

COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS  
COM LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E  
ADIÇÃO DE FIBRAS

TIAGO DA ROSA HOMEM

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia**.

Porto Alegre

Janeiro de 2002

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Curso de Pós-Graduação

---

Prof. Jorge Augusto Ceratti  
Orientador

---

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Orientador

---

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

- Prof. Leto Momm  
D.Sc. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica  
Ph.D. University of Surrey, UK
- Prof. Washington Peres Núñez  
D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a  
minha noiva Adriana.

## AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação somente foi possível devido à ajuda de diversas pessoas. Mesmo correndo o risco de algum esquecimento, gostaria de particularizar alguns de meus sinceros agradecimentos:

Aos meus orientadores, Nilo Cesar Consoli e Jorge Augusto Ceratti, pelo incentivo, dedicação, sabedoria e entusiasmo dedicados à realização deste trabalho;

À colega Giovana Savitri Pasa pelo inestimável apoio prestado no projeto do experimento e na análise dos resultados.

Ao bolsista de iniciação científica Dionísio Doering pela colaboração incansável na montagem do equipamento de deformação permanente e à bolsista Caroline Trindade De Angelis pelo auxílio na realização dos ensaios de permeabilidade;

Ao técnico Carlos Ivan H. Ribas pelo auxílio na montagem do equipamento de deformação permanente e pela ajuda na realização dos ensaios;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à CAPES pela oportunidade e financiamento à realização deste trabalho;

À Owens Corning Fiberglass Corporation pelas fibras gentilmente cedidas para a realização deste estudo;

Ao Consórcio Construtor TRS pela inestimável ajuda na moldagem dos corpos de prova;

À Ipiranga Asfaltos pelo fornecimento do asfalto utilizado nesta pesquisa;

Ao Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) pelo empréstimo do equipamento *Los Angeles* para a realização dos ensaios de desgaste Cantabro;

Aos amigos e colegas do PPGEC: Celso Pedreira, Diego Nacci, Fernando Pugliero, Gabriela Medeiros, Giovani Rotta, Júlio Montardo, Luciano Specht, Marcelo Rigo, Marcelo Tessari, Marcos Feuerharmel e Márcio Vandrúscolo;

Aos colegas e professores do PPGEC pelo agradável convívio e troca de experiências;

Aos meus pais Targino e Regina e a minha irmã Mirela pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos transmitidos ao longo de minha vida;

A minha noiva Adriana pelo amor, compreensão e parceria nos momentos mais difíceis.

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b> .....	ix
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xi
<b>Lista de Quadros</b> .....	xiii
<b>Lista de Siglas e Símbolos</b> .....	xiv
<b>Resumo</b> .....	xvii
<b>Abstract</b> .....	xviii
<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. HISTÓRICO.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. HIPÓTESES TESTADAS.....	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	7
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	7
2.2 FIBRAS.....	8
<b>2.2.1. Tipos de fibras</b> .....	9
2.2.1.1. <i>Fibras naturais</i> .....	9
2.2.1.2. <i>Fibras industrializadas</i> .....	10
<b>2.2.2. Mecanismos de associação asfalto-fibra</b> .....	13
<b>2.2.3. Estrutura e propriedades da mistura asfalto-fibra</b> ..	14
2.2.3.1 <i>Ação das fibras</i> .....	14
2.2.3.2. <i>Ligação asfalto-fibra</i> .....	16
2.2.3.3. <i>Percentuais de fibra adicionados em misturas asfálticas</i> .....	17
2.2.3.4. <i>Vantagens e desvantagens dos vários tipos de fibras</i> .....	17
2.2.3.5. <i>Execução de misturas asfálticas com fibras</i> .....	18

2.3. ASFALTOS.....	19
<b>2.3.1. Definição.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2. Propriedades.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3. Polímeros modificadores dos asfaltos.....</b>	<b>21</b>
2.3.3.1. <i>Estireno-butadieno-estireno (SBS).....</i>	22
2.3.3.2. <i>Etileno-vinil-acetato (EVA).....</i>	24
2.4. MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS: CARACTERÍSTICAS GERAIS..	25
<b>2.4.1. Mecanismo de funcionamento.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2. Vantagens de utilização.....</b>	<b>26</b>
2.4.2.1. <i>Aderência.....</i>	26
2.4.2.2. <i>Visibilidade.....</i>	27
2.4.2.3. <i>Ruído.....</i>	27
2.4.2.4. <i>Consumo de combustível.....</i>	28
2.4.2.5. <i>Número de acidentes.....</i>	29
<b>2.4.3. Desvantagens de utilização.....</b>	<b>30</b>
2.4.3.1. <i>Custos de construção.....</i>	30
2.4.3.2. <i>Manutenção.....</i>	31
2.4.3.3. <i>Vida útil.....</i>	31
<b>2.4.4. Critérios de projeto.....</b>	<b>32</b>
2.4.4.1. <i>Método tradicional.....</i>	35
2.4.4.2. <i>Metodologia proposta por Khalid e Jiménez (1996).....</i>	35
2.4.4.3. <i>Metodologia proposta por Mallick et al. (2000).....</i>	36
<b>2.4.5. Recomendações construtivas.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.6. Propriedades físicas e mecânicas.....</b>	<b>40</b>
2.4.6.1. <i>Resistência ao desgaste.....</i>	40
2.4.6.2. <i>Módulo de resiliência.....</i>	42
2.4.6.3. <i>Condutividade hidráulica.....</i>	44
2.4.6.4. <i>Resistência à tração.....</i>	45
2.4.6.5. <i>Deformação permanente.....</i>	46
<b>3. Programa Experimental.....</b>	<b>48</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	48
3.2. PROJETO DO EXPERIMENTO.....	49
3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	51

