>≥ 7<br>≥ 0.75 | ≥ 5<br>≥ 6<br>≥ 7<br>≥ 75 | -<br>-<br>-<br>≥ 0,8 | ≥ 4<br>≥ 5<br>≥ 6<br>>0,7 | ≥ 0,7                 |
| Încercarea de ornieraj (NF P 98-253-1)<br>- 5 cm, 1000 cicluri, 40 rotiri la 60 °C<br>- 5 cm, 3000 cicluri, 40 rotiri la 60 °C<br>- 10 cm, 30000 cicluri, 60 rotiri la 60 °C<br>- 10 cm, 30000 cicluri, 80 rotiri la 60 °C<br>- 10 cm, 10000 cicluri, 100 girații la 60 °C | ≤ 10 %<br>≤ 20 %    | ≤ 10 %<br>≤ 10 %            | ≤ 10 %<br>≤ 10 %          | ≤ 8%                 | ≤ 10%                     |                       |

112 Studiul proprietăților termo-fizice. Studiu experimental - 3

|  | <b>BBUM<br/>0/6</b>      | <b>BBTM<br/>0/10</b>                   | <b>BBSG<br/>0/14</b>                   | <b>EME</b>            | <b>GB</b>    | <b>BB la<br/>rece</b> |
|--|--------------------------|--|--|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Încercarea de determinare a modului și a pierderii de liniaritate (NP P 98-260-1)<br>- cu bitum 40/50<br>- cu bitum 60/70<br>- cu bitum 80/100<br>la 15 °C, 0.02 s | ≥ 8000 MPa<br>≥ 6000 MPa | ≥ 8000 MPa<br>≥ 6000 MPa<br>≥ 4000 MPa | ≥ 8000 MPa<br>≥ 6000 MPa<br>≥ 4000 MPa | ≥ 12000 MPa           | ≥ 9000 MPa   |                       |
| Încercarea de modul complex (NF P 98-260-2)<br>15° C - 10 Hz   | ≥ 5000MPa                | ≥ 5400 MPa                             | ≥ 5400 MPa                             | ≥ 12000               | ≥ 9000       |                       |
| Încercarea la oboseală (NF P 98-261-1)   | ≤ 100·10 <sup>-6</sup>   | ≤ 100·10 <sup>-6</sup>                 | ≤ 100·10 <sup>-6</sup>                 | ≤ 90·10 <sup>-6</sup> |              |                       |
| Încercarea de compactare cu presa giratorie (NF P 98-252)<br>- la 10 rotații<br>- la 40 rotații<br>- la 60 rotații<br>- la 80 rotații                              | >9<br>4 < <8             | >11<br>4 < <9                          | >11<br>4 < < 8                         | ≥ 11<br>4 < <9        | ≤ 10<br>≤ 10 | ≥ 12<br>5 < <12       |

Mixturile asfaltice utilizate în Franța și pe care s-au determinat proprietățile termo-fizice sunt:

- Betoanele asfaltice bogate în conținutul de bitum și utilizate în principal pentru straturile de uzură. Aceste betoane asfaltice sunt clasate în funcție de granulometrie astfel:

➤ Beton asfaltic ultrasubțire (**BBUM**): un strat cu grosimea de 2 cm, este utilizat pentru straturile de uzură acolo unde macro-textura suprafeței este solicitată și în cazul lucrărilor de întreținere a suprafeței de rulare;

➤ Beton asfaltic foarte subțire (**BBTM**): un strat cu grosimea de 2,5 cm. Acest beton asfaltic este utilizat pe scară largă în Franța pentru straturile de rulare, permițând realizarea unui strat de uzură, care după câțiva ani poate fi amorsat și refăcut în cazul în care în anumite locuri macro-textura a fost solicitată datorită traficului;

➤ Beton asfaltic subțire (**BBM**): un strat cu grosimea de 3 la 5 cm;

➤ Beton asfaltic semigreu (**BBSG**): un strat cu grosimea de aproximativ 6 cm. Acest beton asfaltic este utilizat pe scară largă în Franța pentru straturile de rulare.

- Anrobat bituminos (**GB**): un amestec cu un conținut mai mic de liant, destinat straturilor de bază și de fundație, cu grosime cuprinsă între 8 și 14 cm.

- Mixtură cu modul ridicat (**EME**), utilizată ca și strat de rezistență.

Pe lângă aceste tipuri de mixturi asfaltice furnizate de către societatea Eurovia, s-au mai realizat patru doze cu materialele avute la dispoziție înlocuind



proporțional agregatele, respectiv filerul, cu cenușă de termocentrală în procente de 10 %, 15 %, tabelul 3.4. Aceste doze nu sunt conforme standardului de realizare a mixturilor asfaltice deoarece cenușa având granulozitatea și densitatea scăzute, în procentajul total partea fină nu se încadrează în limitele prevăzute de stas. Această alegere a procentajului ridicat de cenușă a fost datorată scopului urmărit de creștere a conductivității termice și a căldurii specifice. După măsurarea și determinarea acestor caracteristici termice care pot să rezulte conform scopului urmărit, aceste procentaje de cenușă o să se diminueze astfel încât mixturile realizate să poată fi conform standardelor.

Tabelul 3.4

## Doze finale realizate în Franța

| Tip<br>mixtură                | Sort (%)  |       |                     |                   |                   | Filer<br>(%) | Cenușă<br>(%) | Bitum<br>(%)    |
|-------------------------------|-----------|-------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------|---------------|-----------------|
|                               | 10/<br>20 | 10/14 | 6/10<br>*<br>(6/14) | 2/6<br>*<br>(4,6) | 0/2<br>*<br>(0/4) |              |               |                 |
| BBSG 0/14                     | -         | 23,50 | 18,80               | 33,90             | 8,50              | 9,40         | -             | 5,80<br>(50/70) |
| BBSG 0/20                     | 47,4      | -     | 16,10               | 19,90             | 6,60              | 4,70         | -             | 5,30<br>(50/70) |
| BBSG 0/14<br>(10 %<br>cenușă) | -         | 13,50 | 18,90               | 33,90             | 8,50              | 9,40         | 10,00         | 5,80<br>(50/70) |
| BBSG 0/14<br>(15%<br>cenușă)  | -         | 8,50  | 18,90               | 33,90             | 8,50              | 9,40         | 15,00         | 5,80<br>(50/70) |
| BBSG 0/20<br>(10 %<br>cenușă) | 37,4      | -     | 16,10               | 19,90             | 6,60              | 4,70         | 10,00         | 5,30<br>(50/70) |
| BBSG 0/20<br>(15 %<br>cenușă) | 32,4      | -     | 16,10               | 19,90             | 6,60              | 4,70         | 15,00         | 5,30<br>(50/70) |
| GB 0/20                       | 42,00     |       |                     | *9,00             | *49,00            | -            | -             | 4,50<br>(35/50) |
| BBM 0/10                      | -         | -     | 51,50               | 18,00             | 27,00             | 3,50         | -             | 5,70<br>(20/30) |
| BBSG 0/10                     | -         | -     | 52,50               | 15,00             | 28,50             | 4,00         | -             | 5,60<br>(35/50) |
| EME 0/14                      | -         | -     | *38,00              | *22,50            | *37,50            | 2,00         | -             | 5,60<br>(10/20) |
| BBTM 0/6                      | -         | -     | -                   | 46,00             | 54,00             | -            | -             | 6,60<br>(50/70) |
| BBUM 0/6                      | -         | -     | -                   | 43,00             | 57,00             | -            | -             | 6,80<br>(50/70) |

### 3.9. Măsurările cu bancul de conducție

Caracterizarea termo-fizică a unui material implică în mod normal determinarea mai multor parametri. În acest caz, metodele de măsurare folosite în cadrul laboratorului sunt de actualitate, însă mai au nevoie de unele măsuri speciale

în conformitate cu caietul de sarcini al materialelor ce trebuie măsurate. Ele folosesc teoria cvadropolării termice și funcționarea a două moduri de bază independente ca stocaj și transfer evidențiat prin diagonala matricei. Măsurătorile permit identificarea conductivității termice și a căldurii specifice. Valorile de efuzivitate și difuzivitate sunt deduse prin calcul.

### 3.9.1. Dispozitivul experimental

Metodele folosite în cadrul laboratorului au fost îndelung testate [7]. Acestea se bazează pe studii de măsurare a fluxului și a temperaturii pe ambele părți ale unui eșantion supus unor condiții limită controlate. Figura 3.29, prezintă dispozitivul utilizat.

Încercările au fost efectuate pe diferite probe de mixtură asfaltică. Atunci când se pune în bancul de încercare, proba de mixtură asfaltică se înconjoară cu un inel de polistiren de 1 cm grosime sau cu material textil, pentru a se evita pe laterale pierderea de flux și a se asigura condițiile de transfer unidirecțional.

Fluxmetrele de măsură au o suprafață activă de 15 cm x 15 cm și un inel de gardă care împreună cu suprafața activă au dimensiunea de 25 cm x 25 cm. Măsurarea temperaturii este efectuată cu ajutorul unui termocuplu de tip K. Fiecare termocuplu este conectat la o masă termică de temperatură cunoscută, pentru a ajunge la temperatura fețelor eșantionului. Solicitățile sunt gestionate prin două plăci de schimb din aluminiu care sunt conectate la băile termostat prin intermediul pompelor. Deplasarea plăcii superioare este asigurată de un cilindru pneumatic, care permite de asemenea să mențină presiunea sistemului fluxmetru-probă, prin menținerea la minim a rezistenței de contact.

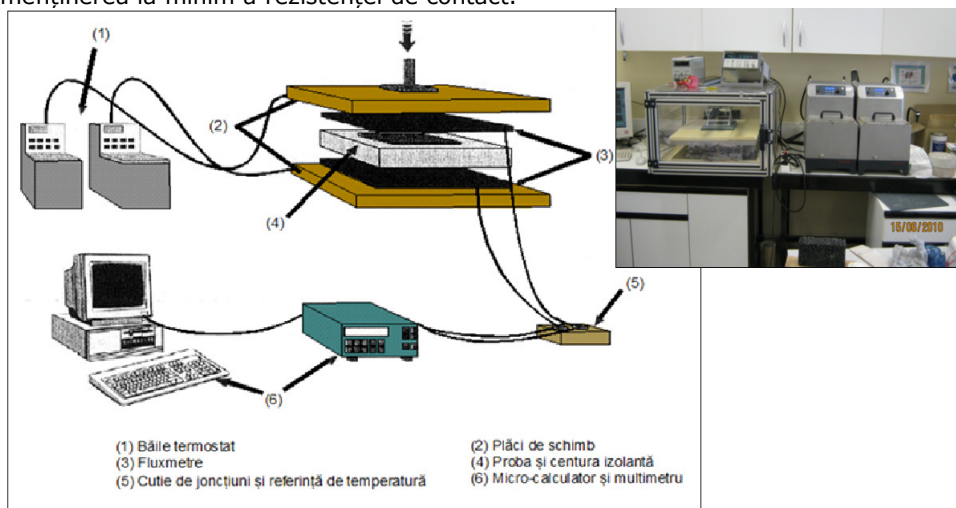


Figura 3.29. Dispozitiv experimental de determinare a caracteristicilor termice pentru mixtura asfaltică prin metode clasice

Este important de remarcat că solicitările termice impuse sistemului pot da naștere la transferul de masă în timpul manipulării. Pentru a asigura validitatea rezultatelor obținute, trebuie acordată o atenție menținerii unui decalaj rezonabil și suficient pentru obținerea unor date corecte.

Achiziția automată a punctelor de măsurare este efectuată de un micro-computer care controlează un multimetru digital printr-un IEEE.

### 3.9.2. Determinarea conductivității termice

Conductivitatea termică  $\lambda [W/(K \cdot m)]$  caracterizează aptitudinea unui material de a conduce căldura în regim permanent. Aceasta reflectă, mai mult sau mai puțin, tendința materialului de a lăsa „trecerea” căldurii. Acest parametru se înscrie prin urmare intuitiv în noțiunea de transfer de căldură în jurul mediului.

Metoda constă în prezentarea unei probe de grosime  $l$  supusă unui gradient de temperatură, astfel încât să se impună un transfer de flux. În figura 3.30, se prezintă schematic magnitudinea de intrare și ieșire a sistemului.

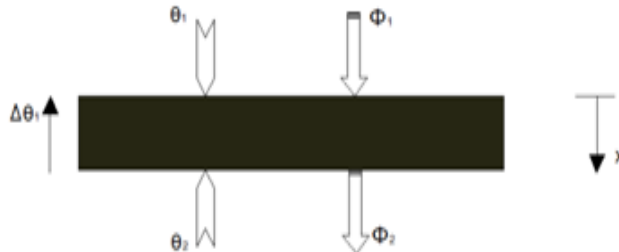


Figura 3.30. Sistem conductiv unidirecțional supus unui gradient de temperatură

Conductivitatea termică a unui material este direct legată de rezistența termică ce reflectă opoziția sa față de trecerea căldurii. Metoda constă în impunerea pe ambele fețe a sistemului de temperaturi diferite  $\theta_1$  și  $\theta_2$ . Fluxul și temperatura sunt identificate la intrare și la ieșire. Cunoașterea acestor două cantități permite calculul rezistenței termice, figura 3.31, și a deducerii conductivității termice.

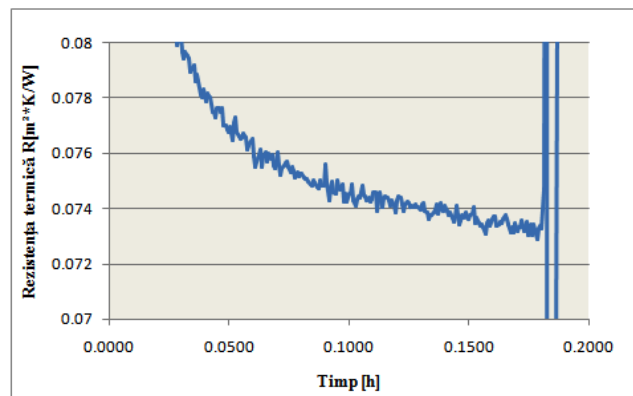


Figura 3.31. Evoluția rezistenței termice în curs de determinare a conductivității, pentru un beton asfaltic

Pentru un sistem unidirecțional în regim permanent, relația dintre flux și diferența de temperatură poate fi exprimată după cum urmează:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta\theta}{R}$$

$$\varphi_2 = \frac{\Delta\theta}{R}$$

Utilizarea cantităților generalizate  $\sum \varphi$  și  $\Delta\theta$ , permite realizarea fluxului pe ambele fețe cu suma expresiilor precedente, cum ar fi :

$$\sum \varphi = \frac{2}{R} \Delta\theta \quad (3.73)$$

unde R reprezintă rezistența termică a probei.

În figura 3.32, sunt prezentați pașii la care este supusă proba pentru determinarea conductivității termice și a căldurii specifice. Astfel pentru determinarea conductivității, temperaturile plăcilor de căldură care vin în contact cu proba sunt diferite (25 °C la partea superioară și 15 °C la partea inferioară), astfel fluxul de căldură este îndreptat de sus în jos.

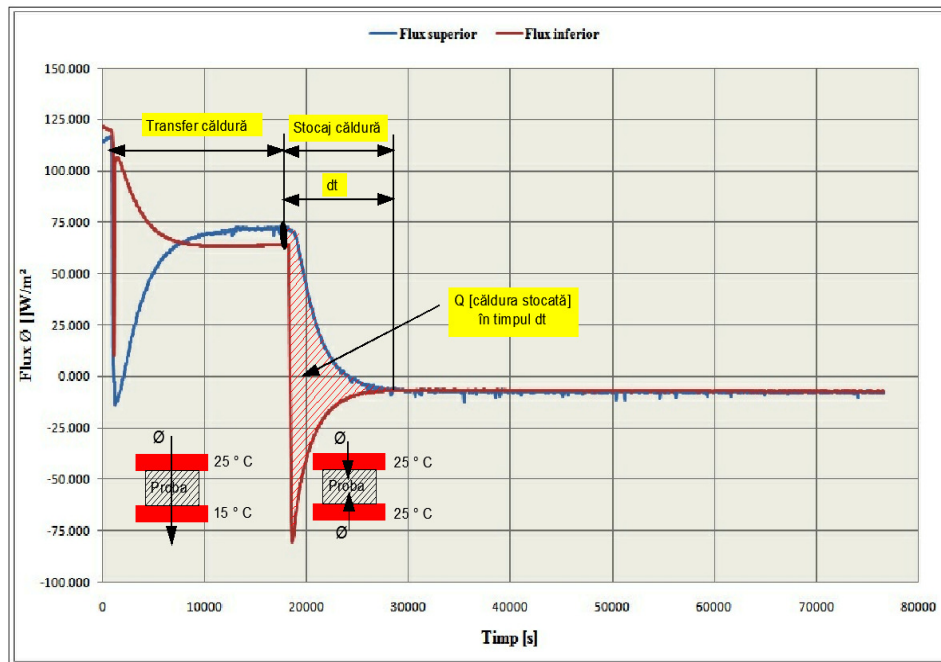


Figura 3.32. Pașii la care este supusă proba din beton asfaltic pentru determinarea conductivității termice și a căldurii specifice

Utilizarea acestor cantități generalizate constă în reducerea duratei de măsurare, fapt observat în figura 3.33, unde constatăm că suma fluxurilor are o

constantă de timp mult mai scăzută decât cea a fluxmetrelor elementare.  $\sum \varphi$  este aproape staționară înainte de starea permanentă.

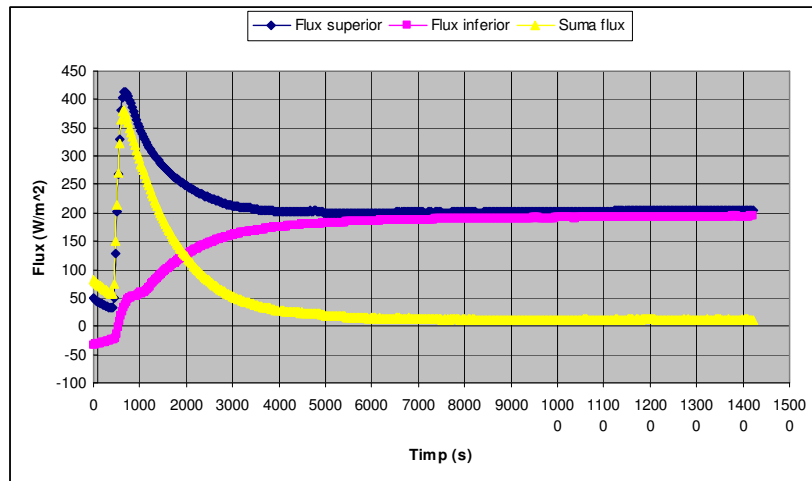


Figura 3.33. Evoluția fluxului în curs de determinare a conductivității termice

Conductivitatea termică se determină numai după ce suma fluxului este stabilă.

$$R = \frac{2\Delta\theta}{\sum \varphi} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (3.74)$$

$$\text{și } \lambda = \frac{l}{R} \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}] \quad (3.75)$$

unde  $l$  reprezintă grosimea probei.

### 3.9.2. Determinarea căldurii specifice

Căldura specifică  $c$  [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ], caracterizează capacitatea unui material de a stoca energie termică (căldură). Ea măsoară cantitatea de energie necesară pentru variația de  $1^\circ\text{C}$  la temperatura masei unui kilogram de material.

Metoda constă în efectuarea unui studiu de bilanț energetic între două stări de echilibru. Dispozitivul de măsură este același pe care l-am descris anterior, numai pentru solicitări termice de schimbare.

Pornind de la o stare inițială ( $t_{\text{initial}}$ ) stabilă, vom impune o variație de temperatură prin schimbarea setării celor două băi de temperatură, figura 3.32. Temperatura se va schimba, iar fluxul de pe fiecare parte, va arăta ca în figura 3.34. Așteptăm redresarea până la starea finală ( $t_{\text{final}}$ ) a fluxurilor, unde materialul a recuperat o nouă stare de echilibru, asociată cu o nouă temperatură de echilibru.

În timpul fazei de dezechilibru, proba stochează sau eliberează o energie  $Q$  sub formă de căldură, în funcție de creșterea sau scăderea temperaturii. Această energie este legată de diferența de flux prin următoarea relație:

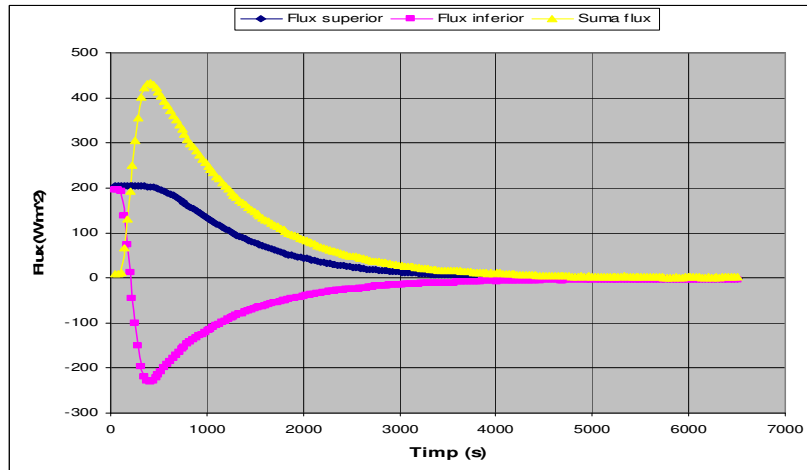


Figura 3.34. Evoluția fluxurilor în curs de determinare a căldurii specifice

$$Q = \int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} \Delta\varphi \, dt \quad [\text{J}/\text{m}^2] \quad (3.76)$$

$$Q = C \cdot \Delta\theta$$

unde  $\Delta\theta$  corespunde variațiilor de temperatură dintre starea inițială și starea finală. Se calculează apoi capacitatea termică a probei cu următoarea relație:

$$C = \frac{\int_{t_{\text{initial}}}^{t_{\text{final}}} \Delta\varphi \cdot dt}{\Delta\theta} \quad [\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}] \quad (3.77)$$

Cunoscând masa volumică a probei și grosimea ei, se determină căldura masică cu următoarea relație:

$$c = \frac{C}{\rho \cdot S \cdot l} \quad [\text{J}/\text{Kg} \cdot \text{K}] \quad (3.78)$$

unde  $\rho$  reprezintă masa volumică a probei și  $l$  grosimea ei.

### 3.9.3. Determinarea efuzivității termice și a difuzivității termice

Difuzivitatea termică caracterizează aptitudinea unui material de a găzdui o tensiune termică nouă. Ea este direct proporțională cu conductivitatea termică și invers proporțională cu căldura specifică și masa volumică.

Efuzivitatea termică a unui material este proprietatea termică care caracterizează aptitudinea materialului de a „smulge” căldură.

Este important de reținut că dacă  $a$  este mai mare, căldura se propagă mult mai rapid, și cu cât  $b$  este mai mare materialul „absoarbe” căldură.

Parametrii difuzivității și efuzivității termice pot fi calculați pornind de la următoarele relații [6]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.79)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.80)$$

#### 3.9.4. Determinarea emisivității

Emisivitatea reprezintă aptitudinea unui material de a emite căldura. Suprafețele cu o emisivitate mai scăzută cer unele condiții mai stabile, decât suprafețele cu emisivitate ridicată, pentru un control cât mai precis al temperaturii. Emisivitatea este în strânsă legătură cu reflexivitatea care reprezintă disponibilitatea materialului de a reflecta căldura (emisivitate + reflexivitate = 1).

Măsurarea emisivității amestecurilor asfaltice s-a realizat cu echipamentele specifice acestui tip de măsurători, care se află în dotarea Laboratorului LAMTI de la Universitățile d'Artois – Béthune, figura 3.35.



Figura 3.35. Determinarea emisivității pe amestecurile asfaltice în cadrul laboratorului din instituția gazdă

Echipamentul pentru măsurarea emisivității materialelor metalice și nemetalice, se compune dintr-un generator de radiație ultravioletă. O sferă în interiorul căreia se descompune radiația emisă de materialul supus măsurării, pe cele două direcții caracterizate în coordonate sferice de unghiul zenital  $\theta$  și azimutal  $\varphi$ , definindu-se astfel intensitatea de radiație cu ajutorul unui aparat care determină nivelul de emisivitate influențat de temperatura mediului de măsurare.

Metodologia de măsurare a emisivității materialelor cu ajutorul standului descris anterior se desfășoară respectând anumiți pași: pentru a avea o precizie ridicată a fiecărei probe de material supusă măsurării se realizează pentru prima dată o măsurare a emisivității mediului ambiant în care se desfășoară măsurătorile la o

temperatură constantă (21 °C). În a doua etapă se verifică stabilitatea sistemului cu ajutorul unui etalon, iar în ultima etapă se plasează proba a cărei emisivitate se dorește a fi evaluată.

### 3.10. Rezultate experimentale obținute pe mixturile asfaltice din Franța

În tabelul 3.5, sunt prezentate rezultatele experimentale privind proprietățile termo-fizice pe mixturile asfaltice din Franța [63].

Tabelul3.5

| Proprietățile termo-fizice obținute |                                       |                                |                      |                            |                   |                 |            |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|------------|
| Nr. crt.                            | Tip probă                             | $\rho$<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] | $\lambda$<br>[W/m·K] | $Q$<br>[J/m <sup>2</sup> ] | $C$<br>[J/m·K]    | $c$<br>[J/Kg·K] | $\epsilon$ |
| 1                                   | BBSG 0/14<br>(B.A.16)                 | 2238                           | 1,230                | $6,36 \cdot 10^5$          | $1,30 \cdot 10^5$ | 1170            | 0,953      |
| 2                                   | BBSG 0/20<br>(B.A.D.25)               | 2178                           | 0,977                | $5,73 \cdot 10^5$          | $1,16 \cdot 10^5$ | 1070            | 0,959      |
| 3                                   | BBSG 0/14<br>(B.A.16)<br>10% cenușă   | 2163                           | 0,697                | $3,88 \cdot 10^5$          | $8,08 \cdot 10^4$ | 747             | 0,941      |
| 4                                   | BBSG 0/14<br>(B.A.16)<br>15% cenușă   | 2310                           | 0,803                | $5,35 \cdot 10^5$          | $1,04 \cdot 10^5$ | 902             | 0,938      |
| 5                                   | BBSG 0/20<br>(B.A.D.25)<br>10% cenușă | 2430                           | 0,806                | $4,75 \cdot 10^5$          | $9,24 \cdot 10^4$ | 761             | 0,928      |
| 6                                   | BBSG 0/20<br>(B.A.D.25)<br>15% cenușă | 2107                           | 0,702                | $4,87 \cdot 10^5$          | $9,40 \cdot 10^4$ | 893             | 0,978      |
| 7                                   | GB 0/20 C3                            | 2295                           | 0,630                | $8,83 \cdot 10^5$          | $2,46 \cdot 10^5$ | 1270            | 0,944      |
| 8                                   | BBM 0/10                              | 2310                           | 1,025                | $5,73 \cdot 10^5$          | $1,07 \cdot 10^5$ | 971             | 0,962      |
| 9                                   | BBSG 0/10                             | 2325                           | 1,173                | $6,02 \cdot 10^5$          | $1,22 \cdot 10^5$ | 1105            | 0,947      |
| 10                                  | EME 0/14                              | 2400                           | 0,925                | $5,52 \cdot 10^5$          | $1,04 \cdot 10^5$ | 907             | 0,951      |
| 11                                  | BBTM 0/6                              | 2343                           | 1,060                | $5,97 \cdot 10^5$          | $1,18 \cdot 10^5$ | 1122            | 0,952      |
| 12                                  | BBUM 0/6                              | 2320                           | 0,927                | $5,48 \cdot 10^5$          | $9,72 \cdot 10^4$ | 827             | 0,957      |

În **anexa 1** este prezentat un exemplu de măsurători pentru determinarea proprietăților termo-fizice pentru un tip de mixtură asfaltică.

După cum se poate observa și din figurile 3.38, 3.39, caracteristicile termice rezultate în urma măsurătorilor pentru dozajele ce au în componență cenușă de termocentrală sunt superioare față de dozajele ce nu conțin cenușă.

**Aceste caracteristici le consider superioare strict pentru domeniul în care le studiezi, dar prin valoare numerică scăzută.**

Temperaturile la care s-au determinat proprietățile termo-fizice pe probele de mixtură asfaltică au fost:

– pentru conductivitatea termică cuprinsă între 15 °C la partea inferioară a probei, și 25 °C la partea superioară, figura 3.40;



– pentru căldura specifică cuprinsă între 25 °C la partea inferioară și 25 °C la partea superioară, figura 3.41.

Evoluția fluxului pentru determinarea conductivității termice, figura 3.42, 3.43, și a căldurii specifice, figura 3.44, sunt prezentate pentru tipul de mixtură asfaltică BBSG 0/14.

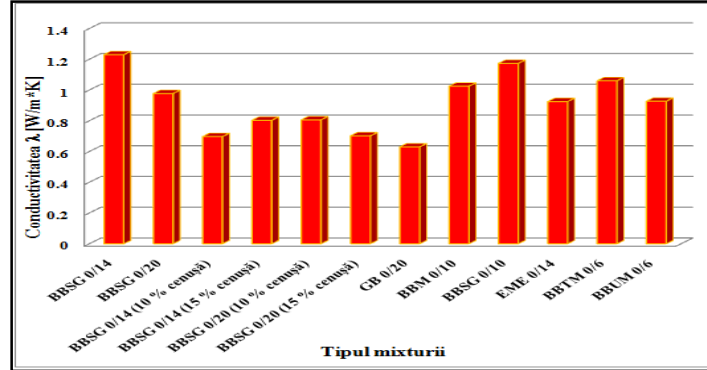


Figura 3.38. Conductivitatea termică rezultată

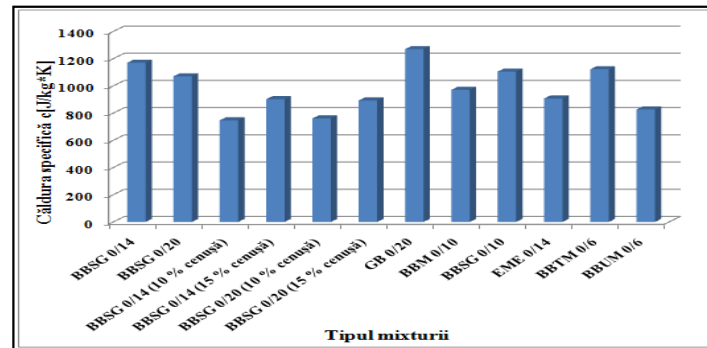


Figura 3.39. Căldura specifică rezultată

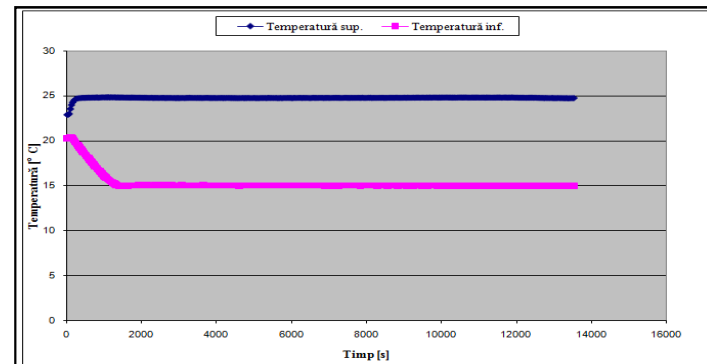


Figura 3.40. Variația de temperatură pentru determinarea conductivității termice pentru mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14

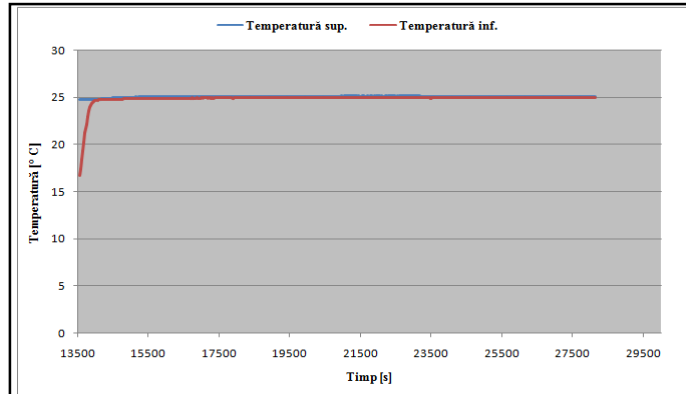


Figura 3.41. Variația de temperatură pentru determinarea căldurii specifice pentru mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14

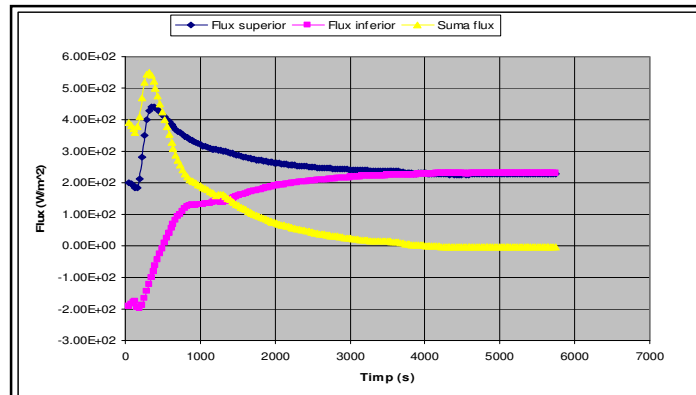


Figura 3.42. Evoluția fluxului în curs de determinare a conductivității termice pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14

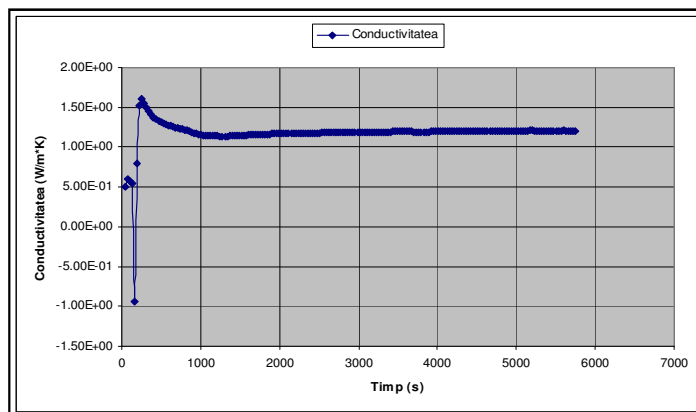


Figura 3.43. Conductivitatea termică determinată pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14

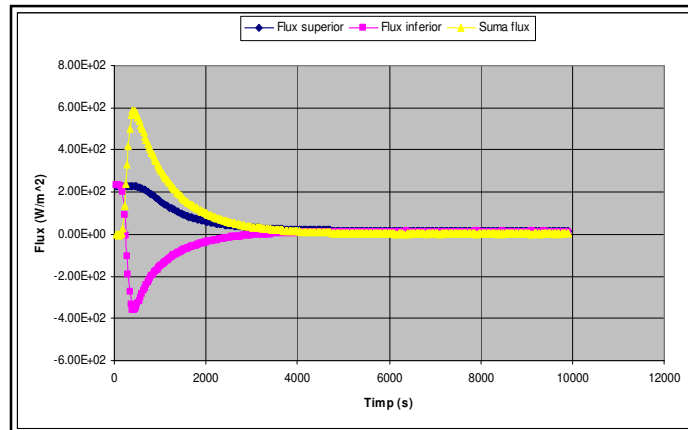


Figura 3.44. Evoluția fluxului în curs de determinare a căldurii specifice pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14

Deoarece straturile din asfalt sunt supuse în timpul verii la fluctuații mari de temperatură, atunci când plouă ele absorb o anumită cantitate de apă. În ceea ce privește influența absorbției de apă a mixturilor asfaltice asupra proprietăților termo-fizice se poate spune că acestea prezintă o valoare inferioară, conform tabelului 3.6.

Tabelul 3.6

Proprietățile termo-fizice ale mixturilor asfaltice studiate în stare uscată și umedă

| Nr. crt. | Tip proba                              | $\rho$<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] | $\lambda$<br>[W/m·K] | $Q$<br>[J/m <sup>2</sup> ] | $C$<br>[J/m·K]    | $c$<br>[J/Kg·K] | $\varepsilon$ |
|----------|--|--------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| 1        | BBSG 0/14<br>(B.A.16)<br>mediu uscat   | 2219                           | 1,230                | $6,36 \cdot 10^5$          | $1,30 \cdot 10^5$ | 1170            | 0,953         |
| 2        | BBSG 0/14<br>(B.A.16)<br>mediu umed    | 2233                           | 1,380                | $6,75 \cdot 10^5$          | $1,39 \cdot 10^5$ | 1250            | 0,944         |
| 3        | BBSG 0/20<br>(B.A.D.25)<br>mediu uscat | 2178                           | 0,977                | $5,73 \cdot 10^5$          | $1,16 \cdot 10^5$ | 1070            | 0,959         |
| 4        | BBSG 0/20<br>(B.A.D.25)<br>mediu umed  | 2215                           | 1,240                | $7,51 \cdot 10^5$          | $1,52 \cdot 10^5$ | 1600            | 0,962         |

Evoluția fluxului pentru determinarea conductivității termice, figura 3.45, 3.46, și a căldurii specifice, figura 3.47, sunt prezentate pentru tipul de mixtură asfaltică BBSG 0/14 în stare umedă.

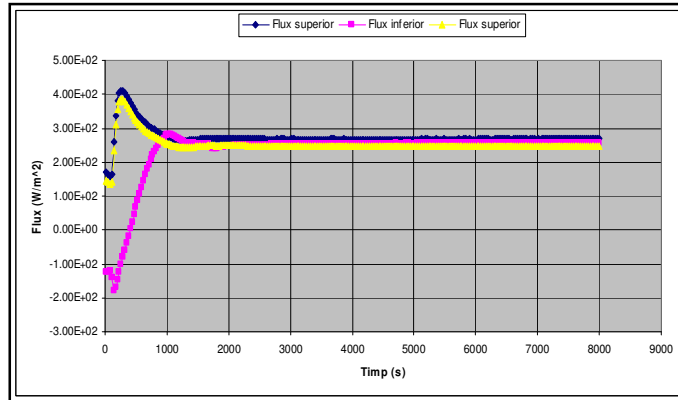


Figura 3.45. Evoluția fluxului în curs de determinare a conductivității termice pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14 în stare umedă

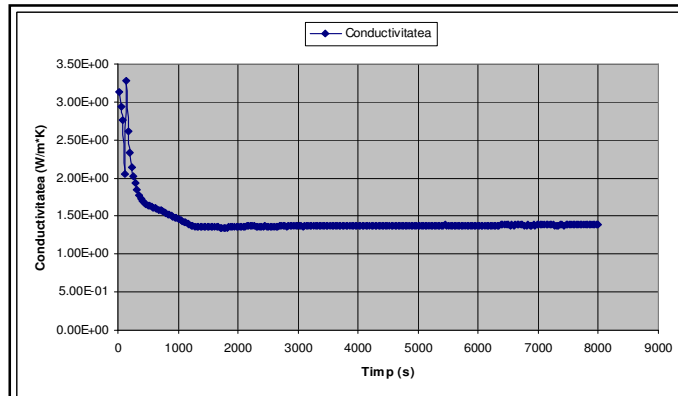


Figura 3.46. Conductivitatea termică determinată pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14 în stare umedă

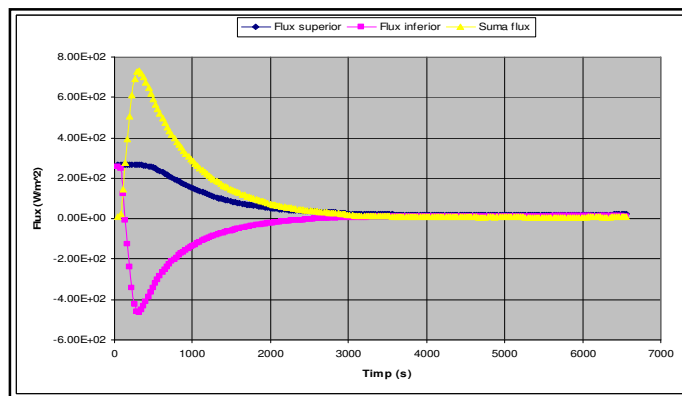


Figura 3.47. Evoluția fluxului în curs de determinare a căldurii specifice pe mixtura asfaltică de tip BBSG 0/14 în stare umedă

### **3.11. Studiu de caz. Modelarea distribuției de temperatură a amestecurilor asfaltice cu ajutorul proprietăților termo-fizice pentru aplicațiile de testare din laborator**

Caracterizarea materialului prin testele de laborator efectuate pe amestecurile asfaltice oferă previziuni de performanță semnificative pentru îmbrăcămintele asfaltice numai în cazul în care temperatura materialului este corect luată în considerare. În acest subcapitol se prezintă un model analitic care, pe baza proprietăților termo-fizice, poate prezice într-un mod corect distribuția temperaturii în amestecul asfaltic. De asemenea se prezintă structura organizatorică de testare în laborator, concepută pentru a valida ca și model determinarea temperaturii. Măsurătorile de temperatură sunt efectuate pe un eșantion de probe cilindrice la momente diferite de timp, după ce proba este supusă de la o stare de echilibru scăzută la o stare de echilibru ridicată, prin plasarea ei în incinta de mediu, în funcție de încercarea la care urmează să fie supusă. Astfel se poate realiza și dezvolta un model ca un instrument practic ce să ofere o estimare fiabilă referitoare la timpul necesar de care este nevoie pentru a se ajunge la o temperatură de testare specifică pentru eșantioanele din amestecul asfaltic supuse diverselor încercări de laborator.

#### **3.11.1. Program experimental**

Se prezintă un studiu de laborator asupra distribuției temperaturii în amestecurile asfaltice, studiu ce relevă timpul necesar în care probele de amestecul asfaltic ajung la o temperatură corectă necesară încercărilor la care urmează să fie supuse, astfel ca rezultatele ce se obțin în urma acestora să nu aibă un ecart mare de valoare între limita inferioară și superioară prevăzută în stas pentru același dozaj de amestecul asfaltic. Astfel, cu ajutorul proprietăților termo-fizice, se pot urmări procesele evolutive complexe în timpul expunerii probelor de amestecul asfaltic la temperaturi ridicate și temperaturi scăzute pe întreg ciclul duratei de viață și se poate reduce timpul de analiză în laborator [61].

De obicei, în laborator, probele cilindrice sunt utilizate cel mai mult pentru diferite teste, în urma cărora se determină proprietățile fizico-mecanice. Datorită acestui fapt, s-au studiat distribuția și validarea temperaturii model asupra unei probe cilindrice standard. După compactarea cu presa giratorie, proba a fost pregătită pentru poziționarea termocuplurilor de temperatură, termocupluri ce au fost poziționate la suprafața cilindrului pe partea superioară, pe suprafața laterală și în interiorul acestuia prin realizarea unor șlițuri cu adâncimi de pătrundere pe fețele laterale de 10 mm, 25 mm, 40 mm, 50 mm. Ca și caracteristici importante la realizarea acestui tip de amestecul asfaltic se menționează faptul că conținutul de bitum a fost de 4,9 %, volumul de goluri de 5,8 % și densitatea de 2440 kg/m<sup>3</sup>.

Pentru controlul temperaturii de testare, proba a fost introdusă în interiorul unei camere de mediu de măsurare. Temperatura din interiorul camerei de testare a fost controlată prin conectarea la o baie termostat a unui schimbător de căldură montat într-un plan adiacent camerei de testare. Diferența temperaturii aerului dintre camera de testare și plan a rezultat cu variații de  $\pm 0,001$  °C .

Principalul obiectiv al experimentului este de a monitoriza schimbările de temperatură în timp la diferite puncte în proba din asfalt, înainte ca aceasta să fie

supusă încercărilor fizico-mecanice. Pentru atingerea acestui obiectiv proba cilindrică a fost condiționată la o temperatură specificată de 3.5 °C timp de 10 ore, pentru a i se asigura distribuția temperaturii uniforme la o stare de echilibru, după care a fost mutată într-o altă cameră de mediu, la o temperatură mai mare pentru o stare de echilibru de 36 °C. Pentru a minimiza pierderea de temperatură în timpul mutării, proba a fost învelită într-un material textil, material păstrat la aceeași temperatură ca și proba. Odată ce proba a fost introdusă în camera de testare și s-au poziționat și conectat termocuplurile, s-a început colectarea datelor.

### 3.11.2. Ecuțiile de generare

Procesul de transfer într-un solid este descris de ecuația tranzitorie de energie [8]. În sistemul tridimensional cartezian ecuația se scrie sub următoarea formă:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{d^3 u}{dt^3} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.81)$$

unde: T - temperatura;  
 $k_x, k_y, k_z$  - conductivitatea termică;  
 x, y, z - direcțiile coordonatelor respective;  
 $\rho$  - densitatea probei;  
 c - căldura specifică;  
 u - energia internă generată pe unitatea de volum;  
 t - timpul.

Pentru sistemul tridimensional de coordonate cilindrice, ecuația rezultă sub forma:

$$k_r \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_\varphi \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + k_z r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{d^3 u}{dt^3} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.82)$$

unde:  $k_r, k_\varphi, k_z$  - conductivitatea termică, r,  $\varphi, z$  - coordonatele spațiale după direcțiile respective.

Pentru a putea determina cât mai corect variațiile de temperatură pe proba cilindrică, aceasta se consideră poziționată în camera de încercare la intersecția dintre un plan infinit cu lățimi cunoscute cu un cilindru lung infinit cu rază cunoscută, conform figurii 3.48. Uneori pentru reducerea frecării suprafeței de contact dintre peretele plan și probă, se poate folosi un disc din teflon la partea de jos pe tot parcursul măsurării. În funcție de grosime și de proprietățile fizico-termice proba ar putea deveni izolanță la partea inferioară, și în acest caz ar putea fi considerată ca intersecție a jumătate de perete plan cu un cilindru infinit.

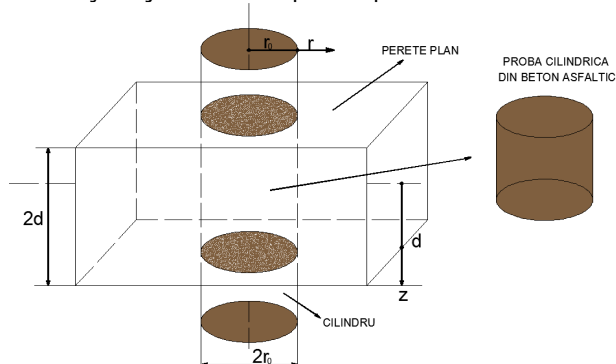


Figura 3.48. Intersecția dintre proba cilindrică și peretele infinit plan

În cazul în care conductivitatea termică se presupune a fi uniformă și întrucât nu există nici o generare de căldură în interiorul probei din beton asfaltic, ecuația diferențială (3.82) pentru un perete plan infinit se poate simplifica astfel:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.83)$$

$a = \frac{k}{\rho c}$  - difuzivitatea termică a mixturii asfaltice

- pentru cilindru ecuația (3.83) poate fi simplificată astfel:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.84)$$

Ținând cont de legea lui Fourier, mărimea adimensională a conducției de căldură este exprimată astfel:  $F_0 = \frac{at}{d_0^2}$ , iar numărul Biot este exprimat  $Bi = \frac{hd_0}{k}$ , ( $d_0$  este jumătate din grosimea peretelui plan, sau raza cilindrului).

Pentru soluțiile propuse, întotdeauna temperatura este normalizată:

$$\text{– pentru peretele plan, } \theta(z, F_0) = \frac{T(z, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty};$$

$$\text{– pentru cilindru, } \theta(R, F_0) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty}.$$

Adâncimea este normalizată ca  $R = \frac{r}{r_0}$ , unde  $r_0$  raza cilindrului, astfel ecuația (3.83) și (3.84) poate fi scrisă sub următoarea formă:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial F_0} \quad (3.85)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial F_0} \quad (3.86)$$

Pentru acest experiment, căldura de conducție  $h$  s-a considerat constantă datorită temperaturii constante din camera de încercare, astfel soluțiile ecuațiilor (3.85) și (3.86), pot fi approximate folosind metoda de separație a variabilelor, rezultând pentru cilindru următoarele relații [69], [84]:

$$\theta(R, F_0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\lambda_n^2 F_0} J_0 \left( \lambda_n \frac{r}{r_0} \right) \quad (3.87)$$

$$\lambda_n \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} = Bi \quad \text{și} \quad A_n = \frac{2J_1(\lambda_n)}{\lambda_n [J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)]} \quad (3.88)$$

unde:  $J_0(\lambda_n)$  și  $J_1(\lambda_n)$  sunt primii doi termeni ai funcției Bessel.

Temperatura normalizată  $\theta(z, r, t)$  pentru cilindru de coordonate  $(z, r)$  și timp, poate fi exprimată în acest experiment ca o multiplicare de rezultate pentru un perete plan infinit și cilindru, astfel:

$$\theta(z, r, t) = \theta(z, t)_{\text{plan}} \times \theta(r, t)_{\text{cilindru}} \quad (3.89)$$

Dacă  $F_0 > 0,2$ , ecuația (7), poate fi exprimată într-un singur termen ( $n=1$ ), care rezultă din precizie în proporție de 2 % [26].

În funcție de valorile pe care le pot lua parametrii  $\lambda$  și [81], ecuația (3.88) poate fi rezolvată folosind metoda Newton-Raphson.

### 3.11.3. Rezultate și interpretări

Valorile măsurate, prezentate în figura 3.49, indică faptul că în proba din asfalt temperatura crește brusc în diverse puncte, încă de la începutul măsurătorilor, apoi continuă cu o creștere doar la un gradient scăzut, rezultând într-un timp extins ajungerea la o stare de echilibru a temperaturii. Temperatura la suprafața superioară crește cel mai rapid, și ca punct de interes când se apropie de centrul probei, gradientul de temperatură rămâne constant.

În cele din urmă, pentru ca timpul să fie suficient, toate punctele din cadrul modelului trebuie să crească până la temperatura de echilibru, fiind la același nivel cu temperatura ambiantă. Previziunile prezentate în figura 3.50, se bazează pe

proprietățile termice determinate pentru dozajul respectiv de beton asfaltic. Odată ce temperaturile de început și final au fost fixate, temperatura în orice moment depinde de trei parametri: conductivitatea termică  $k$ , căldura specifică  $c$  și căldura de convecție  $h$ .

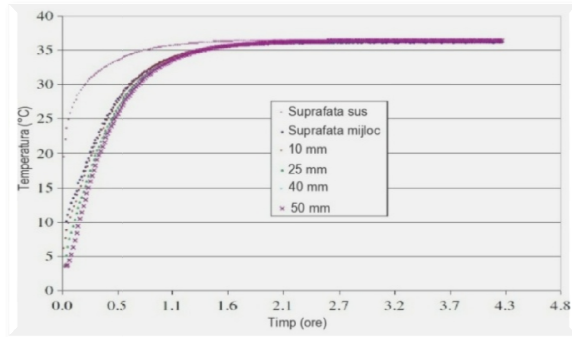


Figura 3.49. Temperatura măsurată

Pentru a pune în evidență influența proprietăților termo-fizice asupra distribuției temperaturii în masa betonului asfaltic, conductivitatea termică a fost considerată variabilă de la  $1,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ... $2,88 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , pe baza măsurătorilor efectuate. Așa cum se observă și din figura 3.51, magnitudinea conductivității termice are un efect semnificativ asupra distribuției de temperatură în betonul asfaltic. La valori mai mari ale conductivității termice, rata de temperatură crește cel mai rapid, lucru normal așteptat.

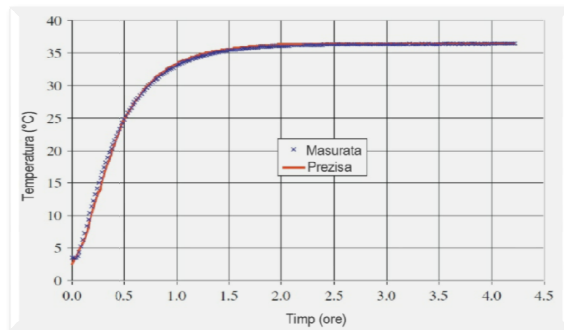


Figura 3.50. Temperatura măsurată vizavi de predicția acesteia în centrul probei folosind proprietățile termo-fizice

Variația temperaturii în funcție de timp a fost măsurată în diferite puncte pe proba de mixtură asfaltică pentru a putea implementa un model de simulare a relației temperatură-timp cu ajutorul proprietăților termo-fizice, acesta putându-se dezvolta pe baza schemei logice prezentate în figura 3.52, cu ajutorul unui program de calcul.

S-a constatat că modelul de analiză ar putea prezice fiabil variația de temperatură și de distribuție. Totodată în funcție de modelul geometric al probelor, dimensiunile și proprietățile termo-fizice, se afectează în mod semnificativ relația timp-temperatură.



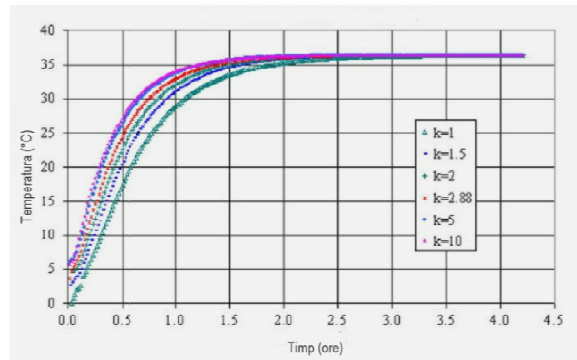


Figura 3.51. Temperatura prezisă pentru diferite conductivități termice

Acest studiu experimental a fost prezentat pentru cazul în care temperatura crește, abordarea putând fi aplicată în caz similar și pentru temperaturi foarte scăzute sau foarte ridicate.

Validarea în continuare a tehnicii propuse pentru determinarea temperaturii model, necesită utilizarea unor dozaaje din mixtură asfaltică cu diferite sorturi, respectiv diferite procente de bitum, deoarece toate aceste proprietăți termo-fizice au un impact ridicat asupra căldurii de transfer.