<b>3.3.1. Agregados</b> .....	51
<b>3.3.2. Ligante Asfáltico</b> .....	53
<b>3.3.3. Fibras</b> .....	54
3.4. MOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVA.....	56
3.5. PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	57
<b>3.5.1. Ensaio de desgaste Cantabro</b> .....	57
<b>3.5.2. Ensaio de condutividade hidráulica</b> .....	60
<b>3.5.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</b> .....	64
<b>3.5.4. Ensaio de módulo de resiliência</b> .....	65
<b>3.5.5. Ensaio de deformação permanente</b> .....	68
<b>4. Apresentação e Análise dos Resultados</b> .....	73
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	73
4.2. DESGASTE CANTABRO.....	74
4.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	79
<b>4.3.1. Ensaio realizados a 25°C</b> .....	79
<b>4.3.2. Ensaio realizados a 45°C</b> .....	80
<b>4.3.3. Comparação entre os resultados obtidos: <math>Mr_{25}</math> e <math>Mr_{45}</math></b> ..	82
4.4. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	85
4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	88
4.6. DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	90
<b>5. Considerações Finais</b> .....	96
5.1. CONCLUSÕES.....	96
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Curva granulométrica dos agregados .....	53
Figura 3.2 - Fibras de vidro: microscopia eletrônica .....	56
Figura 3.3 - Execução de ensaio de desgaste Cantabro no Equipamento <i>Los Angeles</i> .....	58
Figura 3.4 - Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de desgaste Cantabro .....	59
Figura 3.5 - Corte esquemático do permeâmetro .....	61
Figura 3.6 - Seqüência da realização do ensaio de condutividade hidráulica	
a) vedação com parafina	
b) colocação da argila	
c) compactação da argila	
d) vista do aparato após a compactação e a impermeabilização com parafina	
e) vista do equipamento pronto para o ensaio	
f) realização do ensaio .....	63
Figura 3.7 - Vista do equipamento de compressão diametral	65
Figura 3.8 - Desenho esquemático do equipamento utilizado nos ensaios de módulo de resiliência .....	67
Figura 3.9 - Equipamento de módulo de resiliência .....	68
Figura 3.10 - Vista do interior do equipamento de módulo de resiliência durante a execução do ensaio .....	68
Figura 3.11 - Corte esquemático do equipamento de deformação permanente .....	70
Figura 3.12 - Interface do ensaio de deformação permanente	71
Figura 3.13 - Equipamento de deformação permanente antes da colocação da câmara termo-regulável .....	72
Figura 3.14 - Vista do equipamento de deformação permanente.....	72
Figura 4.1 - Superfície de resposta PC x TF x TA .....	75
Figura 4.2 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão de perda ao desgaste Cantabro pelo modelo estatístico.....	76

Figura 4.3 - Superfície de resposta  $MR_{25}$  x TF x TA ..... 80

Figura 4.4 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão do Módulo de Resiliência a 25°C ..... 80

Figura 4.5 - Superfície de resposta  $MR_{45}$  x TF x TA ..... 81

Figura 4.6 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão do Módulo de Resiliência a 45°C ..... 82

Figura 4.7 - Superfície de resposta CH x TF x TA ..... 86

Figura 4.8 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão da Condutividade Hidráulica ..... 86

Figura 4.9 - Superfície de resposta RT x TF x TA ..... 89

Figura 4.10 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão de Resistência à Tração ..... 89

Figura 4.11 - Superfície de resposta DP x TF x TA ..... 91

Figura 4.12 - Comparação entre resultados experimentais e a previsão de Deformação Permanente (mm/cm) ..... 92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeito do polímero SBS nas propriedades do ligante e da mistura asfáltica .....	23
Tabela 2.2 - Faixa granulométrica a ser utilizada .....	37
Tabela 3.1 - Fatores controláveis de interesse .....	50
Tabela 3.2 - Resumo dos teores usados na confecção dos corpos de prova tipo .....	50
Tabela 3.3 - Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental .....	51
Tabela 3.4 - Faixas granulométricas utilizadas no programa experimental .....	52
Tabela 3.5 - Propriedades do ligante asfáltico .....	54
Tabela 3.6 - Composição química do vidro tipo E .....	55
Tabela 3.7 - Densidades e volumes de vazios médios dos CP's.....	57
Tabela 4.1 - Resultados experimentais da perda ao desgaste no Ensaio Cantabro .....	75
Tabela 4.2 - Comparação entre os resultados obtidos e os resultados da bibliografia consultada .....	78
Tabela 4.3 - Resultados experimentais de Módulo de Resiliência a 25°C .....	79
Tabela 4.4 - Resultados experimentais de Módulo de Resiliência a 45°C .....	81
Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados obtidos e os resultados da bibliografia consultada .....	84
Tabela 4.6 - Resultados experimentais da Condutividade Hidráulica .....	85
Tabela 4.7 - Comparação entre os resultados obtidos com dados da literatura consultada .....	87
Tabela 4.8 - Resultados experimentais de Resistência à Tração.....	88
Tabela 4.9 - Comparação entre os resultados obtidos e os dados de Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) .....	90

Tabela 4.10 - Resultados experimentais de Deformação Permanente ..... 91

Tabela 4.11 - Comparação entre os resultados obtidos e os dados da literatura ..... 93

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Características das fibras de celulose .....	9
Quadro 2.2 - Características das fibras de aço utilizadas em pavimentação .....	12
Quadro 2.3 - Comparação entre diferentes tipos de fibras .	17
Quadro 2.4 - Vantagens e desvantagens de várias fibras ...	18
Quadro 2.5 - Metodologia de projeto .....	36
Quadro 2.6 - Critérios de projeto para revestimentos porosos segundo Mallick et al. (2000) .....	38
Quadro 2.7 - Porcentagem de área de desagregação nos trechos piloto e de referência .....	41

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Association for Testings and Materials

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

FHWA: Federal Highway Works Administration

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LMS: Laboratório de Mecânica dos Solos

NIRR: National Institute of Road Research

PIARC: Permanent International Association of Road Congresses

PPGEP: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção

SHRP: Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ANOVA: Análise de variância

CAP: Cimento Asfáltico do Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

ECA: Efeito do Calor e do Ar

EVA: Etileno-vinil-acetato

LVDT: Linear Variable Differential Transducer

NSB: nível de severidade baixo

NSM: nível de severidade médio

PAV: Pressure Aging Vassel

PET: Polietileno tereftalato

PSV: Polished Stone Value

RPM: rotações por minuto

RTFO: Rolling Thin Film Oven

SBS: Estireno-butadieno-estireno

VCA: Voids in coarse aggregate

PAgr: Percentual de agregados

TA: Teor de asfalto

TF: Teor de fibra

CH: Condutividade hidráulica

DP: Deformação permanente

MR<sub>25</sub>: Módulo de resiliência a 25°C

MR<sub>45</sub>: Módulo de resiliência a 45°C

PC: Perda ao desgaste Cantabro

RT: Resistência à tração

$\Delta H_I$ : deformação horizontal instantânea recuperável

$\sigma_R$ : resistência à tração

$\nu_{RI}$ : coeficiente de Poisson instantâneo

CP: corpo de prova

D: diâmetro do corpo de prova

$E_{RI}$ : módulo de resiliência instantâneo

F: carga de ruptura

$F_v$ : carga vertical repetida aplicada no corpo de prova

H: altura do corpo de prova

L/D: comprimento/diâmetro

P: Peso inicial

P': Peso após o ensaio

t: espessura do corpo de prova

w1, w2: variáveis modificadas

$\delta$ : ângulo de fase

$G'$ : módulo de cisalhamento elástico

## RESUMO

### COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS COM LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E ADIÇÃO DE FIBRAS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico de um concreto asfáltico poroso, com teores variáveis de asfalto modificado e adições de fibra de vidro. O ligante utilizado consiste de um asfalto modificado com 4% de polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno). Os corpos de prova moldados incluem teores de asfalto entre 3,66% e 6,34% do peso total da mistura. Os teores de fibra de vidro adicionados na mistura situaram-se entre 0 e 1% do peso total da mistura.

Foram realizados estudos de laboratório envolvendo ensaios de módulo de resiliência, permeabilidade, resistência à tração, desgaste Cantabro e deformação plástica sob cargas repetidas. Para análise dos resultados obtidos, utilizou-se técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada um dos fatores controláveis, teor de asfalto (TA) e teor de fibra (TF) nas variáveis de resposta.

A análise dos resultados possibilitou as seguintes constatações principais: (1) quanto à resistência ao desgaste pode-se considerar que teores de asfalto superiores a 4,1% satisfazem o critério mínimo para projeto; (2) existe uma contribuição cada vez mais positiva do acréscimo de fibras sobre o módulo de resiliência, com o aumento da temperatura; (3) a interação asfalto-fibra diminui a permeabilidade; (4) a deformação permanente foi mínima para um teor de asfalto de 4,5% e um teor de fibra de 0,4%.

## ABSTRACT

### BEHAVIOR OF OPEN GRADED FRICTION COURSE USING MODIFIED BITUMINOUS BINDERS AND FIBERS

The mechanical behavior of a porous asphalt concrete with different contents of modified bitumen and glass fibers was evaluated. The binder used is a 4% SBS (styrene-butadiene-styrene) modified bitumen. Different specimens were molded, varying the asphalt content from 3,66% to 6,34% of the mix total weight. The fiber content was between 0% and 1% of the mix total weight.

Resilient modulus, permeability, splitting tensile tests, Cantabro abrasion resistance and rutting were carried out to evaluate the influence of asphalt and fiber contents in the porous asphalt properties.

The test results can be summarized in the following conclusions: (1) the minimal abrasion resistance design criterium is reached at 4,1% of asphalt content; (2) as temperature increases, the positive influence of increasing fiber content on resilient modulus becomes clear; (3) permeability is reduced by the asphalt-fiber interaction; (4) rutting was minimal for an asphalt content of 4,5% and a fiber content of 0,4%.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O número de caminhões e automóveis vem aumentando significativamente no Brasil nos últimos anos. A manutenção e/ou a melhoria da infraestrutura rodoviária é uma necessidade para a promoção da segurança nas rodovias. Cabe aos engenheiros rodoviários introduzir soluções técnicas que possibilitem aumentar a segurança no trânsito e, dessa forma, atender aos anseios dos usuários.

A busca da melhoria nas condições de segurança de nossas rodovias tem levado ao desenvolvimento de diversas tecnologias que reduzem o número de acidentes. Particularmente em tempo chuvoso, o aspecto da segurança torna-se ainda mais crítico, exigindo soluções tecnológicas que, se não eliminam completamente o risco de graves acidentes, pelo menos diminuam a sua ocorrência.

A fim de atingir esses objetivos, iniciou-se o desenvolvimento de novos tipos de revestimentos, que possibilitassem retirar o mais rápido possível a água sobre a pista. É nesse contexto que surgem os revestimentos drenantes, revestimentos esses que, por apresentarem uma

alta permeabilidade, podem, de forma eficiente, eliminar a água sobre a pista e, portanto, contribuir para o aumento da segurança viária.

Nos últimos anos, o uso de misturas asfálticas porosas como revestimento tem demonstrado enormes vantagens e muitos técnicos rodoviários, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, estão optando pela sua utilização. Misturas asfálticas porosas possuem agregados especialmente selecionados que fazem com que a massa asfáltica apresente um volume de vazios superior a 20% após a compactação. Esse elevado índice de vazios é justamente o que possibilita aos asfaltos porosos apresentarem suas características drenantes.