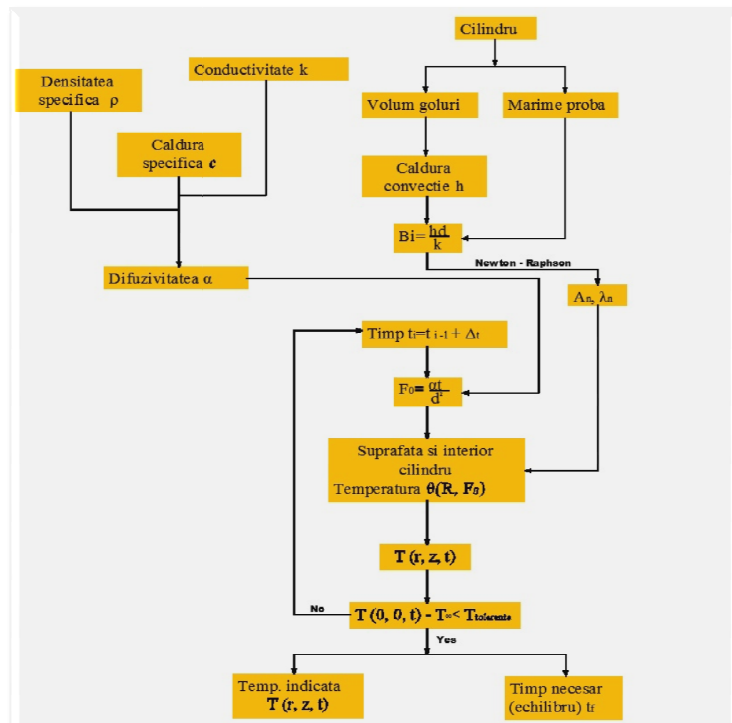


Figura 3.52. Structura organizatorică de simulare a temperaturii (Q.Xu, M. Solaimanian)

### 3.12. Concluzii

Studiile efectuate privind proprietățile termo-fizice ale amestecurilor de asfalt au fost posibile datorită dezvoltării aparatului de măsurare de care am dispus în cadrul laboratorului de inginerie civilă al Universității d'Artois Bethune, Franța.

În cadrul acestui capitol este prezentat modul de funcționare și dezvoltare a aparatului de măsurare pentru caracteristicile termice, cât și relațiile fundamentale ce descriu fenomenul de transfer termic (legea lui Fourier, ecuația de căldură). De remarcat este faptul că aparatul s-a dezvoltat treptat în funcție de materialele care urmau să fie testate.

Mixturile de asfalt utilizate în Franța, cât și amestecurile realizate cu cenușă de termocentrală, pe care am efectuat aceste măsurători permit formularea următoarelor concluzii:

- utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt ajută în mod semnificativ la obținerea unor rezultate superioare privind proprietățile termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate, emisivitate);
- bitumul, componentă esențială în masa amestecului, este factorul decizional în ceea ce privește absorbția de căldură. Cu cât procentul de bitum este ridicat, proprietățile termo-fizice sunt inferioare, lucru ce favorizează la pierderea stabilității amestecului;
- sensibilitatea asfaltului pare să fie mult mai mare la variația capacității volumetrice de căldură specifică a materialului decât la variația conductivității termice. Capacitatea volumetrică de căldură a masei termice constituită în stratul de asfalt influențează puternic comportamentul termic al stratului în cazul în care transferul de căldură se realizează dominant prin conducție pură. Pe de altă parte, temperatura minimă a asfaltului la suprafața de rulare este dependentă de condițiile de flux ambiental (viteza și direcția vântului), deoarece răcirea prin convecție afectează transferul de căldură la suprafață. Teoretic, cea mai mare viteză a vântului determină cel mai mare coeficient de transfer termic prin convecție la suprafața asfaltului, ducând la temperaturi mai mici de suprafață. O cantitate semnificativă de energie primită de suprafața de asfalt se datorează incidenței radiației solare, deși unele câștiguri de căldură convectivă apar în momente când temperatura aerului ambiental este mai mare decât temperatura suprafeței de asfalt;
- cu cât amestecul de asfalt prezintă o densitate ridicată, proprietățile termice prezintă valori superioare;
- dacă gradul de compactare este necorespunzător, conductivitatea termică scade, iar căldura specifică crește;
- cu cât conductivitatea termică și căldura specifică sunt superioare, rezultă că pentru temperaturi ridicate amestecul de asfalt rezistă solicitărilor din trafic, astfel prelungindu-se durata de viață a drumului;
- impactul emisivității asupra stratului de asfalt este semnificativ mai mare în lunile de vară când asfaltul atinge temperaturi maxime, decât în timpul lunilor de iarnă, când sunt înregistrate temperaturi minime ale acestuia. Schimbările de temperatură din timpul verii sunt aproape de două ori mai mari decât în lunile de iarnă, astfel asfaltul emite mai puțină energie în timpul iernii, deoarece diferența dintre temperatura aerului și suprafața de asfalt este mai mică. Această diferență de temperatură este mult mai mare în lunile de vară când stratul de asfalt se încălzește considerabil prin radiația solară.

## **4. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA UNOR MIXTURI ASFALTICE, PRIN STUDIAREA ȘI UTILIZAREA DE MATERIALE COMPOZITE**

### **4.1. Studiul caracteristicilor materialelor rutiere compozite**

La construcția, reabilitarea și întreținerea drumurilor se utilizează mari cantități de materiale. Principalele materiale folosite la execuția straturilor din structurile rutiere sunt agregatele naturale și lianții.

Mixturile asfaltice sunt materiale compozite ale căror proprietăți sunt dependente de caracteristicile materialelor componente: agregate, bitum, filer, produși de adaos. Pentru cunoașterea produsului finit se pornește de la studiul aprofundat al fiecărui material component și al influenței pe care acesta o exercită prin caracteristicile sale. Rolul fiecăruia din producții de bază nu este legat de procentul în care acesta intră în amestec. Bitumul deși reprezintă doar 4,0 % - 7,0 %, prin proprietățile sale fizico-mecanice, chimice și reologice, definește comportarea mixturii în domeniul elastic, vâsco-elastic sau vâscos în funcție de temperatură. În amestec el joacă rolul fiind un liant. Caracteristicile agregatelor datorate rocii de proveniență, sau procesului de prelucrare, au un rol important în realizarea performanțelor finale având în vedere faptul că scheletul mineral constituie suportul care preia încărcările mecanice. Afinitatea dintre bitum și agregat, calitatea materialelor de adaos, în special a părților fine sunt, de asemenea, factori care influențează caracteristicile finale ale mixturii.

Astfel, mixtura asfaltică poate fi caracterizată ca un material compozit, constituit din trei faze:

- faza solidă: agregatele și eventualii aditivi minerali sau fibră;
- faza lichidă sau vâsco-elastică: liantul bituminos;
- faza gazoasă: golurile de aer.

Mixtura asfaltică este deci un material compozit, caracteristicile fiecărui component în parte influențând răspunsul final al amestecului. Mixturile asfaltice au proprietăți elastice, vâscoase și plastice. Comportarea mixturilor este complicată din cauza existenței fenomenelor plastice și depinde foarte mult de viteza de deformare: cu cât viteza de deformare este mai mare, comportarea elastică devine mai importantă decât cea vâscoasă, și invers. Pe de altă parte, din cauza proprietăților generale ale lianților, proprietățile mixturilor asfaltice depind foarte mult de temperatură: la temperaturi joase caracterul elastic este mai pronunțat decât cel vâscos, și invers.

Mixtura asfaltică se comportă ca un material liniar vâscoelastic (atunci când deformațiile sunt mici) ce posedă deopotrivă comportarea elastică a unui solid și comportarea vâscoasă a unui lichid. Datorită componente vâscoase, comportarea materialelor vâscoelastice este dependentă de timp și cu cât timpul este mai mare cu atât curgerea este mai mare.

După cum este precizat și în capitolele anterioare, în construcția de drumuri, straturile structurii rutiere suple și mixte din mixtura asfaltică sunt cel mai mult expuse la solicitări, cauza majoră pe de-o parte fiind traficul greu și pe de altă parte condițiile climaterice. Din această cauză atunci când se proiectează un tip de mixtură asfaltică trebuie să se țină cont de temperatura cea mai scăzută și cea mai ridicată a zonei, respectiv de trafic.

Din punct de vedere termic, condițiile de mediu la care sunt supuse structurile rutiere continuu în fazele de construcție și reparație, precum și în timpul duratei lor de serviciu, pot fi combătute printr-o cunoaștere aprofundată a distribuției temperaturii în fiecare strat component al acesteia. Fluctuațiile de temperatură ale aerului, zilnic și sezonier, intensitatea radiației solare, materialele ce alcătuiesc straturile structurii rutiere, geometria acestora, condițiile de suprafață și precipitațiile, afectează în mod semnificativ stabilitatea structurii rutiere.

Straturile rutiere cele mai supuse acțiunii acestor factori sunt stratul de uzură și stratul de legătură, datorită acestui fapt în acest capitol se prezintă pe de o parte modul de cunoaștere mai aprofundat al distribuției temperaturii în aceste straturi care ajută la o specificație mai sofisticată a lianților hidrocarbonați și a agregatelor prin creșterea calității acestora, iar pe de altă parte se încearcă diminuarea acestei distribuții a temperaturii prin conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice care să prezinte unele caracteristici termice superioare. Astfel, în urma unor studii aprofundate privind aceste caracteristici termice, prin utilizarea unor materiale compozite cum este cenușa de termocentrală, și prin înlocuirea parțială și totală a fillerului în masa mixturii asfaltice, variațiile de temperatură pot fi diminuate.

Pornind de la aceste ipoteze enumerate în cadrul laboratorului de drumuri al Facultății de Construcții din Timișoara, s-au conceput și realizat o serie de dozaje din mixtură asfaltică cu diferite procente de bitum și cenușă de termocentrală. Totodată, pentru aceste mixturi asfaltice s-au determinat proprietățile termo-fizice în laboratorul Universității d'Artois din Franța. După determinarea și interpretarea rezultatelor privind proprietățile termo-fizice, prin încercările fizico-mecanice realizate în țară s-a urmărit influența acestora asupra mixturilor asfaltice concepute.

#### **4.1.1. Utilizarea cenușii de termocentrală în straturile de asfalt**

În condițiile în care resursele de materii prime sunt pe cale de epuizare își face tot mai mult loc ideea necesității creării unor tehnici și elaborării unor tehnologii care să determine schimbări radicale în metodele de producție industrială, utilizând cât mai complet resursele secundare, și crescând astfel gradul de recirculare și folosire succesivă a resurselor prin adoptarea așa-numitelor tehnologii fără deșeuri.

Știința și tehnica vor putea astfel preîntâmpina criza determinată de epuizarea resurselor de materii prime, prin asigurarea unui grad înalt de reciclare și folosire succesivă a unor materii prime, prin utilizarea integrală a resurselor secundare și crearea unor procese tehnologice care să ducă la o reducere substanțială a volumului de deșeuri, la trecerea treptată de la procese tehnologice liniare la așa-numitele „cicluri închise”, asemănătoare sistemelor din natură.

Cenușile de la CET-uri (Centrală Electrică de Termoficare) reprezintă în prezent și în perspectivă principalul deșeu industrial care, datorită compoziției chimice și proprietăților hidraulice, pot constitui surse de noi materii prime valorificabile în diverse domenii.

Dezvoltarea fără precedent a cercetărilor, atât pe plan mondial cât, și la nivel național, au determinat apariția de noi produse și tehnologii bazate pe concepte integrate, de mare eficiență tehnico-economică și cu implicații asupra extinderii sferei de cunoaștere sub multiple aspecte ale acestui deșeu industrial.

Cenușa de termocentrală reprezintă un deșeu cu un puternic impact ecologic datorită cantităților mari în care rezultă și pentru a căror depozitare sunt scoase din circuitul agricol suprafețe mari de teren. Există numeroase studii privind caracterizarea și valorificarea cenușilor de termocentrală din țara noastră, ca adaos la cimenturile portland [52].

Ideea utilizării cenușii de termocentrală în locul fillerului în amestecurile de asfalt nu este un concept nou [3]. Utilizarea sa în amestecurile de asfalt a fost investigată de mulți oameni de știință, iar concluziile cercetărilor obținute pot fi rezumate după cum urmează:

- **Carpenter** (1952) a determinat că cenușile de termocentrală din clasa F conduc la un efect excelent asupra rezistenței la compresiune pentru un exemplar de probe imersate în apă [20].

- **Warden** și alții (1952) au afirmat că cenușa este un material de umplere corespunzător în amestecurile de asfalt, astfel introducerea ei asigură o stabilitate mai mare, o rezistență mai bună la umiditate și flexibilitate [77].

- **Zimmer** (1970) a analizat efectul conținutului de carbon din cenușă. Rezultatele sale au relatat că probele care au în compoziție cenușă au o stabilitate mai mare după ce au fost imersate în apă [83].

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

- **Sankaran și Rao** (1973) au făcut o comparație între utilizarea cenușii și alte materiale de umplere în amestecurile de asfalt, cum ar fi argila și praful rezultat de la agregate. Ei au subliniat că la un conținut de cenușă de 2 % s-a prevăzut cea mai mare stabilitate față de celelalte materiale de umplere [70].

- **Rosner** și alții (1982) au folosit cenușa ca material de umplere în mixtura asfaltică, arătând astfel că probele își păstrează rezistența, iar suplimentar, prin adăugarea de cenușă, rezistența crește. În majoritatea cazurilor ei au considerat că rezistența mixturii asfaltice ce conține cenușă ca material de umplere este mai mare față de utilizarea ca materiale de umplere materiale naturale.

- Într-un studiu efectuat de către **Suheibani** (1986), s-a analizat modul de acoperire al particulelor de cenușă în funcție de mărime, remarcând astfel că un surplus de cenușă în amestec afectează vâscozitatea asfaltului. El a examinat de asemenea efectul proprietăților cenușii zburătoare, declarând astfel că utilizarea cenușii în mixtura asfaltică ar putea conduce la economii considerabile, dar fără cerința suplimentară de liant în amestec.

Analizând aceste aspecte din mai multe puncte de vedere cum ar fi: economic și de mediu, am realizat câteva experimente referitoare la posibilitatea înlocuirii totale sau parțiale a fillerului din mixtura asfaltică cu cenușa de termocentrală.

## 4.2. Caracteristicile materialelor utilizate la prepararea mixturilor asfaltice

### 4.2.1. Agregatele

Agregatele joacă un rol important în performanțele structurilor asfaltice, în care intră în proporție de 85 ... 90 % din greutatea mixturii și reprezintă 75 ... 80 % din volumul acesteia. Prin urmare, cunoașterea proprietăților agregatelor este fundamentală în proiectarea unor mixturi asfaltice de calitate înaltă.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească agregatele naturale pentru a putea fi folosite la prepararea mixturilor asfaltice sunt bine definite și se referă la mărimea și forma granulelor, natura rocii de bază, granulozitatea etc. Ele trebuie să fie mai ales curate, să prezinte o bună adevizitate față de bitumul utilizat, să aibă rezistențe mecanice corespunzătoare și să reziste la uzură.

Compoziția minerală a agregatelor determină în mare parte caracteristicile proprii și modulul de comportare într-o mixtură asfaltică. Astfel, când se selectează o sursă de agregate, cercetările despre natura mineralogică a rocii pot furniza informații valoroase despre posibilitatea utilizării agregatelor pentru mixturi asfaltice. Datorită faptului că agregatele prezintă o coeziune relativ redusă, astfel încât rezistența la forfecare este dependentă în principal de frecarea internă între agregate, forma și textura lor joacă un rol important pentru atingerea încăleșării dorite. Agregatele cubice, cu textură rugoasă, prezintă o rezistență la forfecare mai mare decât agregatele rotunde, cu textură fină, figura 4.1.



Figura 4.1. Tipuri de agregate

Pe baza acestor aspecte menționate mai sus, agregatele utilizate la confecționarea probelor în cadrul laboratorului de Căi de Comunicație Terestre și Cadastru, au ca și sursă de proveniență cariera Lucareț din județul Timiș. Caracteristicile fizico-mecanice și granulozitatea realizată pe aceste agregate sunt prezentate, conform tabelor 4.1 și 4.2.

Granulozitatea reprezintă repartitia procentuală a diferitelor sorturi (elementare sau granulare) care alcătuiesc agregatul natural. Sortul elementar ( $d_{\min}$  -  $d_{\max}$ ) reprezintă agregatele care la cernere rămân pe cele două site sau ciururi consecutive din seria standardizată. Sortul ( $d_{\min}$  -  $d_{\max}$ ) reprezintă agregatele obținute în cadrul operației de sortare, conținând unul sau mai multe sorturi elementare succesive. Granulozitatea agregatelor naturale utilizate la confecționarea probelor din laborator, îndeplinește condițiile de admisibilitate conform: SR 667/01, STAS 730-89, SR 932-9/98, SR 933-2/98.

4.2 – Caracteristicile materialelor utilizate la prepararea probelor 135

Tabelul 4.1

Caracteristicile fizico-mecanice ale rocii din cariera Lucareț

| Nr. crt. | Caracteristica   | U.M.              | Rezultate obținute |        |       | Conform SR 667/01  |
|----------|--|-------------------|--------------------|--------|-------|--|
|          |  |                   | Minimă             | Maximă | Media |  |
| 1        | Densitatea   | kg/m <sup>3</sup> | 2840               | 2880   | 2860  | -  |
| 2        | Densitatea aparentă                                      | kg/m <sup>3</sup> | 2839               | 2849   | 2844  | -  |
| 3        | Compactitate   | %                 | 98,6               | 98,6   | 98,6  | -  |
| 4        | Porozitatea aparentă                                     | %                 | 2,3                | 2,9    | 2,6   | max.1 (A)<br>max.3 (B)<br>max.5 (C)<br>max.8 (D)         |
| 5        | Absorbția de apă   | %                 | 0,82               | 1,02   | 0,92  | -  |
| 6        | Rezistența la îngheț - dezgheț                           | -                 |                    |        |       |  |
|          | – coeficient de gelivitate                               | %                 | 2,60               | 2,60   | 2,60  | max. 3   |
|          | – sensibilitatea la îngheț                               | %                 | -                  | -      | -     | max. 3   |
| 7        | Rezistența la sfărâmare prin compresiune în stare uscată | %                 | 68,4               | 71,0   | 69,7  | min.70 (A)<br>min.67 (B)<br>min.65 (C)<br>min.60 (D)     |
| 8        | Rezistența la compresiune în stare uscată                | N/mm <sup>2</sup> | 138                | 158    | 148   | min.160 (A)<br>min.140 (B)<br>min.120 (C)<br>min.100 (D) |
| 9        | Uzura Los Angeles (sort 40 - 63)                         | %                 | 11,1               | 13,5   | 12,3  | max.16 (A)<br>max.18 (B)<br>max.22 (C)<br>max.25 (D)     |
| 10       | Clasa rocii  | B                 |                    |        |       |  |
| 11       | Natura petrografică                                      | Bazalt            |                    |        |       |  |

Tabelul 4.2

Granulozitatea pentru fiecare sort

| Nr. crt. | Caracteristică                         | Sită (mm)                           | Sort   |        |        |         |
|----------|--|-------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
|          |  |                                     | 0 - 4  | 4 - 8  | 8 - 16 | 16 - 25 |
| 1        | Granulozitatea trecerii prin site, (%) | 25,00                               | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00  |
|          |  | 16,00                               | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 49,10   |
|          |  | 8,00                                | 100,00 | 95,00  | 4,80   | 2,30    |
|          |  | 4,00                                | 99,65  | 25,50  | 0,30   | 0,60    |
|          |  | 2,00                                | 84,10  | 7,80   | 0,30   | 0,60    |
|          |  | 1,00                                | 57,30  | 4,30   | 0,30   | 0,60    |
|          |  | 0,60                                | 38,75  | 2,80   | 0,30   | 0,60    |
|          |  | 0,20                                | 7,85   | 1,20   | 0,30   | 0,60    |
|          |  | 0,10                                | 4,05   | 0,90   | 0,3    | 0,60    |
| 2        | Conținut de granule                    | Care rămân pe sita superioară, (%)  | 9,70   | 4,30   | 1,30   | 2,10    |
|          |  | Care trec prin sita inferioară, (%) | -      | 1,80   | 2,90   | 8,10    |

În ceea ce privește criblurile și nisipul de concasaj au fost determinate și pe acestea caracteristicile fizico-mecanice, conform tabelului 4.3.

Tabelul 4.3  
Caracteristicile fizico-mecanice ale criblurii și nisipului de concasaj

| Nr. crt. | Caracteristică                                       |                      | U.M.               | Sort 4 - 8 | Sort 8 - 16 | Sort 16 - 25 |
|----------|--|----------------------|--------------------|------------|-------------|--------------|
| 1        | Densitatea aparentă                                  |                      | kg /m <sup>3</sup> |            | 2860        | 2860         |
| 2        | Porozitatea aparentă                                 |                      | %                  |            | 2,40        | 2,70         |
| 3        | Densitatea în grămadă                                | în stare afânată     | kg /m <sup>3</sup> | 1420       | 1350        | 1344         |
|          |  | în stare îndesată    | kg /m <sup>3</sup> | 1635       | 1628        | 1620         |
| 4        | Volum de goluri                                      |                      | %                  | 39,00      | 37,00       | 38,00        |
| 5        | Coeficient de formă                                  |                      | %                  | 42,10      | 23,40       | 9,40         |
| 6        | Conținut de impurități                               | corpuri străine      | %                  | lipsă      | lipsă       | lipsă        |
|          |  | fracțiuni sub 0,1 mm | %                  | -          | -           | -            |
|          |  | părți levigabile     | %                  | -          | -           | -            |
| 7        | Uzura cu mașina Los Angeles                          |                      | %                  | 14,40      | 12,70       | 12,80        |
| 8        | Rezistența la îngheț - dezgheț - coef. de gelivitate |                      | %                  | 0,95       | -           | -            |
| 9        | Rezistența la strivire uscat                         |                      | %                  | -          | 68,90       | 70,50        |
| 10       | Rezistența la strivire saturat                       |                      | %                  | -          | 68,40       | 69,90        |
| 11       | Forma granulelor                                     | b/a                  | -                  | 0,60       | 0,68        | -            |
|          |  | c/a                  | -                  | 0,40       | 0,47        | -            |

#### 4.2.2. Filerul

Filerul de calcar este un produs obținut din măcinarea fină a calcarului și conține un grad ridicat de carbonat de calciu (min. 90 %). Se știe din literatura de specialitate că adăugând filer în mixtura asfaltică volumul de goluri scade și rigiditatea crește. Totodată filerul mărește vâscozitatea lianților prea fluizi încălziți la temperaturi ridicate, astfel datorită acestui fapt, în unele mixturi asfaltice, pentru mărirea coeziunii și a impermeabilizării, fără ca să existe riscul ca mixtura să devină instabilă, se poate adăuga o cantitate mai mare de liant.

Condițiile de admisibilitate pentru utilizarea filerului la prepararea mixturilor asfaltice sunt următoarele:

- să nu reacționeze chimic cu lianții;
- să asigure o bună adhezivitate a liantului;
- granulele să nu fie poroase pentru a nu mări consumul de liant prin absorbție;
- să nu absoarbă în mod selectiv componenți ai bitumului.

Astfel, la confecționarea probelor din mixtură asfaltică în laborator am utilizat un filer de calcar produs de către HOLCIM ROMANIA, cu următoarele caracteristici date de furnizor, conform tabel 4.4.



Tabelul 4.4

| Caracteristicile filerului |  |                   |                                       |                 |                        |
|----------------------------|--|-------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------|
| Nr. crt.                   | Caracteristică   | U.M.              | Valori caracteristice STAS 539 : 1979 | Valori obținute | Metoda de încercare    |
| 1                          | Conținut de carbonat de calciu (CaCO <sub>3</sub> )  | %                 | min.90                                | 96,75           | STAS 12801/3:1990      |
| 2                          | Umiditate  | %                 | max.2                                 | 0,12            | STAS 539:1979          |
| 3                          | Granulozitate, trecere prin site<br>- sita 0,630<br>- sita 0,200<br>- sita 0,090<br>- sita 0,071 |                   |                                       |                 | STAS 539:1979          |
|                            |  | %                 | min.100                               | 100,00          |                        |
|                            |  | %                 | min.98                                | 98,10           |                        |
|                            |  | %                 | min.80                                | 95,60           |                        |
|                            |  | %                 | min.72                                | 78,00           |                        |
| 4                          | Coeficient de hidrofilie   | %                 | max.1                                 | 0,72            | STAS 539:1979          |
| 5                          | *Densitatea aparentă după sedimentare în benzen sau toluen                                       | g/cm <sub>3</sub> | 0,5 – 0,8                             | 0,540           | STAS 539:1979, pct 3.4 |
| 6                          | *Coeficient de goluri în stare compactată  | %                 | 0,3 – 0,5                             | 0,340           | STAS 539:1979, pct 3.4 |

\*Densitatea aparentă după sedimentare în benzen sau toluen și coeficientul de goluri în stare compactată sunt încercări subcontractate.

### 4.2.3. Lianții puzzolanici. Cenușa de termocentrală

Lianții puzzolanici sunt materiale silicioase sau silico-aluminoase care conțin compuși ce se combină cu varul sau cimentul în prezența apei la temperatură obișnuită și dau naștere unor formațiuni noi, greu solubile în apă care manifestă proprietăți liante.

Lianții puzzolanici, figura 4.2, au apărut în tehnica rutieră ca o necesitate a înlocuirii parțiale sau totale a lianților hidraulici, cu efecte directe asupra micșorării costurilor lucrării [25].

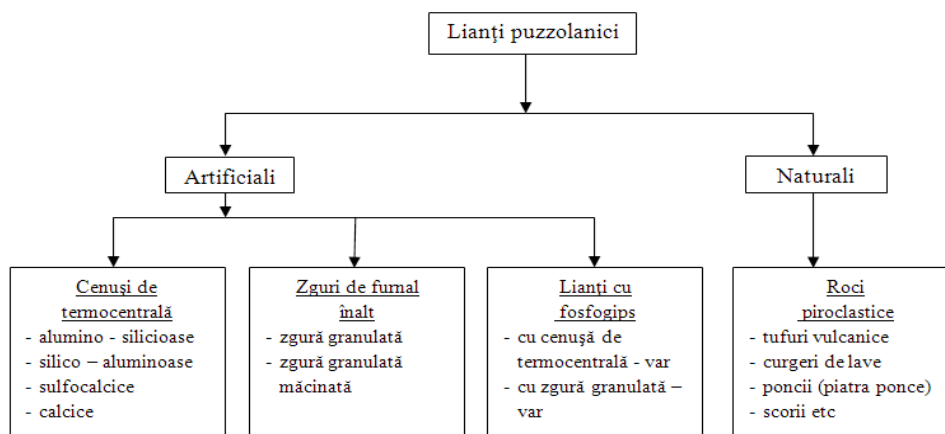


Figura 4.2. Clasificarea lianților puzzolanici

Cenușile de termocentrală sunt puzzolane artificiale care rezultă ca deșeuri la arderea în suspensie de aer a cărbunilor fin măcinați. În literatura de specialitate se menționează diferite criterii de clasificare a cenușilor de termocentrală.

Un criteriu des folosit este în funcție de vârsta geologică a cărbunilor, deosebindu-se cenuși provenite în urma arderii huilelor, cărbunilor bruni și lignitului.

Cenușile de uilă sunt silico-aluminoase și în amestec cu apa și în prezența varului sau cimentului prezintă proprietăți liante.

Cenușile de lignit sunt în general sulfocalcice și manifestă proprietăți puzzolanice în amestec cu apa mai ales în prezența varului și cimentului. Cenușile de lignit din țara noastră au culoarea mai închisă decât cele provenite din arderea huilei.

Cenușile de termocentrală au densitatea scheletului 2,65...2,80 g/cm<sup>3</sup>, densitatea aparentă variază între 1,90...2,40 g/cm<sup>3</sup>, iar densitatea în stare îndesată între 0,9...1,3 g/cm<sup>3</sup>. Este de menționat faptul că între densitatea în grămadă în stare îndesată pentru cenușile provenite prin arderea huilei și a lignitului apar diferențe însemnate.

În cadrul acestui studiu ca, și încercări fizico-mecanice asupra cenușii de termocentrală s-au luat în considerare câteva studii proprii ale colectivului de cercetare din cadrul Facultății de Construcții Timișoara, departamentul Construcții Industriale și Civile [10]. Astfel, în tabelul 4.5 se prezintă analiza chimică a cenușilor rezultate de la unele CTE din România, iar în tabelul 4.6 se prezintă densitățile și suprafața specifică la aceleași cenuși de termocentrală.

Tabelul 4.5

| Proveniența cenușii C.T.E. | Analiza chimică                      |                                |                                |       |                 |                   |                  |      |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|-------------------|------------------|------|
|                            | Compoziția chimică (valori medii), % |                                |                                |       |                 |                   |                  |      |
|                            | SiO <sub>2</sub>                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO  |
| Timișoara                  | 49,07                                | 25,52                          | -                              | 1,15  | -               | 0,26              | 1,90             | 1,01 |
| Timișoara *                | 43,51                                | 28,10                          | 9,28                           | 12,85 | -               | -                 | -                | 2,26 |
| Arad                       | 51,30                                | 19,20                          | -                              | 4,25  | -               | 0,45              | 1,57             | 1,91 |
| Deva                       | 47,33                                | 24,34                          | -                              | 5,85  | 2,75            | 0,58              | 1,97             | 2,73 |
| Craiova                    | 49,20                                | 22,80                          | 7,82                           | 8,80  | 1,44            | 0,51              | 1,70             | 2,41 |

\* Determinări realizate de colectivul de cercetare C.C.I.A

Tabelul 4.6

| Proveniența cenușii C.T.E. | Densitatea și suprafața specifică       |  |   |  |
|----------------------------|---|--|---|--|
|                            | Caracteristici fizice (valori medii), % |  |   |  |
|                            | Densitatea reală [Kg/m <sup>3</sup> ]   | Densitatea în stare afânată [Kg/m <sup>3</sup> ] | Densitatea în stare îndesată [Kg/m <sup>3</sup> ] | Suprafața specifică [cm <sup>2</sup> /g] |
| Timișoara *                | 2333                                    | 566  | 775   | 3800                                     |
| Arad                       | 2378                                    | 1042   | 1321  | 2238                                     |
| Deva                       | 2280                                    | 579  | 832   | 2649                                     |
| Craiova                    | 2370                                    | 617  | 822   | 1224                                     |

\* Determinări realizate de colectivul de cercetare C.C.I.A

După determinările efectuate s-a constatat, după cum astfel este specificat și în literatura de specialitate, că pentru cenușile din țara noastră componenții predominanți sunt:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  și  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , în proporție de 80,89 %, ceea ce depășește 70 %, fapt ce atestă posibilitatea de formare a fazelor vitroase, precum și a silicaților, aluminaților de Ca etc, cu implicații favorabile asupra capacității hidraulice.

Clasificarea cenușii după raportul  $\text{SiO}_2$  și  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :

$$\frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{43,51 \%}{28,10 \%} = 1,548 < 2$$

$$\% \text{CaO} = 12,85 < 15$$

Cenușa studiată se încadrează în clasa cenușilor alumino – silicioase ca majoritatea cenușilor din țara noastră.

Clasificarea cenușii după indicele de bazicitate  $I_B$ , exprimat prin raportul dintre oxizii bazici și cei acizi are valoarea:

$$I_B = \frac{\% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{12,85 + 2,66 + 0 + 0}{43,51 + 28,10} = \frac{15,11}{71,61} = 0,21 < 1,$$

ceea ce corespunde cenușilor alumino-silicioase.

Cenușa de termocentrală utilizată în cadrul acestui studiu provine de la Centrala Electrică de Termoficare Timișoara sud.

#### 4.2.4. Bitumul

Bitumul este un material complex, cu caracteristici legate de factori interni și externi, al cărui studiu constituie în permanență un domeniu de interes.

În funcție de proveniență, acesta poate fi: natural sau artificial (produs în cadrul procesului de rafinare al petrolului). El se prezintă sub forma unor amestecuri complexe de compuși hidrocarbonați și derivați ai acestora, cu mase moleculare și structuri chimice diferite, având ca și caracteristică puterea de aglomerare a materialelor minerale.

În ceea ce privește mixturile asfaltice, cele mai importante proprietăți ale bitumului sunt următoarele: susceptibilitatea la temperatură, vâsco-elasticitatea și îmbătrânirea. Aceste proprietăți sunt influențate de temperatură, astfel încât atunci când aceasta crește, bitumul devine vâscos și prezintă un răspuns plastic când este supus la încărcări mai mari decât propria sa viscozitate la o anumită temperatură. Acest comportament la temperaturi înalte poate fi un factor decisiv la apariția uneia dintre cele mai frecvente degradări ale structurii rutiere (făgășuirea) [17].

Pentru a avea o imagine cât mai reală a modului în care se va comporta o structură rutieră flexibilă sau semirigidă în exploatare este absolut necesară cunoașterea bitumului. Acesta poate influența în mare măsură apariția fisurilor, a dezanrobărilor sau a făgașelor. Oxidarea și durificarea datorate modificărilor structurale apărute în timp, fisurarea la temperaturi joase sau fluajul la temperaturi ridicate sunt câteva din problemele de calitate a drumurilor legate de caracteristicile bitumului utilizat.

Liantul folosit în cadrul încercărilor de laborator este un bitum D 50/70 furnizat de către societatea SC CONFORT S.A. și are următoarele caracteristici principale conform Ind. AND 537 – 2003, tabelul 4.7.

Tabelul 4.7

## Caracteristicile bitumului

| Caracteristici determinate                          | U.M.                            | Rezultate obținute | Bitum D50/70, conform Ind. AND 537-2003 |
|---|---------------------------------|--------------------|---|
| Penetrația la 25 °C                                 | 1/10 mm                         | 68,00              | 50 ... 70                               |
| Punct de înmuiere inel și bilă                      | °C                              | 47,20              | 46 ... 54                               |
| Punct de rupere Fraas                               | °C                              | -6,20              | max. -8,00                              |
| Ductilitatea la 25 °C                               | cm                              | 122,50             | min. 100                                |
| Stabilitatea la încălzire în film subțire la 163 °C | Pierdere de masă                | %                  | 0,15                                    |
|   | Penetrația reziduală            | %                  | 80,00                                   |
|   | Creșterea punctului de înmuiere | °C                 | 3,20                                    |
|   | Ductilitate reziduală la 25 °C  | cm                 | 65,00                                   |
| Adezivitate – criblură cariera Lucreț               | %                               | 90,00              | min. 80                                 |

### 4.3. Stabilirea dozajelor de mixtură asfaltică înlocuind total sau parțial filerul cu cenușa de termocentrală

După ce au fost analizate toate materialele ce au intrat în componența mixturii asfaltice s-a hotărât studierea efectului înlocuirii filerului cu cenușa de termocentrală. Această înlocuire s-a realizat în diferite procente pentru următoarele tipuri de mixtură:

- mixtură asfaltică B.A.16 care se utilizează pentru stratul de uzură;
- mixtură asfaltică B.A.D.25 care se utilizează pentru stratul de legătură.

Astfel în funcție de procentele de cenușă stabilite pentru fiecare tip de mixtură asfaltică s-au realizat dozajele finale, conform tabelelor 4.8 și 4.9, urmând mai departe realizarea probelor conform fiecărei încercări la care urmează să fie supuse.

Tabelul 4.8

## Dozaje finale B.A.16

| Componentele mixturii | Procente cenușă (%) |         |         |         |         |         |
|-----------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                       | Dozaj 1             | Dozaj 2 | Dozaj 3 | Dozaj 4 | Dozaj 5 | Dozaj 6 |
|                       | 0 %                 | 2,5 %   | 5,0 %   | 7,5 %   | 10,0 %  | 12,5 %  |
| sort 8/16             | 25,80               | 25,70   | 25,10   | 25,90   | 25,20   | 25,10   |
| sort 4/8              | 29,60               | 29,20   | 29,80   | 28,20   | 28,50   | 29,10   |
| sort 0/4              | 24,30               | 25,70   | 25,50   | 26,30   | 26,70   | 25,10   |
| nisip natural         | 6,20                | 6,20    | 6,10    | 6,80    | 6,50    | 5,60    |
| cenușă                | 0,00                | 1,70    | 3,30    | 4,90    | 6,50    | 8,10    |
| filer                 | 9,50                | 6,70    | 4,70    | 1,90    | 0,00    | 0,00    |
| bitum                 | 4,60                | 4,90    | 5,40    | 6,00    | 6,50    | 7,00    |

Tabelul 4.9

| Componentele<br>mixturei | Dozaje finale B.A.D.25 |         |         |         |         |
|--------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                          | Procente cenușă (%)    |         |         |         |         |
|                          | Dozaj 1                | Dozaj 2 | Dozaj 3 | Dozaj 4 | Dozaj 5 |
|                          | 0 %                    | 2,5 %   | 5,0 %   | 7,5 %   | 10,0 %  |
| sort 16/25               | 22,10                  | 22,50   | 22,00   | 21,80   | 22,20   |
| sort 8/16                | 22,60                  | 22,70   | 22,90   | 23,30   | 22,70   |
| sort 4/8                 | 20,20                  | 19,20   | 19,20   | 19,30   | 21,80   |
| sort 0/4                 | 16,30                  | 17,30   | 17,20   | 17,10   | 14,20   |
| nisip natural            | 7,70                   | 8,60    | 8,60    | 8,50    | 7,10    |
| cenușă                   | 0,00                   | 1,70    | 3,20    | 4,90    | 6,60    |
| filer                    | 7,20                   | 3,80    | 2,40    | 0,00    | 0,00    |
| bitum                    | 4,00                   | 4,10    | 4,50    | 5,00    | 5,40    |

Datorită faptului că cenușa utilizată în amestecurile de mixtură asfaltică are o densitate în stare îndesată de  $\rho=775 \text{ kg/m}^3$ , ea prezintă un procent de participare în amestec mai mic decât procente stabilite în faza inițială, din cauza faptului că are un volum mai mare de parte fină.

Din punct de vedere al încadrării acestor amestecuri în zonele granulometrice prevăzute de standardul românesc SR 174 - 1/2009, acestea se încadrează după cum se poate observa în figura 4.3.

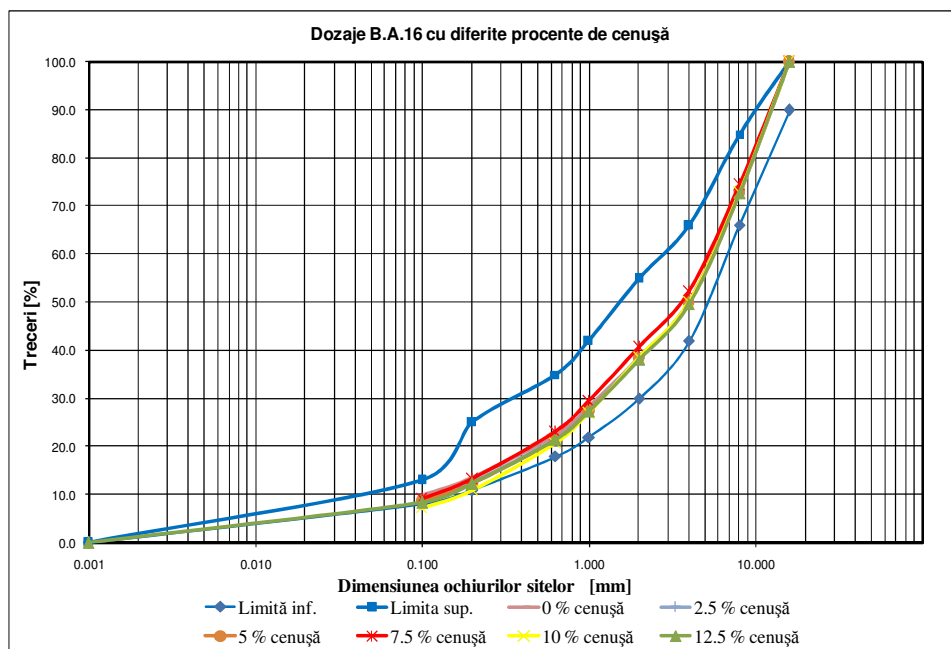


Figura 4.3. Curbele de granulozitate stabilite pentru mixtura asfaltică B.A.16

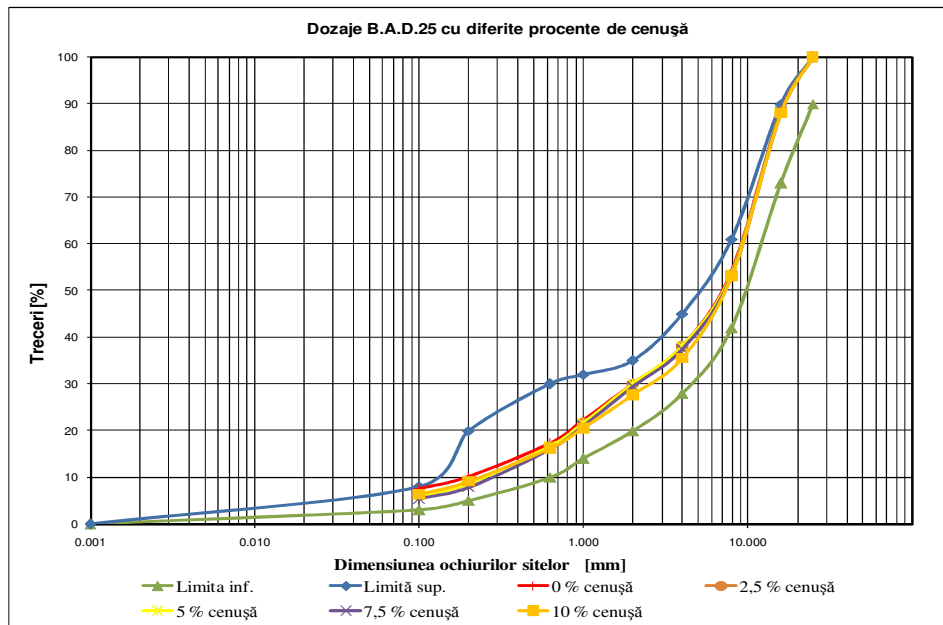


Figura 4.4. Curbele de granulozitate stabilite pentru mixtura asfaltică B.A.D.25

#### 4.4. Realizarea probelor în vederea determinării proprietăților termo-fizice și fizico-mecanice

Din studiul literaturii de specialitate și al experienței altor cercetători pe plan internațional, rezultă că probele de mixtură asfaltică confecționate în laborator trebuie să prezinte un grad ridicat de omogenitate al distribuției volumului de goluri și a agregatelor. Volumul de goluri este determinat în funcție de efortul de compactare și este una dintre cele mai importante variabile care afectează rigiditatea și rezistența la oboseală [44]. Ținta principală a procesului de compactare este să optimizeze realizarea structurii scheletului mineral și să distribuie uniform bitumul și volumul de goluri, ceea ce asigură o bună legătură între bitum și agregate. De asemenea o bună compactare furnizează o rezistență crescută la deformații permanente, o durabilitate mai mare a mixturii atunci când este folosită în stratul de uzură și un risc scăzut la infiltrarea apei [68].

Confecționarea probelor a avut loc în cadrul laboratorului de drumuri al Facultății de Construcții și în cadrul laboratorului Direcției Regionale de Drumuri și Poduri din Timișoara. Pentru determinarea proprietăților termo-fizice probele au fost realizate sub formă de plăcuțe cu dimensiunile de 200 x 200 x 50 mm, acestea având ca scop determinarea conductivității termice a asfaltului, căldura stocată, căldura specifică și emisivitatea. Pentru a putea pune în evidență prin aceste proprietăți termo-fizice rolul cenușii de termocentrală din amestecurile de asfalt, pentru aceleași tipuri de dozaje s-au determinat proprietățile fizico-mecanice conform standardului românesc în vigoare SR 174-1/2009, probele realizate având ca drept caracteristici determinările pe cilindri Marshall și pe cilindri confecționați la girocompactator.

#### 4.4.1. Prepararea probelor cilindrice în laborator

Probele cilindrice folosite în cadrul studiului au fost cilindri Marshall, care s-au realizat cu ajutorul ciocanului Marshall prin aplicarea de 50 lovituri pentru fiecare față și cilindri confecționați cu ajutorul girocompactatorului, figura 4.5, [110] [111].



a) Ciocan Marshall



b) Presă giratorie

Figura 4.5. Aparatura utilizată pentru realizarea probelor

#### 4.4.2. Prepararea plăcuțelor

Pentru realizarea plăcuțelor în vederea determinării proprietăților termo-fizice, s-a folosit ruloul compactor pentru plăci cu dimensiunile 405 x 405 x 50 mm, figura 4.6, care s-au tăiat plăcuțe cu dimensiunile 200 x 200 x 50 mm.

Aparatul de compactare pentru confecționarea probelor de tip placă este fabricat în Marea Britanie și are o caracteristică foarte importantă prin faptul că acesta pare să fie soluția cea mai apropiată de compactarea din teren, atât din punct de vedere al acțiunii forței de compactare, cât și din punct de vedere al distribuției volumului de goluri. Sub o încărcare relativ mică, iau naștere eforturi de forfecare mari care conduc la atingerea unei distribuții uniforme și la o deplasare și reorientare a agregatelor [17], [112].



Figura 4.6. Rulou compactor pentru plăci

#### 4.4.3. Valorile proprietăților termo-fizice pe dozajele realizate în România

În cadrul capitolului 3 am experimentat și prezentat, în urma unui studiu laborios desfășurat în Franța, modul de determinare al proprietăților termo-fizice asupra mixturilor asfaltice. În acest subcapitol voi prezenta rezultatele obținute privind aceste proprietăți termo-fizice pe tipurile de mixturi realizate în cadrul laboratorului din România, respectând modul de alcătuire al acestora conform normelor românești. Datorită faptului că și în țara noastră ne confruntăm din ce în ce mai mult cu probleme privind schimbările climatice, aceste schimbări au un efect nefavorabil asupra straturilor din asfalt prin apariția pierderii stabilității acestora. Una dintre soluțiile de combatere a acestei cauze poate fi îmbunătățirea proprietăților termo-fizice ale mixturilor asfaltice (conductivitate termică, căldură specifică și emisivitate), prin utilizarea unor materiale care să nu absoarbă în totalitate căldura. Înlocuind parțial și total în masa mixturii asfaltice fillerul cu cenușa de termocentrală conform studiilor proprietăților termo-fizice efectuate în Franța, pe probele realizate în România, aceste proprietăți devin superioare. Astfel stratul din asfalt nu mai prezintă o conductivitate termică ridicată și nu mai stochează o cantitate mare de căldură, tabelul 4.10.

Tabelul 4.10  
Efectul utilizării cenușii de termocentrală în betonul asfaltic privind proprietățile termo-fizice

| Nr. crt. | Dozaj                     | Procent bitum [%] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\lambda$ [W/m·K] | Q [J/m <sup>2</sup> ] | C [J/m·K]         | c [J/kg·K] | $\epsilon$ |
|----------|---------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------|------------|
| 1        | B.A.16<br>0 % cenușă      | 7,00 %            | 2450                        | 1,026             | $3,25 \cdot 10^5$     | $8,24 \cdot 10^4$ | 833        | 0,978      |
| 1        | B.A.16<br>0 % cenușă      | 4,60%             | 2450                        | 0,814             | $2,87 \cdot 10^5$     | $5,76 \cdot 10^4$ | 534        | 0,963      |
| 2        | B.A.16<br>2.5 % cenușă    | 4,90 %            | 2420                        | 0,693             | $2,53 \cdot 10^5$     | $5,05 \cdot 10^4$ | 484        | 0,953      |
| 3        | B.A.16<br>5.0 % cenușă    | 5,40 %            | 2400                        | 0,671             | $2,20 \cdot 10^5$     | $4,43 \cdot 10^4$ | 377        | 0,950      |
| 4        | B.A.16<br>7.5 % cenușă    | 6,00 %            | 2365                        | 0,442             | $1,78 \cdot 10^5$     | $3,47 \cdot 10^4$ | 306        | 0,941      |
| 5        | B.A.16<br>10.0 % cenușă   | 6,50 %            | 2315                        | 0,597             | $1,95 \cdot 10^5$     | $3,69 \cdot 10^4$ | 325        | 0,938      |
| 6        | B.A.16<br>12.5 % cenușă   | 7,00 %            | 2300                        | 0,569             | $1,97 \cdot 10^5$     | $3,86 \cdot 10^4$ | 342        | 0,932      |
| 7        | B.A.D.25<br>0 % cenușă    | 4,00 %            | 2400                        | 0,556             | $2,21 \cdot 10^5$     | $4,15 \cdot 10^4$ | 353        | 0,951      |
| 8        | B.A.D.25<br>2.5 % cenușă  | 4,10 %            | 2360                        | 0,550             | $2,76 \cdot 10^5$     | $5,21 \cdot 10^4$ | 450        | 0,949      |
| 9        | B.A.D.25<br>5.0 % cenușă  | 4,50 %            | 2330                        | 0,479             | $2,54 \cdot 10^5$     | $4,66 \cdot 10^4$ | 400        | 0,941      |
| 10       | B.A.D.25<br>7.5 % cenușă  | 5,00 %            | 2330                        | 0,409             | $1,66 \cdot 10^5$     | $3,12 \cdot 10^4$ | 267        | 0,939      |
| 11       | B.A.D.25<br>10.0 % cenușă | 5,40 %            | 2330                        | 0,625             | $2,12 \cdot 10^5$     | $4,12 \cdot 10^4$ | 354        | 0,932      |

Procentul de bitum, după cum se poate observa și din tabelul 4.10, a fost stabilit în urma mai multor încercări de laborator. S-au confecționat cilindri Marshall cu diferite procente de bitum, iar pe aceștia s-au determinat caracteristicile fizico-mecanice. De remarcat este faptul că probele din asfalt încercate și realizate



#### 4.4 – Realizarea probelor în vederea determinării proprietăților termo-fizice 145

conform stasului SR 174-1/2009, cu un conținut de liant optim pentru un beton asfaltic B.A.16 de (6,0...7,3 %), nu au verificat din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice uzuale la care au fost supuse. Datorită acestui fapt s-a trecut la alegerea altui conținut de bitum, sub limitele date de stas prin reducerea coeficientului K (metoda Franceză propusă de Duriez), astfel determinându-se procentul optim pentru care încercările uzuale din laborator s-au încadrat între limitele prevăzute. Pornind de la acest minim de bitum pentru dozajele în care s-a înlocuit parțial și total filerul cu cenușă de termocentrală, acesta nu a mai putut fi respectat datorită unei proprietăți absorbante ceva mai mari a cenușii față de filer, astfel cenușa de termocentrală utilizată în masa mixturii are un dozaj de bitum mai mare cu aproximativ 0,2...0,3 % comparativ cu filerul. Dar totuși cu acest surplus de bitum dozajele se încadrează conform normativului privind conținutul de liant. În plus, prin conținut ridicat de bitum se îmbunătățește rezistența la oboseală.

Deși bitumul este unul dintre cei mai importanți componenți ai mixturii asfaltice, prin procentul cu care participă în amestec poate influența nefavorabil proprietățile termo-fizice, astfel pentru a putea fi mai bine puse în evidență aceste proprietăți termice, s-a realizat în plus și un dozaj cu conținut ridicat de bitum, figura 4.7.

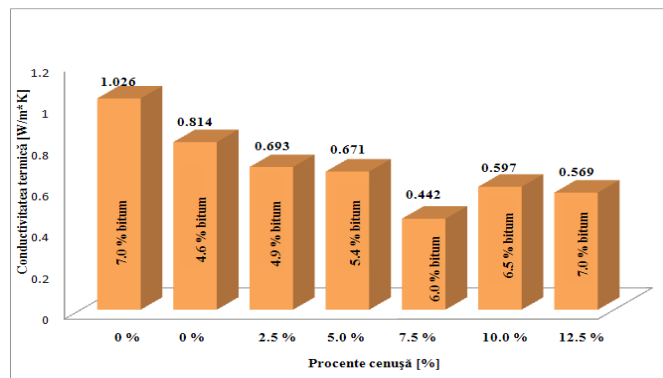


Figura 4.7. Conductivitatea termică rezultată în funcție de procente de bitum și cenușă de termocentrală, pentru un beton asfaltic B.A.16

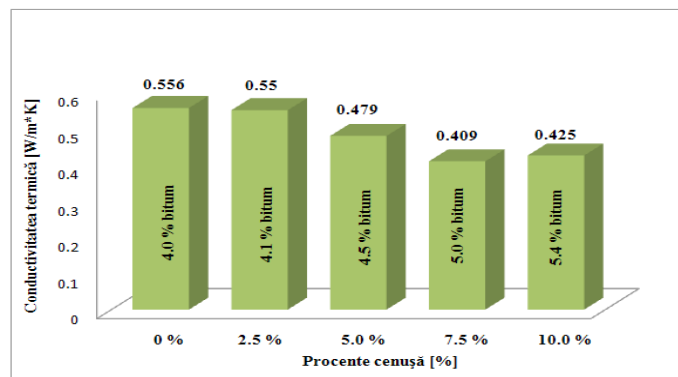


Figura 4.8. Conductivitatea termică rezultată în funcție de procente de bitum și cenușă de termocentrală, pentru un beton asfaltic B.A.D.25

După cum se poate observa din figurile de mai sus cenușa prezintă un efect benefic în amestecurile de asfalt în ceea ce înseamnă conductivitate termică. Practic prin rezultatele superioare obținute, stratul de asfalt nu mai conduce atât de bine căldura, lucru datorat conținutului de siliciu din cenușă care are un factor de emisivitate ridicat.

Aceste rezultate privind proprietățile termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate), le consider superioare strict în domeniul în care le studiez prin valoarea lor numerică scăzută.

Comparativ, în ceea ce privește conductivitatea termică între betonul asfaltic B.A.16 și betonul asfaltic deschis B.A.D.25, cu procente de bitum respectiv cenușă stabilite pentru fiecare în parte, se poate evidenția faptul că betonul asfaltic deschis B.A.D.25 prezintă o conductivitate termică mai bună. Această caracteristică se datorează conținutului de liant mult mai mic și posibil într-o oarecare măsură volumului de goluri mai mare.

În figura 4.9 este prezentată evoluția fluxului termic în curs de determinare a conductivității termice pentru trei dozaje, două cu același conținut de bitum, doar că unul prezintă ca material de umplere fillerul, iar celălalt cenușa de termocentrală, și un dozaj cu un procent de bitum scăzut având în componență doar filler.

După cum am prezentat în capitolul 3, fluxul termic este cantitatea de căldură ce trece printr-o suprafață izotermă într-un interval de timp. În ceea ce privește dozajele realizate se poate observa că evoluția fluxului pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 7,0 % bitum și material de umplere fillerul este mult mai mare față de betonul asfaltic B.A.16 cu 7,0 % bitum și material de umplere cenușa. Pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 4,6 % bitum și 0 % cenușă, evoluția fluxului este aproape egală cu cea a betonului asfaltic B.A.16 cu 7,0 % bitum și 12,5 % cenușă. Fluxul termic ridicat este influențat în mare parte de procentul de bitum fapt demonstrat și de evoluția conductivității termice, figura 4.10, cu cât procentul de bitum este mai mare cu atât conductivitatea termică este mai ridicată. Astfel mixtura asfaltică conduce o mare cantitate de căldură, lucru care o afectează atât din punct de vedere al stabilității pentru temperaturi ridicate, cât și din punct de vedere al îmbătrânirii bitumului. Utilizând cenușa de termocentrală în amestecurile de asfalt pentru același procent de bitum, figura 4.11, aceste inconveniente menționate mai sus pot fi combătute.

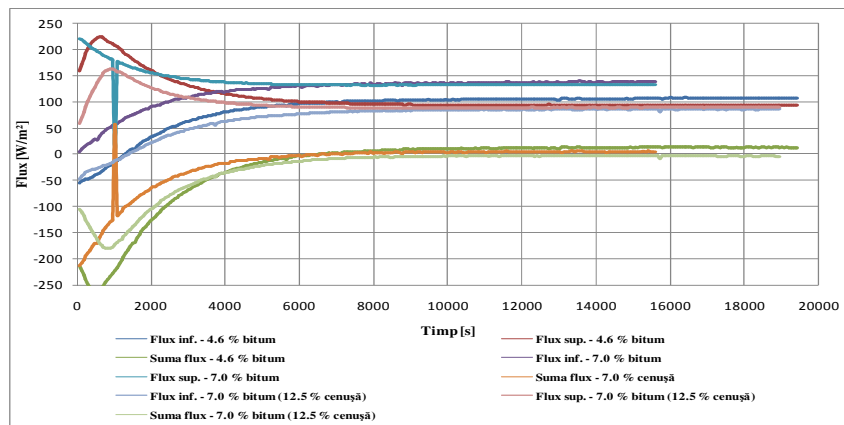


Figura 4.9. Evoluția fluxului în curs de determinare a conductivității termice pentru diferite procente de bitum

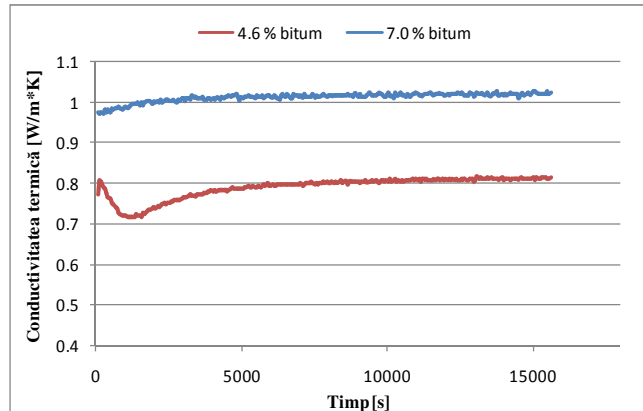


Figura 4.10. Evoluția conductivității termice pentru un conținut diferit de bitum

Referitor la celelalte caracteristici care trebuie calculate pentru a determina căldura specifică se poate observa din figura 4.12, că în funcție de procentul de bitum ridicat, mixtura asfaltică stochează mai multă căldură și prezintă o capacitate termică mare. Acest lucru demonstrează faptul că mixtura asfaltică înmagazinează o cantitate considerabilă de căldură.

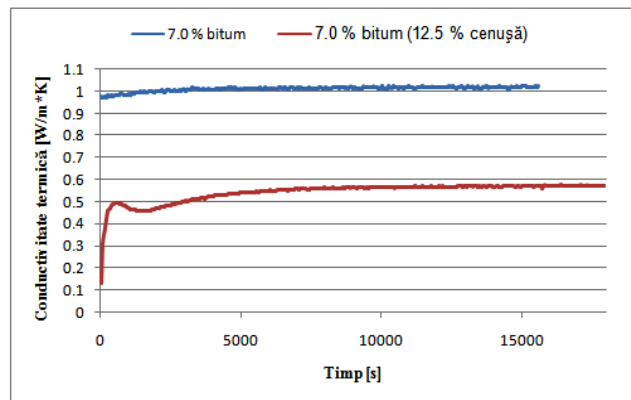


Figura 4.11. Influența cenușii asupra evoluției conductivității termice pentru același procent de bitum

Pentru a putea determina caracteristicile termice și pentru a avea un control al corectitudinii efectuării măsurătorilor, evoluția temperaturii pentru conductivitate respectiv căldură specifică a rămas aceeași, conform măsurătorilor efectuate în Franța, figura 4.13. Astfel pentru determinarea conductivității termice, probei din asfalt i s-a aplicat o temperatură pe fața superioară de 25 °C, iar pe fața inferioară 15 °C, fluxul fiind direcționat de sus în jos. Pentru determinarea căldurii specifice, cele două temperaturi de pe fața superioară, respectiv inferioară, s-au egalat la 25 °C, fluxul fiind direcționat din ambele părți. Astfel până la egalizarea celor două temperaturi proba din asfalt stochează o anumită cantitate de căldură  $Q$  [J/m<sup>2</sup>], după care în funcție de aceasta și de temperatura medie pe cele două suprafețe în

intervalul  $dt$ , rezultă capacitatea de căldură a probei  $C$  [ $J/(m \cdot K)$ ]. În funcție de capacitatea de căldură a probei de asfalt, de grosimea acesteia și de densitate rezultă căldura specifică  $c$  [ $J/(kg \cdot K)$ ], care caracterizează capacitatea asfaltului de a stoca căldura, reprezentând totodată cantitatea de căldură necesară pentru variația de  $1^\circ C$  pe unitatea de masă a materialului.

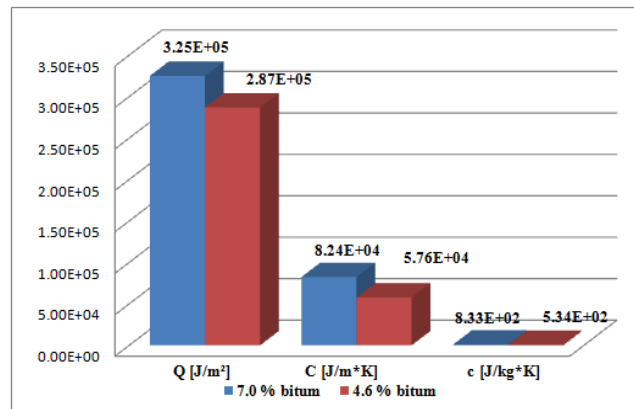


Figura 4.12. Influența procentului de bitum asupra căldurii stocate, capacității de căldură și căldurii specifice pentru un beton asfaltic B.A.16

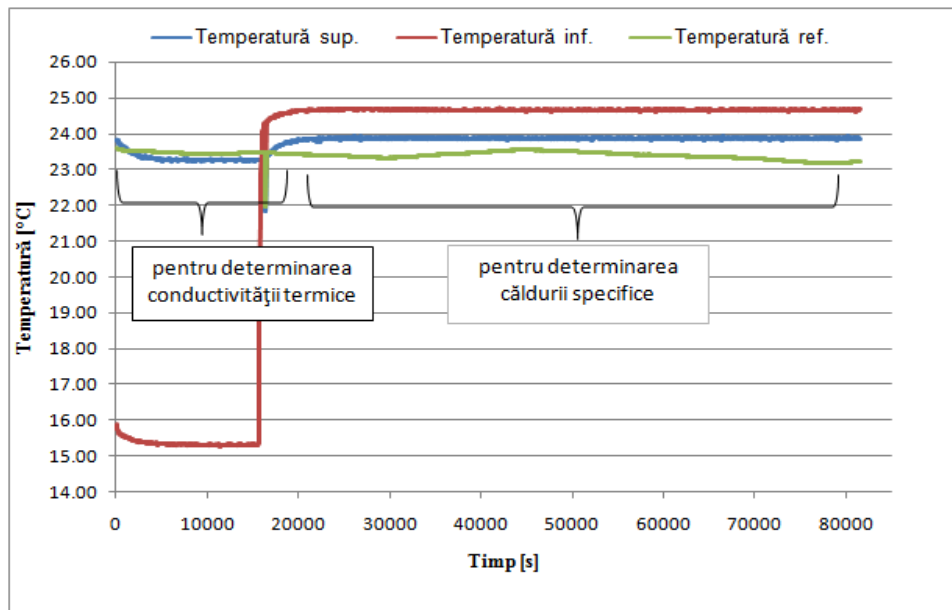


Figura 4.13. Evoluția temperaturii pentru determinarea proprietăților termo-fizice pentru mixtura asfaltică

În figura 4.14, se poate observa evoluția fluxului pentru determinarea proprietăților termo-fizice în funcție de temperaturile selectate conform fiecărei măsurători. Fluxul pentru determinarea conductivității termice este mai ridicat datorită ecartului mare de temperatură la care este supusă proba din asfalt. În această situație el este îndreptat de sus în jos, fapt ce constituie că suma celor două fluxuri rezultate este mai mare. În ceea ce privește fluxul pentru determinarea căldurii specifice acesta scade datorită egalării temperaturilor. Odată egalată temperatura la ambele fețe ale probei de asfalt, fluxurile ce apar sunt de sens contrar, iar suma lor este aproape de valoarea 0, astfel proba înmagazinează căldură.

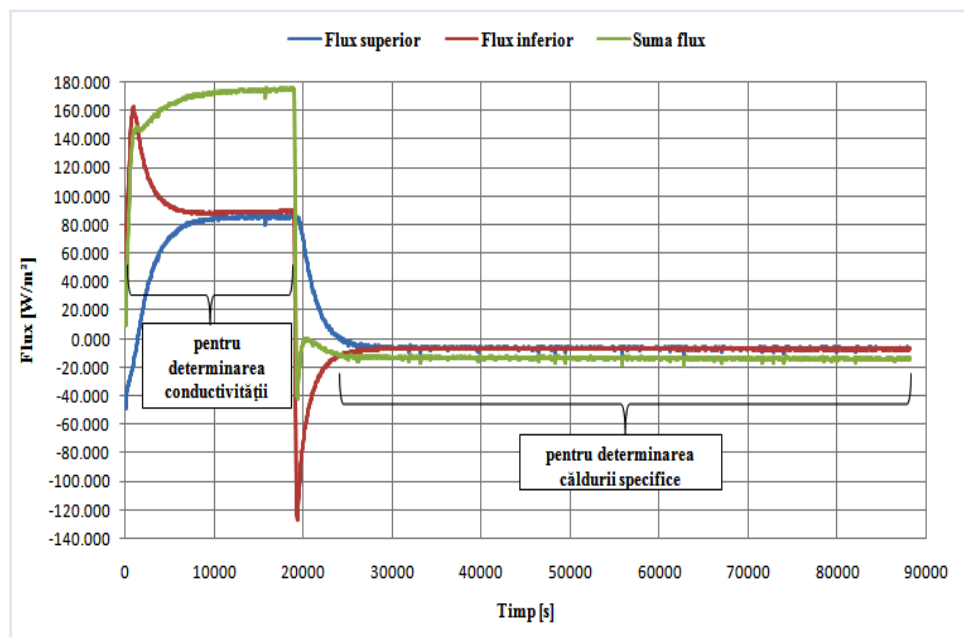


Figura 4.14. Evoluția fluxului pentru determinarea conductivității termice și a căldurii specifice pentru mixtura asfaltică

Din punct de vedere al determinării căldurii specifice pentru dozajele realizate se observă din figurile 4.16 și 4.17 că cenușa de termocentrală utilizată în amestecul de asfalt prin înlocuirea parțială și totală a materialului de umplere ajută considerabil la obținerea unor rezultate superioare. Astfel, față de dozajele în care s-a utilizat numai filer, proba stochează o cantitate mai mică de căldură, cantitate pe baza căreia, în funcție de temperatura medie, se determină capacitatea de căldură. În funcție de capacitatea de căldură obținută, de densitatea probei și grosime rezultă valori superioare pentru căldura specifică.

Rezultatele privind determinarea căldurii specifice pe dozajele din beton asfaltic B.A.16 sunt semnificative față de dozajele din beton asfaltic deschis B.A.D.25, datorită conținutului mai mare de bitum.

Căldura specifică reprezintă cantitatea de energie termică necesară pentru variația de 1 °C pe unitatea de masă a materialului. Făcând o comparație între valorile obținute pe dozajele realizate B.A.16, în funcție de filer și procente de

cenușă mai semnificative (5,0 %, 7,5 %, 10,0 %, 12,5 %) care intră în amestec se remarcă faptul că pentru a ajunge la căldura specifică obținută pe probele din asfalt ce conțin numai fier și un procent ridicat de bitum, temperatura la care ar trebui supuse probele din asfalt ce conțin cenușă este de până la 10...15 °C mai mare decât temperatura de 25 °C la care au fost determinate, figura 4.15.

Referitor la dozajele B.A.D.25 ce au în componență cenușă de termocentrală, temperatura la care ar trebui supuse probele pentru a atinge aceeași căldură specifică ca și dozajul ce are în componență numai fier este aproximativ aceeași, excepție făcând dozajul B.A.D.25 cu 7,5 % cenușă pentru care temperatura ar trebui să crească cu 7 °C.

Utilizând cenușă de termocentrală în masa mixturii asfaltice, prin înlocuire parțială, respectiv totală cu fierul, se obțin mixturi asfaltice care prezintă proprietăți termo-fizice ridicate. Astfel aceste mixturi asfaltice, dacă corespund și din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice, pot fi expuse la temperaturi mai ridicate cu aproximativ 10...15 °C. Această expunere ar fi în coroborare cu schimbările climatice care în prezent sunt o problemă prioritară în domeniul infrastructurii rutiere. Un alt beneficiu ar fi utilizarea cenușii de termocentrală care de altfel este considerată un deșeu industrial, care nu poate fi valorificat.

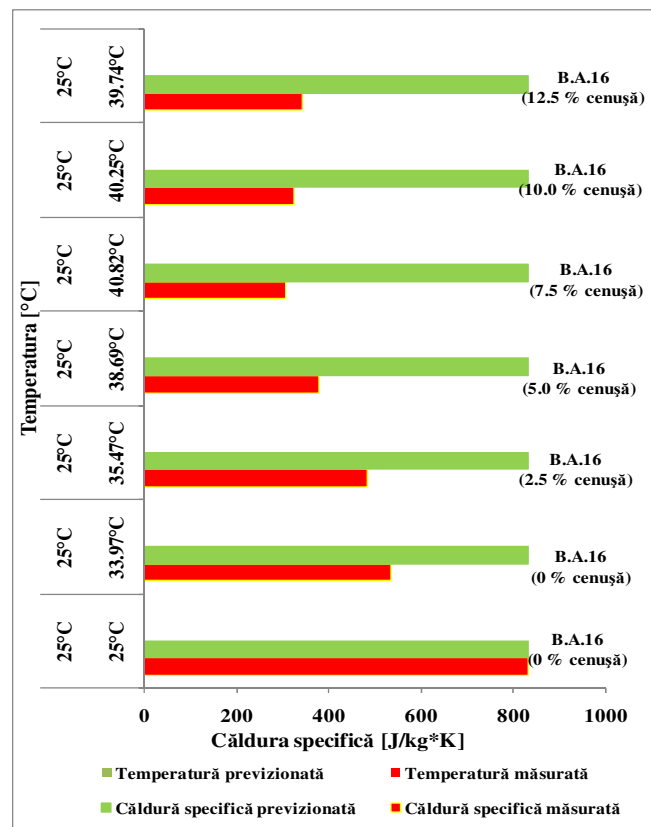


Figura 4.15. Temperatura previzionată pentru mixtura asfaltică B.A.16

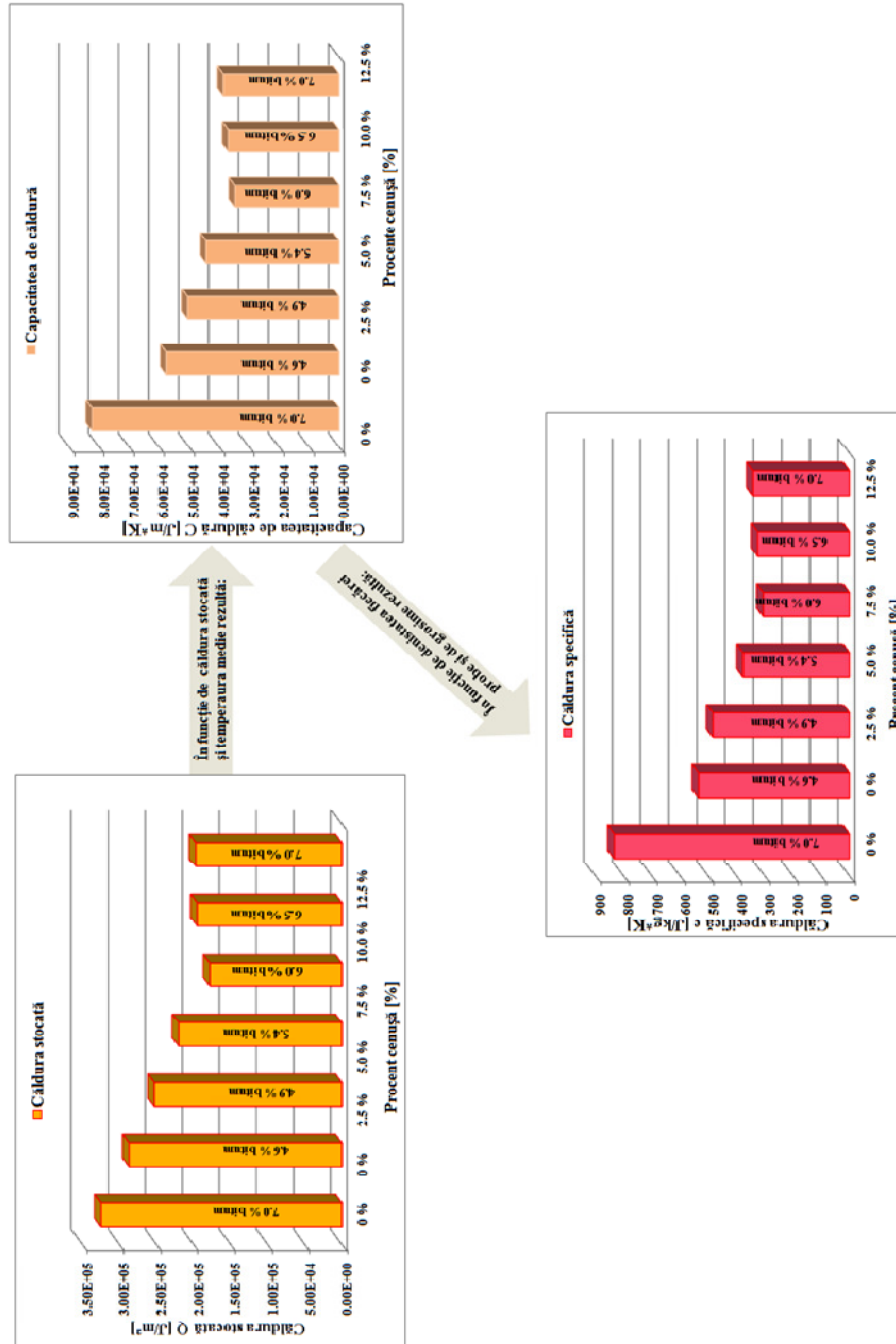


Figura 4.16. Rezultate privind căldura stocată, capacitatea de căldură și căldura specifică pentru dozașele din beton asfaltic B.A.16

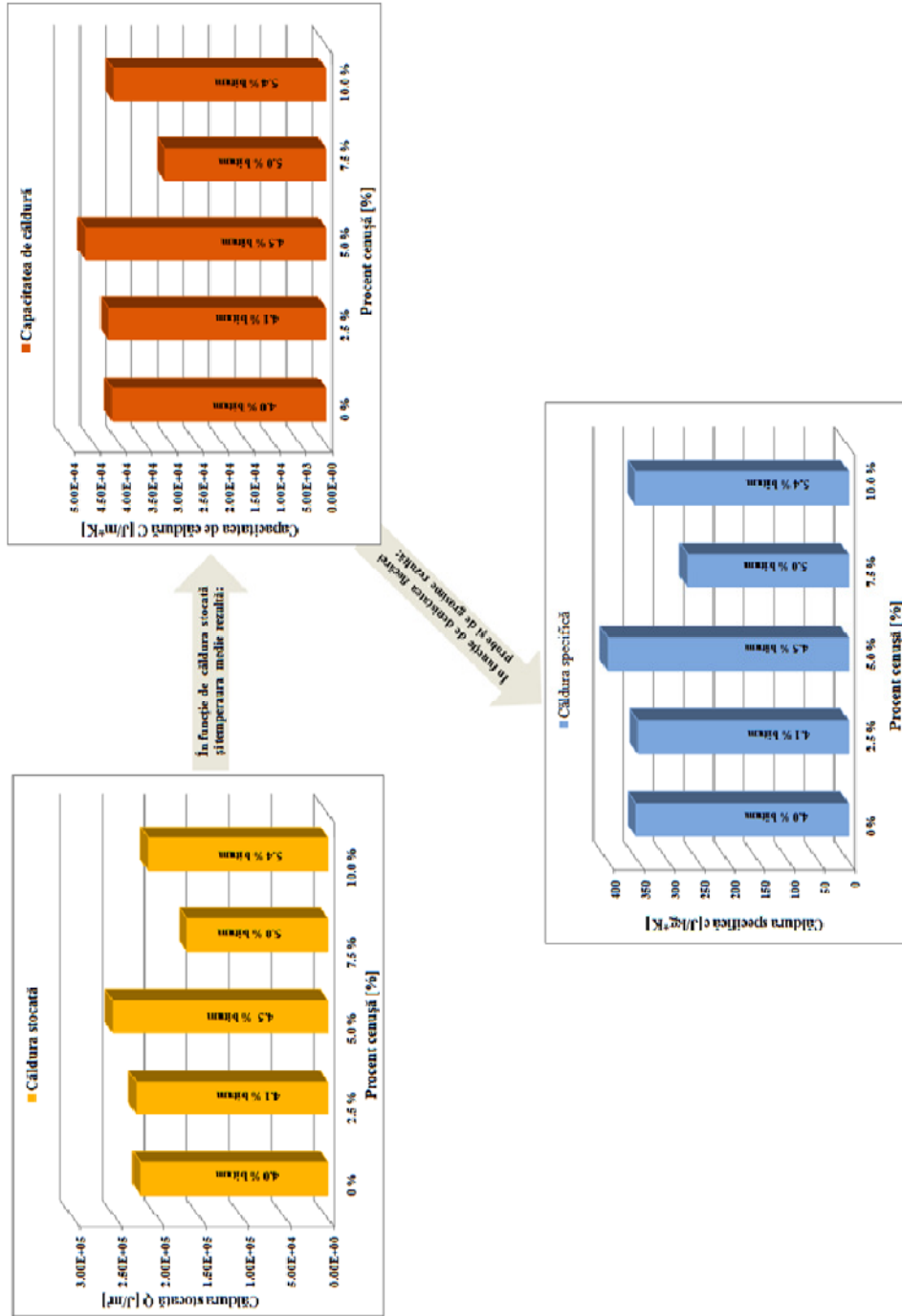


Figura 4.17. Rezultate privind căldura stocată, capacitatea de căldură și căldura specifică pentru dozajele din beton asfaltic B.A.D.25



Alte caracteristici care motivează efectul pozitiv al cenușii în mixtura asfaltică sunt difuzivitatea și efuzivitatea, tabelul 4.11. După cum s-a prezentat în capitolul 3, difuzivitatea termică caracterizează aptitudinea unui material de a găzdui o tensiune termică nouă, astfel cu cât difuzivitatea  $a$  este mai mare, cu atât căldura se propagă mai repede. În figura 4.18, se poate observa că pentru dozajele realizate difuzivitatea scade în funcție de procentul de cenușă. În acest fel căldura se propagă mai greu.

Efuzivitatea  $b$  reprezintă aptitudinea materialului de a smulge căldura. Cu cât efuzivitatea  $b$  este mai mare cu atât materialul absoarbe mai multă căldură. În figura 4.19, efuzivitatea obținută pe dozajele realizate cu cenușă de termocentrală scade semnificativ față de dozajele ce nu conțin cenușă. În această situație mixtura asfaltică nu absoarbe în totalitate căldură.

Și din punct de vedere al acestor două caracteristici, difuzivitate și efuzivitate, este relevant faptul că proprietățile termo-fizice rezultate pentru dozajele ce conțin cenușă de termocentrală sunt superioare.

Tabelul 4.11

Difuzivitatea și efuzivitatea mixturilor asfaltice

| Nr. crt. | Dozaj                        | Procent bitum [%] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\lambda$ [W/m·K] | $c$ [J/kg·K] | $a$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ] | $b$ [J·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-0.5</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
|----------|------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--|--|
| 1        | B.A.16<br>0 % cenușă         | 7,00 %            | 2450                        | 1,026             | 833          | 0,349                                  | 1447   |
| 1        | B.A.16<br>0 % cenușă         | 4,60%             | 2450                        | 0,814             | 534          | 0,177                                  | 1032   |
| 2        | B.A.16<br>2,5 %<br>cenușă    | 4,90 %            | 2420                        | 0,693             | 484          | 0,139                                  | 901  |
| 3        | B.A.16<br>5,0 %<br>cenușă    | 5,40 %            | 2400                        | 0,671             | 377          | 0,105                                  | 779  |
| 4        | B.A.16<br>7,5 %<br>cenușă    | 6,00 %            | 2365                        | 0,442             | 306          | 0,057                                  | 566  |
| 5        | B.A.16<br>10,0 %<br>cenușă   | 6,50 %            | 2315                        | 0,597             | 325          | 0,084                                  | 670  |
| 6        | B.A.16<br>12,5 %<br>cenușă   | 7,00 %            | 2300                        | 0,569             | 342          | 0,085                                  | 669  |
| 7        | B.A.D.25<br>0 % cenușă       | 4,00 %            | 2400                        | 0,556             | 353          | 0,082                                  | 686  |
| 8        | B.A.D.25<br>2,5 %<br>cenușă  | 4,10 %            | 2360                        | 0,550             | 450          | 0,105                                  | 764  |
| 9        | B.A.D.25<br>5,0 %<br>cenușă  | 4,50 %            | 2330                        | 0,479             | 400          | 0,082                                  | 668  |
| 10       | B.A.D.25<br>7,5 %<br>cenușă  | 5,00 %            | 2330                        | 0,409             | 267          | 0,047                                  | 504  |
| 11       | B.A.D.25<br>10,0 %<br>cenușă | 5,40 %            | 2330                        | 0,625             | 354          | 0,095                                  | 718  |

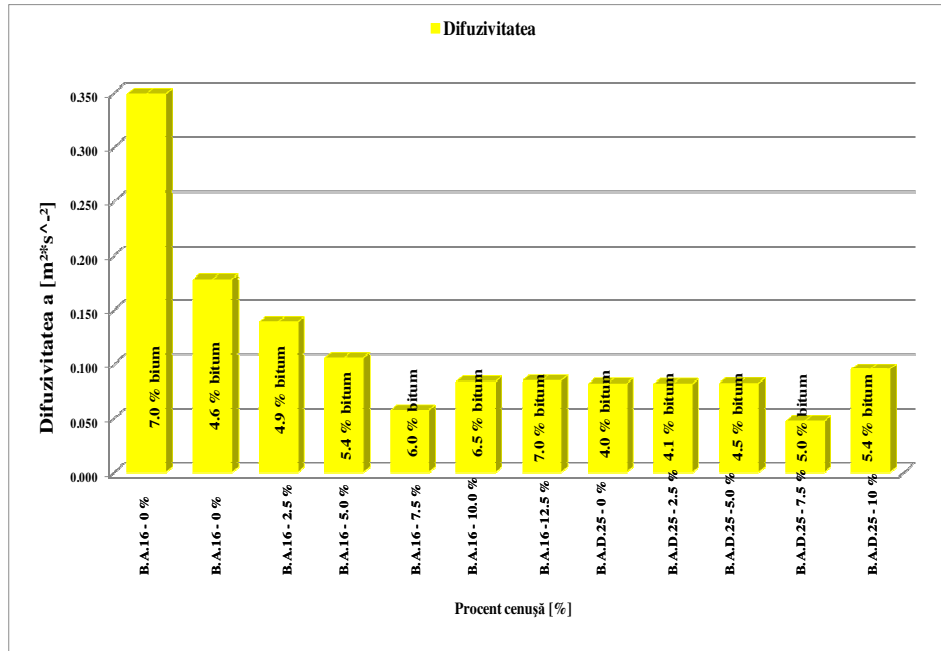


Figura 4.18. Rezultate privind difuzivitatea termică a mixturilor asfaltice realizate

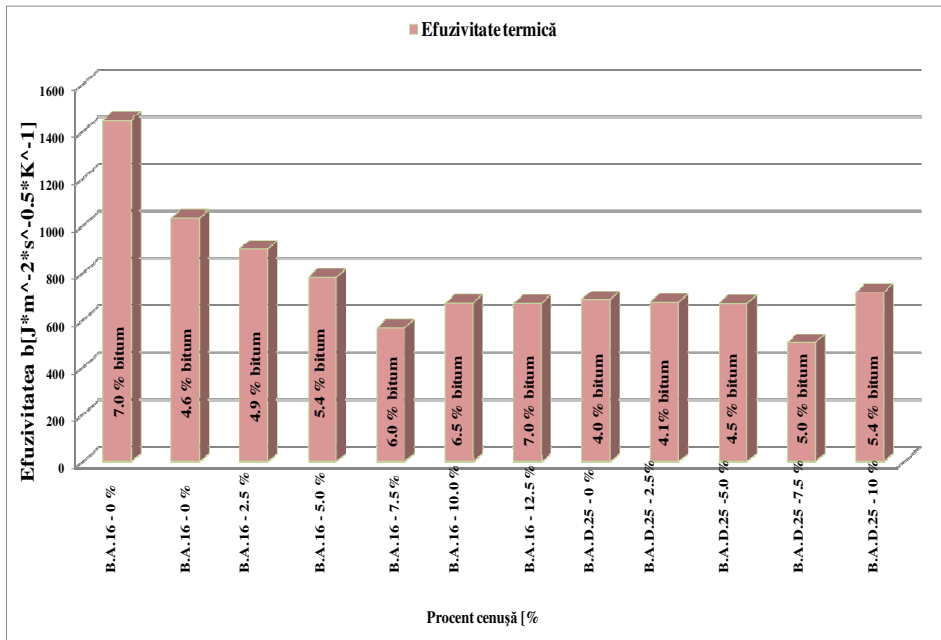


Figura 4.19. Rezultate privind efuzivitatea termică a mixturilor asfaltice realizate

Emisivitatea reprezintă proprietatea materialelor de a emite căldura. Astfel aceasta este în strânsă legătură cu reflexivitatea prin considerentul că dacă emisivitatea scade, reflexivitatea crește. În funcție de factorul de emisie mixtura asfaltică se încadrează între 0,90 ... 0,98. Măsurarea emisivității pe probele realizate a fost posibilă doar în Franța datorită aparatului dezvoltat și prezentat în capitolul 3.

În figura 4.20, emisivitatea rezultată atestă faptul că mixtura asfaltică ce conține în amestec cenușă emite mai puțină căldură față de mixtura asfaltică ce conține doar fier. În această situație în care rezultă o emisivitate scăzută, reflexivitatea crește de la 0,02 la 0,07 în funcție de procentul de cenușă din amestec.

Practic se poate spune că radiația solară ce cade pe suprafața de asfalt este absorbită mai puțin (efuzivitate scăzută), propagată mai puțin (difuzivitate scăzută) și respinsă mai mult (reflexivitate mare).

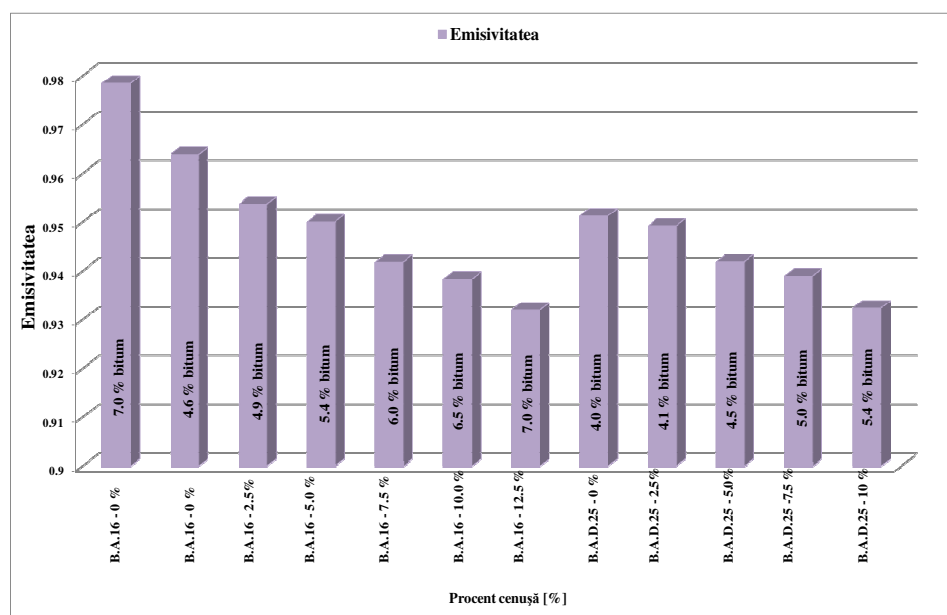


Figura 4.20. Rezultate privind emisivitatea mixturilor asfaltice realizate

#### 4.5. Studii experimentale privind proprietățile fizico-mecanice pentru dozajele din mixtură asfaltică ce conțin cenușă de termocentrală

Conceptul de bază al metodei de proiectare a mixturilor Marshall îl reprezintă alegerea procentului de bitum bazat pe optimizarea câtorva variabile. Pe de altă parte se referă la o evaluare volumetrică a probelor confecționate, bazată pe un set de condiții, la un nivel de compactare dat. Energia de compactare este aleasă astfel încât să conducă la nivele de densitate similare cu cele impuse de compactarea sub trafic. După compactare se determină proprietățile volumetrice ale

mixturii (volum de goluri din mixtură, volum de goluri în amestecul de agregate, volum de goluri umplute cu bitum), acestea fiind apoi comparate cu valorile impuse de standard [98].

În metodologia SUPERPAVE (SUPERIOR PERFORMING ASPHALT PAVEMENTS) de proiectare a mixturilor asfaltice, metoda de proiectare este alcătuită conform cerințelor de performanță dictate de trafic și de mediul înconjurător (clima). Sistemul are ca obiectiv definirea unui amestec economic de liant bituminos și agregate, amestec în urma căruia să rezulte o mixtură asfaltică care să prezinte suficient liant bituminos pentru durabilitate, suficiente goluri în amestecul de agregate și suficient volum de goluri în mixtura asfaltică [102].

Astfel, pentru a pune în evidență studiul dezbătut în cadrul tezei privind comportarea mixturilor asfaltice ce conțin cenușă de termocentrală și pentru a avea un control cât mai aproape de realitate privind efectul acestora în dozajele realizate, trebuie luate în calcul și proprietățile volumetrice ale amestecului de agregate și bitum. Ca și referință privind rezultatele, acestea s-au comparat cu rezultatele conform criteriilor SUPERPAVE.

Proprietățile volumetrice, figura 4.21, ale mixturii compactate sunt: volumul de goluri în mixtură, goluri în amestecul de agregate și goluri umplute cu bitum. Ele furnizează unele indicații asupra performanței probabile ale mixturii în perioada de serviciu a drumului [67].

Agregatul mineral este poros și poate absorbi apă și bitum într-un grad variabil. Mai mult, raportul apă/bitum absorbit variază cu fiecare tip de agregat în parte.

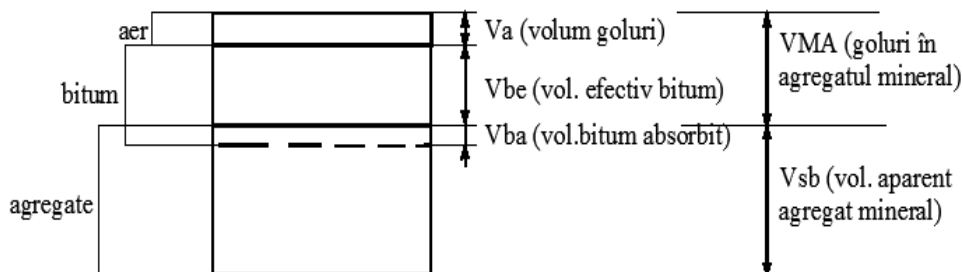


Figura 4.21. Proprietățile volumetrice ale mixturii asfaltice

Volumul de goluri în mixtură ( $V_a$ ) reprezintă procentul de goluri dintre particulele acoperite cu liant în mixtura compactată.

$$V_a = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho}\right) \quad (4.1)$$

unde:

$V_a$  - este volumul de goluri al probei compactate exprimat ca procent din volumul total;

$\rho$  - densitatea mixturii asfaltice  $g/cm^3$ ;

$\rho_{ap}$  - densitatea aparentă a mixturii asfaltice compactate, în  $g/cm^3$ .

Se recomandă ca volumul de goluri din mixtura compactată pentru stratul de uzură să fie între 2 % și 5 % indiferent de traficul la care se proiectează drumul, iar pentru anrobate bituminoase poate atinge valori între 10 % și 20 %.

Golurile din amestecul de agregate (VMA) reprezintă volumul dintre particulele agregatului într-o mixtură compactată. Acest volum se compune din volumul de goluri din mixtură și volumul efectiv de liant. Un nivel adecvat al

#### 4.5 – Studii experimentale privind proprietățile fizico-mecanice 157

VMA-ului asigură suficient bitum în vederea unei durabilități satisfăcătoare. Într-o mixtură rutieră ce are un conținut nepotrivit de bitum va apărea o întărire accelerată a liantului bituminos. Aceasta conduce la deteriorarea îmbrăcăminții rutiere din cauza traficului și la fisurarea la oboseală din cauza incapacității drumului de a se încovoia sub trafic. De asemenea, umiditatea poate avea o influență nefavorabilă din acest punct de vedere.

$$VMA = 100 \cdot \left(1 - \frac{100 - \% \text{bitum}}{100} \cdot \frac{\rho_{ap}}{\rho_{ag}}\right) \quad (4.2)$$

unde:

VMA – reprezintă golurile din agregatul mineral;

$\rho_{ag}$  – densitatea specifică a agregatului, în g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{ap}$  – densitatea aparentă a mixturii asfaltice compactate, în g/cm<sup>3</sup>.

Criteriile pentru VMA variază în funcție de dimensiunea maximă a agregatului folosit, tabelul 4.12.

Tabelul 4.12

| Criteriile VMA              |               |
|-----------------------------|---------------|
| Dimensiunea maximă nominală | VMA minim (%) |
| 9,5 mm                      | 15,0          |
| 12,5 mm                     | 14,0          |
| 19,0 mm                     | 13,0          |
| 25,0 mm                     | 12,0          |
| 37,5 mm                     | 11,0          |
| 50,0 mm                     | 10,5          |

Golurile umplute cu bitum VFA, reprezintă procentul de goluri din agregatul mineral umplute cu bitum. Experiențele au arătat că VFA trebuie să se situeze între limitele prevăzute în tabelul 4.13, pentru a preveni instabilitatea mixturii sub un efort de forfecare și îmbătrânire accelerată.

$$VFA = \left(1 - \frac{\%Va}{\%VMA}\right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

Tabelul 4.13

| Criteriile VFA                        |         |
|---------------------------------------|---------|
| Nivelul traficului (osii echivalente) | VFA (%) |
| < 3 x 10 <sup>5</sup>                 | 70 – 80 |
| < 3 x 10 <sup>6</sup>                 | 65 – 78 |
| < 1 x 10 <sup>8</sup>                 | 65 – 75 |
| > 1 x 10 <sup>8</sup>                 | 65 – 75 |

În ceea ce privește cercetarea proprie, pentru a se putea realiza o comparație între dozajele realizate pentru betoanele asfaltice B.A.16 și B.A.D.25 cu diferite procente privind materialul de umplere (filer și/sau cenușă de termocentrală), prin metoda clasică Marshall s-a urmărit compararea procentului de bitum ales pentru fiecare dozaj.

Pentru determinarea procentului inițial de bitum s-a considerat metoda franceză propusă de Duriez, pe baza coeficientului K rezultând valoarea proporțională a grosimii convenționale a filmului de bitum necesar pentru anrobarea scheletului mineral [54]:

$$e = \lambda d^{0.8} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.4)$$

unde:

$\lambda$  – este coeficient care depinde de caracteristicile bitumului și are în general valoarea 24;

$d$  – diametrul granulei medii, în  $\mu\text{m}$ .

În final, relația utilizată pentru stabilirea dozajului de liant este:

$$b = K\sqrt[5]{S} \quad [\%] \quad (4.5)$$

unde:

$b$  este procentul de liant raportat la 100 părți de agregat natural;

$K$  – modulul de conținut (variază în funcție de tipul mixturii, trafic și zonă climaterică);

$S$  – suprafața specifică (calculată) a agregatului natural total, care intră în compoziția mixturii asfaltice, în  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

$$100 S = 0,17 A + 0,32 a + 2,30 N + 12 n + 135 f \quad (4.6)$$

În funcție de procentul de bitum ales, s-au realizat în laborator o serie de dozaaje pentru care s-au determinat caracteristicile fizico-mecanice prin încercări pe cilindri Marshall, conform STAS SR 174-1:2009. Astfel prin realizarea mai multor dozaaje cu un conținut ridicat de bitum (conform stas), mixtura asfaltică rezultată nu a fost corespunzătoare prevederilor standardizate, tabelul 4.14. Datorită acestui fapt s-a trecut la studierea îndeaproape a unui conținut de liant ceva mai mic, pentru care încercările fizico-mecanice uzuale corespund standardului. Mai departe pentru a putea face o diferență între utilizarea filerului și utilizarea cenușii de termocentrală în amestec, pentru dozaaje stabilite s-au realizat și o serie de încercări dinamice.

Tabelul 4.14

Caracteristicile fizico-mecanice realizate pentru un procent ridicat de bitum

|          | Bitum (%) | Cenușă (%) | Stabilitate corectată KN | Indice fluaj mm | Raport S/I, KN/mm | Densitate Kg/m <sup>3</sup> | Absorbție de apă (%) | Va (%) | VMA (%) | VFA (%) |
|----------|-----------|------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|--------|---------|---------|
| B.A.16   | 7,0 %     | 0 %        | 7,70                     | 8,0             | 0,96              | 2440                        | 0,40                 | 0,00   | 18,96   | 100,0   |
|          | 7,0 %     | 2,5 %      | 8,80                     | 7,0             | 1,26              | 2420                        | 0,65                 | 0,00   | 19,62   | 100,0   |
|          | 7,0 %     | 5,0 %      | 10,50                    | 6,50            | 1,62              | 2400                        | 0,75                 | 2,01   | 20,29   | 96,97   |
|          | 7,2 %     | 7,5 %      | 12,50                    | 4,50            | 2,78              | 2330                        | 1,92                 | 4,75   | 22,78   | 79,14   |
|          | 7,2 %     | 10,0 %     | 11,00                    | 4,50            | 2,44              | 2340                        | 1,00                 | 3,84   | 22,45   | 82,91   |
|          | 7,5 %     | 12,5 %     | 10,89                    | 4,50            | 2,42              | 2300                        | 0,90                 | 3,51   | 24,02   | 85,38   |
| B.A.D.25 | 4,4 %     | 0 %        | 8,90                     | 4,50            | 1,98              | 2350                        | 4,30                 | 9,24   | 19,76   | 53,27   |
|          | 4,6 %     | 2,5 %      | 13,20                    | 4,50            | 2,93              | 2350                        | 4,30                 | 7,71   | 19,93   | 61,34   |
|          | 5,2 %     | 5,0 %      | 12,99                    | 4,30            | 3,02              | 2330                        | 2,93                 | 9,00   | 21,11   | 57,39   |
|          | 5,5 %     | 7,5 %      | 11,50                    | 4,00            | 2,88              | 2330                        | 3,05                 | 7,10   | 21,36   | 66,74   |
|          | 5,5 %     | 10,0 %     | 11,50                    | 4,25            | 2,71              | 2300                        | 2,25                 | 6,67   | 22,38   | 70,17   |

După cum se poate observa caracteristicile fizico-mecanice obținute mai ales pentru dozaaje din beton asfaltic B.A.16 realizate, nu se încadrează conform STAS SR 174-1/2009, cauza principală fiind pe de o parte procentul ridicat de bitum, care deși corespunde limitelor date în stas nu conduce la obținerea unor rezultate

#### 4.5 – Studii experimentale privind proprietățile fizico-mecanice 159

corespunzătoare, iar pe de altă parte calitatea acestuia. În ceea ce privește efectul cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt din datele rezultate reiese faptul că aceasta nu influențează caracteristicile fizico-mecanice, ci din contră, în funcție de același procent de bitum, dar cu înlocuirea parțială și totală a filerului, le îmbunătățește semnificativ.

Astfel în urma mai multor încercări de stabilire a procentului de bitum, ținând cont și de proprietatea ceva mai absorbantă a cenușii, cu 0,20...0,30 % mai mare decât a filerului, s-au stabilit dozajele conform tabelelor 4.8, respectiv 4.9, prezentate mai sus, dozaje pentru care sau determinat proprietățile termo-fizice și caracteristicile fizico-mecanice. În tabelul 4.15, sunt date rezultatele privind încercările uzuale efectuate pentru mixtura asfaltică B.A.16 și B.A.D.25.

Tabelul 4.15  
Caracteristicile fizico-mecanice realizate pentru un procent scăzut de bitum

|          | Bitum (%) | Cenușă (%) | Stabilitate corectată KN | Indice fluaj mm | Raport S/I, KN/mm | Densitate Kg/m <sup>3</sup> | Absorbție de apă (%) | Va (%) | VMA (%) | VFA (%) |
|----------|-----------|------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|--------|---------|---------|
| B.A.16   | 4,6 %     | 0 %        | 12,10                    | 4,70            | 2,57              | 2450                        | 1,80                 | 1,38   | 16,53   | 91,66   |
|          | 4,9 %     | 2,5 %      | 12,20                    | 4,40            | 2,77              | 2420                        | 3,25                 | 3,26   | 17,81   | 81,70   |
|          | 5,4 %     | 5,0 %      | 12,50                    | 4,00            | 3,13              | 2400                        | 2,20                 | 3,75   | 18,91   | 80,19   |
|          | 6,0 %     | 7,5 %      | 12,50                    | 3,30            | 3,79              | 2350                        | 1,90                 | 6,28   | 21,11   | 70,24   |
|          | 6,5 %     | 10,0 %     | 13,00                    | 3,50            | 3,71              | 2300                        | 2,75                 | 8,01   | 23,20   | 65,47   |
|          | 7,0 %     | 12,5 %     | 13,60                    | 3,80            | 3,58              | 2290                        | 2,55                 | 6,97   | 23,94   | 70,90   |
| B.A.D.25 | 4,0 %     | 0 %        | 10,90                    | 4,00            | 2,73              | 2400                        | 3,70                 | 5,60   | 17,71   | 68,39   |
|          | 4,1 %     | 2,5 %      | 8,50                     | 3,20            | 2,66              | 2360                        | 3,50                 | 8,05   | 19,17   | 58,02   |
|          | 4,5 %     | 5,0 %      | 11,60                    | 3,70            | 3,14              | 2330                        | 3,95                 | 9,14   | 20,53   | 55,49   |
|          | 5,0 %     | 7,5 %      | 12,10                    | 3,80            | 3,18              | 2330                        | 3,20                 | 8,96   | 20,95   | 57,23   |
|          | 5,4 %     | 10,0 %     | 13,80                    | 3,80            | 3,63              | 2330                        | 4,00                 | 7,55   | 21,28   | 64,53   |

Verificarea calității mixturilor asfaltice proiectate s-a făcut prin comparare cu valorile prevăzute în standardul românesc SR 174-1/2009, pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25. Astfel rezultatele obținute pentru dozajele realizate sunt conforme normativului [105].

Dacă am considera amestecurile realizate doar în funcție de procentul de bitum stabilit și doar de utilizarea filerului ca material de umplere, normal ar fi ca stabilitatea Marshall pentru dozajele respective să scadă, iar indicele de fluaj și densitatea să crească. Referitor la utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt în locul filerului, se poate observa din figurile 4.22 – 4.28, că aceasta prezintă un efect invers, dar favorabil caracteristicilor mecanice. Practic stabilitatea Marshall crește, iar indicele de fluaj scade, chiar dacă avem un conținut de bitum mai ridicat. În ceea ce privește densitatea aparentă, aceasta scade proporțional cu procentul de cenușă utilizat în amestec, dar nu sub valoarea prevăzută în stas. Acest lucru este normal datorită densității scăzute a cenușii față de filer.

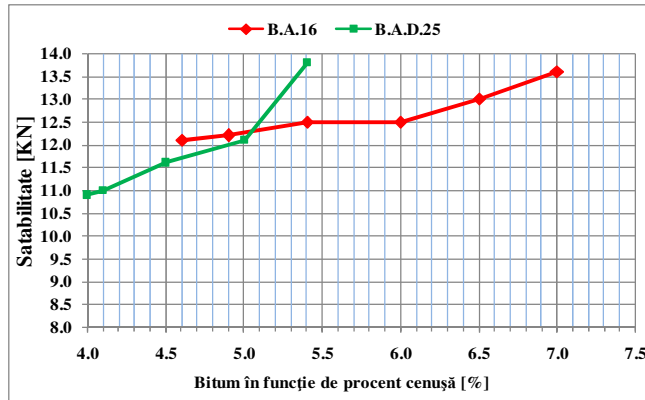


Figura 4.22. Stabilitatea Marshall în funcție de procentaje de bitum și cenușă pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25

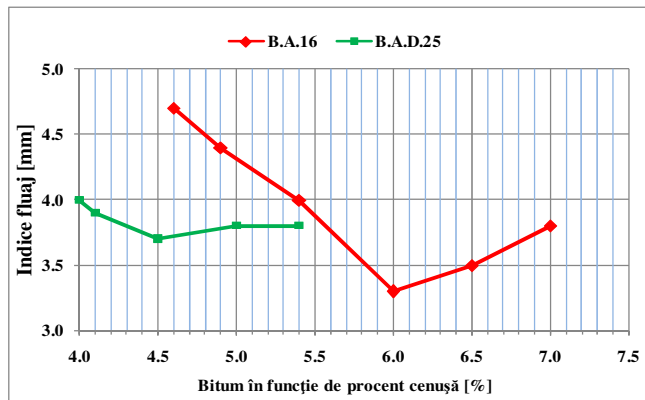


Figura 4.23. Indicele de fluaș Marshall în funcție de procentaje de bitum și cenușă pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25

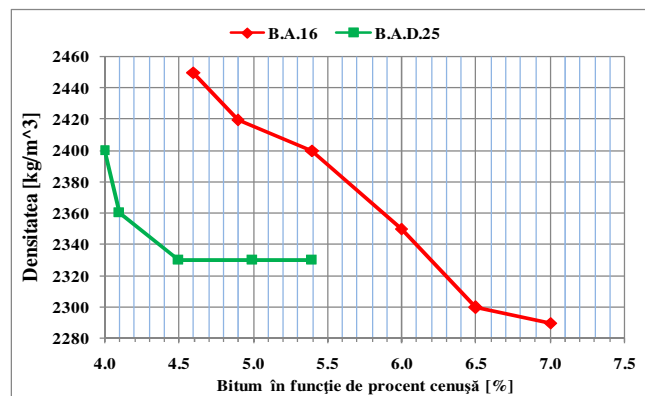


Figura 4.24. Densitatea probelor Marshall în funcție de procentaje de bitum și cenușă pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25



Referitor la absorbția de apă pentru amestecurile realizate, figura 4.25, se poate observa o fluctuație a acesteia în funcție de procente de cenușă utilizate. Deși normal ar fi ca absorbția de apă să scadă odată cu creșterea densității și a conținutului de bitum, în acest caz, datorită utilizării cenușii în amestec, densitatea mixturii scade, iar absorbția de apă pentru procente mai semnificative de cenușă utilizată în mixturile B.A.16 și B.A.D.25 prezintă o ușoară creștere. Acest lucru pare a fi inexplicabil datorită unei proprietăți a cenușii de termocentrală de a nu absorbi apa (este hidrofobă), fapt ce ar putea conduce mai departe la reducerea eventualelor segregări ale mixturii asfaltice. Totodată pe lângă aceste caracteristici (densitate scăzută, procent de bitum mai mare), o influență semnificativă privind absorbția de apă ridicată poate fi datorată compactării din laborator. Practic pentru dozajele realizate se poate spune că absorbția de apă se încadrează conform stas.

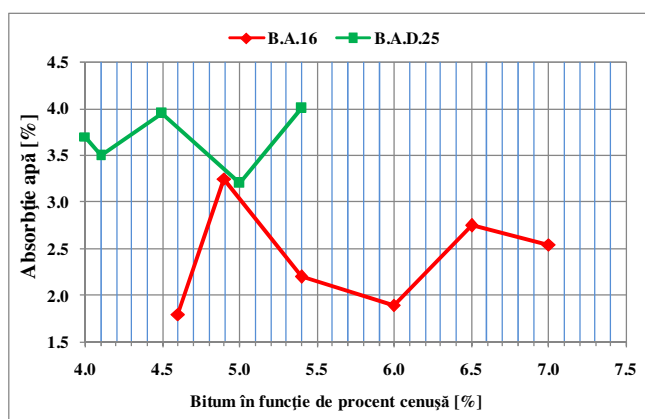


Figura 4.25. Absorbția de apă în funcție de procente de bitum și cenușă pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25

În ceea ce privește volumul de goluri al mixturilor realizate se poate spune că pentru dozajele ce conțin cenușă acesta crește, lucru normal așteptat datorită scăderii densității acestora. În mod normal la un conținut identic de liant ca în dozajele efectuate, dar având ca material de umplere fierul, volumul de goluri scade semnificativ, iar mixtura rezultată prezintă o susceptibilitate scăzută la umiditate. Acest lucru poate fi considerat la fel și pentru dozajele cu cenușă datorită caracterului hidrofob al acesteia. Referitor la rezultatele obținute, figura 4.26, pentru volumul de goluri din mixtură și volumul de goluri din amestecul de agregate, este demonstrat conform unor studii privind modul de determinare al acestora, în funcție de modul de compactare cu girocompactatorul sau cu compactatorul Marshall, un procent mai mic de până la 1,7...1,6 % a volumului de goluri determinat pe cilindri confecționați cu presa giratorie față de cilindrii Marshall [85], [89].