Conhecidos nas mais diversas denominações, *open graded friction course*, *pop corn mix*, camada porosa de atrito, camada drenante, revestimento poroso, concreto asfáltico poroso, esses revestimentos têm apresentado uma utilização cada vez mais expressiva, despertando o interesse do meio rodoviário nacional.

Nesse contexto insere-se o presente trabalho, que procura abordar o desempenho de misturas asfálticas porosas principalmente sob o ponto de vista mecânico, procurando na medida do possível levantar outras questões que sejam de interesse ao estudo de revestimentos porosos.

## 1.2. HISTÓRICO

Em 1953, o *National Institute of Road Research (NIRR)* da África do Sul realizou diversas experiências a fim de investigar a durabilidade das misturas asfálticas porosas.

Na Suíça, a primeira aplicação de revestimentos porosos foi executada em 1972 em um pavimento

aeroportuário. No final da década de 70, iniciou-se a utilização de revestimentos porosos em pavimentos rodoviários. Desde 1982 realiza-se através do "*Institute for Transportation , Traffic, Highway and Railway Engineering IVT of the Swiss Federal Institute of Technology*" um programa de pesquisas com o objetivo de observar o desempenho a longo prazo de revestimentos asfálticos porosos.

Na Holanda, o uso de revestimentos asfálticos porosos iniciou-se em 1972. A partir da década de 80, com a possibilidade dos revestimentos porosos reduzirem o ruído produzido pelo tráfego, esse tipo de revestimento começou a ter um emprego mais abrangente.

Na Bélgica, os revestimentos porosos tiveram sua aplicação iniciada em 1979 através do "*Comité de Recherches Routières*". Em 1988, a Bélgica já contava com aproximadamente 2 milhões de metros quadrados executados com revestimentos porosos.

A primeira aplicação de revestimentos asfálticos porosos na Espanha ocorreu em 1980, através da execução de quatro trechos experimentais em uma rodovia do norte daquele país, onde freqüentemente havia a ocorrência de chuvas. Já em 1990, a Espanha contava com aproximadamente 3 milhões de metros quadrados executados com revestimentos porosos.

No Brasil, a primeira experiência realizada com esse tipo de revestimento foi na pista de pouso e decolagem do Aeroporto de Confins - Belo Horizonte (1983). Outras experiências foram posteriormente executadas no Aeroporto Santos Dumont (1987), na rua Leopoldo Bulhões, RJ (1990), em um trecho experimental na Rodovia dos Bandeirantes, SP

(1992) e em um trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra (km 226 - 221), SP (1997).

### 1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico de um concreto asfáltico poroso, com teores variáveis de asfalto modificado SBS e adições de fibras de vidro. Além disso, procura-se contribuir para o desenvolvimento de misturas asfálticas porosas no Brasil através da realização de diversos ensaios aplicados em pavimentação rodoviária. Em especial, espera-se que os resultados obtidos sirvam de base para o projeto de um trecho a ser executado com uma mistura asfáltica porosa na BR 290 - *Free-Way*.

Como objetivos específicos procura-se analisar o comportamento mecânico e a condutividade hidráulica de misturas asfálticas porosas em função do percentual de asfalto e do teor de fibras.

### 1.4. HIPÓTESES TESTADAS

As hipóteses testadas nesse trabalho foram as seguintes:

- a adição de fibras influi positivamente na redução das deformações permanentes do revestimento poroso analisado;
- da mesma forma, a adição de fibras melhora o desempenho ao desgaste de misturas porosas;

- aumenta-se a resistência à tração das misturas porosas com o aumento do teor de fibra;
- a permeabilidade é reduzida com o aumento do teor de asfalto;
- os valores de módulo de resiliência para misturas porosas são da ordem de 80% dos valores encontrados para concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ).

### 1.5. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta de 5 capítulos, organizados de forma sistemática com o objetivo de obter-se uma melhor compreensão do estudo desenvolvido.

O Capítulo 1 aborda de uma forma bastante genérica as misturas asfálticas porosas, apresentando um histórico do seu emprego. Nele são apresentados os objetivos da dissertação, as hipóteses testadas e a organização dos capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica acerca dos assuntos pertinentes ao estudo realizado. Para tanto, é realizada uma apresentação dos diversos estudos a respeito de misturas asfálticas porosas, de ligantes modificados, dos mecanismos de interação matriz-fibra e de ensaios empregados para projeto e análise do desempenho de misturas asfálticas porosas.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental realizado. Nele são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, o planejamento do experimento, a moldagem dos corpos de prova e os tipos de ensaios realizados.

No Capítulo 4, os resultados dos diversos ensaios realizados são apresentados, bem como a avaliação dos mesmos através da análise de regressão múltipla. O estabelecimento de correlações entre as variáveis de estudo é abordado através de equações e de gráficos de superfícies de resposta. Os resultados obtidos são relacionados com os comportamentos na literatura.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo, as recomendações de projeto e as sugestões para futuros estudos acerca de misturas asfálticas porosas.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No decorrer do presente capítulo, será apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca de misturas asfálticas porosas e de alguns aspectos e conceitos relevantes ao entendimento da presente pesquisa.

Inicialmente, introduz-se alguns comentários a respeito dos materiais constituintes das misturas asfálticas porosas, notadamente o asfalto e as fibras. Particularmente, discutem-se os tipos de fibras utilizadas em pavimentação, os modos de interação asfalto-fibra e a estrutura e propriedades das fibras. Também aborda-se os aspectos relevantes ao estudo de asfaltos modificados com polímeros.