Astfel, ținând cont de faptul că aceste rezultate s-au determinat pe cilindrii Marshall, făcând o analogie conform modului de compactare menționat mai sus, se poate spune că valorile rezultate pentru dozajele B.A.16 privind volumul de goluri se încadrează conform limitelor recomandate pentru stratul de uzură, excepție făcând dozajul cu 10,0 % cenușă.

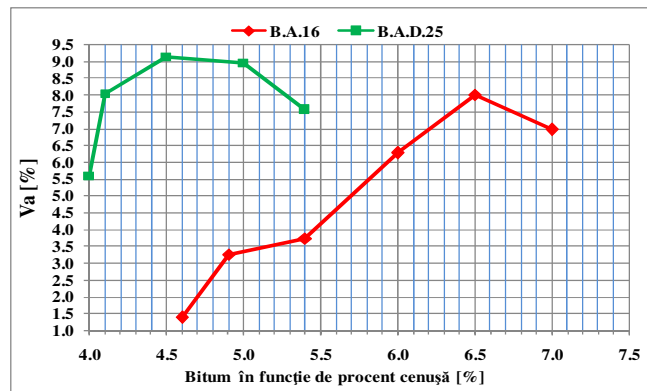


Figura 4.26. Volumul de goluri din mixtură în funcție de procentaje de bitum și cenușă pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25

Conform criteriilor SUPERPAVE privind volumul de goluri din amestecul de agregate VMA, acesta se compune din volumul de goluri din mixtură și volumul efectiv de liant. Din punct de vedere al analizării rezultatelor VMA-ului pentru mixturile realizate B.A.16 și B.A.D.25, figura 4.27, ce conțin și cenușă de termocentrală, se poate spune că respectă condițiile impuse. Un lucru esențial se remarcă pentru dozajele B.A.16 cu conținutul de cenușă 7,5 %, 10,0 % și 12,5 %, prin prisma faptului că deși prezintă un volum de goluri al amestecului de agregate mai ridicat, volumul de goluri umplute cu bitum respectă criteriile SUPERPAVE. Acest lucru poate fi datorat densității mai scăzute a cenușii de termocentrală față de filer. Astfel pentru dozajele cu mai multă cenușă în componență rezultă o densitate mai scăzută în pofida faptului că conținutul de bitum este ridicat, toate acestea conducând la un volum de goluri în masa mixturii spre limitele extreme.

Volumul de goluri umplute cu bitum, figura 4.28, pentru dozajele B.A.16 cu un conținut scăzut de liant bituminos nu se încadrează conform criteriilor SUPERPAVE. Acest inconvenient conduce mai departe la instabilitatea mixturii sub un efort de forfecare și îmbătrânire accelerată. În această situație făcând o analogie între conținutul de liant și materialele de umplere (filer și cenușă de termocentrală), se pot remarca următoarele aspecte: dacă dozajele respectată același procent de bitum precum și același conținut de filer în loc de cenușă de termocentrală, caracteristicile fizico-mecanice nu verifică, iar în momentul în care pentru același conținut de bitum s-a înlocuit parțial și total filerul cu cenușă, rezultatele obținute se încadrează conform stasului.

Concluziile ce pot fi trase în urma acestor încercări constau în faptul că pentru un conținut ridicat de bitum la realizarea mixturilor asfaltice, utilizarea cenușii ca material de umplere este benefică din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice (stabilitate Marshall, indice de fluj, densitate aparentă etc.) cât și din punct de vedere al îmbunătățirii rezistenței la oboseală, iar pentru același conținut de bitum, dar utilizând ca material de umplere în amestecuri filerul, mixtura asfaltică rezultată își pierde stabilitatea foarte repede în timpul exploatarei.

Unul dintre obiectivele esențiale ale studiului de laborator este acela de a urmări efectul proprietăților termo-fizice pe care le-am determinat asupra încercărilor fizico-mecanice. Astfel pentru a putea pune în evidență acest aspect, din măsurătorile realizate privind conductivitatea termică și căldura specifică asupra

dozajelor realizate a reieșit faptul că acestea sunt superioare pe măsură ce procentul de cenușă de termocentrală din amestec crește.

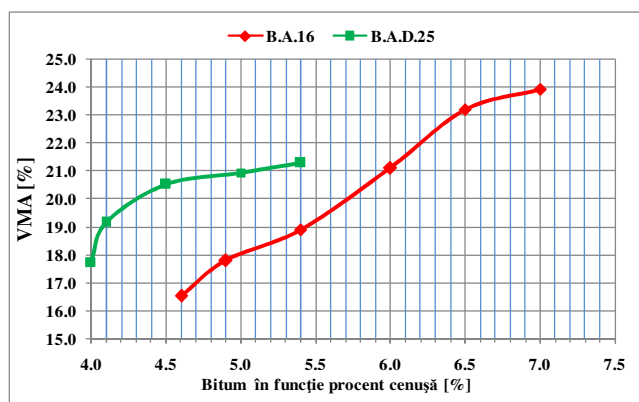


Figura 4.27. Volumul de goluri din amestecul de agregate în funcție de procente de bitum și cenușă pentru amestecurile B.A.16 și B.A.D.25

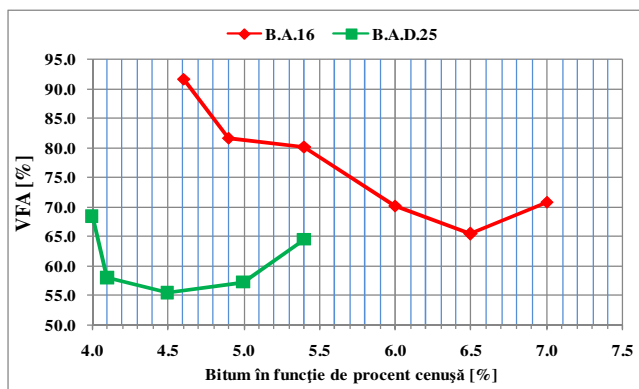


Figura 4.28. Volumul de goluri umplute cu bitum în funcție de procente de bitum și cenușă pentru amestecurile B.A.16 și B.A.D.25

Făcând o analogie între căldura specifică rezultată pentru dozajul B.A.16 cu 0 % cenușă și dozajul B.A.16 cu 7,5 % cenușă se poate afirma faptul că cel dintâi, deși are un conținut mai scăzut de bitum, prezintă o caracteristică termică net inferioară dozajului ce conține 7,5 % cenușă, pentru o temperatură de testare de 25 °C. Astfel, căldura specifică pentru dozajul B.A.16 cu 7,5 % cenușă, poate egala căldura specifică a dozajului B.A.16 cu 0 % cenușă, numai la o temperatură de testare mai mare cu 15 °C față de temperatura inițială la care a fost determinată. Mai exact amestecurile studiate, B.A.16 și B.A.D.25, în funcție de procentul de cenușă pe care îl conțin, pot avea aceleași rezultate ca și amestecul asfaltic ce conține filler, dar la temperaturi mai mari, conform caracteristicilor termice temperaturile pot fi cuprinse între 10...15 °C, față de temperatura inițială de 25 °C.

Pe baza acestui considerent, în laborator, pe amestecurile asfaltice rezultate, s-a determinat stabilitatea Marshall la temperaturi mai mari cu 10 °C, respectiv 20 °C,

decât temperatura de testare conform stasului SR 174-1/2009. În figurile 4.29 și 4.30, se poate observa evoluția stabilității Marshall și a indicelui de fluaj pentru mixtura B.A.16, în funcție de procentul de bitum și cenușă de termocentrală la temperaturile de testare stabilite (60 °C, 70 °C și 80 °C). Astfel, dozajele cu un conținut mai ridicat de cenușă la temperatura de testare de 70 °C și 80 °C față de temperatura standard de 60 °C, își pierd stabilitatea cu aproximativ 5 %, pe când dozajele ce conțin un procent mai mic de cenușă sau deloc își pierd stabilitatea cu aproximativ 30 %.

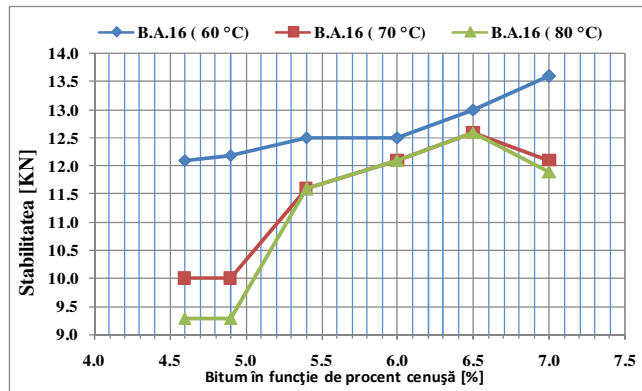


Figura 4.29. Stabilitatea Marshall în funcție de procente de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.16 la temperaturi diferite

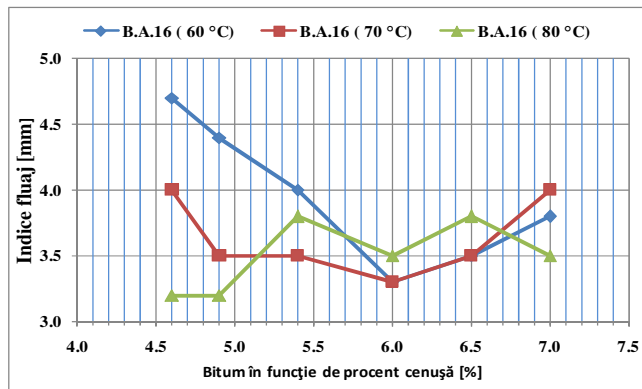


Figura 4.30. Indicele de fluaj în funcție de procente de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.16 la temperaturi diferite

În ceea ce privește dozajele de mixtură asfaltică B.A.D.25 realizate, rezultatele referitoare la caracteristicile termice prezintă o evoluție mai mică pentru mixtura ce conține cenușă și filer, acest fenomen datorându-se conținutului mai scăzut de liant precum și volumului de goluri mai ridicat datorat agregatului mare. Deși aceste proprietăți termo-fizice par apropiate, atunci când s-a determinat pe cilindrii Marshall stabilitatea și indicele de fluaj au apărut diferențe semnificative în funcție de temperatura de testare la care au fost supuși. Din figura 4.31, se poate observa că mixtura asfaltică ce nu conține cenușă de termocentrală își pierde mult

mai repede stabilitatea față de celelalte. Ca și procent de scădere a stabilității, acesta se încadrează undeva la 20 % pentru eșantioanele din asfalt ce conțin numai filer față de aproximativ 10 % pentru cele ce conțin și cenușă de termocentrală.

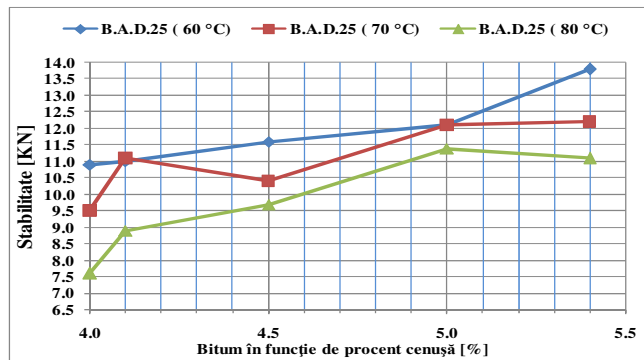


Figura 4.31. Stabilitatea Marshall în funcție de procente de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.D.25 la temperaturi diferite

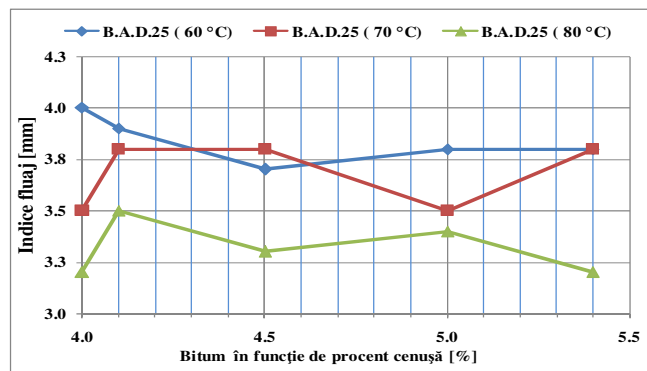


Figura 4.32. Indicele de fluj în funcție de procente de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.D.25 la temperaturi diferite

## 4.6. Rigiditatea mixturilor asfaltice realizate

Rigiditatea mixturilor asfaltice este una dintre cele mai importante caracteristici care influențează major comportarea în exploatare a unui strat asfaltic din componența unei structuri rutiere. Această proprietate este influențată semnificativ de temperatură, precum și de efectul îmbătrânirii liantului bituminos.

După cum am prezentat în capitolul 2, modulul complex ( $E^*$ ) pentru un material vâscoelastic, cum de altfel este și mixtura asfaltică, este folosit pentru reprezentarea rigidității. Modulul complex se determină plecând de la o încărcare dinamică obținându-se astfel raportul dintre tensiunea impusă și deformația rezultată, care din cauza caracterului vâscoelastic al materialului, apare cu întârziere față de acțiunea tensiunii, întârziere denumită defazaj. Astfel unghiul de defazaj este folosit pentru a determina susceptibilitatea mixturii asfaltice la schimbările condițiilor de mediu (în special temperatura) [82].

Modulul de rigiditate reprezintă norma modulului complex sau valoarea modulului secant. Modulul secant reprezintă relația între efort și deformație la timpul de încărcare  $t$ , pentru un material supus unei viteze controlate de deformație:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \quad (4.7)$$

unde:

$\sigma(t)$  – efortul,  $\varepsilon(t)$  – deformația și  $t$  – timpul.

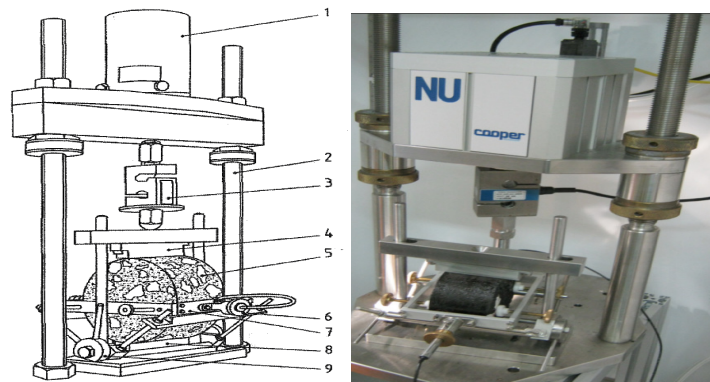
Din punct de vedere al analizării factorilor care influențează direct măsurarea modulului dinamic, există în literatura de specialitate o serie de programe de încercări care constă în variația mai multor factori, factori în urma cărora pot fi trase următoarele concluzii:

- cu cât temperatura crește, modulul de rigiditate scade;
- unghiul de defazaj crește odată cu temperatura;
- modulul de rigiditate scade cu creșterea volumului de goluri;
- modulul de rigiditate crește dacă vâscozitatea bitumului crește;
- modulul de rigiditate scade cu creșterea procentului de bitum din dozaj;
- modulul de rigiditate scade cu scăderea efortului de compactare.

#### 4.6.1. Metoda de determinare a modulului de rigiditate în laborator

Metoda de determinare a modulului de rigiditate utilizată a fost „Încercarea prin aplicarea unei întinderi indirecte pe epruvete cilindrice (IT-CY)”, conform SR EN 12697-26/2004 [109].

Aparatura de încercare, figura 4.33, este compusă dintr-un cadru de oțel pentru încărcare și două benzi de oțel inoxidabil, care prezintă pe fața ce vine în contact cu epruveta o ușoară concavitate pe întreaga lățime. Marginile benzilor de încărcare sunt rotunjite pentru a se evita tăierea epruvetei în timpul încercării. Trebuie să se asigure un mijloc de centrare a platanului inferior cu axa cadrului de oțel pentru încărcare. Platanul superior face contact cu sistemul de încărcare printr-un reazem sferic.



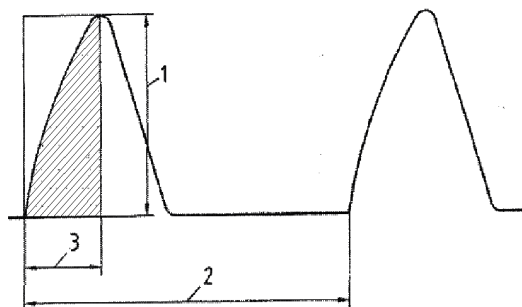
Legendă:

- |  |  |
|--|--|
| 1 Dispozitiv pneumatic de acționare a încărcării | 6 Regulator LVDT                                   |
| 2 Cadru de oțel pentru încărcare                 | 7 Cadru de montare LVDT                            |
| 3 Capsulă dinamometrică                          | 8 Placă inferioară de încărcare                    |
| 4 Placă superioară de încărcare                  | 9 Aliniament LVDT pentru dispozitivul de strângere |
| 5 Epruvetă de încercat                           |  |

Figura 4.33. Exemplu de echipament de încercare

Un dispozitiv de acționare a încărcării adecvat este încorporat prin mijloace prin care încărcarea poate fi aplicată în lungul diametrului vertical al epruvetei, prin plăcile de încărcare. Acest dispozitiv de acționare trebuie să fie capabil să aplice impulsuri repetate încărcării cu o perioadă de pauză. Încărcarea va avea forma unei funcții haversiene sau apropiată de aceasta. Timpul de acționare a încărcării trebuie controlat în timpul încercării. Acest timp de încărcare este măsurat din momentul în care începe impulsul încărcării și este timpul necesar pentru ca încărcarea aplicată să crească de la zero la valoarea maximă care trebuie atinsă ( $124 \pm 4$ ) ms. Valoarea încărcării maxime trebuie să fie reglată pentru a se realiza în acel moment deformația orizontală de trecere de 0,005 % din diametrul epruvetei.

Factorul de suprafață al încărcării trebuie să fie raportul între suprafața hașurată din figura 4.34, și produsul timpului de propagare și încărcarea maximă. Atunci când acest factor deviază de la 0,60, modulul de rigiditate măsurat trebuie corectat.

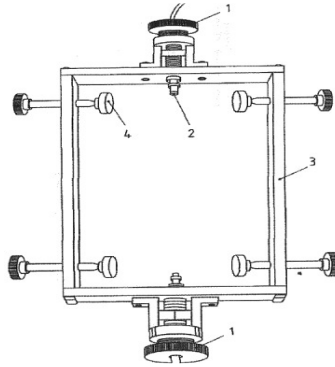


- 1 Încărcare maximă
- 2 Perioadă de repetare a impulsurilor
- 3 Timp de propagare

Figura 4.34. Forma impulsului încărcării, care indică timpul de propagare și încărcarea maximă

În figura 4.35, este prezentat dispozitivul adecvat pentru măsurarea deformației diametrului orizontal. Sistemul de măsurare al deformației este capabil de monitorizarea deformației pe diametrul orizontal al epruvetei în timpul unui impuls de încărcare. Exactitatea măsurării trebuie să fie mai mare cu  $1 \mu\text{m}$  peste domeniul de  $\pm 50 \mu\text{m}$ . Valoarea maximă a deformației orizontale înregistrată trebuie să fie amplitudinea modificării diametrului orizontal al epruvetei.

Standardul recomandă că deformația orizontală țintă este de 5 micrometri pentru o probă cu diametrul de 10 cm și de 7 micrometri pentru o probă cu diametrul de 15 cm. De la introducerea originalului 5 kN Nottingham Asphalt Tester (NAT) în Marea Britanie, amestecurile au devenit semnificativ mai rigide, aceasta în principal pentru că NAT furnizează căile de măsurare a rigidității pentru amestecuri mai dure. Cu aceste materiale care prezintă o rigiditate ridicată, deformațiile orizontale țintă pot să nu se producă deoarece sarcini ca acelea de 5 kN ale testerului nu sunt suficient de mari pentru timpul de ridicare specific (124 ms). Cu ajutorul aparatului de testare de o capacitate mare CRT-NU14, figura 4.36, rigiditatea acestor materiale cu module superioare poate fi acum măsurată cu acuratețe.



Legendă:

1 Regulator LVDT  
3 Cadru de montare LVDT

2 LVDT  
4 Bride de prindere

Figura 4.35. Dispozitiv de măsurare a deformației diametrului orizontal



Figura 4.36. Camera și aparatul de testare COOPER CRT-NU14

#### 4.6.2. Măsurarea rigidității

Pentru măsurarea rigidității se aplică cel puțin 10 impulsuri de condiționare, cu scopul de a face apt echipamentul să adopte amplitudinea și durata încărcării, care să dea deformația orizontală specificată a diametrului și timpul. Dacă este necesar, dispozitivele de măsurare a deformației trebuie aduse înapoi la aproximativ mijlocul porțiunii domeniilor de lucru. Ulterior se aplică epruvetei cinci impulsuri de încărcare și, pentru fiecare aplicare a impulsului de încărcare, se măsoară, și se înregistrează variația încărcării aplicate și a deformației diametrului orizontal cu timpul, și se determină factorul de suprafață al încărcării.

Traversa superioară a presei trebuie să se poziționeze astfel încât să dea un factor de suprafață al încărcării în intervalul de la 0,50 până la 0,70. Dacă această



poziționare nu se realizează, epruveta trebuie refuzată și rezultatele respinse. Valoarea recomandată pentru factorul de suprafață al încărcării este de 0,60.

Folosind măsurările de la 5 impulsuri ale încărcării, modulul de rigiditate măsurat se determină pentru fiecare impuls cu relația :

$$S_m = \frac{F \times (v+0,27)}{(z \times h)} \quad (4.8)$$

unde:

$S_m$  – modulul de rigiditate măsurat, exprimat în MPa;

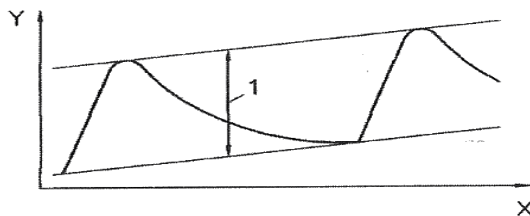
$F$  – valoarea maximă a încărcării verticale aplicate, exprimată în N;

$z$  – amplitudinea deformației orizontale obținută în timpul ciclului de încărcare, exprimată în mm;

$h$  – grosimea medie a epruvetei, exprimată în mm;

$v$  – coeficientul lui Poisson.

Dacă coeficientul lui Poisson nu este determinat, se ia valoarea de 0.35 pentru toate temperaturile.



Legendă:

X - Timp

Y - Deformație

1 - Amplitudinea deformației

Figura 4.37. Amplitudinea deformației

Modulul de rigiditate măsurat trebuie să fie adaptat la factorul de suprafață al încărcării cu 0,60, folosind următoarea relație:

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k)) \quad (4.9)$$

unde:

$S'_m$  – modulul de rigiditate măsurat, exprimat în MPa, adaptat la factorul de suprafață al încărcării cu 0,60;

$k$  – factorul de suprafață al încărcării măsurat;

$S_m$  – modulul de rigiditate măsurat, exprimat în MPa, la un factor de încărcare  $k$ , exprimat în grade Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Epruveta trebuie încercată pe două diametre care înainte de poziționarea ei pentru încercare sunt trasate. Dacă valoarea medie a modulului de rigiditate pentru această încercare trebuie să fie între +10 % sau -20 % din valoarea medie înregistrată pentru prima încercare, media pentru cele două încercări trebuie să se calculeze și înregistreze ca modul de rigiditate al epruvetei.

### 4.6.3. Rezultate experimentale de laborator asupra modulului de rigiditate

Determinarea modulului de rigiditate în funcție de modul de compactare s-a făcut utilizând girocompactorul [111]. Încercarea de laborator a fost cea de întindere indirectă pe probe cilindrice, la temperatura de 15  $^{\circ}\text{C}$  și durată de încărcare de 124 ms, atât pentru mixtura asfaltică B.A.16, cât și pentru mixtura

asfaltică B.A.D.25, mixturi ce au în componență ca material de umplere în locul filerului diferite procente de cenușă. Pentru acest tip de compactare s-a urmărit obținerea de probe cu caracteristici volumetrice asemănătoare (volumul de goli pentru mixtura B.A.16 să se încadreze între limitele prevăzute de 2,0...5,0 %).

Pentru a putea pune în evidență pe de o parte efectul cenușii de termocetrală din masa mixturii asfaltice în funcție de procentul de bitum, pentru betonul asfaltic B.A.16, s-au efectuat o serie de probe cilindrice cu un conținut ridicat de bitum, dar aproximativ egal pentru toate dozajele, indiferent de procentul de cenușă care a intrat în amestec. Pe de altă parte s-au realizat o serie de probe cilindrice conform dozajelor stabilite pentru încercările fizico-mecanice uzuale.

Pentru modulul de rigiditate la 15 °C, în funcție de procentul de bitum și cenușă ce intră în amestec pentru probe cilindrice confecționate cu girocompactorul, conform metodei de încercare la întindere indirectă (IT-CY), figura 4.38, se constată următoarele:

- pentru același procent de bitum, dar utilizând ca material de umplere în amestecul de asfalt filerul valoarea modulului de rigiditate este mai scăzută față de utilizarea cenușii;
- pe parcurs ce procentul de bitum rămâne neschimbat, dar în amestec se înlocuiește treptat filerul cu cenușă, valoarea modulului de rigiditate crește;
- dacă procentul de bitum scade modulul de rigiditate crește, dar în această stuație mixtura asfaltică este susceptibilă la oboseală și îmbătrânire accelerată.

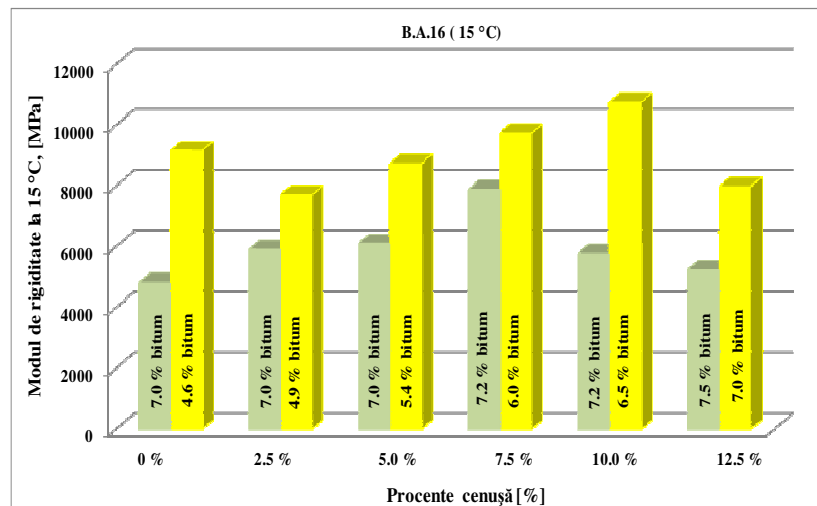


Figura 4.38. Modulul de rigiditate la IT-CY în funcție de procentul de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.16

În ceea ce privește esența acestui studiu și în cazul de față, pentru determinarea modulului de rigiditate se urmărește pierderea valorii acestuia în funcție de creșterea temperaturii de testare, ținând cont de proprietățile termofizice studiate pe aceste mixturi asfaltice. Astfel din figura 4.39, se poate observa că pentru un conținut mai ridicat de bitum, la temperaturi de determinare mai mari cu 5 °C, respectiv 10 °C față de temperatura de 15 °C conform stas SR 174-1/2009, pentru amestecul ce conține numai filer, valoarea modulului de rigiditate scade cu

până la 50...60 %, figura 4.40, față de amestecurile ce conțin și cenușă de termocentrală unde valoarea modulului de rigiditate scade numai cu 30...40 %.

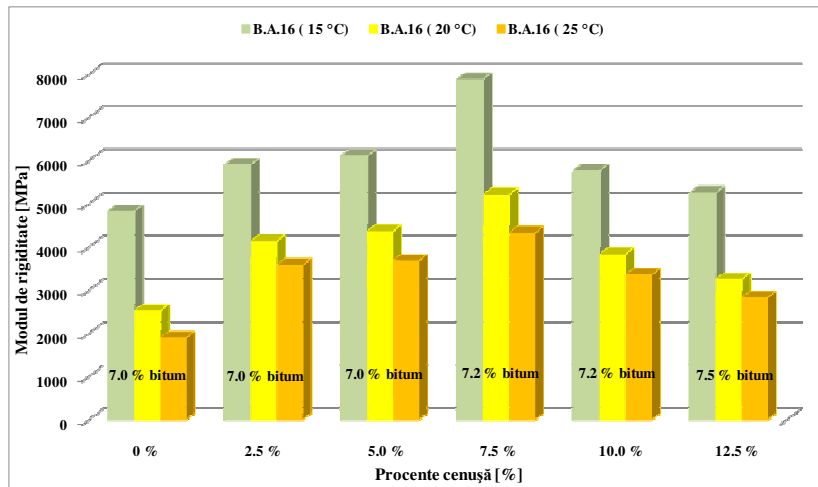


Figura 4.39. Evoluția modulului de rigiditate la IT-CY în funcție de un conținut ridicat de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.16 supusă la temperaturi mai mari

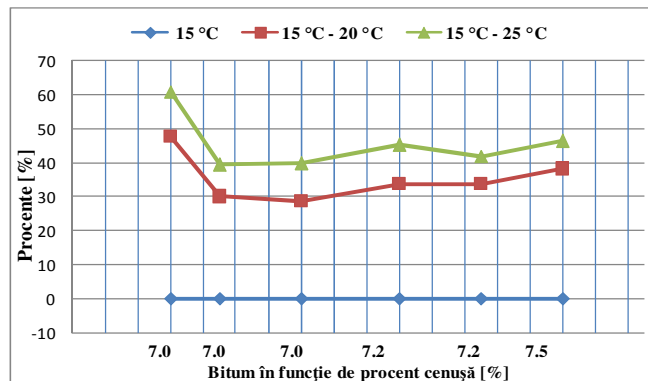


Figura 4.40. Procentele de evoluție a modulului de rigiditate în funcție de temperatură pentru mixtura B.A.16 cu conținut ridicat de bitum

Dacă procentul de bitum din amestec este mai mic, conform studiului privind proprietățile termo-fizice, căldura specifică a mixturii asfaltice este superioară, iar valoarea modulului de rigiditate scade, dar nu așa de mult ca și în cazul în care am avea un conținut mai mare de bitum. Modulul de rigiditate determinat pe mixtura asfaltică B.A.16 cu conținut variabil de bitum în funcție de procentul de cenușă justifică acest lucru conform figurii 4.41. Din figură reiese faptul că pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 0 % cenușă valoarea modulului de rigiditate în funcție de temperaturile superioare de testare scade cu 45...55 %, în timp ce pentru celelalte doze ce conțin și cenușă de termocentrală, deși procentul de bitum este mai mare, valoarea modulului de rigiditate scade în funcție de conținutul de cenușă până la valori de 30...40 %, figura 4.42.

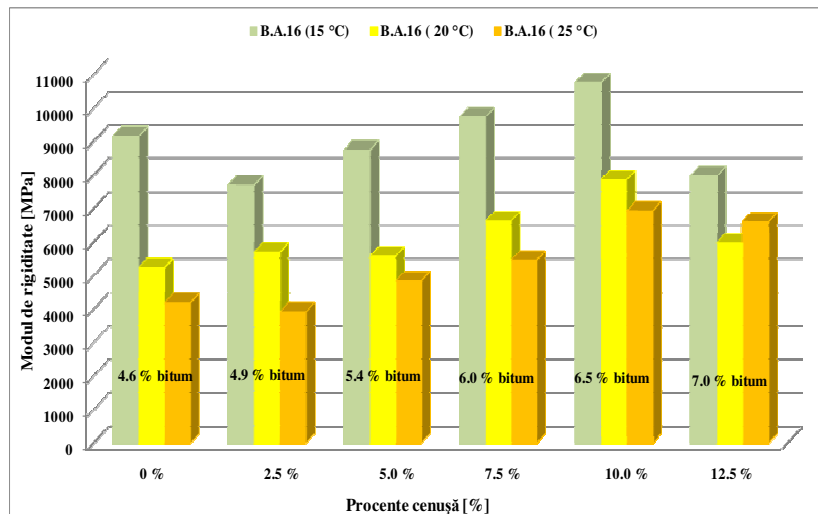


Figura 4.41. Evoluția modului de rigiditate la IT-CY în funcție de un conținut scăzut de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.16 supusă la temperaturi mai mari

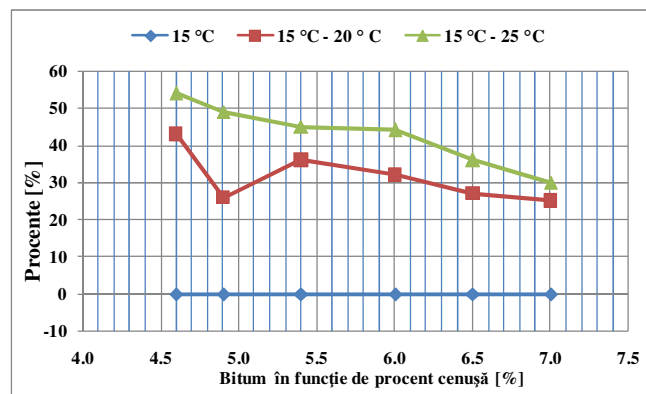


Figura 4.42. Procentele de evoluție a modului de rigiditate în funcție de temperatură pentru mixtura B.A.16 cu conținut scăzut de bitum

Referitor la probele de mixtură asfaltică B.A.D.25 cu diferite procente de bitum, respectiv cenușă în amestec, conform rezultatelor măsurării modului de rigiditate, figura 4.43 se remarcă și pentru acest tip de mixtură o scădere semnificativă a acestuia mai ales pentru dozajul ce conține numai filer respectiv un procent redus de 2,5 % cenușă, astfel valoarea modului scade cu aproximativ 35...55 %. Totodată, pentru probele ce conțin un procent semnificativ de cenușă și bitum, apare o discrepanță mare între valorile modului de rigiditate determinate pentru temperatura de 20 °C și temperatura de 25 °C cu aproximativ 30 %. Acest inconvenient poate fi datorat compactării necorespunzătoare a probelor respective, compactare care conduce la un volum ridicat de goluri în masa mixturii, astfel, expunându-le la o temperatură ridicată, modulul de rigiditate scade, figura 4.44.

În urma determinării modului de rigiditate pentru toate probele realizate se poate evidenția faptul că acestea sunt foarte susceptibile la variații de temperatură. Din punct de vedere al corelației dintre caracteristicile termice și valorile modului de rigiditate, se poate spune că acestea au un efect favorabil în previziunea temperaturii la care sunt supuse. Cu cât căldura specifică rezultată este superioară, modulul de rigiditate scade treptat în funcție de creșterea temperaturii. Mixturile asfaltice ce conțin cenușă prin înlocuirea parțială sau totală a fillerului își pierd mai greu rigiditatea la temperaturi mai ridicate decât mixturile ce conțin numai filler. Mai exact, ca și ordin de mărime în ceea ce privește afirmația de mai sus, valoarea modului de rigiditate pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 0 % cenușă și temperatură de testare de 15 °C, respectiv valoarea modului pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 7,5% cenușă și temperatură de testare de 25 °C, amândouă cu aproximativ același conținut de bitum, este aproximativ egală, figura 4.39.

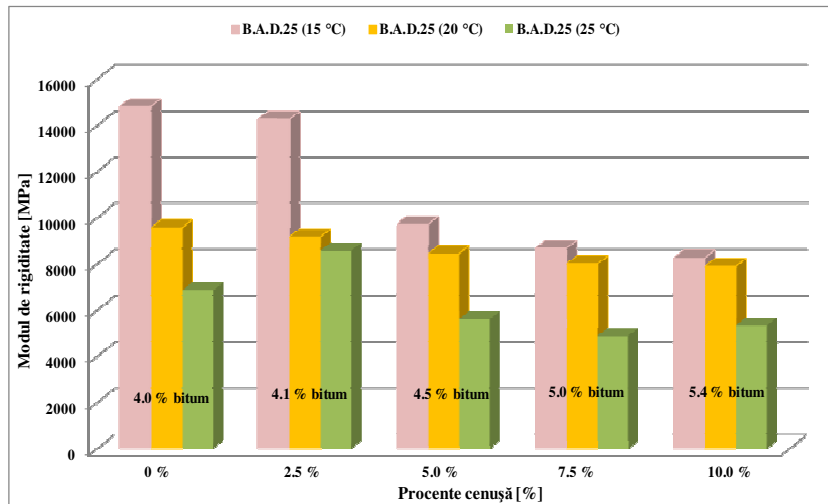


Figura 4.43. Evoluția modului de rigiditate la IT-CY în funcție de un conținut scăzut de bitum și cenușă pentru mixtura B.A.D.25 supusă la temperaturi mai mari

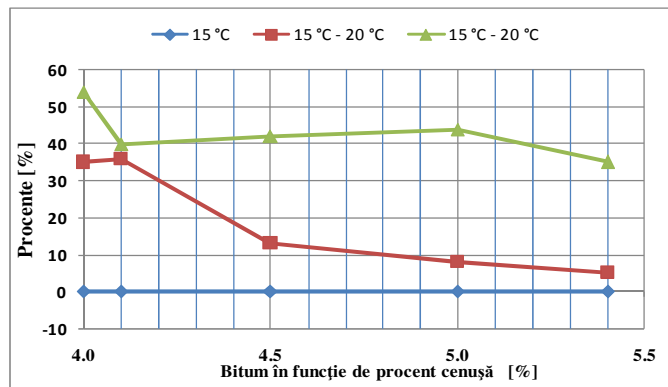


Figura 4.44. Procentele de evoluție a modului de rigiditate în funcție de temperatură pentru mixtura B.A.D.25

Deci această susceptibilitate la variații de temperatură afectează modulul de rigiditate prin diminuare. Pentru ca stratul asfaltic să se comporte normal în condiții de exploatare, el ar trebui supus la aceeași temperatură pentru care a fost conceput, dar cum acest lucru este imposibil datorită schimbărilor climatice cu care ne confruntăm în momentul de față, prin utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt în locul fillerului, temperatura poate să varieze cu până la 10 °C peste temperatura inițială.

Totodată, de acest lucru ar trebui să se țină seama în considerarea valorilor modulelor de rigiditate necesare în calculele de dimensionare a straturilor din asfalt, ce împreună cu straturile de fundație alcătuiesc structura rutieră.

#### **4.7. Studiul efectelor din fluaj pentru mixturile asfaltice realizate**

Una dintre principalele degradări ce apar la drumurile cu structuri rutiere flexibile o reprezintă deformațiile permanente, care se manifestă sub forma unor neregularități în profil longitudinal și în special în profil transversal, prin deformații produse de trafic și de condițiile climatice [98], [100], [103].

Efectele acestui tip de degradare asupra confortului și siguranței circulației, fac necesară proiectarea structurilor rutiere în așa fel încât mărimile ce caracterizează suprafața drumului să nu scadă sub anumite limite pe întreaga durată de viață a structurii rutiere.

În producerea deformațiilor permanente intervin trei mecanisme care conduc la neregularități ale suprafeței căii de rulare și în special la producerea fâgașelor. Aceste mecanisme sunt clasificate astfel:

- ornierajul de structură, este rezultatul deformațiilor individuale ale unui sau mai multor straturi (inclusiv stratul suport) ce conține straturile asfaltice, datorită tensiunilor rezultate din încărcarea dată de autovehicule, tensiuni ce depășesc rezistența materialului. Forma fâgașelor rezultate prezintă o deschidere sub formă de "V" în secțiune transversală;

- ornierajul de fluaj (curgere), este rezultatul deformațiilor individuale ale straturilor asfaltice datorate tensiunilor produse de încărcările din trafic, tensiuni care depășesc rezistența materialului. Forma fâgașelor rezultate prezintă umeri pe ambele părți sub formă de "W" sub acțiunea roților gemene. Aceste fâgașe se formează adesea în rampă și în apropierea intersecțiilor, acolo unde vehiculele grele reduc viteza iar tensiunile tangențiale care rezultă în zona de contact pneu îmbrăcămintă sunt mari;

- ornierajul de uzură, este rezultatul uzurii îmbrăcăminții rutiere datorată pneurilor cu crampoane sau cu lanțuri folosite pe perioada de iarnă și se prezintă în profil transversal sub formă discontinuă.

Ornieraajul reprezintă acumularea deformațiilor plastice (permanente) în toate straturile rutiere. Metodele teoretice bazate pe metoda deformației stratului arată în general că cele mai mari deformații plastice apar la partea inferioară a stratului.

Dintre mecanismele prezentate, cel mai în măsură să prezică o proiectare adecvată a amestecurilor conform studiului realizat până în momentul de față pentru mixtura asfaltică B.A.16 și B.A.D.25, este ornieraajul din fluaj.

Ornieraajul din fluaj în straturile asfaltice apare din cauza proiectării neadecvate a amestecului de agregate, filler și bitum și nu este influențat de proiectarea structurii rutiere. Factorii care influențează acest tip de ornieraaj se referă

la caracteristicile materialelor componente, la proporția lor în mixtură și la punerea în operă a mixturii asfaltice.

Din cauză că ornerajul se produce datorită tensiunilor tangențiale mari de scurtă durată, în mixtura asfaltică apare fenomenul de fluaj și relaxare, deosebit de important prin consecințele sale. Astfel, factorii care intervin cu rol hotărâtor în analiza acestei stări de tensiune foarte complexă sunt viteza de deformare și temperatura. În practică, fenomenul poate să se prezinte sub două aspecte:

- variația deformațiilor cu timpul sub sarcină constantă constituie o latură a acestui fenomen și este numită fluaj;
- variația tensiunilor cu timpul sub deformare constantă constituie cealaltă latură, numită relaxare.

Acesta este cazul materialelor neomogene la care, simultan cu fluajul, se produce o variație însemnată a tensiunilor [17]. Fluajul acționează ca o deformare plastică. Datorită fluajului, deformațiile structurilor rutiere pot spori de câteva ori față de cele instantanee. De aceea, la trepte mari de încărcare sau temperaturi ambiante ridicate, fluajul poate provoca o rupere prematură a structurii.

Forma generalizată utilizată pentru a putea ilustra stadiile fluajului este reprezentată în figura 4.45. Deformația la fluaj, pentru un nivel dat de tensiune este reprezentată în funcție de timp și este împărțită în trei stadii.

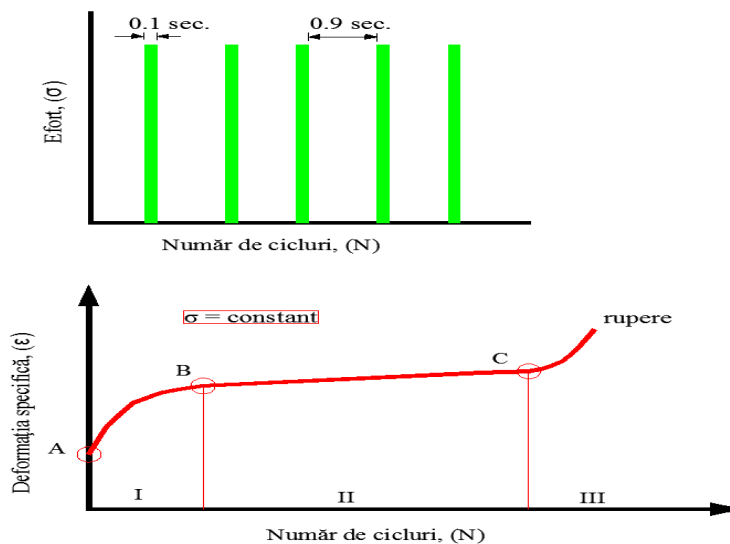


Figura 4.45. Stadiile fluajului

Cele trei stadii ale fluajului sunt:

- I - fluajul nestabilizat;
- II - fluajul stabilizat;
- III - cedarea.

În primul stadiu viteza de deformare crește rapid, în al doilea stadiu viteza de deformare este constantă (panta drepte reprezintă viteza de deformare), iar a treia regiune prezintă stadiul de rupere în care deformația crește din nou rapid.

Fluajul nestabilizat AB se caracterizează prin scăderea treptată a vitezei de deformare. Descreșterea vitezei de deformare se datorește fenomenului de consolidare prin ecrusare, care însoțește întotdeauna deformațiile plastice.

Fluajul stabilizat corespunde porțiunii rectilinii BC și se caracterizează prin faptul că viteza de deformare rămâne constantă. Când se stabilește un echilibru între acțiunile antagoniste ale temperaturii și ecruisării, viteza de deformare atinge o valoare minimă, constantă în timp. Faza fluajului stabilizat este cea mai importantă întrucât ea durează timp îndelungat, iar dacă epruveta nu ajunge la rupere, aceasta poate reprezenta aproape în totalitate fenomenul. În acest stadiu, viteza deformației plastice depinde de vâscozitatea liantului și de tensiunile care iau naștere.

Pe măsură ce tensiunea și temperatura cresc, durata stadiului fluajului stabilizat se reduce și curba care se obține capătă cu totul altă formă. Când încărcările și temperatura sunt prea ridicate, stadiul al doilea al fenomenului de fluaj poate lipsi. În acest caz punctele B și C se confundă. Apare un punct de inflexiune, de unde vitezele de fluaj descrescătoare se transformă în viteze de fluaj crescătoare.

Zona de cedare este ultimul stadiu al fenomenului de fluaj, în care viteza de deformare începe să crească din nou, ceea ce duce la modificarea concavității curbei  $\epsilon = f(t)$  către axa deformațiilor. În cele din urmă, din cauza microfisurilor și a dislocărilor, tensiunile cresc foarte mult și apare ruperea epruvetei.

Cerințele pentru o bună rezistență la fluaj sunt în contradicție cu cele pentru o bună rezistență la oboseală. De exemplu, o mixtură foarte bogată în bitum și săracă în volum de goluri va avea o rezistență ridicată la fisurarea din oboseală (durabilitate), dar o rezistență mică la ornieraj (stabilitate). În general, o astfel de mixtură asfaltică va fi mai ușor de pus în operă. În altă ordine de idei, o mixtură asfaltică bogată în agregate și goluri, și săracă în conținut de bitum, va avea o rezistență mare la ornieraj (stabilitate bună), dar o rezistență mică la oboseală (durabilitate slabă). O astfel de mixtură va fi mai puțin lucrabilă.

În practică se caută o soluție de compromis între exigențele în materie de rezistență la fisurare și rezistență la ornieraj prin fluaj. Această idee este susținută de faptul că în permanență se caută menținerea unui echilibru între stabilitate și durabilitate, prin mijloace practice. De fapt, atât durabilitatea, cât și stabilitatea, sunt indispensabile într-o anumită măsură, depinzând de rolul stratului în structura rutieră. În cele din urmă este necesar să se ajungă la proiectarea unei mixturi asfaltice care să permită o ușoară punere în operă și să furnizeze materialului proprietățile cerute pentru durabilitate și stabilitate [67].

#### **4.7.1. Factori care influențează deformațiile permanente ale mixturilor asfaltice**

Deformațiile permanente se dezvoltă odată cu creșterea numărului de încărcări aplicate în strânsă legătură cu proprietățile mixturii asfaltice și cu evoluția caracteristicilor mediului ambiant.

O parte din factorii care afectează deformațiile permanente pot fi controlați sau modificați, în timp ce alții, precum ar fi variațiile sezoniere de temperatură și alți factori externi, nu pot fi controlați. În același timp, de-a lungul duratei de viață a drumului unii factori rămân neschimbați de exemplu (grosimea stratului care rămâne aceeași încă din faza de dimensionare), în timp ce alții variază sezonier sau odată cu îmbătrânirea și degradarea mixturii.

Astfel mixtura asfaltică este expusă unei serii întregi de factori care influențează evoluția deformațiilor permanente. Dintre acești factori vor fi prezentați pe scurt aceia care caracterizează comportarea mixturilor asfaltice din exterior (traficul și condițiile climatice) [34], [104].



Traficul reprezintă unul din principalii factori care se iau în considerare în proiectarea drumurilor. Tensiunile ce apar la suprafața sistemului rutier depind de încărcarea pe osie, presiunea de contact, volumul traficului și în particular, compoziția traficului și procentul de autocamioane și tipul lor, modul de încărcare, durata sa și frecvența.

Evoluția caracteristicilor geometrice și de greutate ale vehiculelor comerciale a fost dramatică în ultimii douăzeci de ani. Ca rezultat, traficul a devenit mai agresiv, nu numai prin creșterea numărului de vehicule comerciale, dar și prin creșterea efectelor distrugătoare date de vehicule. De exemplu, un pericol pentru drumuri îl reprezintă roata simplă cu pneu mare, care este semnificativ mai distrugătoare pentru structurile rutiere flexibile decât roata dublă tradițională. Acest tip de roată, deși prezintă o aceeași încărcare și presiune de contact, induce o deformare mai mare la compresiune în toate straturile sistemului rutier și o tensiune mai mare de întindere la partea inferioară a stratului asfaltic.

Condițiile climatice care pot influența deformările permanente ale straturilor asfaltice sau efectele acestor deformări asupra confortului călătorilor se referă la temperatura aerului și variațiile sale, și la precipitații.

Temperatura exterioară (a aerului) afectează direct suprafața drumului și influențează straturile structurii rutiere. Materialele asfaltice fiind de culoare închisă absorb cu ușurință căldura din exterior. Pe de altă parte, ele au un coeficient scăzut al conductivității termice.

În orice investigații ale comportării plastice se iau în considerare numai temperaturile exterioare mari, împreună cu durata de expunere la soare. Al doilea factor este extrem de important pentru formarea fâgașelor [52].

S-a constatat, din măsurători, că la suprafața sistemului rutier flexibil temperatura poate atinge peste 60 °C. La câțiva centimetri adâncime (de la 1,5 cm la 5 cm) temperatura variază între 55 °C și 60 °C. Temperaturile nu depind de regiunea în care se află drumul, ci de temperatura ambiantă din ziua în cauză. În sprijinul celor precizate mai sus vin unele măsurători efectuate în centrul Franței, în sudul Franței, în Germania și în Italia, pentru aceeași temperatură a aerului: 35 °C, tabelul 4.16.

Tabelul 4.16  
Temperaturi aproximative în sistemul rutier, pentru o temperatură exterioară de 35 °C

| Centrul Franței    | Sudul Franței      | Germania       | Italia         |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 0 cm: 50 °C        | 0 cm: 50 °C        | 0 cm: 45 °C    | 0 cm: 54 °C    |
| - 4 cm: 45 – 50 °C | - 4 cm: 50 – 55 °C | - 5 cm: 42 °C  | - 10 cm: 27 °C |
| - 8 cm: 40 – 45 °C | - 8 cm: 45 – 50 °C | - 10 cm: 35 °C | - 17 cm: 21 °C |
| - 18 cm: 35 °C     | - 18 cm: 40 °C     | - 25 cm: 28 °C | - 52 cm: 18 °C |

Așadar, deformările permanente sunt influențate major de evoluția temperaturii, fiind astfel foarte important să se țină cont de distribuția temperaturii în timp, cât și în grosimea stratului asfaltic.

#### **4.7.2. Tipul de încercare de laborator aplicat pentru caracterizarea mixturilor asfaltice la deformării permanente**

Tipurile de încercări folosite pentru a caracteriza comportarea la deformării permanente a mixturilor asfaltice sunt:

1. teste la fluaj static;
2. teste de încărcări repetate: - compresiune ciclică uniaxială;  
- compresiune ciclică triaxială;
3. încercarea la făgășuire (Wheel tracking test);
4. încercările SHRP.

Tipul de încercare utilizat pentru caracterizarea deformațiilor pentru mixturile asfaltice B.A.16 și B.A.D.25 confecționate în cadrul laboratorului de drumuri cu diferite procente de cenușă de termocentrală în amestec, a fost încercarea de compresiune ciclică triaxială [108].

Conform acestui tip de încercare, proba este supusă unei încărcări axiale în același timp cu o presiune de fretare. Astfel proba este închisă într-o membrană etanșă pe platanul inferior, figura 4.46. Platanul inferior este perforat și proiectat să permită aplicarea de vacuum care va produce o presiune diferențială între exteriorul și interiorul membranei, acest lucru fiind de fapt ceea ce apare efectiv în plus față de testul triaxial convențional.

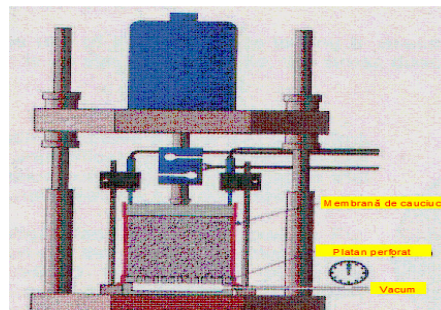


Figura 4.45. Testul triaxial de vacuum

Încărcarea axială aplicată prin acest tip de încercare este considerată a fi mult mai simulativă de încărcarea din trafic, decât încărcarea aplicată prin fluaj static. Această încărcare poate fi de două tipuri:

$$\text{– de tip "haversine": } \sigma_a(t) = \sigma_v \cdot (1 + \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)) \quad (4.10)$$

unde:  $\sigma_a(t)$  – compresiunea ciclică axială, funcție de timp;  
 $\sigma_c$  – compresiunea laterală;  
 $\sigma_v$  – amplitudinea;  
 $f$  – frecvența;  $t$  – timpul.

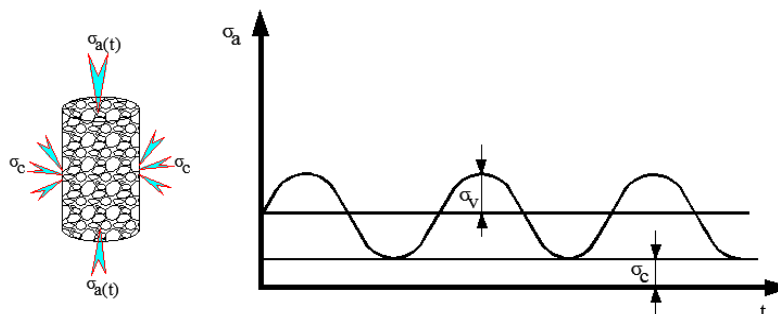


Figura 4.47. Încărcare de tip haversine

– de tip "bloc": unde  $\sigma_a(t)$  este egal cu înălțimea  $\sigma_b$ , în timpul perioadei de încărcare  $T_1$  și 0 și cu  $T_0$  în timpul perioadei de relaxare, figura 4.48.

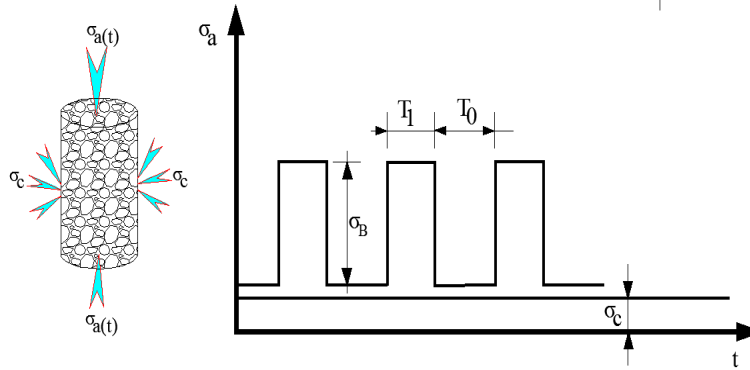


Figura 4.48. Încărcare de tip bloc

Deformația permanentă la ciclu "n" este următoarea:

$$\epsilon_n = 100 \cdot \left( \frac{h_0 - h_n}{h_0} \right) \quad (4.11)$$

unde:  $\epsilon_n$  - deformația permanentă la ciclu n;  
 $h_0$  - înălțimea medie după perioada de preîncărcare;  
 $h_n$  - înălțimea medie la ciclu n.

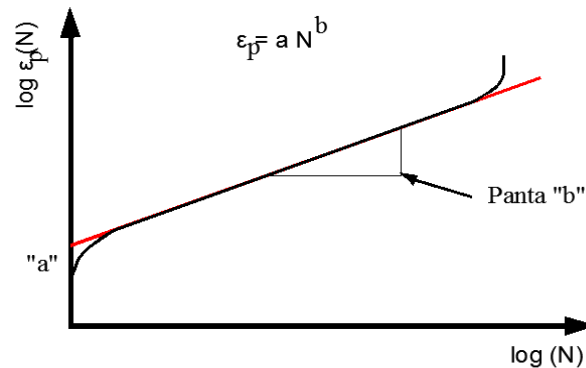


Figura 4.49. Evoluția cu numărul de încărcări a deformației permanente

### 4.7.3. Studiul în laborator al fluajului mixturilor asfaltice realizate prin testul de încercare la compresiune ciclică

Studiul mixturilor asfaltice la fenomenul de deformații permanente s-a efectuat pe probe cilindrice compactate cu girocompactorul, probe care sunt conforme dozajelor stabilite în tabelele 4.8 și 4.9, în funcție de procentul de cenușă de termocentrală ce intră în amestec. Datorită rezultatelor caracteristicilor termice superioare obținute pe aceste mixturi asfaltice, și totodată pentru a scoate în evidență efectul acestora asupra deformațiilor permanente, pe lângă temperatura de încercare conform stas, probele au mai fost testate și pentru alte temperaturi. În ceea ce privește condițiile de încărcare, acestea au rămas neschimbate. Astfel pentru mixturile asfaltice B.A.16 efortul de încărcare a fost de 300 kPa, nivelul

fretării de 0,5 bari și numărul de impulsuri de 1800  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{ciclu}$ , iar pentru mixturile asfaltice B.A.D.25 efortul de încărcare a fost de 200 KPa, nivelul fretării de 0,5 bari și numărul de impulsuri de 1800  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{ciclu}$ , toate condițiile fiind conform stas SR 174-1/2009.

#### 4.7.3.1. Influența temperaturii asupra comportării la deformații permanente a straturilor asfaltice

În urma încercărilor la temperatura de 50 °C, pe mixtura asfaltică B.A.16 ce conține în amestec diferite procente de cenușă, s-au obținut următoarele rezultate, conform figurii 4.50. Astfel se poate menționa faptul că respectând condițiile de încărcare, respectiv temperatură, prevăzute în stas, comportarea mixturii la fluaj dinamic este influențată în sens pozitiv de procentul de cenușă de termocentrală ce participă în amestec, excepție făcând mixtura asfaltică B.A.16 cu 12,5 % cenușă care datorită unui conținut mai ridicat de bitum cu aproximativ 0,5 % decât mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă, prezintă o deformație axială mai mare cu aproximativ 10 %. Pentru a putea face o diferențiere vizibilă a rezultatului privind deformația permanentă pentru același conținut de bitum, deformația axială rezultată pentru mixtura B.A.16 cu un procent de 7,0 % bitum și 0 % cenușă este cu 70 % mai mare față de deformația rezultată pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 7,0 % bitum și 12,5 % cenușă. În plus pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 7,0 % bitum și 0 % cenușă, deformația rezultată nici nu a atins numărul de cicluri impus.

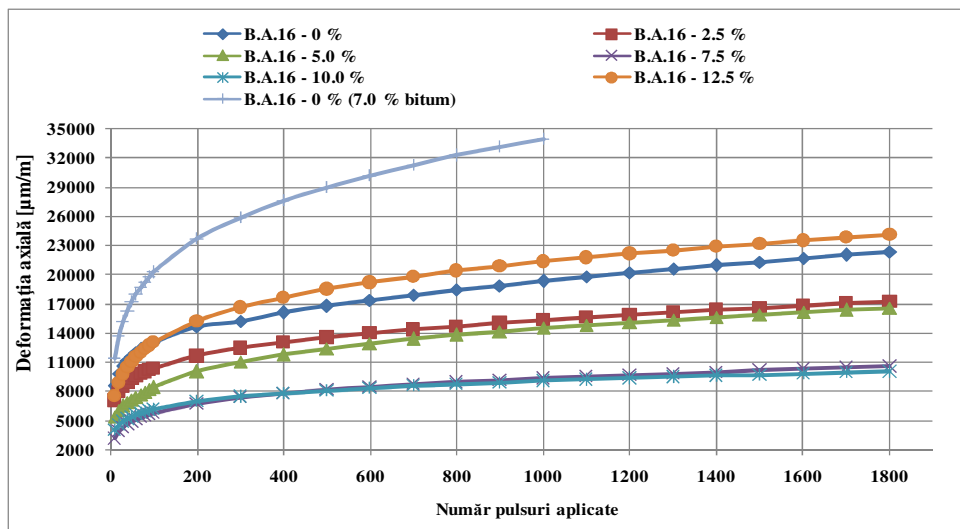


Figura 4.50. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.16 la temperatura de 50 °C

Efectuând testul pentru aceleași condiții de încărcare dar la o temperatură de 60 °C, figura 4.51, se poate observa o evoluție mai bună la deformații a mixturii ce conține în amestec cenușă, față de amestecul ce conține numai filer. Făcând și în această situație o legătură între caracteristicile termice și deformațiile permanente rezultate pe aceste mixturi se remarcă faptul că, cu cât căldura specifică este superioară și deformațiile permanente sunt mai mici.

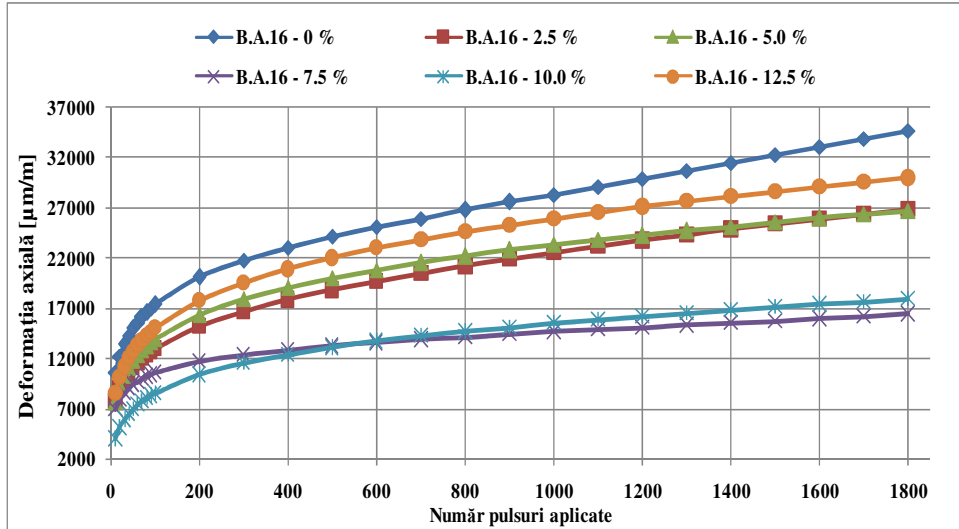


Figura 4.51. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.16 la temperatura de 60 °C

Datorită faptului că temperatura de testare nu a mai putut fi ridicată din cauza condițiilor tehnice privind aparatura de testare, mixtura asfaltică B.A.16 a fost supusă la o temperatură de 40 °C inferioară temperaturii specificată de stas. În urma analizării rezultatelor, se poate observa că deformațiile axiale determinate la o temperatură mai mică decât temperatura indicată sunt mult mai mici, figura 4.52. Din punct de vedere al conținutului de bitum stabilit în funcție de procente de cenușă, în această condiție de încercare se poate afirma faptul că, cu cât conținutul de bitum crește, mixtura asfaltică prezintă o stabilitate ridicată la deformații permanente.

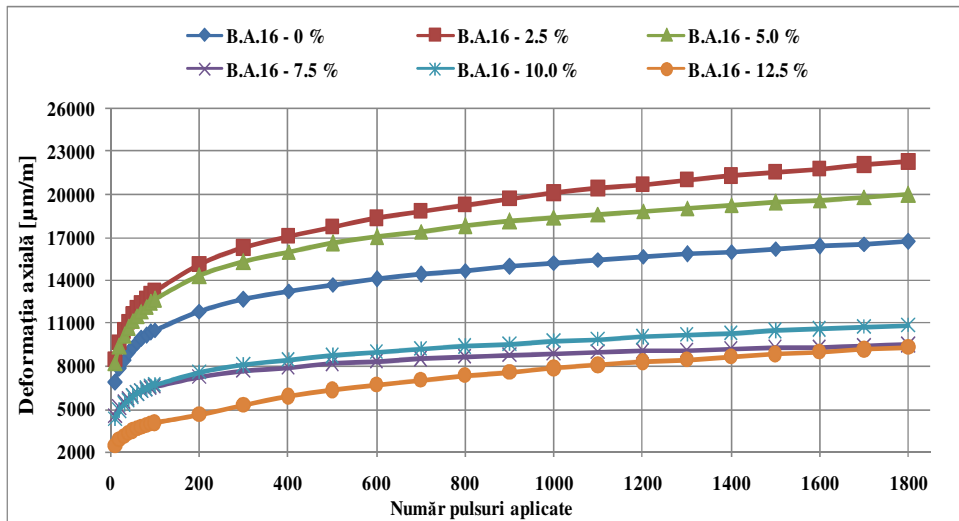


Figura 4.52. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.16 la temperatura de 40 °C

În ceea ce privește mixtura asfaltică B.A.D.25, cu diferite procente de cenușă în amestec, din punct de vedere al rezultatelor privind deformațiile permanente se poate afirma faptul că acestea sunt conforme cu limita dată de stas SR 174-1/2009, indiferent de temperatura de testare. Acest lucru poate fi datorat atât conținutului mai scăzut de bitum, cât și scheletului mineral mai puternic.

Referitor la proprietățile termo-fizice asupra acestor caracteristici fizico-mecanice privind deformațiile axiale pentru mixtura asfaltică B.A.D.25, nu se poate evidenția un efect vizibil al acestora tocmai datorită rezultatelor apropiate a caracteristicilor termice obținute pentru respectivele dozaje.

Totuși, din figurile 4.53, 4.54 și 4.55, se poate observa o evoluție constantă a deformațiilor axiale în funcție de procentul de cenușă (7,5 %, respectiv 10,0 %) pentru temperaturile de testare stabilite.

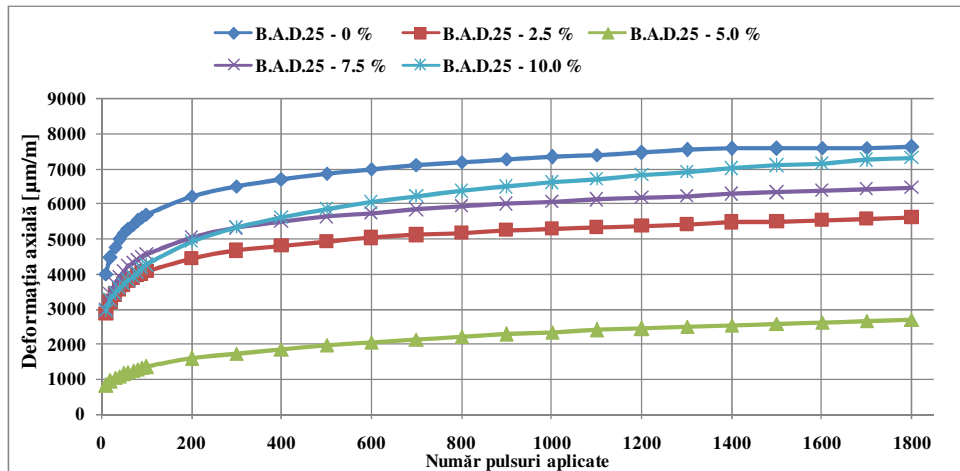


Figura 4.53. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.D.25 la temperatura de 40 °C

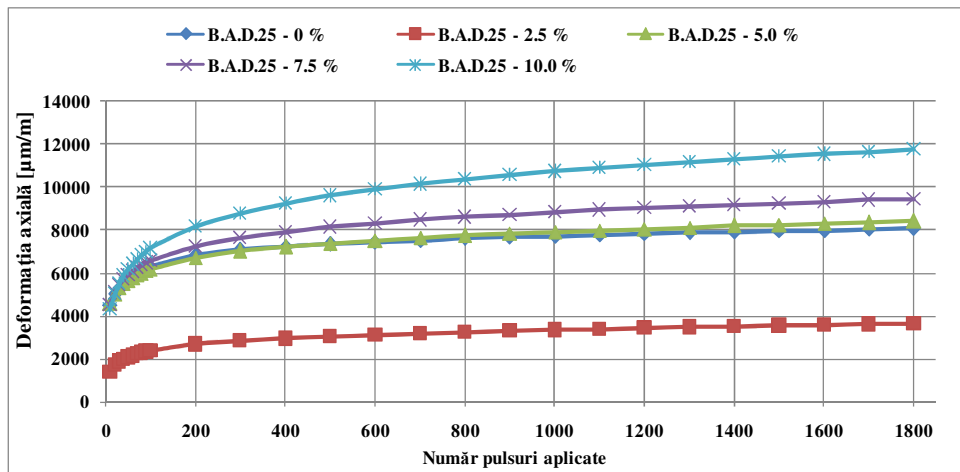


Figura 4.54. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.D.25 la temperatura de 50 °C

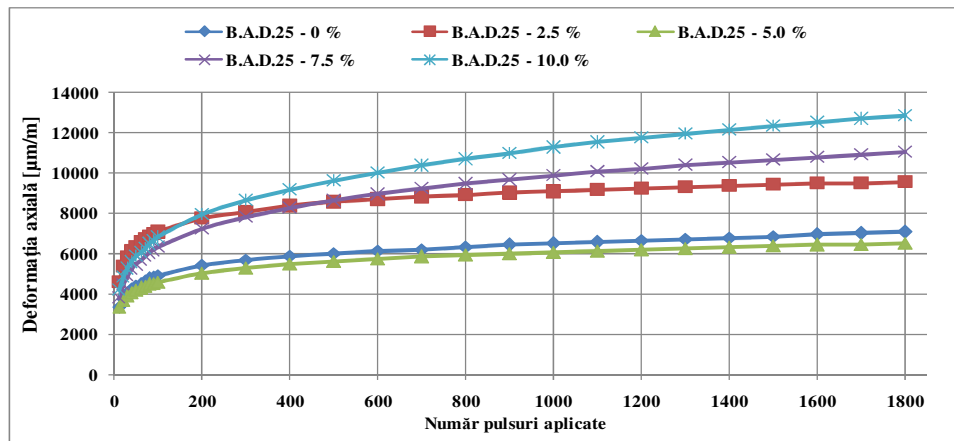


Figura 4.55. Curbele de fluaj pentru mixtura asfaltică B.A.D.25 la temperatura de 60 °C

În urma analizării curbelor de fluaj pentru temperaturile studiate și condițiile de încărcare stabilite, s-a calculat viteza de fluaj (rata de deformare), precum și deformațiile permanente calculate la 1000 de cicluri conform SR EN 12697-25, valori centralizate în tabelul 4.17.

Tabelul 4.17  
Valorile vitezei de fluaj și a deformației permanente, în funcție de evoluția temperaturii

| Nr. crt. | Mixtură | Procent cenușă (%) | Temperatură (°C) | Interval de calcul al pantei (zonă liniară a curbei): $n_2 - n_1$ | Viteză de fluaj (pantă): $(e_{n_1} - e_{n_2}) / (n_2 - n_1)$ | Deformație permanentă calculată $\epsilon_{1000}$ : $\epsilon_{1000} = a \cdot 1000^b$ |
|----------|---------|--------------------|------------------|---|--|--|
| 1        | B.A.16  | 0 %                | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 1,88   | 15209  |
| 2        |         |                    | 50 °C            |   | 3,83   | 19321  |
| 3        |         |                    | 60 °C            |   | 7,88   | 28348  |
| 4        |         | 2,5 %              | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 2,74   | 20076  |
| 5        |         |                    | 50 °C            |   | 2,39   | 15355  |
| 6        |         |                    | 60 °C            |   | 5,35   | 22574  |
| 7        |         | 5,0 %              | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 1,99   | 18371  |
| 8        |         |                    | 50 °C            |   | 2,61   | 14520  |
| 9        |         |                    | 60 °C            |   | 4,23   | 23333  |
| 10       |         | 7,5 %              | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 0,76   | 8849   |
| 11       |         |                    | 50 °C            |   | 1,53   | 9363   |
| 12       |         |                    | 60 °C            |   | 2,19   | 14661  |
| 13       |         | 10,0 %             | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 1,39   | 9708   |
| 14       |         |                    | 50 °C            |   | 1,20   | 9097   |
| 15       |         |                    | 60 °C            |   | 2,99   | 15517  |
| 16       |         | 12,5 %             | 40 °C            | 1000 ... 1800 cicluri   | 1,83   | 7815   |
| 17       |         |                    | 50 °C            |   | 3,39   | 21364  |
| 18       |         |                    | 60 °C            |   | 5,05   | 25965  |

|    |          |                          |                          |                          |       |      |
|----|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|------|
| 19 | B.A.D.25 | 0 %                      | 40 °C                    | 1000 ... 1800<br>cicluri | 0,33  | 7345 |
| 20 |          |                          | 50 °C                    |                          | 0,43  | 7721 |
| 21 |          |                          | 60 °C                    |                          | 0,71  | 8505 |
| 22 |          | 2,5 %                    | 1000 ... 1800<br>cicluri | 40 °C                    | 0,39  | 5292 |
| 23 |          |                          |                          | 50 °C                    | 0,37  | 3348 |
| 24 |          |                          |                          | 60 °C                    | 0,60  | 9098 |
| 25 |          | 5,0 %                    | 1000 ... 1800<br>cicluri | 40 °C                    | 0,45  | 2336 |
| 26 |          |                          |                          | 50 °C                    | 0,60  | 7915 |
| 27 |          |                          |                          | 60 °C                    | 0,56  | 6807 |
| 28 |          | 7,5 %                    | 1000 ... 1800<br>cicluri | 40 °C                    | 0,49  | 6070 |
| 29 |          |                          |                          | 50 °C                    | 0,76  | 8849 |
| 30 |          |                          |                          | 60 °C                    | 1,45  | 9883 |
| 31 | 10,0 %   | 1000 ... 1800<br>cicluri | 40 °C                    | 0,87                     | 6616  |      |
| 32 |          |                          | 50 °C                    | 1,26                     | 10744 |      |
| 33 |          |                          | 60 °C                    | 1,95                     | 11297 |      |

Astfel deformația permanentă (deformația specifică rezultată după 1000 de cicluri) la temperatura de 60 °C crește față de temperatura normală de 50 °C, pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu diferite procente de bitum și cenușă, după cum urmează:

- 68 % pentru mixtura B.A.16 cu 0 % și 2,5 % cenușă;
- 58 % pentru mixtura B.A.16 cu 7,5 % și 10,0 % cenușă.

În figura 4.56, este prezentată evoluția ratei de deformare a mixturii asfaltice B.A.16 în funcție de temperatura la care este determinată. Pentru temperatura de 60 °C, rata de deformare scade în funcție de procentul de cenușă, lucru ce asigură o mai bună stabilitate a mixturii asfaltice la variațiile din temperatură. Deși multe studii de specialitate demonstrează faptul că în funcție de procentul de bitum ridicat mixtura asfaltică își pierde mai ușor stabilitatea, în această situație, utilizând cenușa de termocentrală, respectiva afirmație nu mai este valabilă.

În condițiile de încercare impuse de SR 174-1/2009, se poate observa din studiul probelor încercate, că viteza de deformare la 50 °C pentru mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă nu corespunde, în timp ce toate celelalte, deși au un conținut mai mare de bitum, corespund. În plus pentru o temperatură de testare de 60 °C viteza de deformare crește considerabil pentru mixtura ce are în componență ca parte fină numai filer.

Pentru mixtura B.A.D.25, viteza de deformare la toate temperaturile și condițiile de testare, corespunde conform valorii prevăzute de stas, în acest caz apărând doar câteva variații bruște a ratei de deformare pentru mixtura asfaltică B.A.D. 25 cu 7,5 % și 10,0 % cenușă, variații datorate în mare parte conținutului mai ridicat de bitum.



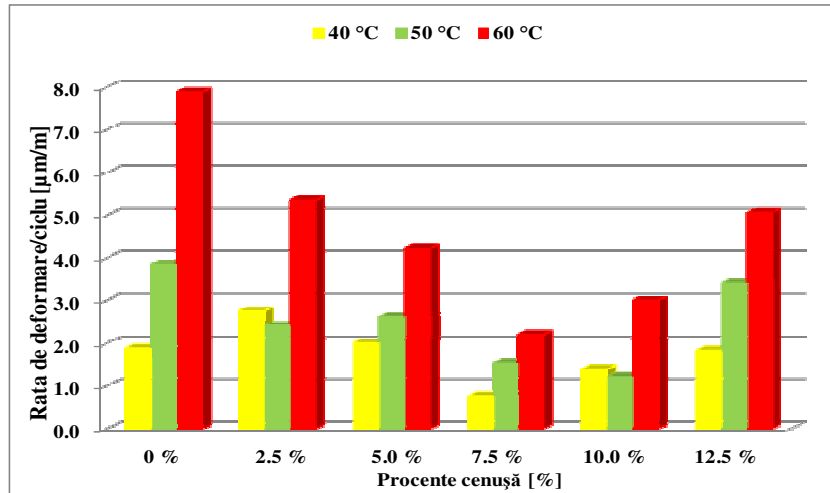


Figura 4.56. Rata de deformare pentru mixtura asfaltică B.A.16

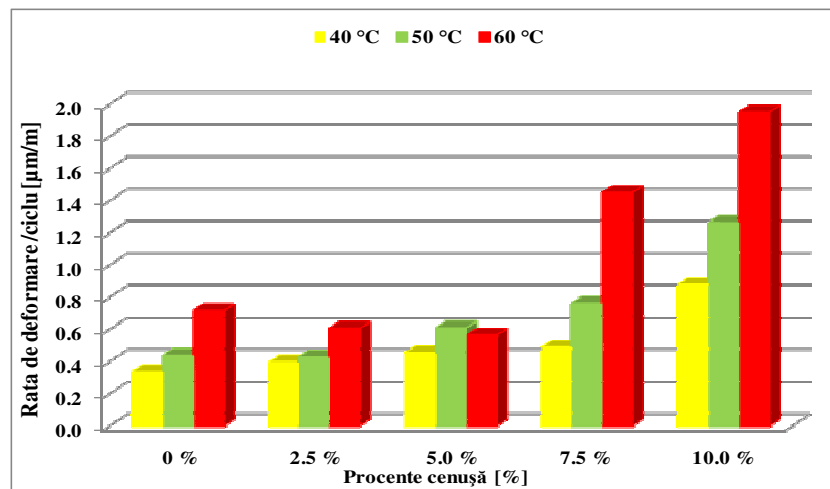


Figura 4.57. Rata de deformare pentru mixtura asfaltică B.A.D.25

#### 4.7.4. Încercarea la fâgăsuire (ornieraj)

În urma analizării și interpretării rezultatelor obținute prin metodele standardizate de încercare a mixturilor asfaltice, pentru dozajele realizate în cadrul studiului, restricționat fiind de timpul petrecut în laborator pentru încercarea la fâgăsuire a tuturor probelor, datorită rezultatelor favorabile obținute pentru mixtura B.A.16 cu 7,5 % cenușă, s-a hotărât că este suficient de relevant studiul asupra acesteia. Astfel pentru a putea scoate în evidență efectul cenușii de termocentrală din amestec, această încercare s-a realizat în paralel și pentru o mixtura asfaltică

B.A.16 cu 0 % cenușă. De remarcat faptul că în această situație conținutul de bitum a fost de 6,0 % pentru ambele dozaje.

În laborator, la scară redusă, încercarea constă din trecerea unei roți peste o placă din mixtură asfaltică cu dimensiunile de 30 x 30 x 5 cm, figura 4.58. Variabilele acestui test sunt durata de încărcare (numărul de cicluri) și temperatura la care s-a realizat încercarea (60 °C) [106].



Figura 4.58. Aparatul pentru ornieraj (făgășuire)

Din figura 4.59, reiese faptul că mixtura asfaltică ce are în componență cenușă prezintă o adâncime de făgaș mai mică față de mixtura ce are în componență doar fier. Conform stasului SR 174-1/2009 viteza de deformare (rata de făgășuire) la ornieraj la 1000 de cicluri se încadrează conform limitelor date, în schimb ce adâncimea făgașului pentru mixtura B.A.16 cu 7,5 % cenușă este la limită.

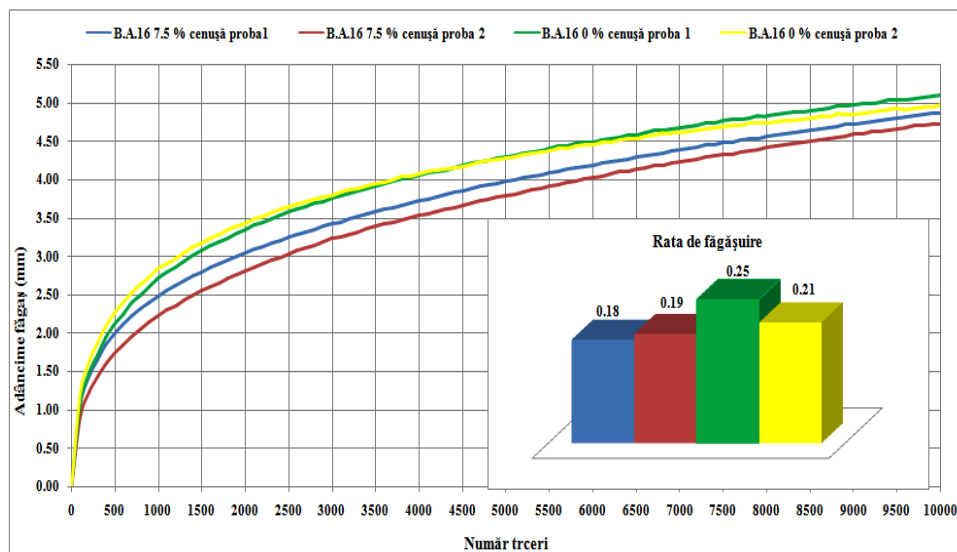


Figura 4.59. Rezultatele privind adâncimea făgașului și rata de făgășuire

## 4.8. Încercarea la oboseală

Oboseala poate fi definită ca fenomenul de rupere sub efort repetat sau fluctuant, având o valoare maximă, în general mai mică decât rezistența la întindere a materialului [49], [51].

Oboseala este interpretată ca un proces de cumulare treptată, urmat de propagarea fisurilor sub efectul încărcărilor repetate. Fisurarea din oboseală apare din cauza concentrărilor de efort date de defectele preexistente în mixtură (procent de goluri, calitatea liantului bituminos).

În ceea ce privește cercetarea proprie s-a aplicat metoda de determinare a rezistenței la oboseală, la întindere indirectă aplicată conform SR EN 12697 – 24/2005 [107]. Metoda constă în aplicarea unei forțe de compresiune fixată de-a lungul diametrului vertical al probei cilindrice rezultată într-o tensiune de întindere indirectă de-a lungul diametrului orizontal. Repetarea aplicării forței verticale va duce de obicei la o crăpătură de-a lungul diametrului vertical. Datorită faptului că și această încercare este condiționată de timp, nu s-a putut realiza pentru toate mixturile asfaltice proiectate. Astfel datorită rezultatelor pozitive obținute în urma încercărilor la care au fost supuse mixtura asfaltică B.A.16 și B.A.D.25 cu 7,5 % cenușă, s-a hotărât ca determinarea evoluției la oboseală să se facă doar pentru acestea, dar pentru a putea fi pus în evidență rezultatul obținut în urma testului, încercarea la oboseală s-a aplicat și pentru mixtura B.A.16 și B.A.D.25 cu 0 % cenușă.

În figura 4.60, se poate observa că deformația verticală rezultată pe mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă la 3600 de cicluri este cu aproximativ 25 % mai mare. Din aliaura diagramei se poate observa o pantă mult mai mare pentru mixtura ce conține în amestec filer față de mixtura ce conține cenușă. În situația mixturii asfaltice B.A.16 cu 0 % cenușă, panta fiind mai pronunțată, ruperea prin fisurare are loc mult mai repede.

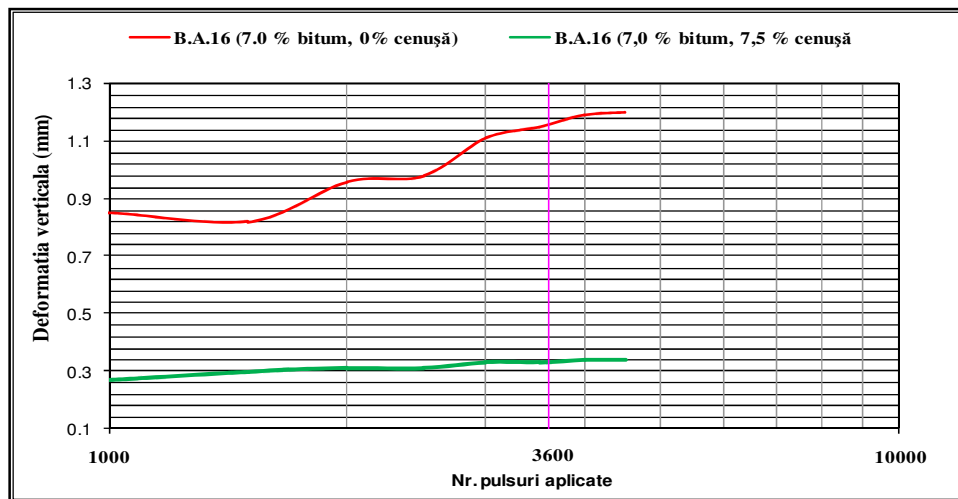


Figura 4.60. Curbe de deformație verticală rezultate pe mixtura B.A.16 cu 0 % și 7,5 % cenușă la 3600 de cicluri

Pentru mixtura asfaltică din stratul de legătură B.A.D.25, rezistența la oboseală rezultată pentru probele încercate arată o tot mai bună rezistență la deformație verticală a probei ce conține în amestec cenușă, deși are un conținut de bitum cu 1 % mai mare. Din punct de vedere al deformației orizontale, aceasta scade în funcție de procentul de cenușă utilizat, figura 4.62.

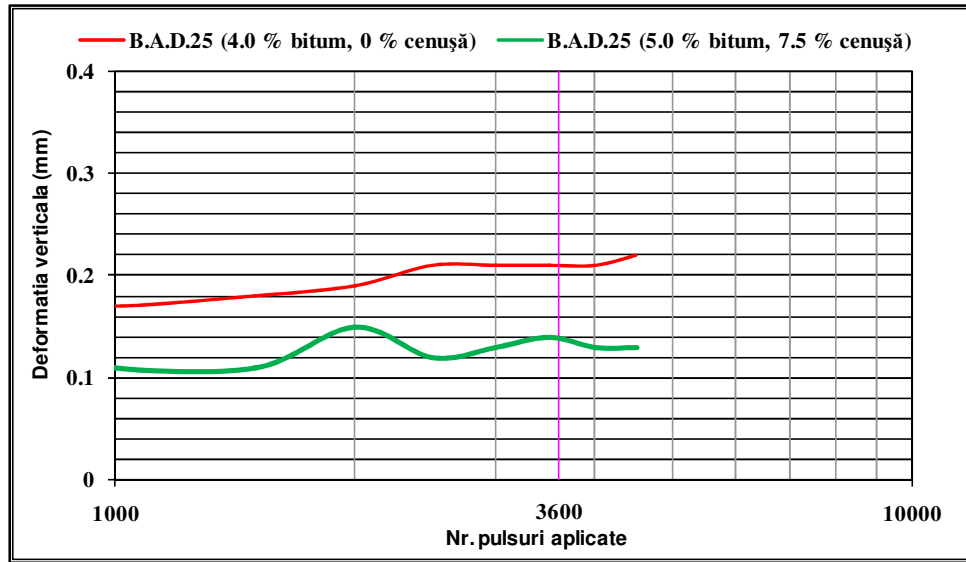


Figura 4.61. Curbe de deformație verticală rezultate pe mixtura B.A.16 cu 0 % și 7,5 % cenușă la 3600 de cicluri

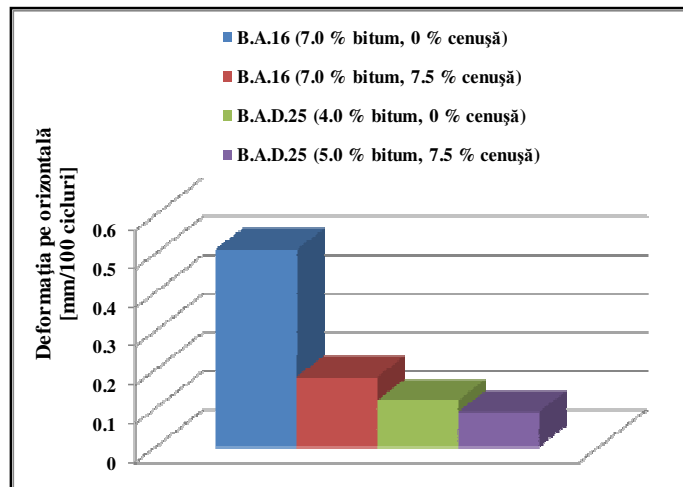


Figura 4.62. Deformația pe orizontală

#### **4.9. Concluzii finale privind utilizarea cenușii de termocentrală la prepararea mixturilor asfaltice**

Din rezultatele experimentale realizate se desprind următoarele concluzii:

– Proprietățile termo-fizice determinate pentru mixturile asfaltice realizate în cadrul laboratorului C.C.T.F.C, prezintă unele aspecte cu influență asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale acestora:

- atunci când aceste caracteristici termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică) prezintă o valoare inferioară, mixtura asfaltică conduce, respectiv înmagazinează, o cantitate însemnată de căldură, ceea ce duce la o pierdere mai rapidă a stabilității;
- când asupra acestor caracteristici termo-fizice se intervine prin introducerea în amestec a cenușii de termocentrală în locul filerului, mixtura asfaltică prezintă valori superioare, astfel observându-se din încercările fizico-mecanice efectuate o comportare din ce în ce mai bună, în funcție de procente de cenușă introduse;
- compararea conductivității termice pentru mixturi ce prezintă în amestec, ca material de umplere numai, cenușă de termocentrală sau numai filer, conținând aceeași cantitate de bitum, duce la un rezultat pozitiv în favoarea amestecului cu cenușă. Acest considerent arată că, deși mixtura, din punct de vedere al absorbției de căldură, se încadrează în categoria corpului negru (absoarbe în totalitate căldura radiată pe suprafață), prin utilizarea de cenușă în amestec această absorbție de căldură poate fi diminuată printr-o conductivitate termică scăzută. Astfel, reducând o parte din absorbția de căldură, în timpul exploatării la temperaturi ridicate mixtura asfaltică nu își mai pierde atât de ușor stabilitatea;
- căldura specifică determinată pentru mixturile asfaltice realizate ce au în componență ca material de umplere cenușa de termocentrală, este superioară. Totodată, s-a demonstrat faptul că, conform studiilor practice efectuate în laborator pe aceste tipuri de mixturi realizate, în funcție de procentul de cenușă și de conținutul de liant, mixtura nu mai înmagazinează atât de multă căldură în masa ei. Practic, mixtura asfaltică ce conține diferite procente de cenușă, pentru a putea înmagazina aceeași cantitate de căldură ca și mixtura ce conține doar filer, trebuie supusă la o temperatură de testare cu aproximativ 10...15 °C mai mult față de temperatura de 25 °C la care a fost supusă în prealabil;
- din punct de vedere al difuzivității și efuzivității rezultate pentru amestecurile realizate, se demonstrează încă o dată faptul că, în funcție de procente de cenușă stabilite, aceste proprietăți termice atestă pozitiv rezultatele obținute privind conductivitatea termică, respectiv căldura specifică. În acest fel difuzivitatea arată că, căldura se propagă mai greu în masa mixturii asfaltice, iar efuzivitatea arată o absorbție mai mică de căldură;
- emisivitatea măsurată pentru aceste mixturi realizate cu diferite procente de bitum, respectiv cenușă de termocentrală, demonstrează modul corect de determinare a proprietăților termice. Astfel, în funcție de procentul crescător de cenușă utilizat în amestec emisivitatea scade și reflexivitatea crește. Practic mixtura asfaltică nu mai emite atât de multă căldură;

- diferența dintre emisivitatea rezultată pentru mixtura asfaltică ce conține în amestec ca material de umplere numai filer și mixtura ce conține cenușă este dictată de reflexivitate.
- Caracteristicile termice pot furniza o imagine clară, în funcție de valoarea lor, asupra încercării la care urmează să fie supusă proba din asfalt. Astfel, pentru a scoate în evidență influența acestor caracteristici termo-fizice prin modul de evoluție asupra caracteristicilor fizico-mecanice, din încercările efectuate au rezultat următoarele:

- stabilitatea Marshall determinată pentru temperaturi mai mari ca temperatura de testare cu 10 °C, respectiv 20 °C, datorită conductivității și căldurii specifice superioare pentru mixtura asfaltică ce conține în amestec un procent semnificativ de cenușă (7,5 %, 10,0 %), scade cu aproximativ 5 % față de 30 % pentru mixtura ce conține în amestec filer;
- modulul de rigiditate determinat la temperaturi mai mari decât temperatura de testare (15 °C) cu 5 °C, respectiv 10 °C, pentru mixtura ce conține în amestec ca material de umplere cenușa, scade cu 30 % față de 60 % pentru mixtura ce conține filer, ambele având același procent de bitum;
- fluajul determinat pentru temperaturi mai mari cu 10 °C, respectiv 20 °C ca temperatura standard de 50 °C, arată o creștere a deformației permanente cu aproximativ 58 % pentru mixtura asfaltică ce conține cenușă în amestec și prezintă caracteristici termice superioare, față de 68 % pentru mixtura ce conține filer și prezintă caracteristici termice inferioare. În ceea ce privește viteza de fluaj și deformația permanentă, făcând o analogie între temperaturile la care acestea au fost determinate, se poate evidenția faptul că pentru caracteristici termice superioare, diferența între valorile asociate vitezei de fluaj, respectiv deformației permanente sunt din ce în ce mai mici;
- referitor la rezistența la oboseală, se poate concluziona că datorită căldurii specifice superioare rezultate pentru proba din asfalt ce conține în amestec cenușă, valoarea deformației verticale respectiv orizontale este mai mică decât în cazul mixturii asfaltice ce conține în amestec filer.

- Efectul cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt:

Din încercările realizate pe mixturile asfaltice cuprinse în cadrul acestui studiu se evidențiază faptul că utilizarea cenușii de termocentrală ca material de umplere în amestecurile de asfalt poate înlocui cu succes filerul.

Datorită unei proprietăți ceva mai absorbante de bitum cu aproximativ 0,2...0,3 % a cenușii de termocentrală față de filer, mixtura asfaltică rezultată prezintă o durabilitate și o rezistență la deformații plastice mai mare, chiar dacă procentul de bitum este ridicat. Astfel, prin utilizarea cenușii în amestec, se poate confirma faptul că s-a asigurat un compromis între durabilitate și rezistența la deformații plastice. Totodată, luând în considerare și natura eforturilor ce acționează asupra structurii rutiere (condiții climatice, trafic), conform caracteristicilor termice rezultate pentru mixtura asfaltică ce conține cenușă, s-a demonstrat faptul că pentru o variație limită a temperaturii eforturile pot fi reduse.

Caracteristicile fizico-mecanice determinate prin încercări uzuale conform stas SR 174-1/2009, prezintă o evoluție bună a mixturilor asfaltice în funcție de procentul de cenușă din amestec, astfel putând fi afirmate următoarele concluzii:

#### 4.9 – Concluzii privind utilizarea cenușii de termocentrală în asfalt 191

- stabilitate Marshall mai mare comparativ cu stabilitatea obținută pe mixtura ce conține în amestec filer;
- indice de fluaj mai mic; pe măsură ce procentul de cenușă crește, indicele de fluaj scade;
- densitate aparentă mai mică (datorată densității scăzute a cenușii față de filer), dar conform stas, indiferent de procentul de cenușă stabilit, din masa mixturii asfaltice;
- volum de goluri mai mare datorat densității scăzute, dar corespunzător limitei date de stas, chiar dacă procentul de bitum este mai mare;
- absorbție de apă în limitele normale, chiar dacă volumul de goluri este mai mare. Această caracteristică se datorează și faptului că cenușa este hidrofobă.

În ceea ce privește proprietățile volumetrice, volumul de goluri din amestecul de agregate și volumul de goluri umplute cu bitum determinate pe mixturile asfaltice realizate și comparate cu criteriile SUPERPAVE, s-a constatat faptul că numai mixturile ce au un procent semnificativ de cenușă și bitum corespund cu acestea.

– Caracteristicile fizico-mecanice determinate prin încercări dinamice conform stasurilor pentru fiecare încercare în parte, au scos în evidență caracterul benefic al utilizării cenușii de termocentrală, față de filer, prin următoarele:

- modulul de rigiditate determinat pentru două mixturi cu același conținut de bitum, dar care folosesc ca material de umplere sau cenușa, sau filerul, este cu 40 % mai mare în cazul mixturii cu cenușă;
- stabilitatea la fluaj, determinată tot pentru două tipuri de amestec de asfalt, unul cu cenușă și altul cu filer, tot cu același procent de bitum, se caracterizează printr-o deformație permanentă mult mai mică pentru amestecul ce conține cenușă față de amestecul cu filer. Referitor la viteza de fluaj, aceasta a atins maximum pentru mixtura asfaltică cu filer încă din primele 1000 de cicluri ale testului, semn că mixtura și-a pierdut foarte repede stabilitatea;
- încercarea la ornieraj pentru mixtura asfaltică ce conține cenușă comparativ cu mixtura ce conține filer se încadrează limitelor date în stas SR 174-1/2009 atât din punct de vedere al vitezei de deformație la ornieraj, cât și al adâncimii făgașului;
- încercarea la oboseală la 3600 de cicluri, conform datelor obținute, arată că ambele amestecuri testate corespund din acest punct de vedere, dar totuși se remarcă o deformație pe orizontală și verticală mai mică pentru mixtura ce conține ca material de umplere cenușa.

Din totalitatea încercărilor de laborator efectuate și a rezultatelor obținute pentru mixturile asfaltice B.A.16 și B.A.D.25 concepute, se concluzionează faptul că cenușa de termocentrală poate înlocui fără nici o reținere filerul din amestecurile de asfalt.

Din punct de vedere al utilizării acestor mixturi asfaltice în exploatare, în funcție de clasa tehnică pentru care corespund, se recomandă realizarea de sectoare experimentale, astfel putându-se urmări în timp comportarea acestora la acțiunile din trafic și de schimbări climatice. Odată monitorizate sectoarele experimentale, se poate susține cu succes utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt.

Utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt prezintă o serie de avantaje, dintre care:

- ocrotirea mediului înconjurător, deoarece cenușile de termocentrală reprezintă un deșeu cu un puternic impact ecologic datorită cantităților mari în care rezultă și pentru a căror depozitare sunt scoase din circuitul agricol suprafețe mari de teren;
- în amestecurile de asfalt ajută la reducerea cantității de mixtură prevăzută pentru a asigura grosimea necesară stratului, în timpul execuției. Acest lucru se datorează densității mai mici a cenușii față de filer;
- costuri mai mici ale mixturii asfaltice ce conține în amestec cenușă, datorită faptului că cenușa reprezintă un deșeu ce nu prea poate fi valorificat.



## **5. MODELAREA UNOR STRUCTURI RUTIERE REALIZATE PE BAZA STUDIILOR EFECTUATE**

Modelarea numerică a structurilor rutiere alcătuite pe baza rezultatelor desprinse din cadrul încercărilor de laborator asupra mixturilor asfaltice concepute își propune să analizeze starea de tensiuni și deformații a acestora, în funcție de diferite temperaturi la care acestea urmează să fie exploatate. Astfel din studiile efectuate se relevă faptul că mixturile asfaltice concepute ce au în componență ca material de umplere în locul fillerului, cenușă de termocentrală, prezintă proprietăți termo-fizice superioare, practic îmbrăcămintea asfaltică nu mai absoarbe atât de multă căldură din radiațiile solare. În ceea ce privește studiul comportării structurilor rutiere, acesta constă din compararea unor structuri rutiere care au în alcătuire straturile de îmbrăcăminte în asfaltică concepute și a unor structuri la care straturile asfaltice conțin ca material de umplere doar filler.

### **5.1. Tipul și alcătuirea structurilor rutiere cuprinse în cadrul studiului**

În ceea ce privește variațiile climaterice, oboseala materialelor, proprietățile terenului de fundare și comportarea diferită a acestora în diferite stadii de exploatare, determină modificarea proprietăților materialelor rutiere și a pământului din alcătuirea terenului de fundare, astfel încât valorile ce caracterizează comportarea elastică a acestora (modulul de elasticitate dinamic,  $E$ , coeficientul lui Poisson,  $\mu$ ), sunt supuse unor variații. Tocmai datorită acestui fapt s-a propus studierea comportării structurilor rutiere suple standard utilizate cel mai frecvent în țara noastră, comparativ cu structurile rutiere concepute care prezintă în alcătuirea lor straturile de asfalt realizate și studiate în cadrul laboratorului. În acest sens, s-a propus studierea comportării structurilor rutiere în funcție de variațiile caracteristicilor materialelor rutiere. Referitor la studiul comportării structurilor rutiere cu ajutorul modelării numerice s-au luat în considerare valorile modulilor de rigiditate, respectiv proprietățile termo-fizice obținute în cadrul cercetării pe fiecare beton asfaltic din componența structurii rutiere, celelalte straturi (anrobat bituminos, piatră spartă, balast, teren de fundare) prezentând aceleași proprietăți pentru toate structurile propuse spre modelare. Datorită faptului că modulul de elasticitate dinamic al materialelor bituminoase suferă modificări radicale în funcție de temperatură, și ținând cont de faptul că scopul urmărit și atins era acela de îmbunătățire a acestuia, în tabelul 5.1 sunt prezentate structurile rutiere propuse pentru modelarea numerică, respectiv temperaturile la care urmează să fie modelate.

Studiile s-au efectuat prima dată pentru două structuri rutiere suple la care stratul de uzură, respectiv stratul de legătură prezintă pentru fiecare amestec în parte, conform modului de proiectare a acestora, aceeași compoziție mineralogică, procent de bitum de 7,0 % pentru stratul de uzură și 5,0 % pentru stratul de legătură, singura diferență între ele fiind partea fină. Pentru o structură rutieră

straturile din asfalt conțin ca material de umplere filer, iar pentru alta conțin ca material de umplere cenușă de termocentrală. Referitor la celelalte straturi componente ale structurilor rutiere (strat de bază, strat superior de fundație, strat inferior de fundație și teren de fundare), ele s-au considerat aceleași pentru toate structurile studiate.

Celelalte structuri rutiere suplă propuse în cadrul studiului respectă același principiu de alcătuire ca și precedentele, diferența fiind la procentul de bitum, care este conform dozajelor stabilite și dezbătute în detaliu în cadrul tezei. Astfel pentru stratul de uzură s-a luat în considerare mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă și mixtura B.A.16 cu 7,5 % cenușă, iar pentru stratul de legătură mixtura asfalică B.A.D.25 cu 0 % cenușă și B.A.D.25 cu 7,5 % cenușă.

Structurile rutiere cuprinse în cadrul studiului au fost analizate din punct de vedere al variațiilor de temperatură, practic ele au fost modelate în funcție de proprietățile termo-fizice rezultate pe acestea, proprietăți ce prezintă o influență importantă asupra modulului de elasticitate determinat pentru temperaturile de 15 °C, 20 °C și 25 °C.

## **5.2. Studii teoretice privind comportarea structurilor rutiere realizate**

Studiile asupra variațiilor de temperatură asupra comportării în exploatare a complexelor rutiere, cât și a straturilor de asfalt, componente esențiale ale acestora, sunt prezentate în capitolul 2 al tezei de doctorat și sunt completate cu modelarea matematică a structurilor rutiere supuse studiilor și cercetărilor experimentale pe baza metodei elementului finit.

### **5.2.1. Principiile și ipotezele aplicate în modelarea matematică**

Pentru modelarea terenului de fundare, determinarea adâncimii până la care sarcinile din trafic produc tensiuni și deformații semnificative în terasament, s-a studiat distribuția tensiunilor în terenul de fundare pe baza calculului distribuției tensiunilor în cadrul problemei spațiale, în ipoteza unui semispațiu încărcat cu sarcină uniform distribuită pe suprafața de contact dintre pneu și îmbrăcămintă.

Osa standard de 115 kN (o.s. 115) utilizată în calculul de dimensionare a structurilor rutiere din România prezintă următoarele caracteristici:

- sarcina pe roțile duble: 57,5 kN;
- presiunea de contact: 0,625 MPa;
- raza suprafeței circulare echivalente suprafeței de contact pneu-cale:

0,171 m.

Astfel, se poate considera situația prezentată în figura 5.1, când încărcarea este uniform distribuită, având valoarea de  $6,25 \text{ daN/cm}^2$ , pe o suprafață circulară cu raza de 17,1 cm. Distribuția încărcărilor prin structura rutieră se face sub un unghi de  $45^\circ$ , astfel că la nivelul superior al terenului de fundare (patul drumului) s-au calculat sarcinile uniform distribuite și suprafețele echivalente pentru structura rutieră analizată.

Tabel 5.1

Alcătuirea structurilor rutiere suple supuse cercetărilor experimentale

| Nr.crt.   | 15 °C  | 20 °C   | 25 °C   |
|---|--|---|---|
| 1. Mixtură asfaltică standard ce conține filer. Bitum 7 %<br>[MSF 7]                        | <b>B.A.16:</b> E=4825 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ ,<br>$\lambda=1.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,<br>$c=833 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$   | <b>Structuri rutiere suple propuse pentru modelare</b><br><br>            |   |
|   | <b>B.A.D.25:</b> E=5202 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ ,<br>$\lambda=0,556 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,<br>$c=353 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ |   |   |
| 2. Mixtură asfaltică conceputa ce conține cenușă. Bitum 7 %<br>[MCC 7]                      | <b>B.A.16:</b> E=7882 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$ ,<br>$\lambda=0,442 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,<br>$c=306 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$   |   |   |
|   | <b>B.A.D.25:</b> E=8671 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$ ,<br>$\lambda=0,409 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,<br>$c=267 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ |   |   |
| 3. Mixtură asfaltică standard conform dozajelor stabilite (filer). Bitum 4.6 %<br>[MSF 4.6] | <b>B.A.16:</b> E=9167 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ ,  | <b>B.A.16:</b> E=5230 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ ,   | <b>B.A.16:</b> E=4180 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ ,   |
|   | <b>B.A.D.25:</b> E=9708 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ ,  | <b>B.A.D.25:</b> E=8420 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ , | <b>B.A.D.25:</b> E=5601 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ , |
| 4. Mixtură asfaltică concepută conform dozajelor stabilite (cenușă). Bitum 6 %<br>[MCC 6]   | <b>B.A.16:</b> E=9727 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$ ,  | <b>B.A.16:</b> E=6620 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$ ,   | <b>B.A.16:</b> E=5455 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$     |
|   | <b>B.A.D.25:</b> E=8671 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$  | <b>B.A.D.25:</b> E=8002 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$ , | <b>B.A.D.25:</b> E=4867 MPa,<br>$\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$ , |

În rest pentru toate celelalte straturi se consideră: **A.B.2:** E=5000 MPa,  $\mu=0.35$ ,  $\rho=2300 \text{ kg/m}^3$ **Piatră spartă:** E=400 MPa,  $\mu=0.25$ **Balast:** E=152 MPa,  $\mu=0.27$ **Pământ:** E= 70 MPa,  $\mu=0.30$

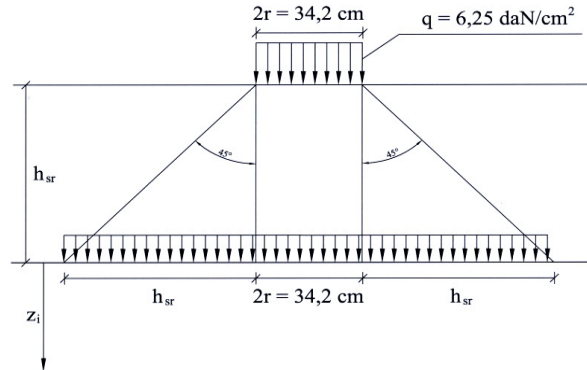


Figura 5.1. Determinarea sarcinii uniform distribuite la nivelul terenului de fundare

Sarcina la nivelul terenului de fundare se poate exprima astfel:

$$p_h = \frac{q \times \pi \times r^2}{\pi \times (r + h_{sr})^2} \text{ [daN/cm}^2\text{]} \quad (5.1)$$

în care:

- $p_h$  - sarcina uniform distribuită la nivelul terenului de fundare;
- $q$  - sarcina uniform distribuită din trafic la suprafața îmbrăcămintei (6,25 daN/cm<sup>2</sup>);
- $r$  - raza suprafeței circulare echivalente suprafeței de contact pneu-îmbrăcămintă (17,1 cm);
- $h_{sr}$  - grosimea structurii rutiere.