Na seqüência, disserta-se sobre as características gerais dos revestimentos porosos. Nesse tópico são discutidos os mecanismos de funcionamento, exigência de materiais, vantagens, desvantagens, métodos de projeto e aspectos construtivos das misturas asfálticas porosas.

Por fim, dá-se ênfase aos estudos experimentais a respeito de revestimentos asfálticos porosos. Nesse

aspecto, procura-se enfatizar questões relativas às propriedades físicas e mecânicas desse tipo de solução.

## 2.2. FIBRAS

As fibras adicionadas a produtos asfálticos têm sido utilizadas, desde muito tempo, como materiais impermeáveis e *filers* em placas de coberturas. Entretanto, somente nos últimos 20 anos, iniciou-se a utilização de fibras em pavimentação. Após um período de estudos experimentais iniciais, o uso de fibras em pavimentos atingiu níveis de industrialização satisfatórios.

Diversos tipos de fibras têm sido utilizados em compósitos asfálticos, a saber:

### ➤ Naturais

- asbestos
- celulose

### ➤ Industrializadas

- sintéticas
  - poliéster
  - polietileno
  - polipropileno
  - acrílico
- inorgânicas e metálicas
  - aço
  - vidro
  - mineral (rocha)

## 2.2.1. Tipos de fibras

### 2.2.1.1. Fibras Naturais

#### a) Fibras de Asbesto

Também conhecidas como fibras de amianto, pode-se afirmar que seu uso é mais tradicional do que os outros tipos de fibra. Asbestos é um termo geral aplicado a qualquer mineral do qual se pode obter fibras flexíveis. As fibras de amianto apresentam uma resistência à tração média de 1000 MPa, apresentando-se em comprimentos entre 1,5 e 40 mm. Quanto menores são as fibras, mais se espera de sua resistência. O seu módulo de elasticidade é de aproximadamente 160 GPa, com diâmetros da ordem de 1  $\mu\text{m}$  (Corté, 1998).

A utilização desse tipo de fibra tem tido um decréscimo durante os últimos anos em função de danos à saúde causados por elas. Outro problema relacionado a esse produto é o seu caráter essencialmente frágil e a resistência ao impacto notadamente baixa (Hannant, 1994).

#### b) Fibras de Celulose

As fibras de celulose são produzidas a partir do processamento de resíduos de madeira ou papel. A sua composição química é  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . O Quadro 2.1 apresenta as propriedades típicas de duas fibras de celulose.

QUADRO 2.1. Características das fibras de celulose

Propriedade	Fibras 1	Fibras 2
Percentual de celulose	75 - 80	90 - 95
pH	6,5 - 8,5	7 - 8
Comprimento médio (mm)	1,1	0 - 2
Diâmetro médio (mm)	45	17 - 36

As fibras de celulose também são utilizadas a partir da mistura com vários ligantes (betume, ceras e óleos) e produzidas em forma pelotizada. A proporção entre ligante e fibras usualmente utilizada situa-se entre 30/70 e 50/50 para betume e em torno de 25/75 com ceras ou óleo. As pelotas apresentam dimensões de 5 - 8 mm de comprimento e 3 - 4 mm de diâmetro. As fibras de celulose são resistentes a temperaturas de 140°C durante diversos dias e apenas alguns segundos a temperaturas da ordem de 200°C.

#### *2.2.1.2. Fibras Industrializadas*

##### a) Fibras sintéticas

###### Polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado de termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar uma sobre as outras (Hollaway, 1994).

Essa característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e concede substancial aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada. O módulo de elasticidade é menor do que o de qualquer outra fibra usualmente utilizada, aproximadamente 8 GPa. A resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Fibras de polipropileno são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis ( Taylor, 1994).

A utilização desse tipo de fibra em concreto asfáltico é bastante rara, na medida em que a fibra possui baixa resistência a temperaturas elevadas.

#### Poliéster

As fibras de poliéster são bastante semelhantes às fibras de polipropileno, mas aquelas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser utilizadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno, mas onde a melhora na performance justifique o seu maior custo (Taylor, 1994). Um dos poliésteres mais conhecidos é o polietileno tereftalato (PET), atualmente utilizado como material de constituição das garrafas plásticas tipo "PET".

As fibras de poliéster são resistentes a temperaturas da ordem de 220 °C. Em misturas asfálticas são utilizadas em comprimentos que usualmente variam de 0,6 mm e 1,2 mm. Entretanto, em alguns casos, as fibras de poliéster podem ser usadas em comprimentos maiores (4 - 6 mm) a fim de melhorar o seu efeito de reforço. Para misturas asfálticas a frio, utiliza-se um tratamento especial com o objetivo de facilitar a sua dispersão em água.

#### Polietileno

As fibras de polietileno são encontradas comercialmente na forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas (Hannant, 1994). Possuem um módulo de elasticidade baixo, mas, no entanto, o polietileno de alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo e a aderência com a matriz.

A utilização desse tipo de fibra em concretos asfálticos usinados a quente é bastante insipiente, devido

ao fato da mesma possuir baixa resistência a altas temperaturas.

#### b) Fibras inorgânicas e metálicas

##### Aço

As fibras de aço são relativamente grossas, por exemplo, 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Pressupondo que não é usual que o material compósito rompa devido a ruptura da fibra de aço (a ruptura do compósito está relacionada ao arrancamento das fibras), não há razão para se aumentar a resistência à tração acima da obtida com os aços comuns (baixo teor de carbono). A resistência à tração é de aproximadamente 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa.

Hannant (1994) salienta que uma grande variedade de formas e comprimentos podem ser obtidos, dependendo do processo de manufatura. As fibras de aço podem sofrer deformações mecânicas de várias formas a fim de aumentar a resistência de aderência.

Em pavimentação asfáltica, a utilização de fibras de aço não é usual. As recomendações a respeito de suas características são mostradas no Quadro 2.2.

QUADRO 2.2: Características das fibras de aço utilizadas em pavimentação (Corté, 1998)

Comprimento das fibras	1 a 2 vezes a máxima dimensão do agregado
Percentual de fibra adicionado	0,4% a 1,5% em massa da mistura
Relação comprimento /diâmetro de fibra	$40 < L/D < 100$
Forma da fibra	Formas onduladas com ancoragem específica
Tratamento superficial	Contra corrosão

## Vidro

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de "cachos", ou seja, fios compostos por centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, do tamanho do furo por onde são extrudados e da velocidade de extrusão (Taylor, 1994).

Os fios podem ser combinados para formar tecidos ou podem ser simplesmente cortados em comprimentos variados. Os tecidos conferem altas características de resistência e rigidez na direção das fibras, quando estas são orientadas. As fibras cortadas são comercializadas como "chopped strand" e proporcionam uma distribuição aleatória de elementos de reforço no compósito (Hollaway, 1994).

As características de fibras de vidro usualmente empregadas em pavimentação são: diâmetro de 6  $\mu\text{m}$ , densidade de 2,50 e comprimento variando entre 1 e 10 mm.

### **2.2.2. Mecanismos de associação asfalto-fibra**

A capacidade das fibras associarem-se com o asfalto pode ser maior do que os finos convencionais de similar área específica. Essa capacidade deve-se a diferentes fatores, como a forma, o estado superficial e as ligações que podem ser criadas através de adsorções físicas e químicas (Serfass e Samanos, 1996).

Fibras naturais juntamente com algumas fibras artificiais, como aço e vidro, não são, ao contrário das fibras sintéticas, termoplásticas. Isso significa que elas não amolecem ou derretem em temperaturas elevadas. Dessa forma, nenhuma associação com asfalto é esperada. Também não existe reação química com o asfalto. Uma boa adesividade

requer que a energia superficial do material da fibra seja maior do que a energia do asfalto ( $\approx 25\text{mJ/m}^2$ ). Por isso, as fibras de vidro utilizadas em pavimentação recebem usualmente um tratamento superficial a fim de garantir uma boa adesividade ao asfalto.

Fibras sintéticas utilizadas em aplicações de asfalto a quente, por exemplo poliéster, são termoplásticas mas possuem um alto ponto de liquefação a fim de prevenir o derretimento quando misturada com o asfalto. Elas não se associam nem reagem com o asfalto. Já as fibras de polietileno e polipropileno, em função de possuírem um baixo ponto de amolecimento, não são utilizadas em aplicações asfálticas a quente.

### **2.2.3. Estrutura e propriedades da mistura asfalto-fibra**

#### *2.2.3.1. Ação das fibras*

As fibras atuam de duas formas distintas quando adicionadas em misturas betuminosas. Elas possuem uma ação a curto prazo, que atua durante a produção, transporte e espalhamento na pista, de forma a possibilitar o aumento do percentual de ligante sem que ocorra o escorrimento do mesmo. Além disso, as fibras possuem uma ação a longo prazo, influenciando as propriedades mecânicas e a durabilidade da mistura asfáltica durante sua vida de serviço.

Os efeitos das fibras dependem de suas características. Algumas possuem uma ação a curto prazo, enquanto outras possuem uma ação a longo prazo. Também existem as que atuam a curto e a longo prazo. Dessa forma, a influência das fibras nas propriedades de misturas betuminosas não pode ser generalizada.

A habilidade das fibras de minimizar o escoamento de ligante (ação a curto prazo) pode ser quantificada através do ensaio Schellenberger (Schellenberger et al, 1986, citado por Decoene, 1990). O ensaio consiste em submeter amostras soltas de misturas porosas, contendo teores diversos de ligante, à temperatura de 170°C, com medição do escoamento a uma hora e a três horas. Com o acréscimo de uma fibra que possua sua ação a curto prazo, pode-se diminuir o escoamento de ligante e, dessa forma, aumentar o percentual de asfalto adicionado (Serfass e Samanos, 1996).

Da mesma forma, o aumento de rigidez do masticue ao adicionar-se fibras pode ser claramente demonstrado através dos ensaios de Daniel e de Anel e Bola (Serfass e Samanos, 1996).

Testes em misturas areia-asfalto-fibras têm demonstrado um ganho de resistência ao cisalhamento e à extrusão em função da adição de fibras. Os resultados usualmente indicam a existência de um teor de fibra ótimo, que depende da natureza da fibra. Esse teor ótimo de fibra é encontrado observando-se dois mecanismos opostos gerados pela adição de fibras (Serfass e Samanos, 1996):

- o aumento da resistência devido ao aumento do intertravamento e o reforço do ligante;
- a queda da resistência a partir de um determinado limite, em função do decréscimo da compactação e, dessa forma, perda na densidade.

O acréscimo de fibras minerais e de fibras de celulose aumentam a rigidez do asfalto a elevadas

temperaturas. No entanto, essas fibras praticamente não influenciam na rigidez do asfalto nas temperaturas usuais de serviço de um pavimento. Portanto, a ação desses tipos de fibras limita-se à atuação como um estabilizante, atuando apenas a curto prazo (Corté, 1998).

Já com a adição de fibras de vidro ou fibras sintéticas ocorre uma melhora das características do ligante tanto a curto prazo, quanto a longo prazo. Pode-se dizer então que esses tipos de fibras atuam como estabilizantes (curto prazo) e materiais de reforço (longo prazo) (Corté, 1998).

As fibras metálicas atuam como um reforço a longo prazo, não tendo nenhuma influência como um material estabilizante.