Valorile obținute sunt centralizate în tabelul 5.2.

Relația de calcul al tensiunii verticale  $\sigma_z$  poate fi scrisă simplificat astfel [43]:

$$\sigma_z = k_c \times p_h \text{ [daN/cm}^2\text{]} \quad (5.2)$$

în care:

- $k_c$  este un coeficient adimensional a cărui valoare este în funcție de rapoartele  $z/R_0$  și  $R/R_0$  (tabelul 5.5);
- $p_h$  - sarcina uniform distribuită pe suprafața de rază  $R_0$  (figura 5.2).

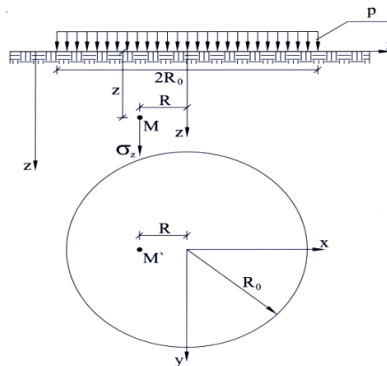


Figura 5.2. Suprafață circulară încărcată cu o sarcină uniform distribuită

Tabelul 5.2

Sarcina uniform distribuită la nivelul patului drumului

| Nr.crt. | Structură rutieră propusă   | Grosimea structurii rutiere, $h_{sr}$ [cm] | Sarcina la nivelul patului drumului, $p_h$ [daN/cm <sup>2</sup> ] | Raza suprafeței la nivelul patului drumului, $R_0$ [cm] |
|---------|---|--|---|---|
| 1       | 4 cm B.A.16<br>6 cm B.A.D.25<br>8 cm A.B.2<br>20 cm piatră spartă<br>25 cm balast | 63   | 0,28  | 80,1  |

Tabelul 5.3

Valorile coeficientului  $k_c$  pentru calculul tensiunilor verticale  $\sigma_z$  sub o sarcină uniform distribuită circular

| $K_c$   | 1,00 | 0,99 | 0,95 | 0,86 | 0,76 | 0,65 | 0,46 | 0,33 | 0,25 | 0,19 | 0,15 | 0,12 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R/R_0$ | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| $z/R_0$ | 0,0  | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,4  | 1,8  | 2,2  | 2,6  | 3,0  | 3,4  |

Valorile tensiunilor verticale  $\sigma_z$ , sunt prezentate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4

Valorile adâncimii active a terasamentului,  $z$  [cm], măsurate sub nivelul patului drumului și a tensiunilor verticale  $\sigma_z$  [daN/cm<sup>2</sup>]

| $K_c$  | 1,00     | 0,99     | 0,95     | 0,86     | 0,76     | 0,65     | 0,46     | 0,33     | 0,25      | 0,19      | 0,15      | 0,12      |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $z/R_0$  | 0,0      | 0,2      | 0,4      | 0,6      | 0,8      | 1,0      | 1,4      | 1,8      | 2,2       | 2,6       | 3,0       | 3,4       |
| <b>1</b>   | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> |
| <b>Structura rutieră analizată (<math>h_{sr} = 63</math> cm)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |
| $z$  | 0        | 16       | 32       | 48       | 64       | 80       | 112      | 114      | 176       | 208       | 240       | 272       |
| $\sigma_z$   | 0,28     | 0,28     | 0,27     | 0,24     | 0,21     | 0,18     | 0,13     | 0,09     | 0,07      | 0,05      | 0,04      | 0,03      |

După cum se poate observa din tabelul 5.4, tensiunile verticale din terenul de fundare determinate pe baza modelului Boussinesq, model dezbătut în cadrul capitolului 2 al tezei, scad odată cu creșterea adâncimii, lucru care se evidențiază și din rezultatele prezentate.

Pe baza acestora se poate formula următoarea concluzie care va fi luată în considerare în modelarea matematică a structurilor rutiere, în special a terenului de fundare a acestora:

- pentru structuri rutiere cu grosimea de 63 cm, tensiunile verticale  $\sigma_z$  ating valori de sub 0,10 daN/cm<sup>2</sup> la adâncimea de 1,30...1,60 m, măsurată sub nivelul patului drumului.

Practic valorile adâncimilor  $z$ , pentru care valorile tensiunilor verticale  $\sigma_z$  coboară sub valoarea de 0,10 daN/cm<sup>2</sup> se consideră ca fiind corespunzătoare adâncimii active a terenului de fundare, lucru ce reiese și din studiul pe baza

modelării matematice, deși la modelarea terenului de fundare pentru structurile analizate acesta a fost modelat ca un spațiu semifinit.

Una dintre posibilitățile de modelare numerică utilizate pe scară largă în domeniul structurilor rutiere are la bază metoda elementelor finite (M.E.F.). Aceasta este o metodă generală de rezolvare aproximativă a ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale care descriu sau nu fenomene fizice. Metoda Elementului Finit a devenit unul dintre cele mai "puternice" instrumente în rezolvarea problemelor ingineresti [73].

Metoda Elementului Finit constă în parcurgerea a trei etape principale. În prima etapă se realizează descompunerea domeniului de analiză în porțiuni de formă geometrică simplă, etapa următoare presupune analiza porțiunilor geometrice create în prima etapă, iar în ultima etapă se realizează recompunerea domeniului respectând anumite cerințe matematice.

Din punct de vedere al domeniilor de aplicație metoda poate fi extinsă în orice domeniu de activitate care descrie un fenomen cu ajutorul unor ecuații diferențiale.

În cadrul tezei a fost folosit programul ABAQUS 6.8-3, care este un program comercial de modelare care are la bază metoda elementelor finite și care a fost aplicat pe scară largă la analiza structurilor rutiere. În scopul validării programului au fost efectuate numeroase studii parametrice, disponibile în literatura de specialitate, ce au cuprins o gamă largă de structuri rutiere utilizând diferite programe de calcul. Rezultatele obținute pe baza analizelor utilizând programul ABAQUS au arătat că acestea sunt comparabile cu cele obținute pe baza analizelor cu programe dedicate și a rezultatelor experimentale. Principalele avantaje pe care le oferă programul ABAQUS în rezolvarea problemelor legate de structuri, în general, și de structuri rutiere, în particular, sunt următoarele [24]:

- modelarea liniară și neliniară elastică, vâsco-elastică și vâsco-plastică a materialelor rutiere;
- calculul bidimensional și tridimensional;
- aplicarea încărcării statice și dinamice;
- modelarea interfețelor cu sau fără frecare (interfețe libere, interfețe legate);
- modelarea propagării fisurilor;
- calculul termic.

ABAQUS include de asemenea o serie de modele de material cum ar fi cel elastic, vâsco-elastic, elasto-plastic, introducând în funcție de tipul materialului diverse criterii de cedare.

ABAQUS furnizează multe tipuri de elemente finite. Pentru modelarea semi-planului infinit sunt disponibile elemente infinite folosite la definirea condițiilor de margine în direcțiile orizontală și verticală în terenul de fundare. Modelarea structurilor rutiere s-a făcut utilizând elemente CAXA parabolice (elemente „shell” cu opt noduri în care variația câmpului necunoscutelor s-a considerat de ordinul II, sau elemente „shell” cu patru noduri în care variația câmpului necunoscutelor s-a considerat de ordinul I). Elementele CAXA au fost utilizate la analiză deoarece dau rezultate foarte bune la modelele încărcate axial simetric. Acest tip de elemente sunt folosite pentru a simula răspunsul tridimensional prin rezolvarea unei suprafețe bidimensionale generată în jurul unei axe centrale de simetrie. Folosirea elementelor CAXA crește eficiența modelelor comparativ cu un model tridimensional, și menține acuratețea rezultatelor.

Discretizarea domeniului în elemente finite folosite în analiză este prezentată în figura 5.3.

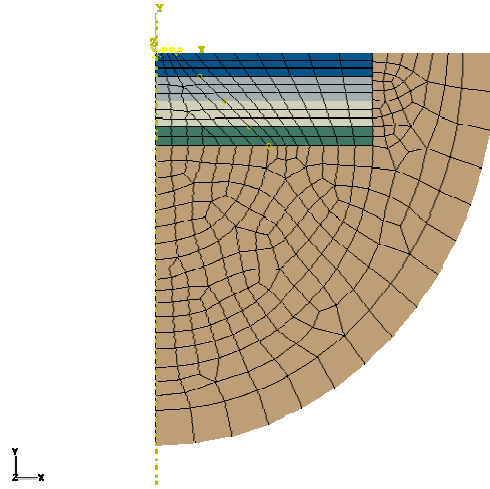


Figura 5.3. Discretizarea domeniilor în elemente finite

Răspunsul tridimensional a fost simulat utilizând elementele finite "axisymmetric deformable" de tip CAXA, ce fac parte integrantă din programul ABAQUS.

Modelul numeric se definește simplificat, utilizând o axă de revoluție, axa  $y$ , și introducerea condițiilor de simetrie corespunzătoare (adică  $U1=UR2=UR3=0$ ) (ABAQUS Documentation) [2].

Elementele utilizate au fost în legătură cu elemente finite standard, care au modelat zona de interes a complexelor rutiere, iar pentru modelarea terenului de fundare ca un spațiu semi-infinit s-au utilizat elemente infinite (CINAX5R).

### 5.2.2. Factori de influență considerați în cadrul modelării

Factorii de influență asupra comportării în exploatare a structurilor rutiere realizate luați în studiu pentru modelarea structurilor rutiere propuse în tabelul 5.1, pe lângă condițiile climaterice, au mai fost traficul rutier (sarcina maximă) și ipotezele legăturilor dintre straturile rutiere. În acest sens s-a studiat comportarea structurilor rutiere propuse, la solicitări standard, în condiții normale de exploatare și prin variații de temperatură.

Una dintre problemele actuale referitoare la analiza structurilor rutiere la comportarea lor în exploatare sub acțiunea sarcinilor datorate traficului, o reprezintă conlucrarea între straturi. În majoritatea metodelor de dimensionare, inclusiv în cele românești, legătura dintre straturile rutiere este considerată ca fiind perfectă. Este greu de calificat cât este de adevărat acest deziderat, însă se apreciază faptul că această legătură este puțin probabil una „perfectă” pe toată durata de exploatare a structurii.

O structură rutieră este dimensionată în funcție de un anumit număr de parametri (trafic, capacitatea portantă a terenului de fundare, caracteristicile materialelor din alcătuirea structurii rutiere etc.) astfel încât fiecare strat rutier să nu fie solicitat decât la nivelul său propriu de capacitate portantă. Solicitățile

aplicate la fiecare trecere a vehiculelor grele provoacă o deformare a structurii. Tensiunile și deformațiile specifice se transmit în diferitele straturi în funcție de caracteristicile materialelor care le compun și a legăturii dintre acestea.

Acumularea de solicitări peste cele admise se transformă într-o deformare permanentă în cazul materialelor netratate (alterarea profilului și uniformității) și printr-o oboseală a materialelor tratate care poate merge până la ruperea acestora. Atunci când straturile sunt legate între ele, structura de rezistență constituie un ansamblu „monolit”, fiecare strat se deformează, dar nu independent, ci în funcție de caracteristicile sale (modul, capacitate de deformație, grosime etc.), dar și în funcție de celelalte straturi de care este legat.

Atunci când nu există legătură între straturi, fiecare strat rutier lucrează independent în funcție de proprietățile sale. În această ipoteză deformațiile și tensiunile la interfețe (compresiune la partea superioară, întindere la baza stratului) sunt sensibil mai importante decât în ipoteza straturilor legate. Procesul de deformare sau oboseală a straturilor va fi mai rapid și durata de exploatare a structurii rutiere mai scurtă [24].

Dintre metodele de dimensionare la nivel mondial, metoda franceză de dimensionare a structurilor rutiere suple și mixte (semirigide), pe baza modelului elastic ALIZE, consideră legătura perfectă între straturile rutiere parțială sau le consideră nelegate.

În plus există riscul de alunecare a straturilor unul pe altul sub acțiunea solicitărilor din trafic. Nelegarea straturilor are ca rezultat necesitatea acceptării unei structuri rutiere mai puțin durabile sau a unor activități de întreținere suplimentare.

Într-adevăr apariția defecțiunilor datorate unei slabe legături între straturi va conduce la necesitatea unei întrețineri costisitoare, deoarece, fie va trebui aplicat un strat de ranforsare, fie va fi necesară frezarea straturilor slab legate și înlocuirea acestora. Astfel, pe baza celor prezentate, se poate constata importanța deosebită, tehnică și economică, a legăturii interfețelor.

Pornind de la aceste observații, studiul efectuat cu ajutorul modelării structurilor rutiere prin metoda elementului finit, a fost elaborat în ipoteza legăturii perfecte între straturi (structură rutieră cu conlucrare **(C.C)**) și în baza ipotezei nelegăturii între interfețe (structură rutieră fără conlucrare **(F.C)**). În figura 5.4 este prezentată starea de deformații în structura rutieră suplă standard supusă modelării în ipoteza legăturii dintre straturi cu conlucrare sau fără conlucrare.

Structurile rutiere au fost modelate cu ajutorul proprietăților materialelor componente fiecărui strat, prezentate în tabelul 5.1.



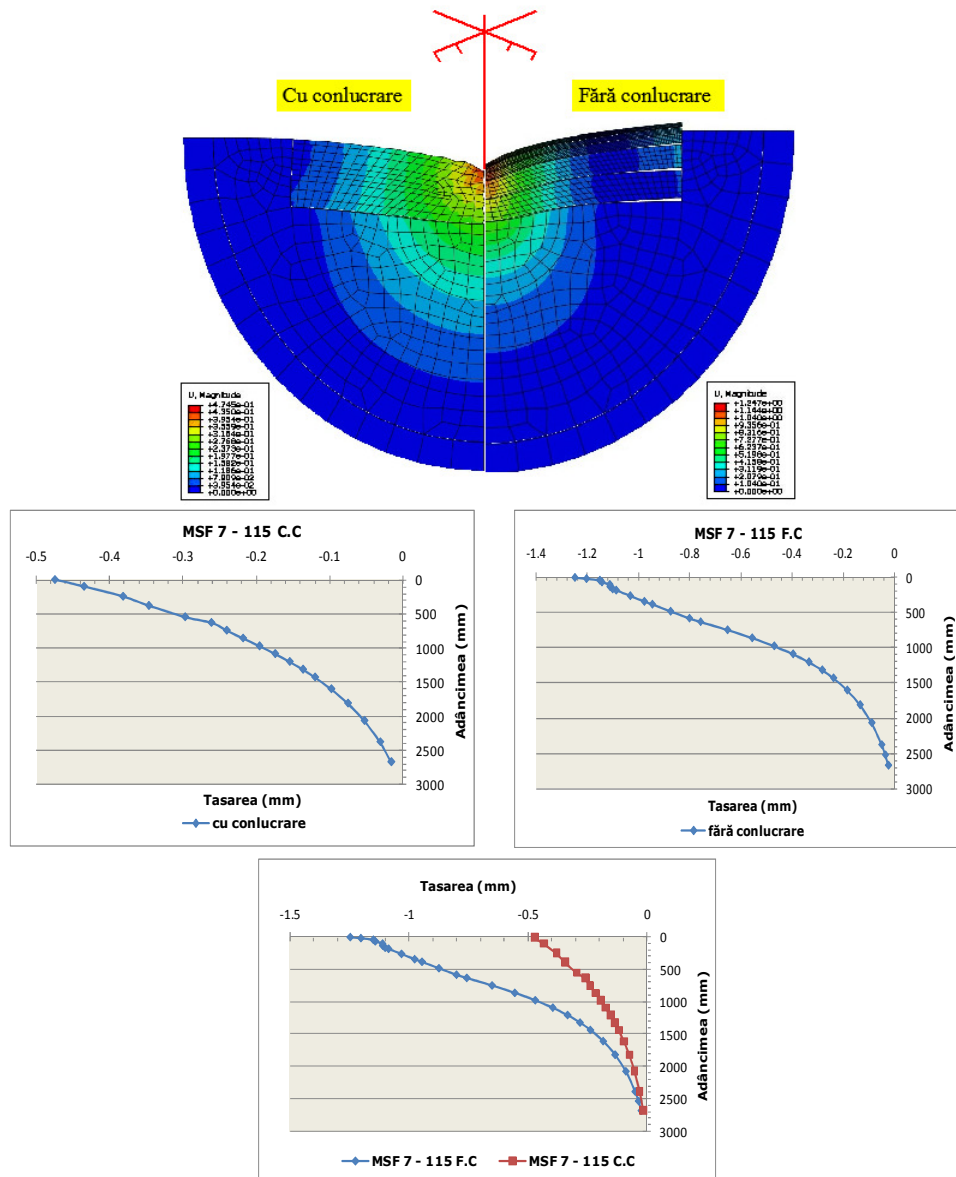


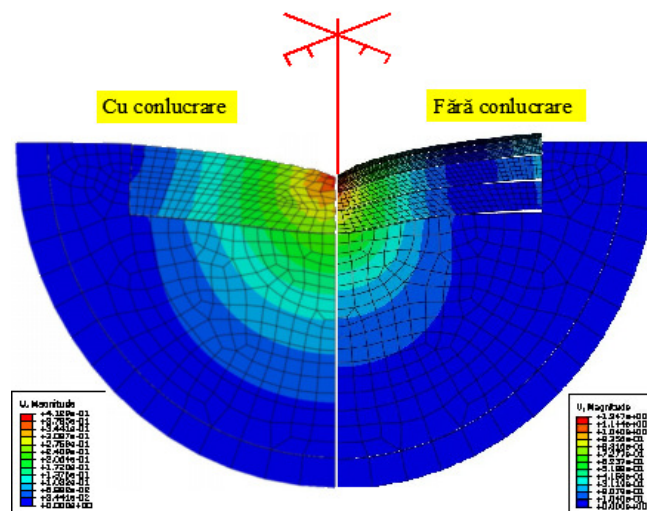
Figura 5.4. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MSF 7 - 115

Din figura 5.4, se observă, în funcție de rezultatele obținute că deformațiile în structura rutieră suplă sunt de circa trei ori mai mari în cazul ipotezei interfețelor libere față de ipoteza straturilor perfect legate. Astfel, la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasările sunt mai mari cu 62 %, iar la nivelul patului drumului

acestea sunt mai mari cu circa 67 %. Acest raport începe să scadă sensibil de la nivelul patului drumului, iar în jurul adâncimii de 2,00 ... 2,50 m deplasările sunt sensibil egale în ambele ipoteze simplificade.

În figura 5.5 sunt prezentate rezultatele obținute în urma modelării structurii rutiere suple concepute (MCC 7 - 215), astfel în funcție de aceste rezultate se poate afirma că deformațiile în cazul interfețelor fără conlucrare sunt mai mari de circa două ori decât în ipoteza straturilor cu conlucrare. În ceea ce privește modul de alcătuire a structurii rutiere MCC 7 - 215 față de structura rutieră MSF 7 - 115 este că straturile din beton asfaltic B.A.16, respectiv B.A.D.25, au în componență 7,5 % cenușă de termocentrală în locul fillerului. Valorile modului de elasticitate s-au determinat în cadrul laboratorului, prin „încercarea prin aplicarea unei întinderi indirecte pe epruvete cilindrice (IT-CY)”, conform SR EN 12697-26/2004, la o temperatură de 15 °C. În figura 5.6, este prezentată situația comparativă a ipotezelor privind legătura între straturile rutiere (cu conlucrare, fără conlucrare) pentru două tipuri de structuri rutiere modelate MSF 7 - 115 și MCC 7 - 215. Se observă faptul că deformațiile în structura rutieră MSF 7 - 115, atât în ipoteza straturilor cu conlucrare, cât și a straturilor fără conlucrare diferă față de structura rutieră MCC 7 - 215, atât prin faptul că solicitările se fac resimțite până la adâncimi mai mari în terenul de fundare, dar și prin faptul că raportul dintre valorile deplasărilor este unul mai redus pentru MCC 7 - 215, astfel că la baza straturilor bituminoase deformațiile sunt mai mici cu cca 2 % , iar la nivelul patului drumului cu cca 1 % , atât în ipoteza interfețelor libere, cât și a interfețelor legate.

Practic făcând o comparație între cele două structuri rutiere modelate se poate afirma faptul că structura rutieră care prezintă în straturile din îmbrăcăminte asfaltică cenușă de termocentrală prin înlocuire parțială sau totală a fillerului, prezintă o comportare mai bună, valorile deplasărilor în acest caz sunt mai mici, fapt explicat prin comportarea vâsco-elastică a acestora și prin rigiditatea mai mare a straturilor realizate.



5.2 – Studii privind comportarea structurilor rutiere realizate 203

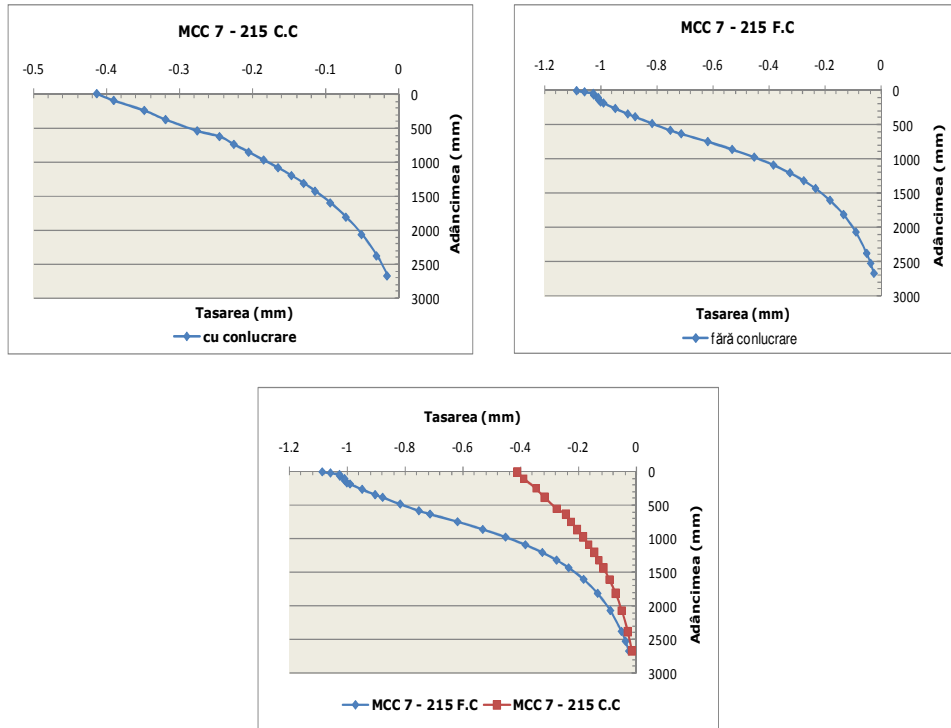


Figura 5.5. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MCC 7 – 215

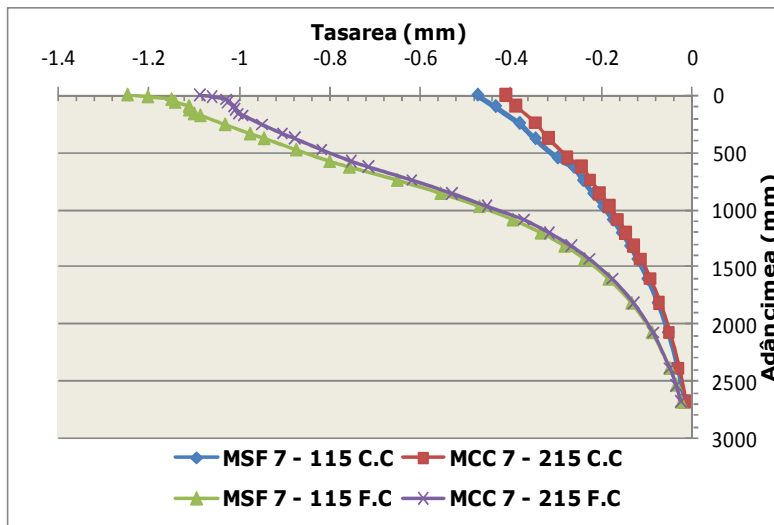


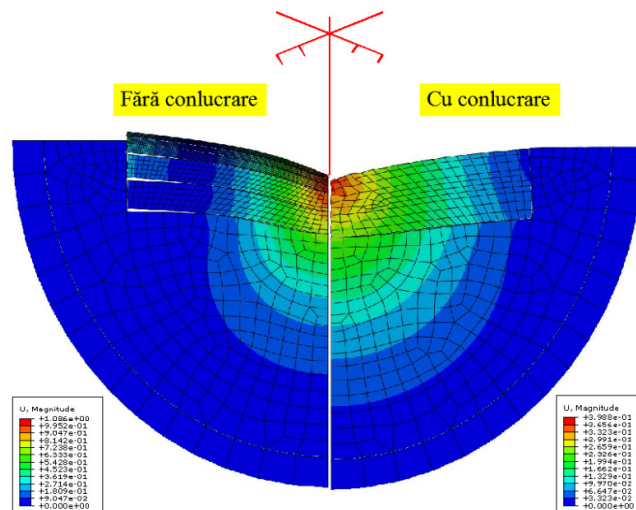
Figura 5.6. Starea de deformații la variații ale caracteristicilor mixturilor asfaltice (structură rutieră suplă MSF 7 – 115, MCC 7 - 215)

Pentru a putea scoate în evidență efectul benefic al cenușii de termocentrală utilizată în amestecurile din asfalt, prin obținerea de proprietăți termo-fizice și proprietăți fizico-mecanice superioare, în urma analizării rezultatelor obținute pe tipurile de mixturi asfaltice concepute s-a hotărât realizarea unei structuri rutiere suplă care să prezinte ca strat de uzură, respectiv legătură, tipul de mixtură pe care am obținut cele mai bune rezultate. Astfel structura rutieră concepută MCC 6 – 415, conform tabel 5.1, prezintă un procent de 7,5 % cenușă de termocentrală și 6,0 % bitum, în stratul de uzură B.A.16 și stratul de legătură B.A.D.25.

În urma obținerii unor rezultate pozitive privind proprietățile termo-fizice pe aceste mixturi asfaltice alese ca și straturi ale structurii rutiere, s-a hotărât modelarea acestora la diferite temperaturi. Scopul urmărit în această situație este de observa starea de deformații în structura rutieră. Pentru a putea face o analiză comparativă a rezultatelor deformațiilor obținute în urma modelării numerice s-a propus și modelarea unei structuri rutiere la care straturile din îmbrăcăminte asfalcică prezintă ca parte fină doar filer.

Datorită faptului că în urma determinării căldurii specifice pe mixturile asfaltice concepute ce conțin cenușă, pentru a avea aceleași caracteristici termice ca și mixturile ce conțin filer, acestea trebuie expuse la temperaturi mai mari cu 10...15 °C. Astfel s-a propus modelarea structurilor rutiere suplă la temperatura de 15 °C, 20 °C, 25 °C. Ca și caracteristici ale straturilor din asfalt la modelare s-au introdus modulul de rigiditate, conductivitatea termică și căldura specifică.

În figura 5.7 sunt prezentate rezultatele pentru structura rutieră suplă MSF 4.6 – 315, conform tabel 5.1, în ipoteza straturilor cu conlucrare și fără conlucrare. Se observă în funcție de rezultatele obținute că deformațiile în structura rutieră suplă sunt de circa două ori mai mari în cazul ipotezei interfețelor libere față de ipoteza straturilor perfect legate. Astfel, la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasările sunt mai mari cu 64 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 67 %. Acest raport începe să scadă sensibil de la nivelul patului drumului, iar în jurul adâncimii de 2,00 ... 2,50 m deplasările sunt sensibil egale în ambele ipoteze simplificate.



## 5.2 – Studii privind comportarea structurilor rutiere realizate 205

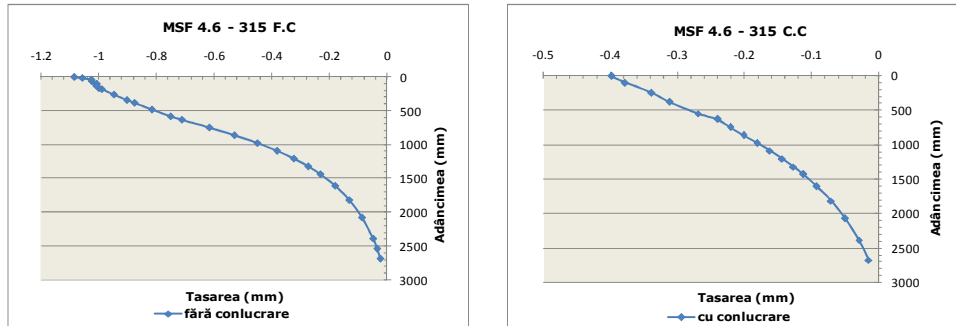


Figura 5.7. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MSF 4.6 – 315

Odată cu creșterea temperaturii, modulul de elasticitate scade implicând totodată creșterea deformațiilor în structura rutieră. Astfel, structura rutieră MSF 4.6 – 320, figura 5.8, analizată atât din punct de vedere al interfețelor libere, cât și al celor perfect legate, prezintă la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasări mai mari cu 62 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 67 %.

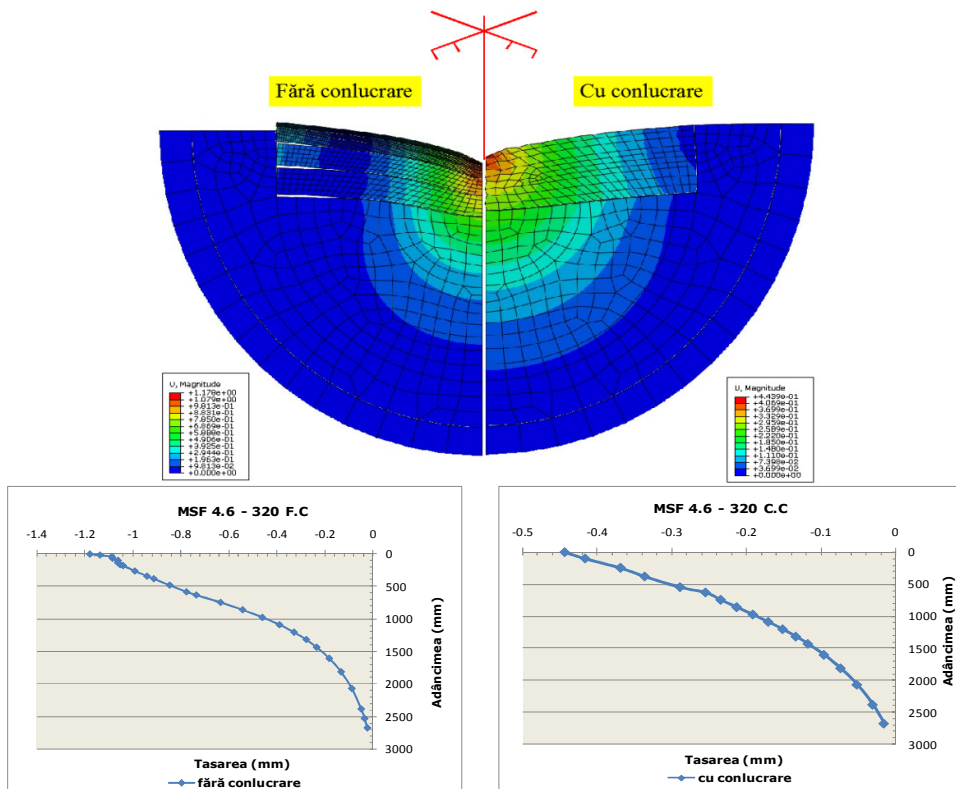


Figura 5.8. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MSF 4.6 – 320

Structura rutieră MSF 4.6 – 325, figura 5.9, analizată atât din punct de vedere al interfețelor libere, cât și al celor perfect legate, prezintă la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasări mai mari cu 61 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 66 %.

Variațiile caracteristicilor de deformabilitate ale mixturilor asfaltice datorate variațiilor de temperatură, aduc modificări ale comportării complexelor rutiere în structură și puțin sub nivelul patului drumului. Astfel, se constată că variațiile modulului de elasticitate a mixturilor asfaltice nu modifică comportarea zonei active a terasamentelor decât până la adâncimi de circa 0,70 m în ipoteza interfețelor fără conlucrare și 1,00 m în ipoteza legăturii perfecte între straturile rutiere.

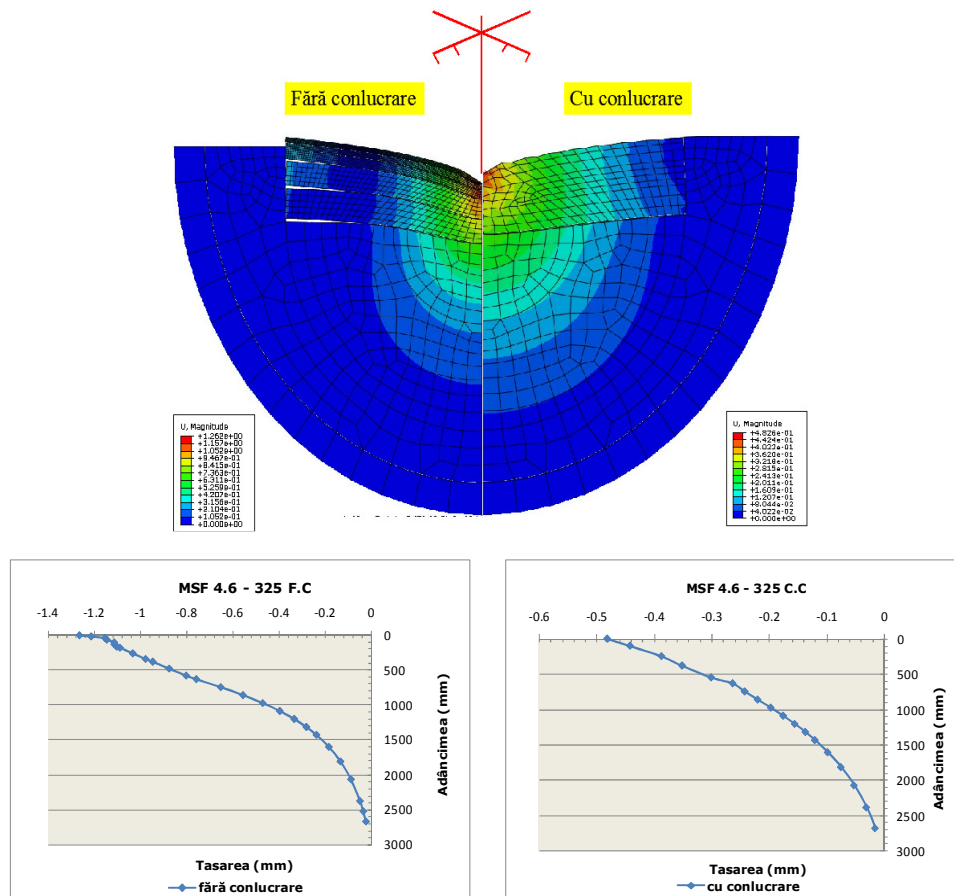


Figura 5.9. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MSF 4.6 – 325

În figura 5.10 este redată starea de deformații la variații ale caracteristicilor mixturilor asfaltice și se poate observa la nivelul superior al straturilor bituminoase o scădere a modulului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice datorită temperaturii care implică o creștere a deformațiilor cu circa 15 %, iar la nivelul patului drumului cu circa 10 % în ipoteza interfețelor libere. În ipoteza legăturii

perfecte între straturi, variația modului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice implică variații ale deformațiilor de circa 18 % la baza straturilor bituminoase și de circa 9 % la nivelul terenului de fundare.

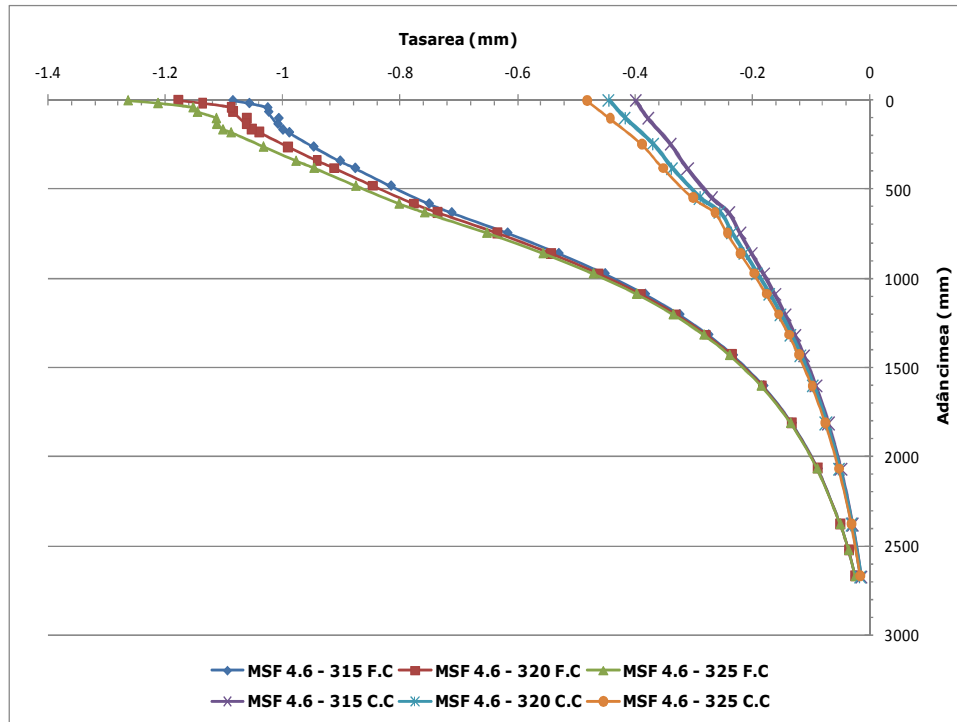


Figura 5.10. Starea de deformații la variații ale caracteristicilor mixturilor asfaltice (structură rutieră suplă MSF 4.6 )

În ceea ce privește rezultatele pentru structura rutieră concepută pe baza utilizării în straturile de asfalt ca material de umplere a cenușii de termocentrală, acestea au fost obținute în urma modelării numerice tot pentru aceleași temperaturi ca și structura rutieră ce conține în amestecurile de asfalt fier. Astfel structura rutieră MCC 6 – 415, figura 5.11, analizată atât din punct de vedere al interfețelor libere, cât și perfect legate, prezintă la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasări mai mari cu 65 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 66 %. Deci în această situație deși structura rutieră concepută MCC 6 – 415 prezintă un procent de bitum mai mare ca și structura rutieră MSF 4.6 – 315, deformațiile rezultate din modelarea numerică sunt mai mici cu aproximativ 1 %, la nivelul straturilor bituminoase, indiferent de ipoteza tratată.

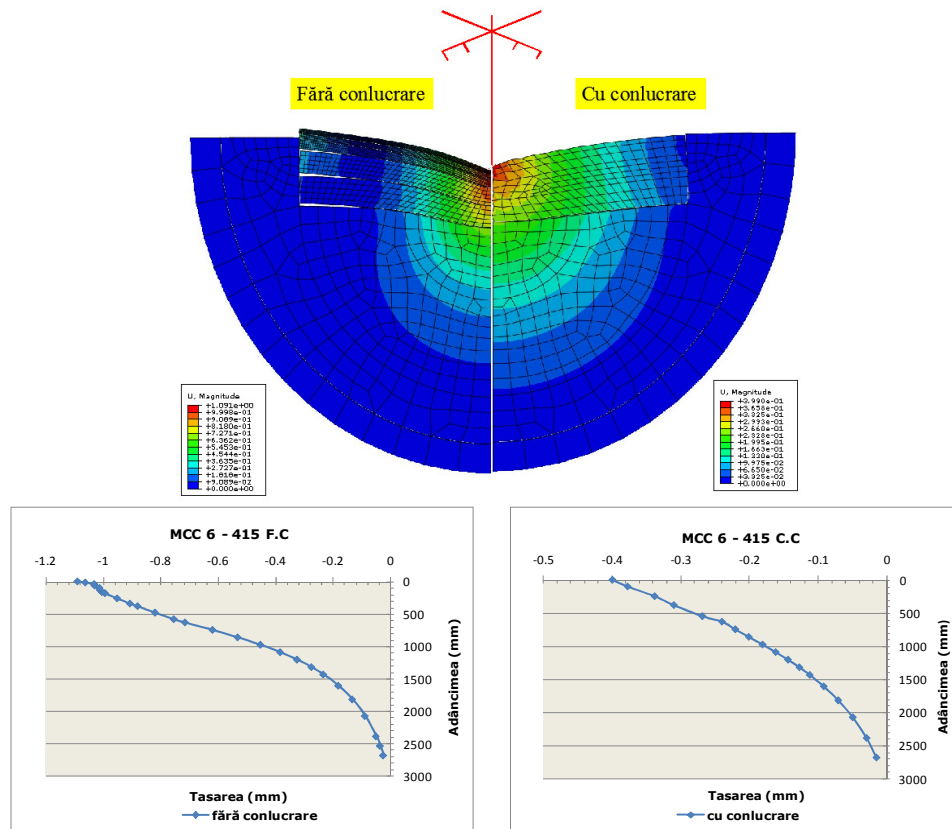


Figura 5.11. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MCC 6 – 415

Structura rutieră MCC 6 – 420, figura 5.12, analizată atât din punct de vedere al interfețelor libere cât și perfect legate, prezintă la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasări mai mari cu 65 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 66 %. Deci în această situație deși structura rutieră concepută MCC 6 – 420 prezintă un procent de bitum mai mare ca și structura rutieră MSF 4.6 – 320, deformațiile rezultate din modelarea numerică sunt mai mici cu aproximativ 3 %, la nivelul straturilor bituminoase, indiferent de ipoteza tratată.

Rezultatele obținute pentru structura rutieră MCC 6 – 425, figura 5.13, analizată atât din punct de vedere al interfețelor libere cât și perfect legate, prezintă la nivelul inferior al straturilor bituminoase deplasări mai mari cu 66 %, iar la nivelul patului drumului acestea sunt mai mari cu circa 66 %. Făcând o comparație între aceasta și structura rutieră MSF 4.6 – 325, modelate la aceeași temperatură ambele, dar ținând cont totuși de faptul că prezintă un procent ridicat de bitum, deformațiile rezultate din modelarea numerică sunt mai mici cu aproximativ 5 % la nivelul straturilor bituminoase indiferent de ipoteza tratată. În ceea ce privește deformațiile rezultate la nivelul patului drumului se remarcă faptul că acestea nu se schimbă valoric.



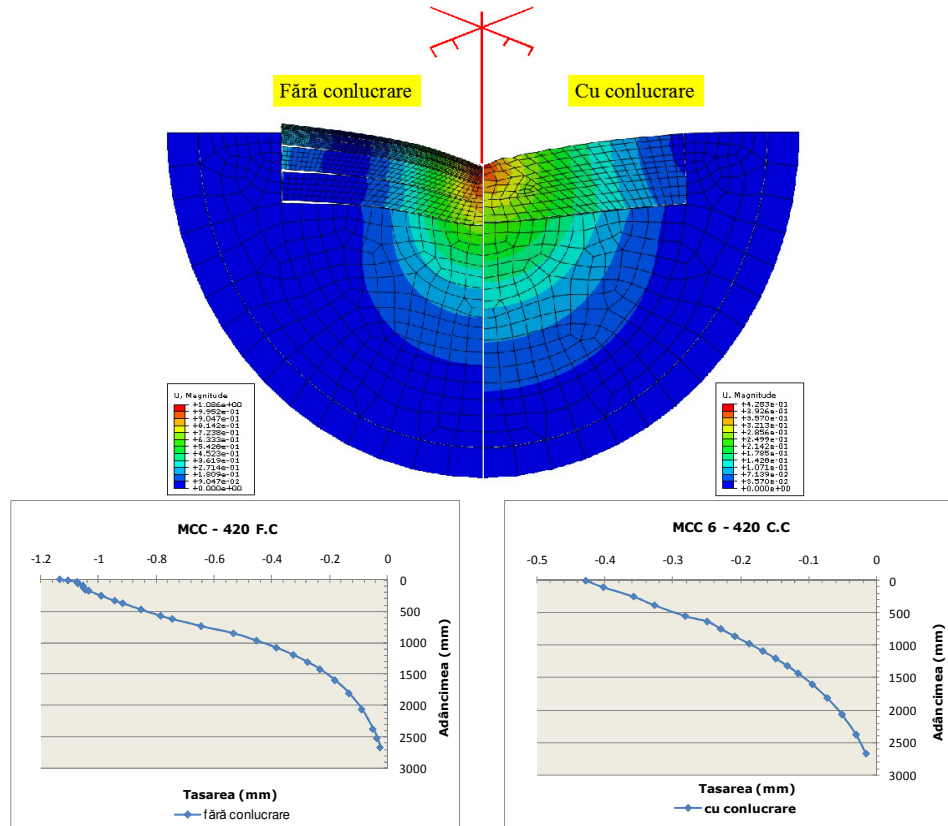
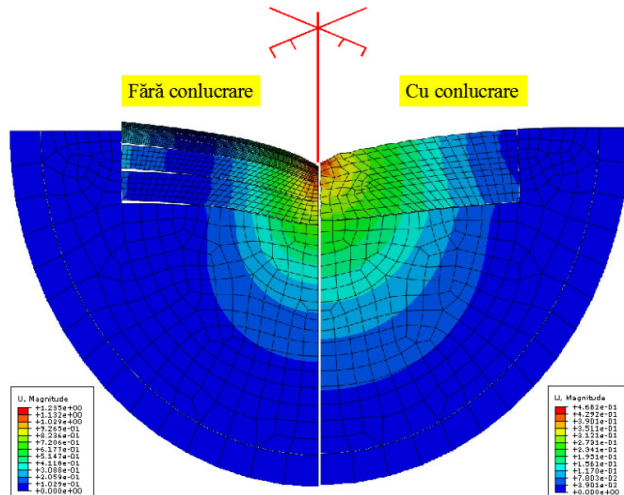


Figura 5.12. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MCC 6 - 420



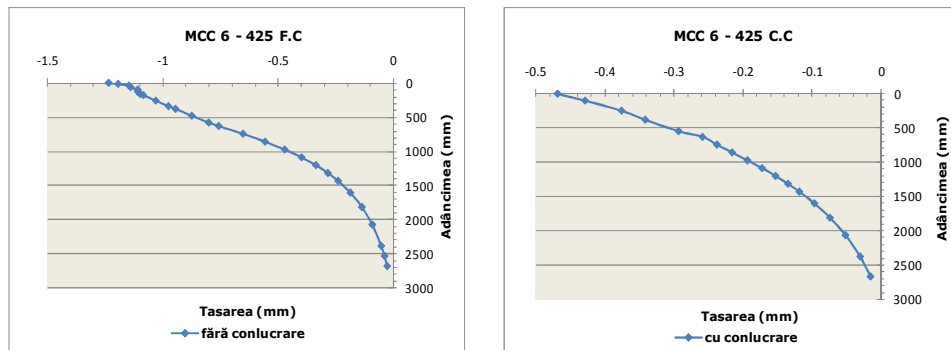


Figura 5.13. Ipoteza straturilor rutiere cu conlucrare și a straturilor fără conlucrare, pentru structura rutieră MCC 6 - 425

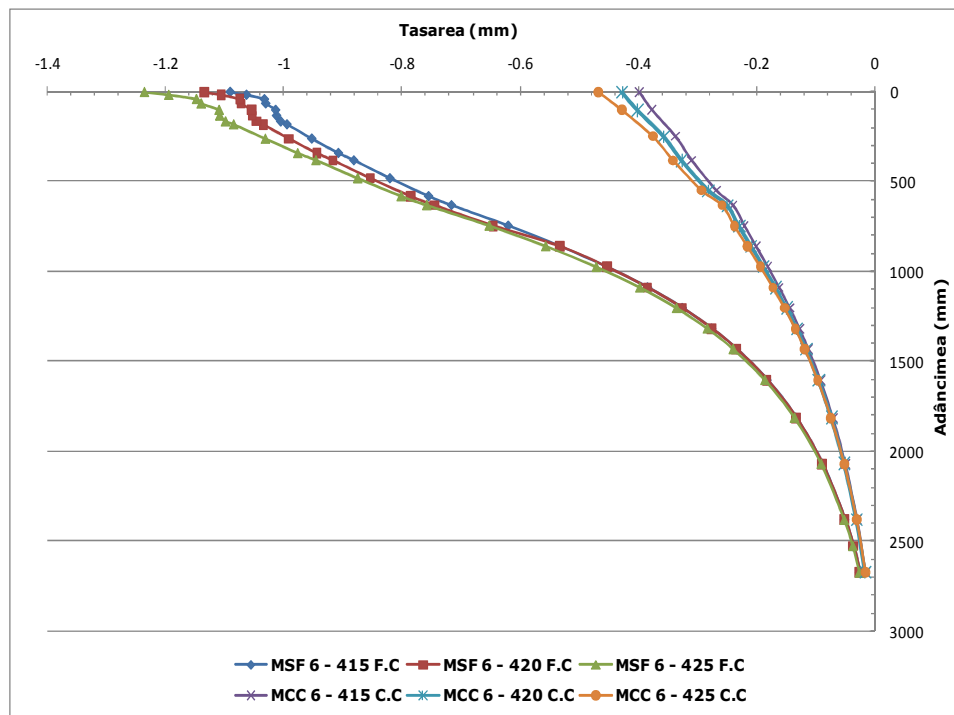


Figura 5.14. Starea de deformații la variații ale caracteristicilor mixturilor asfaltice (structură rutieră suplă MCC 6 )

În figura 5.16 este redată starea de deformații la variații ale caracteristicilor mixturilor asfaltice pentru structura rutieră MCC 6 la temperaturile stabilite și se poate observa la nivelul superior al straturilor bituminoase o scădere a modulului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice datorită temperaturii care implică o creștere a deformațiilor cu circa 12 %, iar la nivelul patului drumului cu circa 10 % în ipoteza interfețelor libere. În ipoteza legăturii perfecte între straturi, variația modulului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice implică variații ale

deformațiilor de circa 15 % la baza straturilor bituminoase și de circa 8 % la nivelul terenului de fundare.

În această situație se remarcă faptul că deși procentul de bitum este mai ridicat pentru straturile de asfalt ce conțin cenușă de termocentrală, componente ale structurii rutiere concepute, valorile privind deformațiile rezultate în urma modelării sunt mai mici. Acest lucru se datorează faptului că mixtura asfaltică concepută nu înmagazinează atât de multă căldură ca și mixtura ce conține fier, lucru demonstrat prin proprietățile termo-fizice rezultate, cât și prin modulul de rigiditate obținut pentru temperaturile la care s-a modelat structura rutieră.

Din figurile 5.15 și 5.16, se scoate în evidență atât pentru ipoteza straturilor fără conlucrare, cât și pentru straturile cu conlucrare, variația deformațiilor în urma modelării. Practic se poate observa că structura rutieră concepută MCC 6 modelată la aceleași temperaturi ca și structura rutieră standard MSF 4.6, pentru temperaturi mai ridicate prezintă deformații mai mici.

Influența caracteristicilor straturilor bituminoase asupra comportării în exploatare (deformații) a complexelor rutiere suple în urma modelării celor două structuri experimentale propuse MSF 4.6 și MCC 6, variind temperatura de referință prin creștere, în funcție de care au rezultat valorile modulilor de elasticitate dinamici ai mixturilor asfaltice, cât și proprietățile termo-fizice ale acestora (conductivitate termică, căldură specifică) conform tabelului 5.1, este prezentată în figura 5.17.