A adição de fibras nas misturas asfálticas possibilita um aumento da quantidade de asfalto, na medida em que aquelas atuam prevenindo o escorrimento de ligante, possibilitando um aumento do filme de asfalto sobre os agregados e, conseqüentemente, uma maior durabilidade da mistura.

#### *2.2.3.2. Ligação asfalto-fibra*

A curto prazo, a efetividade da ligação fibra-asfalto é de suma importância. Ela depende, em sua maior parte, da natureza e da estrutura da fibra. Pode-se relacioná-la, parcialmente, com a superfície específica da fibra, que é apresentada no Quadro 2.3.

QUADRO 2.3. Comparação entre diferentes tipos de fibras  
(Serfass e Samanos, 1996)

Fibras	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )	Densidade	Superfície específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
Asbestos	0,1 - 1	500 - 1000	2,7	7,5
Mineral	3 - 7	200 - 800	2,7	0,6
Vidro	5 - 6	200 - 1000	2,5	0,3
Celulose	20 - 40	900 - 1100	0,9	0,16

#### 2.2.3.3. Percentuais de fibra adicionados em misturas asfálticas

Em misturas asfálticas porosas, fibras minerais são adicionadas em percentuais da ordem de 1%, enquanto fibras de celulose são adicionadas da ordem de 0,3 a 0,5%.

Em *Stone Matrix Asphalt*, adiciona-se fibras em percentuais variando entre 0,3 e 0,5% em peso. Essa quantidade de fibra é suficiente para estabilizar o masticue (asfalto e filer) e evitar o escorrimento de ligante.

#### 2.2.3.4. Vantagens e desvantagens dos vários tipos de fibras

As principais vantagens e desvantagens dos vários tipos de fibras são apresentadas no Quadro 2.4.

QUADRO 2.4. Vantagens e desvantagens de várias fibras  
(Corté, 1998)

FIBRA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Asbestos	- Alta capacidade de ligar-se ao asfalto - Durabilidade - Possível melhora na resistência a deformações permanentes	- Nocivo à saúde
Celulose	- Alta capacidade de ligar-se com o asfalto	- Suscetível à umidade - Pouco ou nenhum efeito de reforço
Mineral	- Alta capacidade de ligar-se com o asfalto	Pouco ou nenhum efeito de reforço
Vidro	Atua como reforço - possível aumento da resistência da mistura	- Fragilidade - Baixa capacidade de aderência ao asfalto sem a utilização de tratamento superficial
Sintéticas: - poliéster - polipropileno - acrílico	Atua como reforço - possível aumento da resistência da mistura	Baixa capacidade de aderência ao asfalto
Aço	Atua como reforço - possível aumento da resistência da mistura	- Nenhuma capacidade de aderência ao asfalto - Ferrugem - Problemas de compactação e de característica da superfície

#### 2.2.3.5. Execução de misturas asfálticas com fibras

A adição de fibras é utilizada tanto em misturas a frio quanto em misturas a quente. No caso de misturas a quente, as fibras são adicionadas à mistura durante o seu preparo. Já no caso de misturas a frio, usualmente adiciona-se as fibras no momento de lançamento da mistura em campo (Corté, 1998).

Usualmente, em usinas asfálticas as fibras são adicionadas antes da inclusão de asfalto. Entretanto, as fibras de vidro devem ser introduzidas ao final do processo de mistura pelo fato de serem bastante frágeis.

As fibras a serem utilizadas em misturas asfálticas devem ser especialmente armazenadas a fim de protegê-las da chuva e da umidade. Essas fazem com que as fibras se aglomerem, dificultando sobremaneira a sua posterior mistura.

Aplicações de misturas asfálticas com fibras sem a utilização de vibroacabadoras são de difícil execução e altas energias de compactação são necessárias. A observância da correta temperatura de compactação é de extrema importância. Quando a utilização de fibras é associada a altos teores de asfalto, não é recomendado o uso de compactadores pneumáticos, pois existe uma forte tendência de o asfalto aderir aos pneus, sendo, portanto, preferível o emprego de compactadores de rolo liso.

## 2.3. ASFALTOS

### 2.3.1. Definição

O asfalto é uma solução composta por partículas de asfaltenos envolvidas por resinas em um meio oleoso (Hunter, 1994).

A composição dos asfaltos pode ser dividida em dois grupos principais: os maltenos e os asfaltenos.

Os maltenos representam 70 a 100% do asfalto e têm uma massa molecular variando de  $3 \times 10^2$  a  $1,5 \times 10^3$ . Sua composição é formada de óleos e resinas. Os óleos representam 40 a 60% do asfalto e são formados

essencialmente por compostos de hidrogênio e carbono. As resinas são caracterizadas por numerosas ramificações, cujo grau depende da proporção e da natureza dos elementos estruturais, podendo ter enxofre, nitrogênio e oxigênio (Campos, 1998).

Os asfaltenos podem representar até 30% do asfalto e sua massa molecular pode ser de  $10^3$  a  $10^4$ , de acordo com a origem e modo de fabricação do asfalto (Campos, 1998).

### **2.3.2. Propriedades**

Segundo Hunter (1994) os ligantes asfálticos possuem duas importantes propriedades reológicas. A primeira delas relaciona-se com o fato de asfaltos serem termoplásticos, ou seja, de mudarem a sua viscosidade com o aumento ou a diminuição da temperatura. A outra propriedade fundamental diz respeito ao aspecto visco-elástico de ligantes asfálticos. Essa propriedade faz com que o asfalto apresente uma parcela de deformação irreversível e outra elástica quando sujeito a uma força externa.

No que diz respeito às propriedades físicas, o asfalto não é atraído para a superfície de partículas sólidas, em função de ser um material de baixa polaridade. Por esse motivo, quando o asfalto e a água estão juntos na presença de agregados, estes atrairão preferencialmente a água (Hunter, 1994).