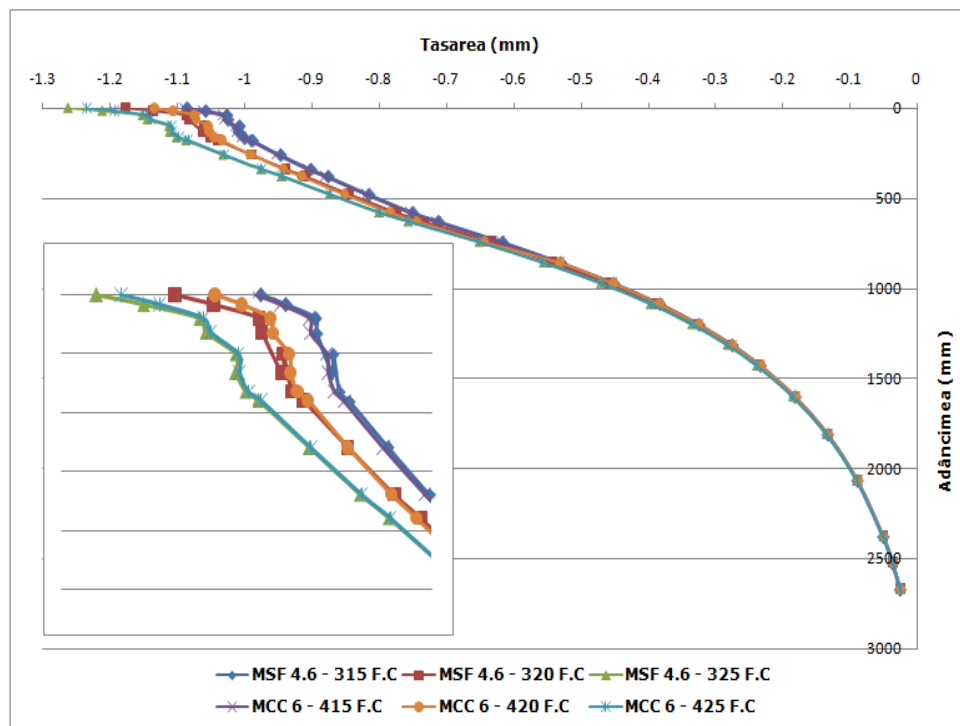


Figura 5.15. Starea de deformații pentru structura rutieră MSF 4.6 și MCC 6, în ipoteza straturilor fără conlucrare

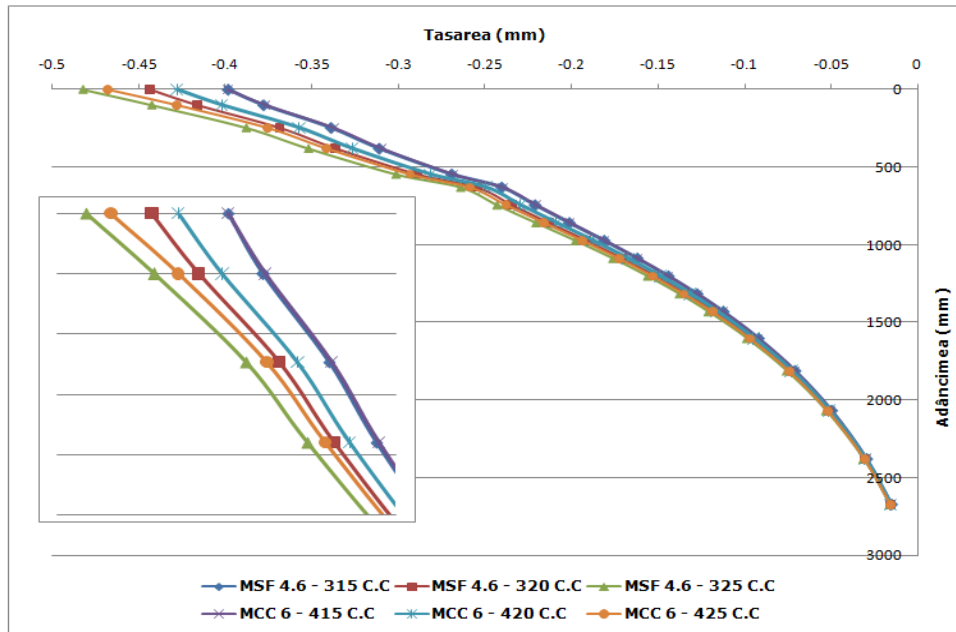


Figura 5.16. Starea de deformații pentru structura rutieră MSF 4.6 și MCC 6, în ipoteza straturilor cu conlucrare

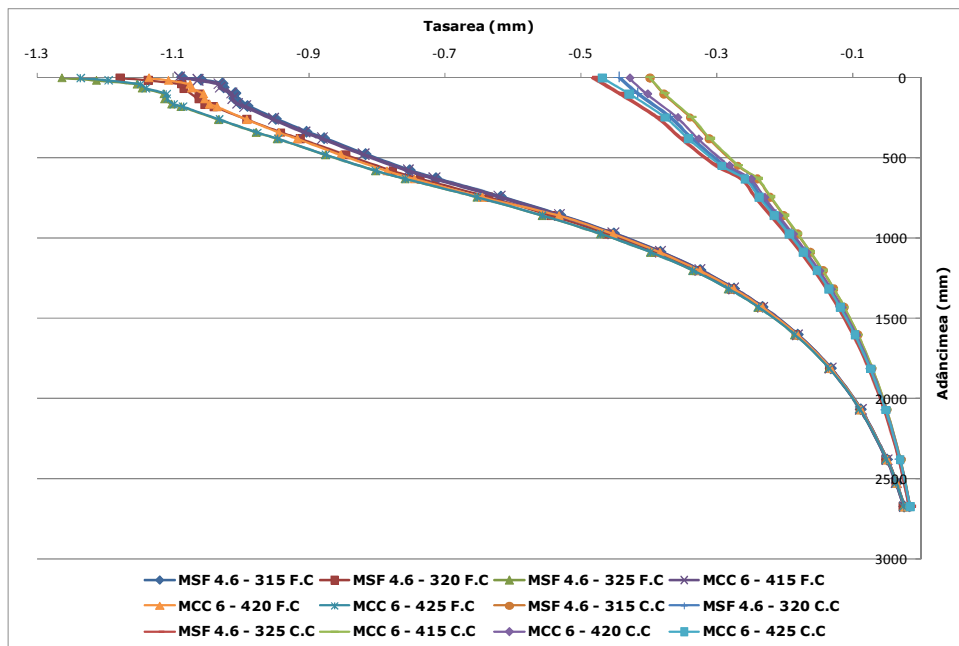


Figura 5.17. Influența caracteristicilor mixturilor asfaltice asupra stării de deformație

Modificările caracteristicilor mixturilor asfaltice determină modificări ale comportării în exploatare ale complexelor rutiere diferite în funcție de tipul structurii rutiere analizate. La structurile rutiere suple MCC 6 modelate pentru temperaturile stabilite, modificările mai importante privind deformațiile în complexul rutier, sunt aduse datorită faptului că modulul de rigiditate pentru aceste mixturi asfaltice concepute nu își pierde așa de mult din valoare la temperaturi mai ridicate (scăderea deformațiilor), având în vedere scăderea acestuia pentru mixturile asfaltice componente ale structurii rutiere MSF 4.6 la aceleași temperaturi (creșterea deformațiilor).

## 6. CONCLUZII FINALE

În prezenta teză de doctorat se analizează studierea unor factori de influență care, prin intermediul variațiilor mari de temperatură, periclitează în mod frecvent structurile rutiere, cu particularizare pentru straturile din asfalt, în scopul determinării proprietăților termo-fizice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate și emisivitate) și conceperii și realizării unor straturi asfaltice cu caracteristici termo-fizice și fizico-mecanice superioare.

Studierea acestor factori de influență asupra comportării structurii rutiere în exploatare se face în scopul îmbunătățirii acesteia și menținerii ei la standarde superioare pentru perioade de timp cât mai îndelungate. După cum se știe în construcția de drumuri, straturile din îmbrăcăminte asfaltică ale structurii rutiere suple și mixte sunt cel mai mult expuse la solicitări determinate pe de-o parte de traficul greu și pe de altă parte de condițiile climaterice. Cunoașterea influenței acestor factori asupra complexelor rutiere și combaterea lor prin diferite moduri, pot conduce la eliminarea unor efecte negative generate de aceștia în timpul exploatării.

Practic studiile evidențiate în cadrul tezei de doctorat se axează în cea mai mare parte pe determinarea caracteristicilor termice ale mixturilor asfaltice, caracteristici cu ajutorul cărora se urmărește combaterea factorilor de influență rezultați din condițiile de mediu la care sunt supuse structurile rutiere continuu în fazele de construcție, reparație, precum și în timpul duratei lor de serviciu. Datorită cunoașterii distribuției de temperatură în fiecare strat asfaltic component al structurii rutiere, solicitările ce apar datorită variațiilor de temperatură pot fi combătute. Fluctuațiile de temperatură ale aerului zilnic și sezonier, intensitatea radiației solare, materialele ce alcătuiesc straturile structurii rutiere prin geometria acestora și condițiile de suprafață sunt unii din cei mai importanți factori ce periclitează în mod semnificativ stabilitatea structurii rutiere.

În ceea ce privește succesul pe termen lung al proiectării straturilor rutiere, acesta constă într-o estimare precisă a profilului de temperatură, lucru ce ajută foarte mult, în special la evaluarea deformațiilor structurii rutiere, la o estimare cât mai corectă a modului de calcul, cât și la evaluarea zilnică și sezonieră a efectelor de încălzire-răcire.

După cum se știe din literatura de specialitate, îmbrăcămintele din asfalt prezintă temperaturi mai mari de suprafață decât alte suprafețe în zilele de vară și au un potențial de eliberare a unei cantități considerabile de căldură în atmosferă prin fluxul de căldură și radiații. O înțelegere corectă a cumulului de căldură și o determinare corectă a acestuia prin stabilirea proprietăților termo-fizice, precum și o combatere a efectelor prin realizarea unor mixturi asfaltice cu caracteristici termice superioare, este de mare ajutor în luarea deciziilor în tehnologiile de construcție a infrastructurilor rutiere și la studierea fenomenului de căldură care prezintă o problemă serioasă de mediu.

Astfel, datorită acestor inconveniente enumerate anterior, s-au studiat metodele de identificare a proprietăților termo-fizice ale mixturilor asfaltice ce permit urmărirea unor procese evolutive complexe în timpul expunerii lor la temperaturi ridicate și temperaturi scăzute pe întreg ciclul duratei lor de viață. Identificarea proprietăților termo-fizice a fost posibilă datorită dezvoltării noi a

aplicațiilor tehnice de măsurare fluxmetrică ce permit definirea modalităților de statut termic în plan.

Pe lângă studiul și determinarea proprietăților termo-fizice ce au fost realizate în cadrul unui stagiu de doctorat efectuat în Franța, s-au adus contribuții favorabile asupra îmbunătățirii caracteristicilor termice prin conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice în compoziția cărora s-a utilizat ca și componentă, pe lângă materialele de bază, cenușa de termocentrală, prin înlocuirea parțială și totală a fillerului. Aceasta ajută la obținerea unor proprietăți termo-fizice superioare, proprietăți ce au un efect favorabil asupra caracteristicilor fizico-mecanice. Așadar, pentru a putea urmări toate aceste procese evolutive ale caracteristicilor termice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate și emisivitate) asupra caracteristicilor fizico-mecanice, în teză sunt prezentate o serie de dozaje B.A.16 și B.A.D.25 concepute și realizate cu diferite procente de cenușă de termocentrală.

Caracteristicile materialului prin testele de laborator efectuate pe mixturile asfaltice oferă previziuni de performanță semnificative pentru îmbrăcămintile asfaltice numai în cazul în care temperatura materialului este luată corect în considerare. Astfel se prezintă un model analitic care, pe baza proprietăților termo-fizice, poate prezice într-un mod corect distribuția temperaturii în mixtura asfaltică. Totodată, este prezentată structura organizatorică de testare în laborator, concepută pentru a valida ca și model determinarea temperaturii.

Caracteristicile fizico-mecanice stabilite pe mixturile asfaltice realizate au fost determinate conform stasurilor în vigoare pentru fiecare încercare în parte. Mai mult cu ajutorul mixturilor asfaltice rezultate s-au conceput o serie de structuri rutiere care au fost modelate matematic și cercetate la variații diferite de temperatură, astfel putându-se scoate în evidență efectul benefic al proprietăților termo-fizice și al utilizării cenușii de termocentrală.

Pe baza studiilor teoretice și experimentale au rezultat o serie de concluzii extrem de interesante și valoroase pentru domeniul infrastructurii rutiere, concluzii care pot să deschidă o serie de oportunități pentru viitoarele cercetări în domeniu.

Astfel, teza de doctorat este structurată într-un număr de șase capitole și bibliografie. Studiile efectuate s-au evidențiat pe parcursul a 245 de pagini care cuprind 146 relații de calcul, 44 tabele și 169 figuri. Studiul bibliografic cuprinde un număr de 109 titluri cuprinzând tratate de specialitate din literatura națională și internațională, standarde și normative în vigoare, reviste, publicații și lucrări științifice.

## 6.1. Conținutul tezei de doctorat

În **capitolul 1** sunt prezentate strategiile și direcțiile de acțiune privind dezvoltarea rețelelor naționale de transport. În ceea ce privește rețeaua de drumuri din țara noastră se poate afirma că este una deficitară, atât din punct de vedere al densității, cât și din punct de vedere al stării tehnice a acesteia, situație ce are un impact major asupra transporturilor rutiere, prin pierderi deosebit de importante care se reflectă la nivelul agenților economici și, de asemenea, al utilizatorilor individuali. Obiectivul general de estompere al acestor inconveniente poate fi realizat printr-o dezvoltare echilibrată a sistemului național de transport care să asigure o infrastructură și servicii de transport moderne și durabile. Atingerea acestui obiectiv va contribui în mod direct la asigurarea dezvoltării durabile a sectorului de transporturi, a economiei și a mediului și la creșterea gradului de

accesibilitate a României. Dintre obiectivele specifice avute în vedere pentru atingerea scopului general se pot confirma următoarele:

- modernizarea și dezvoltarea rețelei de transport de interes european și național;
- creșterea condițiilor de siguranță și a calității serviciilor;
- liberalizarea pieței interne de transport;
- stimularea dezvoltării economiei și a competitivității;
- întărirea coeziunii sociale și teritoriale la nivel regional și național;
- compatibilitatea cu mediul înconjurător.

Tot în cadrul primului capitol se prezintă câteva particularități privind starea drumurilor de interes național, județean și local. Astfel în ceea ce privește starea drumurilor din România, se poate confirma că este una necorespunzătoare, datorată în mare parte lipsei autostrăzilor care conduc la o intensificare a traficului pe drumurile naționale și județene. Pe fondul dezvoltării economiei în ultimii ani, problema infrastructurii prezintă un impact agravat datorat lipsei autostrăzilor, astfel încetinind creșterea economică și ducând la pierderea unor investiții importante.

Rețeaua rutieră publică din România asigură accesul motorizat în majoritatea localităților țării, densitatea rețelei fiind de  $0,64 \text{ km/km}^2$ , iar lungimea de 78 949 km (exclusiv stradală) din care 16 500 km (20,90 %) drumuri naționale principale și secundare (6 228 km drumuri europene din care 322 km autostrăzi) și 62 449 km (79,10 %) drumuri județene și comunale.

Se definește starea tehnică a drumurilor care se evaluează cu ajutorul următoarelor caracteristici:

- planeitatea suprafeței de rulare;
- rugozitatea suprafeței îmbrăcăminții rutiere;
- capacitatea portantă a complexului rutier exprimată prin valoarea deformației elastice;
- starea de degradare a îmbrăcăminții rutiere, caracterizată prin indicii de degradare:
  - indicele global de degradare (IG) pentru îmbrăcămințile bituminoase;
  - indicele de degradare (ID) pentru îmbrăcămințile bituminoase și cele din beton de ciment.

Conform datelor obținute de la Ministerul Transporturilor și Infrastructurii și de la direcțiile pentru Administrarea Drumurilor și Podurilor Județene, privind situația drumurilor naționale și județene de pe teritoriul administrativ al României, este prezentată starea tehnică și starea de viabilitate a acestora.

O dată integrată infrastructura românească în rețelele europene de transport se are în vedere promovarea interconectării și interoperativității prin concentrarea atenției asupra coridoarelor paneuropene de transport IV și IX ce tranzitează și țara noastră, asigurând astfel integrarea graduală în familia țărilor continentului european și punerea în valoare a resurselor economice și turistice de care dispunem. Astfel o infrastructură de transport eficientă conectată la rețeaua europeană de transport contribuie la creșterea competitivității economice. Pe lângă aceste considerente unul dintre obiectivele specifice ale priorităților naționale de dezvoltare, întreținere și modernizare a infrastructurilor de transport se realizează prin următoarele acțiuni:

- modernizarea întregii rețele de drumuri naționale prin realizarea de îmbrăcăminți asfaltice sau din beton de ciment;
- creșterea capacității portante prin realizarea unor ranforsări ale structurilor rutiere în vederea trecerii de la sarcina pe osie de la 10 t la 11,5 t;



- îmbunătățirea performanțelor îmbrăcăminților asfaltice prin utilizarea de mixturi asfaltice cu performanțe ridicate;
- conservarea prin lucrări de întreținere a parametrilor tehnici ai structurilor existente care îndeplinesc exigențe legate de asigurarea desfășurării traficului în condiții de siguranță;
- modernizarea și/sau reabilitarea structurilor existente ai căror parametri tehnici nu mai corespund evoluției traficului.

Toate aceste elemente strategice au ca scop generarea unei coeziuni teritoriale între România și statele membre ale UE, prin reducerea timpilor de călătorie către principalele destinații, atât interne, cât și externe, prin modernizarea și dezvoltarea infrastructurilor rutiere.

În **capitolul 2** se prezintă câteva aspecte referitoare la structurile rutiere, pornind de la definițiile acestora și de la modul de alcătuire al lor din cele mai vechi timpuri (structurile rutiere romane) până în zilele noastre, fiind prezentate totodată și tendințele la nivel mondial de realizare a acestora. Clasificarea structurilor rutiere este în strânsă legătură cu modul de alcătuire al acestora, cu materialele și tehnologiile folosite, cu metodele de dimensionare și comportare în exploatare. Alcătuirea structurilor rutiere suple și mixte se diferențiază printr-un mod de comportare diferit exercitat în timpul exploatării, datorită modului de realizare a straturilor componente.

Astfel în cadrul capitolului sunt tratate doar structurile rutiere flexibile și semirigide ce prezintă un grad de răspândire ridicat atât la noi în țară, cât și pe plan mondial, astfel încât este necesar un studiu complex al acestor structuri ce presupun combinații de straturi din diverse materiale, cu proprietăți diferite supuse la încărcări provenite din diverși factori (trafic, condiții climatice). Din punct de vedere al comportării în exploatare a structurilor rutiere enumerate sunt prezentate câteva din concluziile materializate în urma observațiilor efectuate asupra lor, și anume pentru:

- structurile rutiere flexibile:
  - peste 40 % din cazuri grosimea totală a straturilor rutiere este de 40 ... 60 cm;
  - suprafața îmbrăcăminții rutiere prezintă deformații permanente (65 % din cazuri) și este fisurată (60 % din cazuri);
  - deflexiunea medie pe aceste structuri rutiere este de circa 0,70 m și nu depășește 1,00 m decât în circa 20 % din cazuri.
- structuri rutiere semirigide:
  - realizarea unor importante economii de materiale prin construcția unor straturi rutiere mai subțiri, dar cu o capacitate portantă ridicată;
  - economisirea lianților tradiționali (mai scumpi) prin înlocuirea lor parțială sau totală cu lianți puzzolanici.

În ceea ce privește dimensionarea structurilor rutiere, aceasta cunoaște o evoluție continuă de succes, având ca punct de pornire anii 1940 – 1960, fapt ce implică observarea modului de interacțiune a structurii rutiere cu pământul din stratul suport, cu schimbările climatice și cu diversele clase tehnice de trafic. Astfel, au fost tratate două abordări foarte diferite pentru dimensionarea structurilor rutiere. Abordarea empirică analizează comportamentul real al carosabilului sub trafic din date experimentale și stabilește criteriile pentru definirea expirării duratei de viață a drumului. Această abordare, pe lângă faptul că se realizează pe baza unor date rezultate din urmărirea în timp a unor sectoare experimentale, prezintă și o serie de dezavantaje. În cadrul abordării teoretice, se stabilește un model care reproduce cât mai aproape funcționarea mecanică a structurii rutiere. Folosind modelul stabilit se determină solicitările suportate de materialele din structura

rutieră și patul drumului sub efectul traficului, apoi se compară cu solicitările admisibile.

Domeniul mecanicii structurilor rutiere este limitat de înțelegerea modului de funcționare a diverselor tipuri de structuri rutiere și definirea regulilor de dimensionare. Astfel, metodele analitice de dimensionare a structurilor rutiere flexibile sunt bazate pe modele matematice, structurile rutiere sunt alcătuite din straturi infinite în plan orizontal, așezate pe un teren de fundare de grosime semifinită, straturile sunt alcătuite din materiale omogene, izotrope și cu comportare elastică. Structurile rutiere semirigide au la bază aceleași metodologii de dimensionare ca și cele ale structurilor rutiere suple, doar că criteriile de dimensionare sunt legate de tensiunile de întindere induse de prezența straturilor rigide din materiale stabilizate.

Modelele mecanicii structurilor rutiere pe baza cărora s-au dezvoltat metodele de dimensionare a structurilor rutiere abordate de către autor în cadrul tezei sunt prezentate în funcție de clasificarea cronologică, clasificarea potrivit problemelor fizice abordate și clasificarea prin utilizarea modurilor de rezoluție matematică. Din literatura de specialitate referitoare la modul de funcționare mecanică a structurilor rutiere se remarcă faptul că pentru estimarea comportării în exploatare a unei structuri rutiere este necesară, pe lângă toate aceste aspecte, cunoașterea și înțelegerea proprietăților fundamentale ale mixturii asfaltice.

Fundamentarea teoretică a dimensionării structurilor rutiere se face pe baza analizei eforturilor și deformațiilor unui sistem multistrat elastic. Calculul practic, necesită printre altele cunoașterea exactă a parametrilor ce caracterizează comportarea mecanică a materialelor ce intră în alcătuirea diferitelor straturi ale complexului rutier. Astfel, tot în cadrul acestui capitol s-a făcut o trecere în revistă a noțiunii de modul complex pentru mixtura asfaltică ce este un material vâsco-elastic, și s-a evidențiat rolul temperaturii și al frecvenței asupra modului complex din care reiese că influența frecvenței de încărcare este mult mai mare pentru temperaturi ridicate decât pentru temperaturi scăzute.

Referitor la încercarea la oboseală, în condițiile reale de exploatare, în îmbrăcămințile asfaltice apar eforturi unitare și deformații cu caracter aleatoriu, care practic sunt imposibil de reconstituit în laborator. Așadar sunt prezentate o serie de condiții ce trebuie respectate pentru determinarea încercării la oboseală ținând totodată cont și de influența temperaturii care are un rol important la evaluarea performanțelor proprietăților mixturii asfaltice la oboseală atunci când acesta variază. În ceea ce privește comportamentul îmbrăcăminților asfaltice la variații de temperatură, acesta se reflectă printr-un răspuns elastic la solicitări foarte scurte și temperaturi scăzute, și prin curgere la încărcări ușoare și temperaturi ridicate.

Un alt aspect foarte important de care nu se prea ține cont la dimensionarea structurilor rutiere este rolul schimbărilor climatice care, prin efectul ciclurilor sezoniere de temperatură, arată că comportarea structurilor rutiere ce au în componență straturi din asfalt este sensibilă la variațiile de temperatură. Datorită necesității unui calcul de distribuție a temperaturilor în interiorul structurii s-a prezentat un studiu al variațiilor de temperatură în structura rutieră prin analiză termică, analiză a cărei ecuații de bază sunt furnizate de legile de propagare a căldurii (ex. legea lui Fourier). Astfel pe baza acestora a fost stabilit programul GEL, care prin schema de rezolvare permite calculul distribuției temperaturii într-o structură rutieră alcătuită din mai multe straturi. Modelarea structurii rutiere este similară cu cea utilizată în calculele structurilor sub încărcări, dar numărul de parametri implicați în fiecare strat sunt foarte importanți (căldură specifică, conductivitate termică, conținut de apă).

Grosimile straturilor rutiere, fie ele constructiv alese sau dimensionate conform criteriilor de calcul, influențează comportarea în exploatare a complexelor rutiere, fapt evidențiat în diagramele prezentate în conținutul capitolului, care subliniază dependența deformațiilor înregistrate la diferite niveluri ale structurilor rutiere în funcție de grosimile straturilor componente.

Datorită faptului că variațiile de temperatură prezintă un efect negativ asupra comportării în exploatare a structurilor rutiere, ar trebui luate măsuri de reducere a acestora prin tratarea sau realizarea unor îmbrăcămînți asfaltice care să nu absoarbă și să nu cumuleze în totalitate variațiile de temperatură la care sunt supuse. Așadar influența factorilor climaterici asupra comportării complexelor rutiere se manifestă inclusiv la nivelul terenului de fundare. Datorită acestui considerent, ideală ar fi conceperea și realizarea unor structuri rutiere flexibile și semirigide la care straturile din asfalt să prezinte un modul de elasticitate ridicat pentru temperaturile specifice sezonelor calde, astfel crescând stabilitatea îmbrăcămînții asfaltice.

În **capitolul 3** se prezintă efectiv studiul efectuat pentru determinarea proprietăților termo-fizice prin metodele și mijloacele specifice de determinare ale acestora. Aceste proprietăți au fost studiate tocmai pentru a putea urmări efectul variațiilor de temperatură asupra îmbrăcămînților asfaltice. Proprietățile termo-fizice ale unui material conductor implică de obicei determinarea mai multor parametri, iar pentru punerea lor în evidență s-au determinat conductivitatea termică, căldura specifică, difuzivitatea, efuzivitatea și emisivitatea.

Datorită faptului că betonul asfaltic prezintă un comportament diferit în funcție de temperatură, au fost efectuate măsurători care să precizeze temperatura în asfalt și pe baza acestora, cu ajutorul proprietăților termo-fizice care sunt necesare pentru modelarea relației timp-temperatură, s-au dezvoltat diverse modele și aplicații referitoare la anticiparea variației temperaturii în betonul asfaltic.

În ceea ce privește studiul de transfer termic, acesta prezintă dificultăți speciale datorită naturii materialului care este constituit din mai multe faze, iar mărimile termice accesibile nu pot fi un reprezentant în totalitate al fazei solide care este predominantă în cazul betonului asfaltic, dar pot să contribuie la constituirea altor mărimi. În acest fel mediile poroase care conțin apă sunt reprezentate sub diferite forme, dar datorită migrației de apă schimbarea statutului se face sub efectul de gradient termic, acesta fiind susceptibil de a afecta în mod semnificativ echilibrul energetic și parametrii globali care pot fi deduși. Astfel, identificarea parametrilor termo-fizici ai betonului asfaltic într-un mediu echivalent cu perturbări minime de echilibru al temperaturii reprezintă obiectivul esențial al studiului, dar ținând cont de unele constrângeri cum ar fi: temperatura medie de încercare să fie aproape de temperatura camerei și gradientul termic să fie limitat.

Pentru a putea analiza betonul asfaltic din punct de vedere al absorbției de căldură, s-a făcut o trecere în revistă a elementelor fundamentale ale radiației termice. Astfel s-a studiat natura fenomenului de radiație termică la modul general, putându-se demonstra faptul că betonul asfaltic în funcție de distribuția energiei radiante poate fi integrat la corp negru, deoarece absoarbe aproape în totalitate radiația incidentă, emite radiația difuză independent de direcție, iar pentru o anumită temperatură și lungime de undă dată, emite energie mai mult decât orice corp. Tot în cadrul acestui capitol sunt prezentate și legile radiației termice (legea lui Plank, Wien și Stefan-Boltzmann), legi care atestă următoarele:

- puterea de emisie variază continuu cu lungimea de undă (Plank);
- puterea de emisie crește cu temperatura pentru o lungime de undă dată (Plank);

- la creșterea temperaturii maximul puterii spectrale de emisie se deplasează către lungimi de undă mai mici (Wien);
- factorul de emisie a metalelor este în general mic, pe când factorul de emisie al materialelor nemetalice, categorie din care face parte și mixtura asfaltică, are valori mai ridicate (Stefan-Boltzmann);
- factorul de emisie depinde puternic de natura suprafeței, metodele de fabricație, tratamentele termice, reacțiile chimice cu mediul înconjurător (Stefan-Boltzmann).

Relațiile de bază ce descriu fenomenul de transfer termic sunt reprezentate prin legea lui Fourier și ecuația de căldură, astfel pentru un mediu omogen și izotrop există o relație liniară între densitatea fluxului de căldură care este proporțională cu conductivitatea termică, și gradientul de temperatură. Pornind de la ecuația de căldură a fost descrisă difuzia într-un mediu cu ajutorul căreia s-a putut realiza transferul de căldură prin conducție de echilibru. Așadar ținând cont de aceste caracteristici este permisă rezolvarea ecuației și determinarea stării termice în orice punct definit de temperatură și densitatea fluxurilor. Tot în această situație sunt analizate și cazurile de transfer unidirecțional la care liniile de flux sunt paralele cu direcția de propagare pentru un singur mediu, în cazul acesta un singur strat de asfalt, sau poate fi generalizat pentru o structură multistrat.

Impedanța termică exprimă raportul între temperatură și densitatea de flux. Pentru determinarea impedanței termice sunt analizate diferite condiții, printre care faptul că mediul se consideră omogen la condiția limită izotermă și condiția limită semi-infinită.

Din punct de vedere al analizării sistemului constituit pentru determinarea proprietăților termo-fizice, în acest capitol s-au prezentat toate elementele componente ale sistemului de măsurat, toate condițiile impuse astfel încât măsurătorile efectuate să fie cât mai reale, și totodată modul de combatere a unor factori de influență care pot perturba corectitudinea măsurătorilor.

Metodologiile de caracterizare ale sistemului de conducție duc la determinarea unei impedanțe experimentale din semnalele măsurate de flux și temperatură. Una dintre cheile succesului metodei prezentate este calitatea de estimare a impedanței termice. Diferitele etape de prelucrare au condus de la o procedură de abordare foarte clasică direct bazată pe transformatele Fourier, la proceduri de elaborare bazate pe modelarea sistemului. Poziția problemei în această situație constă în determinarea funcției de transfer a unui sistem liniar, ce poate fi caracterizat prin prisma a două abordări, una constând în observarea răspunsului în timp a solicitării sistemului, iar cealaltă constând în plasarea sistemului în domeniul de frecvență.

Referitor strict la aparatura utilizată pentru determinarea caracteristicilor termice sunt prezentate detaliat fiecare dintre componentele ce intră în ansamblul de măsurare. Totodată, pentru corectitudinea măsurătorilor s-a realizat calibrarea fluxmetrelor și s-a analizat influența condițiilor experimentale. Astfel, mărimea livrată de fluxmetru fiind o diferență de potențial direct proporțională cu fluxul ce îl traversează, este necesar să se cunoască bine comportamentul senzorilor plasați în cadrul măsurării. Calibrarea este esențială tocmai datorită faptului că permite interpretarea tensiunii furnizate de senzor și o convertește în flux termic. În acest context, a fost necesar să se stabilească gradul de sensibilitate al fluxmetrelor și mai ales comportamentul vizavi de condițiile de măsurare (presiune, temperatură, direcția fluxului etc.).

Proprietățile termo-fizice studiate cu ajutorul aparaturii dezvoltate pe baza funcției de transfer termic sunt:

- conductivitatea termică - caracterizează aptitudinea unui material de a conduce căldura în regim permanent, reflectând mai mult sau mai puțin tendința materialului de a lăsa căldura să treacă;
- căldura specifică - caracterizează capacitatea unui material de a stoca energia termică. Ea măsoară cantitatea de energie necesară pentru variația de 1°C la temperatura masei unui kilogram de material.

Cu ajutorul acestor două caracteristici termice studiate se poate determina mai departe difuzivitatea termică, ce caracterizează aptitudinea unui material de a găzdui o tensiune termică nouă, și efuzivitatea, ce caracterizează aptitudinea unui material de a smulge căldură.

Foarte important, dintre detaliile privind modul de măsurarea a caracteristicilor termice, se remarcă modul de poziționare a probei din asfalt în bancul de încercare, prin împrejmuirea acesteia cu un inel din polistiren sau cu material textil, pentru a se evita pe laterale pierderea de flux și de a se asigura condițiile de transfer unidirecțional. Măsurarea temperaturii este efectuată cu ajutorul unui termocuplu de tip K. Fiecare termocuplu este conectat la o masă termică gestionată prin două plăci de schimb din aluminiu care sunt conectate la băile termostat prin intermediul unor pompe. Pașii efectuați pentru determinarea conductivității termice constă doar în asigurarea unidirecțională a fluxului termic ce tranzitează proba, prin setarea unei temperaturi mai mari pentru placa de schimb superioară, iar pentru determinarea căldurii specifice constă în asigurarea unui flux din ambele direcții, prin egalarea temperaturii pentru ambele plăci de schimb.

Studiile experimentale privind determinarea proprietăților termo-fizice pe mixturile utilizate în Franța, arată că acestea diferă de la un tip la altul. Scopul urmărit în această situație pe lângă determinarea acestor proprietăți, era acela de îmbunătățire a proprietăților termo-fizice prin utilizarea cenușii de termocentrală în amestecul de asfalt. Rezultatele obținute atestă faptul că dozajele realizate cu cenușa de termocentrală prin înlocuirea fillerului sunt superioare. Aceste rezultate le-am considerat superioare strict în acest studiu prin valoarea lor numerică scăzută.

Deoarece straturile din asfalt sunt supuse în timpul verii la fluctuații mari de temperatură, atunci când plouă ele absorb o anumită cantitate de apă. În ceea ce privește absorbția de apă a mixturilor asfaltice asupra proprietăților termo-fizice se poate afirma că acestea sunt inferioare, adică prezintă o valoare mai ridicată.

Un studiu de caz prezentat în cadrul acestui capitol atestă faptul că aceste proprietăți termo-fizice sunt de mare ajutor în modelarea distribuției de temperatură a mixturilor asfaltice. Astfel caracterizarea materialului prin testele de laborator efectuate pe mixturile asfaltice oferă previziuni de performanță semnificative pentru îmbrăcămintele asfaltice numai în cazul în care temperatura materialului este corect luată în considerare. Tot în acest capitol este prezentat un model analitic care pe baza proprietăților termo-fizice poate prezice într-un mod corect distribuția temperaturii în mixtura asfaltică, precum și o structură organizatorică de testare în laborator concepută pentru a valida ca și model determinarea temperaturii. Practic studiul relevă timpul necesar în care probele de mixtură asfaltică ajung la temperatura corectă necesară încercărilor la care urmează să fie supuse, astfel ca rezultatele ce se obțin în urma acestora să nu aibă un ecart mare de valoare între limita inferioară și superioară prevăzută în stas pentru dozajul respectiv.

Astfel, cu ajutorul proprietăților termo-fizice, se pot urmări procesele evolutive complexe în timpul expunerii mixturii asfaltice la temperaturi scăzute pe întreg ciclul duratei de viață și se poate reduce timpul de analiză în laborator. Valorile măsurate în cadrul studiului efectuat, indică faptul că în proba din asfalt temperatura crește brusc în diverse puncte, încă de la începutul măsurătorilor, apoi

continuă cu o creștere doar la un gradient scăzut, rezultând într-un timp extins ajungerea la o stare de echilibru a temperaturii. Temperatura la suprafața superioară crește cel mai rapid, și ca punct de interes când se apropie de centrul probei, gradientul de temperatură rămâne constant. Pentru ca timpul să fie suficient, toate punctele din cadrul modelului trebuie să crească până la temperatura de echilibru, fiind la același nivel cu temperatura ambiantă. Previziunile prezentate se bazează pe proprietățile termo-fizice determinate pe mixtura asfaltică studiată, astfel odată ce temperaturile de început și final au fost fixate, temperatura în orice moment depinde de conductivitatea termică și căldura specifică.

În urma analizării rezultatelor privind studiul experimental pentru determinarea proprietăților termo-fizice efectuat în Franța asupra mixturilor asfaltice avute la dispoziție și realizate, printre concluziile enumerate în cadrul capitolului se pot evidenția următoarele:

- utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt ajută în mod semnificativ la obținerea unor rezultate superioare privind proprietățile termo-fizice;
- bitumul, componentă esențială în masa mixturii, este factorul decizional în ceea ce privește absorbția de căldură; cu cât procentul de bitum este ridicat, proprietățile termo-fizice sunt inferioare, lucru ce favorizează la pierderea stabilității mixturii;
- cu cât conductivitatea termică și căldura specifică sunt superioare, rezultă că pentru temperaturi ridicate mixtura asfaltică rezistă solicitărilor din trafic, astfel prelungindu-se durata de viață a drumului;
- dacă gradul de compactare este necorespunzător, conductivitatea termică scade, iar căldura specifică crește;
- cu cât mixtura asfaltică prezintă o densitate ridicată, proprietățile termice prezintă valori mai ridicate.

În **capitolul 4** pe baza unui studiu aprofundat privind efectul și evoluția proprietăților termo-fizice asupra mixturilor asfaltice, s-au conceput și realizat unele mixturi asfaltice utilizând în amestec, prin înlocuire parțială și totală a fillerului, cenușa de termocentrală. Pornind de la studiul tuturor materialelor compozite ce intră în masa mixturii asfaltice și ținând cont de faptul că fiecare material component influențează răspunsul final al amestecului s-a dorit a se realiza o comportare vâscoelastică.

Straturile rutiere cele mai supuse acțiunii factorilor climatici sunt stratul de uzură și stratul de legătură. Datorită acestui fapt în acest capitol se prezintă pe de-o parte modul de cunoaștere mai aprofundat al distribuției temperaturii în aceste straturi care ajută la o specificație mai sofisticată a lianților hidrocarbonați și a agregatelor prin creșterea calității acestora, iar pe de altă parte se încearcă diminuarea acestei distribuții a temperaturii prin conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice care să prezinte unele caracteristici termice superioare.

În ceea ce privește utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt s-au prezentat câteva idei sugestive desprinse din literatura de specialitate din afara țării. Astfel, pe baza unor încercări fizico-mecanice asupra cenușii de termocentrală utilizată în amestecurile realizate, s-au luat în considerare câteva studii proprii ale colectivului de cercetare ale departamentului de Construcții Civile și Industriale, prezentându-se astfel și analiza chimică rezultată pe cenușa respectivă. Pornind de la toate ipotezele enumerate, în cadrul laboratorului de drumuri al Facultății de Construcții din Timișoara, s-au conceput și realizat o serie de dozaie din mixtură asfaltică cu diferite procente de bitum și cenușă de termocentrală. Totodată, pentru aceste mixturi asfaltice s-au determinat proprietățile termo-fizice în laboratorul Universității d'Artois din Franța.

Pentru toate materialele ce au intrat în componența mixturilor asfaltice s-au efectuat toate încercările necesare conform stasurilor în vigoare, astfel putându-se confirma calitatea acestora. Așadar, după ce au fost analizate toate materialele ce au intrat în componența mixturii asfaltice s-a trecut la stabilirea dozajelor prin înlocuirea parțială și totală a filerului cu cenușa de termocentrală. Dozajele realizate prezentate în acest capitol au fost stabilite pentru mixtura asfaltică B.A.16 și B.A.D.25 cu diferite procente de cenușă și bitum. Probele confecționate în vederea determinării pe acestea a caracteristicilor termo-fizice și fizico-mecanice, s-au realizat respectând pentru fiecare încercare la care urmau să fie supuse, normele prevăzute de stas.

Din punct de vedere al rezultatelor obținute privind proprietățile termo-fizice pe mixturile asfaltice realizate în România s-a constatat că utilizarea cenușii de termocentrală prezintă un efect benefic în amestecurile de asfalt în ceea ce privește conductivitatea termică. Practic, prin rezultatele superioare obținute, stratul din asfalt nu mai conduce atât de bine căldura, lucru datorat în mare parte conținutului de siliciu și aluminiu din cenușă care prezintă un factor de reflexivitate ridicat. Făcând o comparație între conductivitatea termică rezultată pe mixtura B.A.16 și B.A.D.25, cu procentele de bitum, respectiv cenușă, stabilite pentru fiecare în parte, se poate evidenția faptul că mixtura asfaltică B.A.D.25 prezintă o conductivitate termică mai bună. Această caracteristică se datorează în mare parte conținutului mai mic de liant și posibil într-o oarecare măsură volumului de goluri mai mare.

Căldura specifică obținută în urma prelucrării datelor rezultate pe mixturile asfaltice având ca material de umplere cenușa de termocentrală în locul filerului, atestă rezultate superioare. Astfel, față de dozajele în care s-a utilizat numai filer, probele realizate stochează o cantitate mai mică de căldură într-un interval de timp  $dt$ , cantitate pe baza căreia, în funcție de temperatura medie se determină capacitatea de căldură. În funcție de capacitatea de căldură obținută, de densitatea probei respective și de grosime, rezultă căldura specifică.

Datorită faptului că, căldura specifică reprezintă cantitatea de energie termică necesară pentru variația de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  pe unitatea de masă a materialului, s-a făcut o analogie între valorile obținute pe dozajele realizate B.A.16, în funcție de filer și procentele de cenușă cele mai semnificative care intră în amestec. Mai exact s-a remarcat faptul că, pentru a ajunge la căldura specifică obținută pe probele din asfalt ce conțin numai filer și un procent ridicat de bitum, temperatura la care ar trebui supuse probele din asfalt ce conțin cenușă este de până la  $10\text{...}15\text{ }^{\circ}\text{C}$  mai mare decât temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la care au fost determinate în prealabil. Așadar, utilizând cenușă de termocentrală în masa mixturii asfaltice, prin înlocuire parțială, respectiv totală cu filerul, se obțin mixturi asfaltice care prezintă proprietăți termo-fizice ridicate.

Alte caracteristici care relevă efectul pozitiv al cenușii în mixtura asfaltică sunt difuzivitatea și efuzivitatea, care prin rezultatele obținute atestă caracteristici superioare. Datorită faptului că emisivitatea este în strânsă legătură cu reflexivitatea prin considerentul că dacă emisivitatea scade, reflexivitatea crește, pentru mixturile asfaltice realizate ce au în componență cenușă de termocentrală, emisivitatea rezultată este mai scăzută față de mixtura asfaltică ce conține numai filer. În această situație în care rezultă o emisivitate scăzută, reflexivitatea a crescut de la  $0,02$  la  $0,07$  în funcție de procentul de cenușă din amestec. Practic se poate confirma că radiația solară ce cade pe suprafața de asfalt este absorbită mai puțin (efuzivitate scăzută), propagată mai puțin (difuzivitate scăzută) și respinsă mai mult (reflexivitate mare și emisivitate scăzută).

Referitor la studiile experimentale privind proprietățile fizico-mecanice pentru dozajele din mixtură asfaltică ce conțin cenușă de termocentrală, se poate afirma faptul că mixturile realizate au fost proiectate pe baza metodei de proiectare a mixturilor Marshall, care reprezintă alegerea procentului de bitum bazat pe optimizarea câtorva variabile și realizează o evaluare volumetrică a probelor confecționate, bazată pe un set de condiții, la un nivel de comportare dat. Astfel, pentru a pune în evidență studiul dezbătut în cadrul acestui capitol privind comportarea mixturilor asfaltice ce conțin cenușă de termocentrală și pentru a avea un control cât mai aproape de realitate privind efectul acestora în dozajele realizate, trebuie luate în calcul și proprietățile volumetrice ale amestecului de agregate și bitum (volumul de goluri din mixtură, volumul de goluri din amestecul de agregate, volumul de goluri umplute cu bitum).

Mixturile asfaltice supuse determinării caracteristicilor fizico-mecanice prezintă aceeași compoziție cu mixturile pentru care s-au determinat caracteristicile termo-fizice. Aceste dozaje au fost concepute în urma mai multor încercări de stabilire a procentului de bitum, ținând cont și de proprietatea ceva mai absorbantă a cenușii, cu 0,20...0,30 % mai mare decât a filerului. Verificarea calității mixturilor asfaltice proiectate s-a făcut conform încercărilor uzuale efectuate prin comparare cu valorile prevăzute în standardul românesc SR 174-1/2009, pentru mixturile B.A.16 și B.A.D.25.

Analizând amestecurile realizate doar în funcție de procentul de bitum stabilit și doar de utilizarea filerului ca material de umplere, normal ar fi ca stabilitatea Marshall pentru dozajele respective să scadă, iar indicele de fluaj și densitatea să crească. Referitor la utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt în locul filerului, din încercările efectuate s-a constatat că efectul este invers, lucru favorabil caracteristicilor mecanice. Practic densitatea Marshall crește, iar indicele de fluaj scade chiar dacă procentul de bitum este ridicat. În ceea ce privește densitatea aparentă, aceasta scade proporțional cu procentul de cenușă utilizat în amestec, dar nu sub valoarea prevăzută în stas. Acest lucru este normal datorită densității mai scăzute a cenușii de termocentrală față de filer.

Absorbția de apă pentru mixturile realizate prezintă o oarecare fluctuație în funcție de procente de cenușă utilizate. Datorită utilizării cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt, absorbția de apă crește foarte puțin în comparație cu scăderea densității. Totuși în această situație o influență semnificativă privind ușoara creștere a absorbției de apă poate fi datorată gradului de compactare din laborator. Referitor la volumul de goluri din amestecurile de asfalt realizate se confirmă faptul că pentru dozajele ce conțin cenușă acesta crește, lucru normal așteptat datorită scăderii densității acestora. Pentru același conținut de liant, dar având ca material de umplere doar filer, volumul de goluri scade semnificativ, iar mixtura în această situație prezintă o susceptibilitate scăzută la umiditate, acest lucru poate fi considerat la fel și pentru dozajele realizate cu cenușă datorită caracterului hidrofob al acesteia. Referitor la rezultatele obținute pentru volumul de goluri din mixtură și volumul de goluri din amestecul de agregate, este demonstrat conform unor studii privind modul de determinare al acestora, în funcție de modul de compactare cu girocompactatorul sau compactatorul Marshall, un procent mai mic de până la 1,6...1,7 % a volumului de goluri determinat pe cilindrii confecționați cu presa giratorie față de cilindrii Marshall. Astfel ținând cont de faptul că aceste rezultate s-au determinat pe cilindri Marshall, făcând legătură cu modul de compactare menționat mai sus, se poate spune că valorile rezultate pentru mixtura asfaltică B.A.16 privind volumul de goluri se încadrează conform limitelor recomandate pentru stratul de uzură.



Volumul de goluri din amestecul de agregate se compune din volumul de goluri din mixtură și volumul efectiv de liant. Din punct de vedere al analizării rezultatelor VMA-ului pentru mixturile realizate B.A.16 și B.A.D.25 ce conțin și cenușă de termocentrală, se poate spune că respectă condițiile impuse. Mixturile asfaltice care conțin un procent mai ridicat de cenușă prezintă o densitate aparentă mai scăzută în pofida faptului că conținutul de bitum este ridicat, astfel volumul de goluri din amestec fiind mai ridicat. Volumul de goluri umplute cu bitum, pentru dozajele B.A.16 cu un conținut scăzut de liant bituminos nu se încadrează conform criteriilor SUPERPAVE, acest inconvenient conducând mai departe la instabilitatea mixturii sub un efort de forfecare și îmbătrânire accelerată.

Concluziile rezultate în urma încercărilor realizate pe mixturile asfaltice concepute, atestă faptul că pentru un conținut ridicat de bitum precum și utilizarea unui bitum mai moale la realizarea mixturilor asfaltice, utilizarea cenușii ca material de umplere este benefică din punct de vedere al caracteristicilor fizico-mecanice, cât și din punct de vedere al îmbunătățirii rezistenței la oboseală, pe când tot pentru același conținut de bitum, dar utilizând ca material de umplere în amestec fillerul, mixtura asfaltică rezultată își pierde stabilitatea mult mai repede.

Ținând cont de faptul că prin utilizarea cenușii de termocentrală au rezultat proprietăți termo-fizice superioare, mixturile asfaltice realizate au fost supuse încercărilor fizico-mecanice și la temperaturi mai mari cu 10...15 °C față de temperatura standard a încercării la care trebuiau supuse. Pe baza acestui considerent în cadrul laboratorului, pe mixturile asfaltice rezultate, s-a determinat stabilitatea Marshall la temperaturi mai mari cu 10 °C respectiv 20 °C, decât temperatura de testare conform stas. Astfel evoluția stabilității Marshall și a indicelui de fluaj pentru probele din mixtură asfaltică B.A.16, cu un conținut mai ridicat de cenușă la temperatura de testare de 70 °C și 80 °C față de temperatura standard de 60 °C, își pierd stabilitatea cu aproximativ 5 %, pe când probele din asfalt cu un conținut mai mic de cenușă sau deloc, își pierd stabilitatea cu aproximativ 30 %.

În ceea ce privește rigiditatea mixturilor asfaltice, ca și metodă de determinare a acesteia, a fost utilizată „Încercarea prin aplicarea unei întinderi indirecte pe epruvete cilindrice (IT-CY)”, conform SR EN 12697-26/2004. Această metodă de determinare a modulului de rigiditate, este exemplificată în cadrul acestui capitol, începând de la descrierea fiecărei componente în parte a aparaturii utilizate până la condițiile ce trebuie impuse astfel ca încercarea să fie corect efectuată. Probele cilindrice realizate în vederea determinării pe acestea a modulului de rigiditate au fost compactate cu girocompactorul, urmărindu-se totodată obținerea de probe cu caracteristici volumetrice asemănătoare (volumul de goluri să se încadreze în limitele prevăzute de 2...5 %).

Pentru scoaterea în evidență a efectului cenușii de termocentrală din masa mixturii asfaltice în funcție de procentul de bitum, pentru mixtura asfaltică B.A.16, s-au efectuat pe de o parte o serie de probe cilindrice cu un conținut ridicat de bitum, dar aproximativ egal pentru toate dozajele, indiferent de procentul de cenușă care a intrat în amestec, iar pe de cealaltă parte s-au realizat o serie de probe cilindrice conform dozajelor stabilite pentru încercările fizico-mecanice uzuale. În urma încercărilor efectuate pe aceste probe, ținând cont de specificațiile din stas, au rezultat următoarele:

- pentru același procent de bitum, dar utilizând ca material de umplere în amestecul de asfalt fillerul, valoarea modulului de rigiditate este mai mică față de utilizarea cenușii;

- în timp ce procentul de bitum rămâne neschimbat, dar în amestec se înlocuiește treptat fillerul cu cenușă, valoarea modulului de rigiditate crește;
- dacă procentul de bitum scade modulul de rigiditate crește, dar în această situație mixtura asfaltică este susceptibilă la oboseală și îmbătrânire accelerată.

Foarte important este de remarcat faptul că tot în cadrul acestui studiu, pentru determinarea modulului de rigiditate s-a urmărit pierderea valorii acestuia în funcție de creșterea temperaturii de testare, ținând cont de proprietățile termo-fizice studiate pe aceste mixturi asfaltice. Astfel, pentru un conținut mai ridicat de bitum și aproximativ egal, indiferent de procente de filler, respectiv cenușă, ce intră în amestec, la temperaturi de testare mai mari cu 5 °C, respectiv 10 °C, față de temperatura de 15 °C conformă stas SR 174-1/2009, pentru mixtura B.A.16 ce conține numai filler, valoarea modulului de rigiditate scade cu până la 50...60 %, față de amestecurile ce conțin cenușă de termocentrală unde valoarea modulului de rigiditate scade numai cu 30...40 %. Pentru dozajele realizate ce au procentul de bitum stabilit în funcție de procente de cenușă care intră în amestec, din încercările efectuate privind modulul de rigiditate tot pentru mixtura B.A.16 ce conține în amestec doar filler, a reieșit faptul că în funcție de temperaturile de testare superioare valoarea rigidității scade cu până la 45...55 %, în timp ce pentru celelalte dozaje ce conțin și cenușă, deși procentul de bitum este mai ridicat, valoarea modulului de rigiditate scade în funcție de conținutul de cenușă până la valori de 30...40 %.

Ca și o concluzie generală privind determinarea modulului de rigiditate pentru toate probele concepute și realizate în cadrul acestui studiu se poate evidenția faptul că acestea sunt foarte susceptibile la variații de temperatură. Din punct de vedere al legăturii dintre caracteristicile termice și valorile modulului de rigiditate, se poate spune că acestea au un efect favorabil în previziunea temperaturii la care sunt supuse. Cu cât căldura specifică rezultată este superioară, modulul de rigiditate scade treptat în funcție de creșterea temperaturii. Mixturile asfaltice ce conțin cenușă de termocentrală prin înlocuirea parțială sau totală a fillerului își pierd mai greu rigiditatea la temperaturi mai ridicate decât mixturile ce conțin numai filler. Ca și ordin de mărime în ceea ce privește afirmația de mai sus, valoarea modulului de rigiditate pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 0 % cenușă și temperatură de testare de 15 °C, respectiv valoarea modulului pentru betonul asfaltic B.A.16 cu 7,5 % cenușă și temperatură de testare de 25 °C, amândouă cu aproximativ același conținut de bitum, este aproximativ egală.

Pentru ca îmbrăcămintea asfaltică să se comporte normal în condiții de exploatare, ea ar trebui supusă la aceeași temperatură pentru care a fost concepută, dar cum acest lucru este imposibil datorită schimbărilor climatice cu care ne confruntăm din ce în ce mai mult, prin utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt în locul fillerului, temperatura poate să varieze cu până la 10 °C peste temperatura inițială.

Una dintre principalele degradări ce apar la drumuri cu structuri rutiere flexibile o reprezintă deformațiile permanente, care se manifestă sub forma unor neregularități în profil longitudinal și în special în profil transversal, prin deformații produse de trafic și de condițiile climatice. Așadar, pentru dozajele realizate în cadrul acestui capitol s-au studiat și efectele rezultate din fluaș. Pentru a putea pune cât mai bine în evidență importanța studierii fluașului asupra mixturilor asfaltice s-a făcut o trecere în revistă a mecanismelor care conduc la apariția deformațiilor

permanente, și a stadiilor de fluaj care reprezintă deformația pentru un nivel dat de tensiune în funcție de timp.

Dintre factorii care influențează deformațiile permanente ale mixturilor asfaltice s-a pus accent cel mai mult pe condițiile climatice. Astfel, temperatura exterioară (a aerului) afectează direct suprafața drumului și influențează straturile structurii rutiere. Materialele asfaltice fiind de culoare închisă absorb cu ușurință căldura din exterior.

Tipul de încercare de laborator aplicat pentru caracterizarea mixturilor asfaltice la deformații permanente a fost încercarea de compresiune ciclică triaxială de tip bloc. Conform acestui tip de încercare proba este supusă unei încărcări axiale în același timp cu o presiune de fretare. Modul de funcționare al aparatului, respectiv condițiile de încărcare pentru fiecare tip de mixtură în parte sunt prezentate în conținutul capitolului.

În urma încercărilor la temperatura de 50 °C pe mixtura asfaltică B.A.16 ce conține în amestec diferite procente de cenușă, se poate menționa faptul că, respectând condițiile de încărcare, respectiv temperatură, prevăzute în stas, comportarea mixturii asfaltice la fluaj dinamic este influențată pozitiv de procentul de cenușă ce participă în amestec. De exemplu pentru același conținut de bitum, deformația axială rezultată pentru mixtura B.A.16 cu un procent de 7,0 % bitum și 0 % cenușă este cu 70 % mai mare față de deformația rezultată pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 7,0 % bitum și 12,5 % cenușă. În plus pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 7,0 % bitum și 0 % cenușă, deformația rezultată nici nu a atins numărul de cicluri impus.

Efectuând testul la fluaj dinamic pentru aceleași condiții de încărcare dar la o temperatură de 60 °C, s-a observat o evoluție mai bună la deformații a mixturii B.A.16 ce conține în amestec cenușă, față de mixtura asfaltică ce conține numai filer. Făcând și în această situație o analogie între caracteristicile termice și deformațiile permanente rezultate pe aceste mixturi, se remarcă faptul că, cu cât căldura specifică este mai mică și deformațiile permanente sunt mai mici. În ceea ce privește mixtura asfaltică B.A.D.25, cu diferite procente de cenușă în amestec, din punct de vedere al rezultatelor privind deformațiile permanente se poate confirma că sunt conforme limitelor prevăzute în stas SR 174-1/2009. Acest lucru poate fi datorat atât conținutului mai scăzut de bitum, cât și scheletului mineral mai puternic.

Ca ordin de mărime, deformația permanentă rezultată după 1000 de cicluri la temperatura de 60 °C crește față de temperatura normală de 50 °C, pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu diferite procente de bitum și cenușă, cu aproximativ 68 % pentru procentele 0 % și 2,5 % cenușă și 58 % pentru procentele 7,5 % și 10 %. Rata de deformare pentru temperatura de 60 °C, scade în funcție de procentul de cenușă, lucru ce asigură o mai bună stabilitate a mixturii asfaltice la variațiile din temperatură. Deși multe studii de specialitate demonstrează faptul că în funcție de procentul de bitum ridicat mixtura asfaltică își pierde mai ușor stabilitatea, în această situație prin utilizarea cenușii de termocentrală respectiva afirmație nu mai este valabilă, datorită faptului că mixtura asfaltică nu mai absoarbe așa de ușor căldura, fapt demonstrat de proprietățile termo-fizice superioare și datorită realizării unui mastic (cenușă+bitum) mai rigid la temperaturi ridicate prin mărirea procentului de cenușă în raport cu cel de bitum.

Încercarea la ornieraj pentru mixturile asfaltice concepute s-a realizat în paralel doar pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 0 % și 7,5 % cenușă și conținut de bitum egal, tocmai datorită evidențierii comportamentului acestora în funcție de materialul de umplere. În urma încercărilor la ornieraj realizate a reieșit faptul că

mixtura asfaltică ce are în componență cenușă prezintă o adâncime de fâgaș mai mică față de mixtura ce are în componență doar filer. Conform stasului SR 174-1/2009 viteza de deformare (rata de fâgășuire) la orieraj la 1000 de cicluri se încadrează conform limitelor date, în timp ce adâncimea fâgașului pentru mixtura B.A.16 cu 7,5 % cenușă este la limită.

Pentru încercarea la oboseală s-a aplicat metoda de determinare la întindere indirectă conform SR EN 12697-24/2005. Încercarea s-a realizat pentru mixturile asfaltice B.A.16 și B.A.D.25 cu un conținut de 0 % și 7,5 % cenușă și procent de bitum egal. Din încercările efectuate a rezultat că deformația verticală rezultată pentru mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă la 3600 de cicluri este cu aproximativ 25 % mai mare față de deformația rezultată pentru mixtura asfaltică B.A.16 cu 7,5 % cenușă. În această situație panta fiind mai pronunțată pentru mixtura B.A.16 cu 0 % cenușă, ruperea are loc mult mai repede. Rezistența la oboseală rezultată pentru mixtura asfaltică B.A.D.25 cu 7,5 % cenușă față de mixtura ce conține numai filer, arată o deformație verticală mai mică.

Pe baza acestor studii realizate privind proprietățile fizico-mecanice ale mixturilor asfaltice concepute și realizate, cât și efectul proprietăților termo-fizice asupra lor, în finalul acestui capitol au fost evidențiate o serie de concluzii interesante și extrem de valoroase pentru domeniul infrastructurii rutiere, putând astfel pe baza lor să fie concepute și realizate unele structuri rutiere cu performanțe ridicate. Totodată, aceste cercetări realizate deschid o serie de oportunități pentru cercetări viitoare în acest domeniu asupra înlăturării defecțiunilor ce pot să apară datorită schimbărilor climatice.

**Capitolul 5**, conține studii teoretice și o serie de modelări pentru structurile rutiere alcătuite pe baza rezultatelor desprinse din cadrul încercărilor de laborator asupra mixturilor asfaltice concepute, în urma cărora se analizează starea de tensiuni și deformații, în funcție de diferite temperaturi la care acestea urmează să fie exploatate. Astfel din studiile efectuate se relevă faptul că mixturile asfaltice concepute ce au în componență ca material de umplere în locul filerului, cenușă de termocentrală, prezintă proprietăți termo-fizice superioare, practic îmbrăcămintea asfaltică nu mai absoarbe atât de multă căldură din radiațiile solare.

Alcătuirea structurilor luate în studiu s-a stabilit în funcție de determinările efectuate în laborator pe mixturile asfaltice concepute. Astfel s-au stabilit straturile componente structurilor rutiere așa încât să poată fi scoasă în evidență îmbrăcămintea asfaltică ce conține în amestec ca material de umplere cenușa de termocentrală. Practic singura diferență luată în studiu pentru cele patru structuri rutiere suple modelate este dată de îmbrăcămintea asfaltică care diferă funcție de procentul de bitum și procentul de cenușă de termocentrală stabilit, restul straturilor având aceleași grosimi respectiv proprietăți.

Influența modulului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice ce conțin ca material de umplere cenușa de termocentrală, determinat pentru diferite temperaturi, în cazul acestor structuri rutiere aduce modificări mai importante în deformarea complexelor rutiere decât în cazul structurilor rutiere suple ce prezintă o îmbrăcămintea asfaltică având ca material de umplere filerul.

Ipoteza legăturii perfecte dintre straturi conferă o comportare mai bună complexelor rutiere decât ipoteza neconlucrării dintre straturi. În sprijinul acestei informații stau rezultatele obținute în cadrul celor două ipoteze, unde deformațiile sunt mai mari în ipoteza interfețelor libere, indiferent de tipul structurii rutiere și variațiile parametrilor. În ceea ce privește variațiile caracteristicilor de deformabilitate ale mixturilor asfaltice aduc modificări ale complexelor rutiere în structură și sub nivelul patului drumului. Astfel, în cazul structurilor rutiere suple, se

constată că variațiile modului de elasticitate dinamic al mixturilor asfaltice nu modifică comportarea zonei active a terasamentelor decât până la adâncimi de 0,70 m în ipoteza interfețelor fără conlucrare și 1,00 m în ipoteza legăturii interfețelor cu conlucrare între straturile rutiere.

Din punct de vedere al rezultatelor obținute și prezentate în cadrul acestui capitol în urma modelării numerice se remarcă faptul că deși procentul de bitum este mai ridicat pentru straturile de asfalt, ce conțin cenușă de termocentrală, componente ale structurii rutiere concepute, valorile privind deformațiile rezultate în urma modelării sunt mai mici. Acest lucru se datorează faptului că mixtura asfaltică concepută nu înmagazinează atât de multă căldură ca și mixtura ce conține filer, lucru demonstrat prin proprietățile termo-fizice rezultate cât și prin modulul de rigiditate obținut pentru temperaturile la care s-a modelat structura rutieră.

## **6.2. Contribuții personale ale autorului și direcții pentru cercetări viitoare**

Contribuțiile personale aduse de autor în domeniul infrastructurii rutiere prin conceperea și realizarea unor structuri rutiere cu performanțe ridicate sunt:

- inventarierea rețelei rutiere publice de drumuri din Romania, în funcție de gradul de modernizare al acesteia;
- elaborarea unei strategii de dezvoltare și întreținere a infrastructurilor de transport care să țină cont de comportamentul și caracterizarea mixturilor asfaltice din schimbări climatice;
- realizarea unui studiu al modelelor mecanicii structurilor rutiere pe baza cărora s-au dezvoltat metodele de dimensionare aplicate pe plan mondial, cu exemplificarea modului de funcționare al fiecăruia în funcție de eforturile exercitate;
- realizarea unui studiu privind rolul schimbărilor climatice asupra dimensionării structurilor rutiere prin determinarea variațiilor de temperatură ale straturilor componente cu ajutorul analizei termice;
- determinarea în premieră națională a proprietăților termo-fizice a mixturilor asfaltice (conductivitate termică, căldură specifică, difuzivitate, efuzivitate și emisivitate);
- prezentarea metodei de determinare și a relațiilor matematice care stau la baza dezvoltării aparatului necesare de determinare a proprietăților termo-fizice;
- elaborarea unui studiu de determinare a caracteristicilor termice pe unele mixturi utilizate în Franța;
- îmbunătățirea proprietăților termo-fizice prin utilizarea în amestecurile de asfalt ca material de umplere în locul filerului a cenușii de termocentrală;
- dezvoltarea unui model analitic, care pe baza proprietăților termo-fizice, poate prezice într-un mod corect distribuția temperaturii în laborator pe probele de mixtură asfaltică ce urmează a fi testate;
- propunere privind utilizarea programului GEL, pentru calculul distribuției de temperatură într-o structură rutieră alcătuită din mai multe straturi, datorită cunoașterii proprietăților termo-fizice;
- conceperea și realizarea unor mixturi asfaltice utilizând ca material de umplere în locul filerului, prin înlocuire totală sau parțială cenușa de termocentrală de la CET Timișoara;

- determinarea proprietăților termo-fizice pe mixturile asfaltice realizate, cu ajutorul aparaturii puse la dispoziție de Universitatea d'Artois din Franța;
- punerea în evidență a influenței proprietăților termo-fizice asupra proprietăților fizico-mecanice pe mixturile concepute, scoțând totodată în evidență efectul benefic al utilizării cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt, prin caracteristici fizico-mecanice superioare obținute chiar pentru temperaturi mai mari ca și temperatura de testare;
- realizarea unor structuri rutiere cu performanțe ridicate prin combaterea schimbărilor climatice și exploatarea lor la condiții normale de trafic, utilizând ca strat de uzură și legătură mixturile asfaltice concepute;
- modelarea numerică a unui complex rutier, conceput pe baza studiilor efectuate prin utilizarea în alcătuirea sa a diferite tipuri de mixturi asfaltice pentru stratul de uzură respectiv legătură, cu Metoda Elementului Finit în două ipoteze referitoare la conlucrarea straturilor rutiere;
- luarea în considerare la modelarea numerică pentru structurile rutiere propuse, a valorilor modulilor de elasticitate dinamici, a densităților și a caracteristicilor termice, obținute pentru mixturile asfaltice din stratul de uzură, stratul de legătură și recomandate pentru restul straturilor componente.

Direcțiile pentru cercetări viitoare, referitoare la influența proprietăților termo-fizice asupra structurilor rutiere și a utilizării cenușii de termocentrală la conceperea unor structuri rutiere cu performanțe ridicate, propuse de autor sunt următoarele:

- realizarea unor sectoare experimentale utilizând mixturile asfaltice concepute pentru care s-au obținut cele mai bune caracteristici fizico-mecanice, termo-fizice și urmărirea lor în timp;
- îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice pentru aceste mixturi asfaltice studiate prin utilizarea unor bitumuri speciale, respectiv utilizarea de aditivi;
- modelarea matematică a structurii rutiere din punct de vedere termic cu ajutorul proprietăților termo-fizice;
- urmărirea în laborator a distribuției de temperatură cu ajutorul modelului analitic constituit pe baza proprietăților termo-fizice, pentru o serie mai mare de probe asfaltice ce urmează să fie supuse diverselor încercări;
- utilizarea altor materiale compozite în amestecurile de asfalt care să prezinte un factor de emisie ridicat și bineînțeles care să contribuie la obținerea unor caracteristici fizico-mecanice superioare;
- continuarea cercetărilor privind utilizarea cenușii de termocentrală în amestecurile de asfalt în coroborare cu materialele noi ce apar în domeniu.

## BIBLIOGRAFIE

1. AASHO Road test Report 5. – Pavement Research-HRB Special Report, 1962.
2. ABAQUS Version 6.8 Documentation, 2008.
3. Abdul Rahman, S.A., Egon, T.T. – Properties of Fly Ash – Extended – Asphalt Concrete Mixes. University of Michigan, June 1983.
4. Anandakumar, K. - A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. Institut fur Meteorologie und Physik, Universitat fur Bodenkultur, Turkenschanzstrasse-18, A-1180 Wien, Austria.
5. Antczak, E. - Identification par impédance thermique : Application à la caractérisation des géomatériaux Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 1996.
6. Antczak, E., Chauchois, A., Defer, D., Duthoit, B. – Characterization of the thermal effusivity of partially saturated soil by the inverse method in the frequency domain Laboratoire d'Artois Mécanique et Habitat, Faculté des Sciences Appliquées, Béthune, France Applied Thermal Engineering vol.23 pp.1525-1536 2003
7. Antczak, E., Defer, D., Elaoami, M., Duthoit, B. – Mesures fluxométriques appliquées à l'étude des caractéristiques thermophysiques d'un mortier en cours de prise XXII<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de Génie Civil, Marne la Vallée, France 2004.
8. Arpacı, S.V., Kao, S.H. Selamet, A. – Introduction to heat transfer. NJ; 1999.
9. Badea, A.A. – Inițiere în transferul de căldură și masă, curs 2004.
10. Badea, C. – Contribuții referitoare la utilizarea deșeurilor refofosibile pentru producerea unor noi tipuri de materiale de construcții. Teză de doctorat, Timișoara, 2004.
11. Barber, E.S. – Charges de cisaillement sur les Chaussées. Extrait de la publication américaine. Publics Road, vol 32, 6 février 1963 (traduction LCPC 63.81).
12. Belc, F., Lucaci, G., Lucaci, S. – Avantaje ale aplicării de soluții tehnice radicale la lucrările de reabilitare ale drumurilor publice. Al XII-lea Congres Național de Drumuri și Poduri, CD, poziția 1.4.1., București, 2006.
13. Bota, L. – Contribuții la îmbunătățirea capacității portante la drumurile de interes județean și local utilizând tehnologia de reciclare în situ, Teză de doctorat, Cluj – Napoca 2008.
14. Bota, L. – Prezentare drumuri locale, Poiana Brașov, 2010.
15. Boussinesq, J. – Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des corps élastiques – Paris, Gauthier Villars, 1885.
16. Boutonnet, M., Livet, J., Deschassot, B. – Conductivité thermique apparente des matériaux d'assises traitées – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, septembre-octobre 1974.
17. Burlacu, A. – Contribuții privind influența modului de încercare asupra aprecierii comportării mixturilor asfaltice în exploatare. Teză de doctorat, București 2011.
18. Burmister, D.M. – The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways – Proceedings of the Highway Research Board, vol 23, novembre 1943.
19. Caniard, L., Peyronne, C. – The consideration of frost in the design of asphalt pavements – Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements – Michigan, Ann Arbor, août 1977.

20. Carpenter, C.A. – A comparative study of fillers in asphaltic concrete. *Public Roads*, 27, 101 – 110, 1952.
21. Cerny, R., Madera, J., Podebradska, J., Toman, J., Drchalova, J., Klecka, T., Jurek, K., Rovaniokova, P. – The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges. Department of Structural Mechanics and Department of Physics of Czech Technical University, Institute of Physics of The Academy of Sciences, Czech Republic. *Cement and Concrete Research* vol. 30 pp. 1267±1276 2000.
22. Chrisp, T., M. McCarter, W. J., Starrs, Basheer, G. P., Blewett, J. – Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying. Department of Civil and offshore Engineering of Heriot Watt University, and School of Civil Engineering, The Queen's University of Belfast, UK. *Cement & Concrete Composites* vol. 24 pp. 415-426, 2002.
23. Christensen, D.W. Anderson, D.A. – Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Volume 61, Charleston, SC, 1992.
24. Costescu, C. – Contribuții la studiul unor factori de influență asupra stării tehnice a drumurilor din zona Banatului, Teză de doctorat, Timișoara, 2010.
25. Costescu, I. Belc, F. – Agregate natural stabilizate în tehnica rutieră. Editura orizonturi universitare Timișoara, 1998.
26. Çengel, Y.A. – Heat transfer-a practical approach. 2nd ed. McGraw-Hill Companies, 2002.
27. Defer, D. – Théorie du signal appliqué à la caractérisation thermique et au contrôle non destructif des ouvrages in situ sous sollicitations aléatoires. Thèse de doctorat, Lille, 1994.
28. Defer, D., Antczak, E., Oter-Duthoit L. – Caractérisation thermophysique d'une paroi in situ sous sollicitations naturelles. XXI<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaire de Génie Civil, France 2003.
29. Delacre, E. – Caractérisation thermique de matériaux poreux humides par analyse inverse dans le domaine fréquentiel. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 2000.
30. Demange, D. – New applications of the flash method. Proceedings of the 15<sup>th</sup> ECTP, 5-9 september 1999, wurzburg, High Temperatures – High pressures, vol. 32, 1999.
31. Diaconu, E., Dicu, M., Răcănel, C. – Căi de comunicații rutiere. Principii de proiectare. Editura Conspress, București, 2006.
32. Doan, T.H. – Contribution a l'étude du comportement à la fatigue des enrobés bitumineux – Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI, 1970.
33. Doan, T.H. – Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, decembre 1977.
34. Dorobanțiu, S. – Influența sarcinilor pe osie asupra drumului. *Revista de drumuri și poduri* 47, 1998.
35. Dubois, D., Prade, H. – Théorie des possibilités: applications à la représentation des connaissances en informatique, Masson, 1990.
36. Elaoami, M. – Etat de l'art des techniques d'auscultation et d'instrumentation appliquées aux ouvrages. DEA en Génie Civil à l'Université d'Artois, 2001.
37. Ferne, B. – Private Communication. Transport Research Laboratory, 1996.
38. Fodor, G., Popescu, N. – Structuri rutiere suplă și semirigide, Dimensionare și alcătuire. Ghid Tehnic.



39. Francken, L. – Module complexe des mélanges bitumineux. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, special V, décembre 1977.
40. Francken, L., Verstraeten, J. – Methods for predicting modulus and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending – 53 rd ann., Meet. Highw. Res. Board., Transp. Res. Rec. 1974.
41. Fremond, M. – Mathématiques et problèmes routiers – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, janvier-février, 1976.
42. Han Kim, K., Jeon, S. E., Kim, J. K., Yang, S. – An experimental study on thermal conductivity of concrete. Korea Highway Corporation of Seoul, Department of Civil and Environmental Engineering, Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea, Department of Architectural Engineering, Hongik University, Chungnam, South Korea. Cement and Concrete Research vol. 33 pp. 363-371, 2003.
43. Haida, V., Marin, M., Mirea, M. – Mecanica pământurilor. Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2004.
44. Harvey, J., Eriksen, K., Sousa, S., Monismith, C. L. – Effects of laboratory specimen preparation on aggregate-asphalt structure, airvoid content measurement, and repetitive simple shear test results. Transp. Res. Rec. 1454, Transportation Research Board, Washington, D.C. 113 – 122, 1994.
45. Hermansson, A. – Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures. Highway Engineering, Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI, SE-581 95 Sweden Received 2 September 2001; accepted 7 March 2004
46. Highter, W.H., Wall, D.J. – Thermal properties of some asphaltic concrete mixes. Transp. Res Rec 1984;968:38-45.
47. Himeno, K., Watanabe, T., Maruyama, T. – Temperature distributions in asphalt pavements. In : Proceeding of the 3rd paving in cold areas, Canada/Japan science and technology agreement mini workshop, Ottawa; 1987. p. 283-54.
48. Hogg, A.H.A. – Equilibrium of a thin plate symmetrically loaded, resting on an elastic foundation of infinite depth – The London, Edimburg and Dublin Magazine and Journal of Sciences, mars 1938
49. Huang, Y.H. – Pavements Analysis and Design. Ed Prentice-Hall, Inc, 1993.
50. Incropera, F.P., Dewitt, D.P. – Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Willy & Sons, New York, 1996.
51. Jercan, S., Romanescu, C., Dicu, M. – Construcția drumurilor - Încercări de laborator. Ed. I.C.B.-Eurohot, 1992.
52. Kwang, W. K., Hussein M. E. - Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chun Chon 200-701, South Korea.
53. Lataste, J. F. – Mesure de résistivités électriques pour l'auscultation non destructive des ouvrages en béton et béton armé. CDGA Centre de Développement des Géosciences Appliquées, Talence, France, 2003.
54. Laurențiu, N. – Îndrumător pentru laboratoarele de drumuri. A.P.D.P. România 1998.
55. LCPC – Journées d'information. Bitumes et enrobés bitumineux – Paris, LCPC, 1971.
56. LCPC – L'essai AASHO – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1966.
57. Luca, J., Mrawia, D. – New measurement of thermal properties of Superpave asphalt concrete. J Mater Civ Eng 2005; 17:72-9.

58. Lucaci, G., Costescu, I., Belc, F. – Construcția drumurilor. Editura Tehnică, București, 2000.
59. Lucaci, G., Marc, P., Baera, C., Tirtea, A., Gruin, A., Pavlou, D. – Optimization of Design Parametres for Pipe-Lines, Vol. II, July 22-24, 2009, pp. 251-255. Proc. Recent Advances in Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology, EMESEG '09, Rodos (Rhodes) Island, Greece.
60. Mătășaru, Tr., Craus, I., Dorobanțiu, St. – Drumuri, Editura Tehnică, București, 1966.
61. Marc, P., Costescu, C. – Modelarea distribuției de temperatura a mixturilor asfaltice cu ajutorul proprietăților termo-fizice pentru aplicațiile de testare în laborator. Zilele Academice Timișene, Mai 2011.
62. Marc, P., Costescu, I., – Industrial wastes used in pavement layers, Vol. II, November 26-28, 2010, pp. 220-224. "Environmental Protection", B.EN.A, Timișoara, Romania.
63. Marc, P., Lucaci, G. – Studii experimentale privind proprietățile termo-fizice ale mixturilor asfaltice, al XIII Congres Național de Drumuri și Poduri, ISSN 1583-820X, Media Drumuri și Poduri, Poiana Brașov, Romania, Vol II, Septembrie 15 – 17, 2010, pp. 86 – 93.
64. Masumoto, M., Hoko, S., Yamamoto, M. – On the steady state method of the thermal measurement of wet material. Thermophysical properties, pp. 25-28.
65. Max, J. – Méthode s et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Masson, 1985.
66. Phukan, A. – Frozen ground engineering. Engle-Wood Clifs (NJ): Pentrice-Hall; 1985.
67. Răcănel, C. – Efectele din fluaj și oboseală asupra comportării mixturilor asfaltice. Teză de doctorat, București 2002.
68. Renken, P. – Influence of Specimen Preparation on to the Mechanical Behaviour of Asphalt Aggregate Mixtures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000.
69. Spalding, D.B. Pun, W.M. – A review of methods for predicting heat transfer coefficients for laminar uniform property boundary layer flow. Int J Heat Mass Transfer 1999; 5:239–49.
70. Sergan, T. – Mechanical evaluation of asphalt-aggregate mixtures prepared with fly ash a filler replacement. Faculty of Engineering and Architecture, Iki Eylul Campus, Anadolu University, Turkey, 2008.
71. Shen, J. – Notion d'impédance thermique appliqué au contrôle non destructif des matériaux. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 2003.
72. Soliman, S. – Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux – Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI, 1975.
73. Sorohan, S. – Metoda elementelor finite în ingineria mecanică. Programe și aplicații, UPB, 1996.
74. Tan, S., Fwa, T., Chuai, C. – Determination of thermal properties of pavement materials and unbound aggregates by transient heat conduction. Test Evalu 1997; 25:15-22.
75. Verstraeten, J. – Loi de fatigue en flexion répétée des mélanges bitumineux – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, mars-avril 1974.
76. Verstraeten, J. – Stresses and displacements in elastic layered systems – Second International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, – Michigan, Ann Arbor, août 1967.

77. Warden, W.B., Hudson, S.B. and Howell, H.C. – Evaluation of mineral filler in terms of practical pavements performance. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Tehnologists 101 – 110, 1952.
78. Westergaard, H.M. – Theory of concrete pavement design – Proceedings of the Highway Research Board, 1927.
79. Wolfe, R.K., Heath, G.L., Colony, D.C. – University of Toledo time-temperature model laboratory field validation. Report No. FHWA/OH-80/006. Department of Industrial Engineering, University of Toledo, Toledo, Ohio; 1980.
80. Xiaoming, L., Shaopeng, W., Qunshan, Y., Jian, Q. – Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders. Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China Received 31 December 2005.
81. Xu, Q. Solaimanian, M. – Measurement and evaluation of asphalt concrete thermal expansion and contraction. J Test Evalu, ASTM 2008:36.
82. Yoder, E.J., Witcyak, M.W. – Principles of pavements design, 1975.
83. Zimmer, F.V. – Fly ash as bituminous filler. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Ash Utilization Symposium Pittsburgh, Pa. 10-11, March 1970, United States.
84. Zhao, J. Ai, X. Li, Y.Z. – Transient temperature fields in functionally graded materials with different shapes under convective boundary conditions. Heat Mass Transfer 2007; 43:1227–32.
85. \*\*\* – Asphalt pavements surfaces and asphalt mixtures. Transportation Research Record, No 1545, 1996.
86. \*\*\* – Comunicarea Comisiei pentru Consiliul și Parlamentul European cu privire la Strategia de Dezvoltare Durabilă, Bruxelles, decembrie 2005.
87. \*\*\* - COST 333 – Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action. Office for Official Publications of the European Commision, Luxembourg, 1999.
88. \*\*\* – Cours de routes, Dimensionnement des chaussées. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1991.
89. \*\*\* – Design and Construction of Asphalt Overlays and Hot-Mix Asphalt Construction Practics. Transportation Research Record, No 1543, 1996.
90. \*\*\* – Fișă de informare nr 32 privind schimbările climatice și provocările politicii de transport durabil – [http:// www.cdep.ro](http://www.cdep.ro).
91. \*\*\* – Instrucțiuni tehnice departamentale pentru determinarea prin deflectografie și deflectometrie a capacității portante a drumurilor cu sisteme rutiere supl. Indicativ CD 31 – 2002.
92. \*\*\* – Instrucțiuni tehnice privind starea tehnică a drumurilor moderne. Indicativ CD 155 – 2001.
93. \*\*\* – Ministerul Transporturilor și Infrastructurii – <http://www.mt.ro>.
94. \*\*\* – Normativ pentru evaluarea stării de degradare a îmbrăcăminților rutiere pentru structuri supl și semirigide. Indicativ AND 540 – 1998.
95. \*\*\* – Normativ pentru prevenirea și remediarea defecțiunilor la îmbrăcămințile rutiere moderne. Indicativ AND 547 – 1998.
96. \*\*\* – Normativ privind administrarea, exploatarea, întreținerea și repararea drumurilor publice. Indicativ AND 554 – 1999.
97. \*\*\* - Note pour l'utilisation du programme Alize III. Division Structures et Caractéristiques des Chaussées, Division Matériaux Des Chaussées, Division Chaussées et Terrassements, Janvier 1987.
98. \*\*\* – Nottingham Asphalt Tester – NAT Manual, 1994
99. \*\*\* – Planul Național de Dezvoltare 2007 – 2013, <http://eufinanțare.info>.

- 100.\*\*\* – Shell Pavements Design Manual Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, Ed. Shell International Petroleum Company, Limited, London, 1978.
- 101.\*\*\* – Strategia de întreținere și administrare a drumurilor naționale, <http://cnadnr.ro>.
- 102.\*\*\* – SUPERPAVE – Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Asphalt Institute. SUPERPAVE Series No. 1 (Sp - 1) Lexington, Kentucky, SUA, 1995.
- 103.\*\*\* – The Shell Bitumen Handbook, Ed. Shell Limited Co, 1990.
- 104.\*\*\* – XXI st World Road Congress, Kuala Lumpur, 3-9 october,1999.
- 105.\*\*\* - SR 174-1/2009 – Lucrări de drumuri. Îmbrăcăminți bituminoase cilindrate executate la cald. Partea 1: Condiții tehnice pentru mixturi asfaltice.
- 106.\*\*\* - SR EN 12697-22. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 22: Încercarea la ornieraj.
- 107.\*\*\* - SR EN 12697-24. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 24: Încercarea la oboseală.
- 108.\*\*\* - SR EN 12697-25. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 25: Încercarea la compresiune ciclică.
- 109.\*\*\* - SR EN 12697-26/2004. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 26: Rigiditate.
- 110.\*\*\* - SR EN 12697-30. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 30: Confecționarea epruvetelor cu compactorul cu impact.
- 111.\*\*\* - SR EN 12697-31. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 31: Confecționarea epruvetelor cu presa de compactare giratorie.
- 112.\*\*\* - SR EN 12697-33. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 33: Confecționarea epruvetelor cu compactorul cu placă.
- 113.\*\*\* - SR EN 12697-8. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 8: Determinarea caracteristicilor volumetrice ale epruvetelor bituminoase.

## **Anexa 1**

Valorile proprietăților termo-fizice pentru  
un tip de mixtură asfaltică

| t (s) | t (H) | t (ours) | Tpt100 (°C) | UHiRef (µV) | UHiHaut (µV) | UHBas (µV) | UHiFlairie (µV) | TinHaut (°C) | ThiBas (°C) | ThiFlairie (°C) | PhiHaut (W/m²) | PhiBas (W/m²) | Uhaut (V)   | SomPh (W/m²) | DeltaPH (W/m²) |
|-------|-------|----------|-------------|-------------|--------------|------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|--------------|----------------|
| 60    | 0.02  | 0.0007   | 23.59       | 935         | 946          | 626        | 2161            | 23.83        | 15.89       | 52.85           | 4.019          | 175.505       | -0.00929659 | 179.523      | -171.49        |
| 120   | 0.03  | 0.0014   | 23.59       | 935         | 946          | 623        | 2147            | 23.80        | 15.81       | 52.83           | 7.123          | 174.081       | -0.00928312 | 181.204      | -166.96        |
| 180   | 0.05  | 0.0021   | 23.58       | 935         | 945          | 621        | 2161            | 23.80        | 15.76       | 52.86           | 10.200         | 172.048       | -0.00925726 | 182.267      | -161.83        |
| 240   | 0.07  | 0.0028   | 23.56       | 934         | 946          | 618        | 2167            | 23.82        | 15.69       | 53.00           | 12.861         | 169.474       | -0.00923006 | 182.336      | -156.61        |
| 300   | 0.08  | 0.0035   | 23.57       | 934         | 944          | 618        | 2153            | 23.78        | 15.70       | 52.67           | 15.053         | 166.630       | -0.00918722 | 181.683      | -151.58        |
| 360   | 0.10  | 0.0042   | 23.57       | 934         | 942          | 617        | 2137            | 23.73        | 15.66       | 52.30           | 17.013         | 164.154       | -0.00917403 | 181.167      | -147.14        |
| 420   | 0.12  | 0.0049   | 23.56       | 934         | 942          | 616        | 2134            | 23.74        | 15.64       | 52.23           | 20.942         | 161.816       | -0.00915487 | 182.157      | -141.47        |
| 480   | 0.13  | 0.0056   | 23.56       | 933         | 941          | 616        | 2127            | 23.72        | 15.65       | 52.07           | 22.576         | 159.438       | -0.00912388 | 182.011      | -136.86        |
| 540   | 0.15  | 0.0063   | 23.55       | 933         | 939          | 615        | 2134            | 23.67        | 15.52       | 52.23           | 21.225         | 157.172       | -0.00911811 | 178.398      | -135.95        |
| 600   | 0.17  | 0.0069   | 23.55       | 933         | 939          | 614        | 2126            | 23.66        | 15.58       | 52.04           | 26.886         | 154.910       | -0.00909844 | 181.796      | -128.02        |
| 660   | 0.18  | 0.0076   | 23.55       | 933         | 940          | 614        | 2122            | 23.69        | 15.60       | 51.96           | 30.922         | 152.897       | -0.00906097 | 183.818      | -121.98        |
| 720   | 0.20  | 0.0083   | 23.54       | 933         | 939          | 613        | 2120            | 23.67        | 15.58       | 51.92           | 33.525         | 150.960       | -0.00904697 | 184.485      | -117.43        |
| 780   | 0.22  | 0.0090   | 23.54       | 933         | 937          | 614        | 2115            | 23.62        | 15.59       | 51.79           | 36.518         | 148.021       | -0.00903452 | 185.539      | -112.50        |
| 840   | 0.23  | 0.0097   | 23.54       | 933         | 939          | 613        | 2116            | 23.66        | 15.56       | 51.81           | 38.720         | 147.248       | -0.00900885 | 185.968      | -108.53        |
| 900   | 0.25  | 0.0104   | 23.53       | 933         | 937          | 612        | 2119            | 23.62        | 15.55       | 51.88           | 40.945         | 145.465       | -0.00899454 | 186.410      | -104.52        |
| 960   | 0.27  | 0.0111   | 23.53       | 933         | 937          | 613        | 2117            | 23.62        | 15.56       | 51.84           | 43.098         | 144.024       | -0.00896346 | 187.122      | -100.93        |
| 1020  | 0.28  | 0.0118   | 23.53       | 932         | 937          | 612        | 2111            | 23.61        | 15.54       | 51.70           | 45.351         | 142.410       | -0.00894289 | 187.761      | -97.06         |
| 1080  | 0.30  | 0.0125   | 23.53       | 932         | 936          | 612        | 2106            | 23.59        | 15.54       | 51.59           | 47.173         | 140.964       | -0.00892036 | 188.137      | -93.79         |
| 1140  | 0.32  | 0.0132   | 23.53       | 932         | 935          | 612        | 2109            | 23.57        | 15.53       | 51.68           | 49.551         | 139.345       | -0.00892339 | 188.896      | -89.79         |
| 1200  | 0.33  | 0.0139   | 23.52       | 932         | 934          | 610        | 2109            | 23.55        | 15.51       | 51.65           | 51.168         | 138.102       | -0.00890909 | 189.270      | -86.93         |
| 1260  | 0.35  | 0.0146   | 23.52       | 932         | 934          | 611        | 2105            | 23.54        | 15.52       | 51.55           | 53.154         | 136.739       | -0.00889094 | 189.893      | -83.58         |
| 1320  | 0.37  | 0.0153   | 23.52       | 932         | 934          | 611        | 2107            | 23.55        | 15.53       | 51.60           | 55.555         | 135.980       | -0.00886491 | 190.935      | -79.83         |
| 1380  | 0.38  | 0.0160   | 23.52       | 932         | 934          | 610        | 2106            | 23.53        | 15.50       | 51.57           | 56.913         | 134.120       | -0.00884436 | 190.433      | -77.91         |
| 1440  | 0.40  | 0.0167   | 23.52       | 932         | 933          | 610        | 2098            | 23.52        | 15.50       | 51.39           | 57.719         | 133.946       | -0.00882931 | 190.665      | -75.23         |
| 1500  | 0.42  | 0.0174   | 23.52       | 932         | 933          | 610        | 2097            | 23.51        | 15.48       | 51.38           | 59.942         | 131.806       | -0.00885098 | 191.848      | -71.86         |
| 1560  | 0.43  | 0.0181   | 23.52       | 932         | 932          | 610        | 2099            | 23.48        | 15.50       | 51.43           | 61.882         | 130.887       | -0.00879852 | 192.788      | -69.00         |
| 1620  | 0.45  | 0.0188   | 23.52       | 932         | 933          | 609        | 2093            | 23.52        | 15.47       | 51.28           | 63.403         | 129.804       | -0.00880278 | 193.207      | -66.40         |
| 1680  | 0.47  | 0.0194   | 23.52       | 932         | 932          | 609        | 2089            | 23.49        | 15.46       | 51.19           | 64.668         | 128.685       | -0.00878865 | 193.352      | -64.02         |
| 1740  | 0.48  | 0.0201   | 23.52       | 932         | 931          | 609        | 2093            | 23.47        | 15.46       | 51.28           | 65.731         | 127.915       | -0.00878005 | 193.646      | -62.18         |
| 1800  | 0.50  | 0.0208   | 23.52       | 932         | 930          | 608        | 2089            | 23.45        | 15.45       | 51.19           | 66.883         | 127.046       | -0.00876329 | 193.928      | -60.16         |
| 1860  | 0.52  | 0.0215   | 23.52       | 932         | 931          | 609        | 2086            | 23.45        | 15.46       | 51.12           | 68.430         | 125.959       | -0.00875399 | 194.388      | -57.53         |
| 1920  | 0.53  | 0.0222   | 23.52       | 932         | 930          | 610        | 2088            | 23.44        | 15.48       | 51.18           | 69.486         | 125.269       | -0.00875892 | 194.755      | -55.78         |
| 1980  | 0.55  | 0.0229   | 23.52       | 932         | 930          | 607        | 2085            | 23.43        | 15.43       | 51.09           | 71.681         | 124.579       | -0.00876026 | 196.260      | -52.90         |
| 2040  | 0.57  | 0.0236   | 23.52       | 932         | 930          | 608        | 2085            | 23.43        | 15.45       | 51.08           | 73.011         | 123.728       | -0.008738   | 196.739      | -50.72         |
| 2100  | 0.58  | 0.0243   | 23.52       | 932         | 929          | 608        | 2084            | 23.41        | 15.45       | 51.08           | 73.119         | 123.004       | -0.00872898 | 196.122      | -49.89         |
| 2160  | 0.60  | 0.0250   | 23.51       | 932         | 929          | 608        | 2083            | 23.42        | 15.45       | 51.04           | 74.301         | 122.163       | -0.00872172 | 196.463      | -47.86         |
| 2220  | 0.62  | 0.0257   | 23.51       | 932         | 929          | 608        | 2086            | 23.42        | 15.43       | 51.12           | 75.069         | 121.547       | -0.00870023 | 196.616      | -46.48         |
| 2280  | 0.63  | 0.0264   | 23.51       | 932         | 929          | 607        | 2082            | 23.41        | 15.43       | 51.03           | 76.011         | 120.785       | -0.00872069 | 196.796      | -44.77         |
| 2340  | 0.65  | 0.0271   | 23.51       | 932         | 928          | 606        | 2087            | 23.39        | 15.43       | 51.15           | 77.660         | 120.164       | -0.00870754 | 197.824      | -42.50         |
| 2400  | 0.67  | 0.0278   | 23.52       | 932         | 928          | 607        | 2083            | 23.39        | 15.43       | 51.04           | 78.603         | 119.969       | -0.00869036 | 197.972      | -40.77         |
| 2460  | 0.68  | 0.0285   | 23.51       | 932         | 927          | 607        | 2082            | 23.38        | 15.41       | 51.04           | 79.838         | 119.016       | -0.00869496 | 198.954      | -39.18         |
| 2520  | 0.70  | 0.0292   | 23.51       | 932         | 928          | 606        | 2079            | 23.39        | 15.40       | 50.97           | 81.003         | 118.598       | -0.00870326 | 199.601      | -37.00         |
| 2580  | 0.72  | 0.0299   | 23.51       | 932         | 928          | 606        | 2084            | 23.40        | 15.39       | 51.07           | 81.897         | 117.838       | -0.00868986 | 199.735      | -35.84         |
| 2640  | 0.73  | 0.0306   | 23.51       | 932         | 929          | 607        | 2078            | 23.41        | 15.42       | 50.92           | 83.311         | 117.278       | -0.0086865  | 200.589      | -33.97         |
| 2700  | 0.75  | 0.0313   | 23.51       | 932         | 928          | 606        | 2079            | 23.38        | 15.40       | 50.96           | 83.918         | 117.039       | -0.00868559 | 200.957      | -33.12         |
| 2760  | 0.77  | 0.0319   | 23.51       | 932         | 927          | 606        | 2083            | 23.37        | 15.38       | 51.04           | 83.999         | 116.411       | -0.00869213 | 200.410      | -32.41         |
| 2820  | 0.78  | 0.0326   | 23.51       | 932         | 927          | 606        | 2080            | 23.36        | 15.40       | 50.98           | 84.540         | 115.729       | -0.00867217 | 200.269      | -31.19         |
| 2880  | 0.80  | 0.0333   | 23.51       | 932         | 926          | 606        | 2083            | 23.35        | 15.40       | 51.05           | 84.972         | 115.158       | -0.00866783 | 200.130      | -30.19         |
| 2940  | 0.82  | 0.0340   | 23.51       | 932         | 926          | 606        | 2090            | 23.33        | 15.40       | 51.21           | 85.860         | 115.005       | -0.00866163 | 200.865      | -29.15         |
| 3000  | 0.83  | 0.0347   | 23.51       | 932         | 925          | 605        | 2084            | 23.31        | 15.38       | 51.08           | 86.317         | 114.520       | -0.00866229 | 200.837      | -28.20         |
| 3060  | 0.85  | 0.0354   | 23.51       | 932         | 926          | 605        | 2080            | 23.34        | 15.38       | 50.99           | 87.107         | 114.098       | -0.00866398 | 201.205      | -26.99         |
| 3120  | 0.87  | 0.0361   | 23.51       | 932         | 927          | 606        | 2076            | 23.35        | 15.39       | 50.88           | 88.895         | 113.768       | -0.00867391 | 202.663      | -24.87         |
| 3180  | 0.88  | 0.0368   | 23.51       | 932         | 928          | 606        | 2080            | 23.38        | 15.40       | 50.97           | 89.001         | 113.583       | -0.00867745 | 202.384      | -24.38         |
| 3240  | 0.90  | 0.0375   | 23.51       | 932         | 926          | 606        | 2079            | 23.34        | 15.38       | 50.95           | 89.289         | 113.026       | -0.00866066 | 202.315      | -23.74         |

|      |      |        |       |     |     |     |      |       |       |       |         |         |             |         |        |
|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|---------|---------|-------------|---------|--------|
| 3300 | 0.92 | 0.0392 | 23.51 | 922 | 926 | 607 | 2088 | 23.95 | 15.41 | 51.16 | 90.454  | 112.831 | 0.00866669  | 203.265 | 22.28  |
| 3360 | 0.93 | 0.0396 | 23.51 | 922 | 926 | 606 | 2078 | 23.93 | 15.39 | 50.94 | 91.046  | 112.495 | -0.00865064 | 203.541 | 21.45  |
| 3420 | 0.95 | 0.0396 | 23.51 | 922 | 926 | 605 | 2078 | 23.93 | 15.36 | 50.94 | 91.280  | 112.416 | -0.00866043 | 203.947 | -21.16 |
| 3480 | 0.97 | 0.0403 | 23.51 | 922 | 925 | 605 | 2079 | 23.91 | 15.37 | 50.96 | 92.123  | 111.824 | -0.00864982 | 203.678 | -19.70 |
| 3540 | 1.00 | 0.0410 | 23.50 | 931 | 928 | 605 | 2078 | 23.92 | 15.37 | 50.92 | 92.271  | 111.401 | -0.00866634 | 203.672 | -19.13 |
| 3600 | 1.00 | 0.0417 | 23.51 | 931 | 928 | 605 | 2077 | 23.93 | 15.37 | 50.90 | 92.684  | 111.175 | -0.00865049 | 203.860 | -18.49 |
| 3660 | 1.02 | 0.0424 | 23.50 | 931 | 928 | 605 | 2074 | 23.93 | 15.36 | 50.84 | 93.490  | 110.923 | -0.00865263 | 204.413 | -17.43 |
| 3720 | 1.03 | 0.0431 | 23.50 | 931 | 926 | 606 | 2078 | 23.93 | 15.38 | 50.94 | 94.483  | 110.752 | -0.00863582 | 204.235 | -16.27 |
| 3780 | 1.05 | 0.0438 | 23.50 | 931 | 925 | 605 | 2078 | 23.92 | 15.36 | 50.93 | 94.944  | 110.644 | -0.00864465 | 205.589 | -15.70 |
| 3840 | 1.07 | 0.0444 | 23.50 | 931 | 925 | 605 | 2079 | 23.92 | 15.37 | 50.96 | 95.568  | 110.194 | -0.00864431 | 205.762 | -14.63 |
| 3900 | 1.08 | 0.0451 | 23.50 | 931 | 926 | 605 | 2080 | 23.94 | 15.37 | 50.99 | 95.253  | 110.036 | -0.00864814 | 205.289 | -14.63 |
| 3960 | 1.10 | 0.0458 | 23.50 | 931 | 925 | 605 | 2076 | 23.91 | 15.37 | 50.89 | 94.708  | 109.887 | -0.00864789 | 204.595 | -15.18 |
| 4020 | 1.12 | 0.0465 | 23.50 | 931 | 924 | 604 | 2081 | 23.90 | 15.37 | 51.00 | 95.076  | 109.523 | -0.00865174 | 204.599 | -14.45 |
| 4080 | 1.13 | 0.0472 | 23.50 | 931 | 925 | 604 | 2075 | 23.91 | 15.35 | 50.87 | 95.611  | 109.438 | -0.00864363 | 205.049 | -13.83 |
| 4140 | 1.15 | 0.0479 | 23.50 | 931 | 925 | 605 | 2078 | 23.91 | 15.37 | 50.95 | 97.127  | 109.279 | -0.00863865 | 206.406 | -12.15 |
| 4200 | 1.17 | 0.0486 | 23.50 | 931 | 925 | 605 | 2079 | 23.92 | 15.37 | 50.95 | 97.999  | 109.128 | -0.00864895 | 206.527 | -11.73 |
| 4260 | 1.18 | 0.0493 | 23.49 | 931 | 924 | 604 | 2076 | 23.90 | 15.35 | 50.89 | 97.833  | 108.997 | -0.00863947 | 206.630 | -11.16 |
| 4320 | 1.20 | 0.0500 | 23.49 | 931 | 924 | 605 | 2081 | 23.90 | 15.36 | 51.00 | 98.191  | 108.756 | -0.00863329 | 206.947 | -10.56 |
| 4380 | 1.22 | 0.0507 | 23.49 | 931 | 925 | 604 | 2078 | 23.90 | 15.34 | 50.94 | 98.151  | 108.691 | -0.00865143 | 206.842 | -10.54 |
| 4440 | 1.23 | 0.0514 | 23.49 | 931 | 924 | 605 | 2078 | 23.92 | 15.34 | 50.93 | 98.331  | 108.584 | -0.00864645 | 206.895 | -10.23 |
| 4500 | 1.25 | 0.0521 | 23.49 | 931 | 925 | 605 | 2082 | 23.91 | 15.36 | 51.03 | 98.230  | 108.122 | -0.00863912 | 206.352 | -9.89  |
| 4560 | 1.27 | 0.0528 | 23.49 | 931 | 925 | 603 | 2079 | 23.90 | 15.32 | 50.86 | 98.826  | 108.325 | -0.00861958 | 206.651 | -10.00 |
| 4620 | 1.28 | 0.0535 | 23.49 | 931 | 924 | 604 | 2082 | 23.29 | 15.34 | 51.03 | 99.006  | 107.999 | -0.00862351 | 206.955 | -9.95  |
| 4680 | 1.30 | 0.0542 | 23.49 | 931 | 924 | 605 | 2080 | 23.29 | 15.36 | 50.97 | 99.084  | 108.029 | -0.00863475 | 207.113 | -9.95  |
| 4740 | 1.32 | 0.0549 | 23.49 | 931 | 924 | 604 | 2080 | 23.28 | 15.35 | 50.97 | 99.527  | 107.755 | -0.00863999 | 207.282 | -9.23  |
| 4800 | 1.33 | 0.0556 | 23.49 | 931 | 923 | 605 | 2083 | 23.28 | 15.36 | 51.04 | 99.248  | 107.543 | -0.00862298 | 206.791 | -8.30  |
| 4860 | 1.35 | 0.0563 | 23.49 | 931 | 924 | 605 | 2076 | 23.30 | 15.36 | 50.89 | 99.441  | 107.397 | -0.00863712 | 206.838 | -7.96  |
| 4920 | 1.37 | 0.0569 | 23.49 | 931 | 925 | 605 | 2080 | 23.31 | 15.36 | 50.98 | 100.199 | 107.448 | -0.00862126 | 207.646 | -7.25  |
| 4980 | 1.38 | 0.0576 | 23.49 | 931 | 923 | 604 | 2078 | 23.26 | 15.34 | 50.94 | 100.694 | 107.339 | -0.00862565 | 208.033 | -6.65  |
| 5040 | 1.40 | 0.0583 | 23.49 | 931 | 923 | 604 | 2079 | 23.27 | 15.36 | 50.96 | 100.462 | 107.237 | -0.0086621  | 207.699 | -6.78  |
| 5100 | 1.42 | 0.0590 | 23.48 | 930 | 923 | 604 | 2080 | 23.27 | 15.34 | 50.98 | 100.462 | 107.352 | -0.00861853 | 207.814 | -6.89  |
| 5160 | 1.43 | 0.0597 | 23.49 | 931 | 922 | 605 | 2080 | 23.23 | 15.36 | 50.99 | 98.689  | 107.053 | -0.008616   | 205.742 | -8.36  |
| 5220 | 1.45 | 0.0604 | 23.48 | 930 | 924 | 604 | 2079 | 23.28 | 15.34 | 50.95 | 102.341 | 106.907 | -0.0086146  | 209.248 | -4.57  |
| 5280 | 1.47 | 0.0611 | 23.48 | 931 | 924 | 605 | 2077 | 23.29 | 15.36 | 50.90 | 103.209 | 106.657 | -0.00860211 | 209.866 | -3.45  |
| 5340 | 1.48 | 0.0618 | 23.48 | 930 | 923 | 604 | 2077 | 23.26 | 15.35 | 50.92 | 102.311 | 106.688 | -0.00861407 | 209.999 | -4.38  |
| 5400 | 1.50 | 0.0625 | 23.48 | 930 | 923 | 604 | 2078 | 23.27 | 15.35 | 50.94 | 101.886 | 106.653 | -0.00860266 | 208.539 | -4.77  |
| 5460 | 1.52 | 0.0632 | 23.48 | 930 | 923 | 604 | 2076 | 23.27 | 15.34 | 50.88 | 101.565 | 106.587 | -0.00861157 | 208.152 | -5.02  |
| 5520 | 1.53 | 0.0639 | 23.48 | 930 | 923 | 605 | 2074 | 23.25 | 15.36 | 50.85 | 102.711 | 106.464 | -0.00862243 | 209.175 | -3.75  |
| 5580 | 1.55 | 0.0646 | 23.48 | 930 | 923 | 603 | 2076 | 23.26 | 15.31 | 50.88 | 103.021 | 106.534 | -0.0086151  | 209.555 | -3.51  |
| 5640 | 1.57 | 0.0653 | 23.48 | 930 | 924 | 604 | 2079 | 23.28 | 15.33 | 50.96 | 102.718 | 106.389 | -0.00862039 | 209.088 | -3.65  |
| 5700 | 1.58 | 0.0660 | 23.48 | 930 | 924 | 604 | 2077 | 23.29 | 15.35 | 50.91 | 103.574 | 106.381 | -0.00860096 | 209.925 | -2.79  |
| 5760 | 1.60 | 0.0667 | 23.47 | 930 | 924 | 603 | 2078 | 23.28 | 15.32 | 50.83 | 103.664 | 106.329 | -0.00861115 | 209.922 | -2.67  |
| 5820 | 1.62 | 0.0674 | 23.46 | 930 | 924 | 603 | 2078 | 23.29 | 15.32 | 50.86 | 103.822 | 106.217 | -0.00861065 | 210.139 | -2.29  |
| 5880 | 1.63 | 0.0681 | 23.47 | 930 | 924 | 603 | 2075 | 23.29 | 15.32 | 50.86 | 103.897 | 106.249 | -0.00861287 | 209.946 | -2.35  |
| 5940 | 1.65 | 0.0688 | 23.47 | 930 | 924 | 604 | 2074 | 23.28 | 15.34 | 50.84 | 104.085 | 106.187 | -0.0086143  | 210.273 | -2.10  |
| 6000 | 1.67 | 0.0694 | 23.47 | 930 | 923 | 604 | 2076 | 23.27 | 15.35 | 50.88 | 104.040 | 106.046 | -0.00860712 | 210.085 | -2.01  |
| 6060 | 1.68 | 0.0701 | 23.47 | 930 | 922 | 604 | 2080 | 23.24 | 15.33 | 50.97 | 101.889 | 106.133 | -0.00862527 | 208.023 | -4.24  |
| 6120 | 1.70 | 0.0708 | 23.47 | 930 | 921 | 604 | 2077 | 23.23 | 15.34 | 50.90 | 102.801 | 106.876 | -0.0086246  | 208.677 | -3.07  |
| 6180 | 1.72 | 0.0715 | 23.47 | 930 | 923 | 604 | 2074 | 23.26 | 15.35 | 50.84 | 104.657 | 106.926 | -0.00861277 | 210.582 | -1.27  |
| 6240 | 1.73 | 0.0722 | 23.47 | 930 | 923 | 604 | 2078 | 23.28 | 15.34 | 50.94 | 104.753 | 106.719 | -0.00863358 | 210.471 | -0.97  |
| 6300 | 1.75 | 0.0729 | 23.47 | 930 | 923 | 603 | 2078 | 23.27 | 15.33 | 50.94 | 104.727 | 106.697 | -0.00862675 | 210.424 | -0.97  |
| 6360 | 1.77 | 0.0736 | 23.47 | 930 | 924 | 602 | 2075 | 23.28 | 15.30 | 50.87 | 105.187 | 106.799 | -0.00862374 | 210.986 | -0.61  |
| 6420 | 1.78 | 0.0743 | 23.47 | 930 | 923 | 603 | 2074 | 23.27 | 15.31 | 50.79 | 104.533 | 106.789 | -0.00862374 | 210.322 | -1.26  |
| 6480 | 1.80 | 0.0750 | 23.47 | 930 | 923 | 604 | 2072 | 23.25 | 15.34 | 50.85 | 103.798 | 106.831 | -0.00860904 | 209.629 | -2.03  |
| 6540 | 1.82 | 0.0757 | 23.47 | 930 | 923 | 604 | 2078 | 23.25 | 15.34 | 50.93 | 104.678 | 106.608 | -0.00862407 | 210.286 | -0.93  |
| 6600 | 1.83 | 0.0764 | 23.46 | 930 | 924 | 603 | 2078 | 23.29 | 15.33 | 50.93 | 105.279 | 106.633 | -0.00862508 | 210.912 | -0.35  |