A estrutura química dos asfaltos fazem deles materiais instáveis. Ao serem expostos ao calor e ao oxigênio, a estrutura química das resinas quebra-se e estas reduzem-se a asfaltenos. Essa reação é chamada de oxidação e faz com que ocorra o aumento da viscosidade e do módulo de elasticidade do material, com uma redução na sua ductilidade (Hunter, 1994).

#### 2.3.4. Polímeros modificadores dos asfaltos

Os polímeros são os agentes modificadores de asfalto mais comumente utilizados. Eles são macromoléculas nas quais um mesmo grupo de átomos é repetido por muitas vezes. Esses grupos repetidos podem ser formados por um ou vários tipos diferentes de moléculas (monômeros) (Corté, 1998).

Existe uma gama ampla de polímeros, mas somente alguns podem ser utilizados de forma vantajosa, tanto econômica quanto tecnicamente, para modificar o asfalto para as finalidades rodoviárias (Campos, 1998)

Segundo Corté (1998), os polímeros podem ser classificados em duas categorias principais:

- Termofixos ou termorrígidos: são aqueles que, por ação do calor, endurecem de forma irreversível. As suas moléculas formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade devido ao aumento da temperatura. Esse tipo de polímero é raramente combinado com asfalto para aplicações rodoviárias. Como exemplo, tem-se a resina epóxi e o poliuretano.
- Termoplásticos: são aqueles que, por ação do calor, amolecem de forma reversível. Essencialmente, são polímeros que apresentam macromoléculas com estrutura linear.

Os polímeros termoplásticos podem ser divididos em dois grupos distintos: elastômeros e plastômeros. Os elastômeros são aqueles polímeros que, pela forma enovelada de suas moléculas, são passíveis de grandes deformações reversíveis, ou seja, de caráter puramente elásticos. Já os plastômeros não apresentam propriedades elásticas tão

significativas, normalmente atuando apenas sobre a viscosidade do CAP.

#### 2.3.3.1. *Estireno-butadieno-estireno (SBS)*

O representante mais conhecido do grupo dos elastômeros é o copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS).

Os polímeros SBS, comumente utilizados em aplicações rodoviárias, possuem um peso molecular<sup>1</sup> variando entre 80.000 e 300.000. O estireno é normalmente presente em percentuais da ordem de 20 a 30% do peso total do polímero. Percentuais mais altos de estireno podem causar uma baixa compatibilidade com o ligante e acarretar problemas de dispersão e instabilidade no armazenamento (Corté, 1998).

Os compostos de estireno ao serem adicionados ao asfalto formam uma malha tridimensional que resulta em um aumento da viscosidade e da rigidez (Hunter, 1994).

O arranjo morfológico existente entre o ligante e o elastômero faz com que se tenha um comportamento semelhante ao da borracha vulcanizada. Dessa forma, a resposta elástica é bastante superior ao do ligante convencional, principalmente nas temperaturas de serviço (Corté, 1998).

O comportamento do ligante asfáltico modificado com SBS, no que diz respeito à variação da consistência com a temperatura, aproxima-se ao comportamento ideal, possibilitando pequenas variações na performance nas temperaturas de serviço (Corté, 1998).

---

<sup>1</sup> Peso molecular é o peso da molécula medido em unidades de massa atômica (u) (Feltre, 1990).

Os ligantes com elastômeros apresentam uma alta capacidade de alongamento conjugada com uma alta resistência à tração (Corté,1998; Campos, 1998).

As propriedades coesivas avaliadas através de testes empíricos, como temperatura de anel e bola e penetração, são fortemente modificadas com a incorporação de elastômeros (Corté, 1998).

Hunter (1994) apresenta alguns resultados que ilustram o efeito da adição de polímero SBS em um ligante asfáltico, conforme mostra a Tabela 2.1.

TABELA 2.1: Efeito do polímero SBS nas propriedades do ligante e da mistura asfáltica (Hunter, 1994)

Asfalto	Propriedades do asfalto		Afundamento de trilha de roda (mm/h)
	Penetração a 25°C (dmm)	Ponto de amolecimento (°C)	
50 pen	56	52,0	3,2
Cariphalte DM*	84	90,0	0,7

\* 50 pen + SBS

Um aumento no teor de polímero leva a um aumento na temperatura de anel e bola associada a uma pequena redução na penetração, que é representativa de uma baixa suscetibilidade térmica. Com o aumento da temperatura de anel e bola, ocorre um acréscimo na viscosidade (Corté, 1998).

Em condições de temperatura baixa o ligante torna-se frágil, podendo vir a fraturar. O ponto de ruptura Fraas define a temperatura crítica, na qual o asfalto torna-se fraturado (Hunter, 1994). Corté (1998) constatou que o aumento do teor de polímero diminui o ponto de ruptura Fraas.

A resposta elástica do ligante asfáltico pode ser avaliada através de análise das propriedades viscoelásticas

do ligante em um reômetro de cisalhamento dinâmico. Neste aparelho a amostra é submetida a uma tensão oscilatória de cisalhamento, com frequência fixa e temperatura variável, durante todo o intervalo viscoelástico do material (Silva et al., 2002).

A análise do comportamento reológico dos ligantes, por reometria de cisalhamento dinâmico, permite determinar, por exemplo, o módulo de cisalhamento elástico ( $G'$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). Esses parâmetros podem ser relacionados com a elasticidade e susceptibilidade térmica do ligante asfáltico (Silva et al., 2002).

Os asfaltos modificados por elastômeros geralmente conseguem resultados melhores do que ligantes convencionais, quando comparados através do ensaio de reometria de cisalhamento dinâmico. Com a modificação, observa-se um aumento nas propriedades elásticas do ligante, constatada através da diminuição do módulo de cisalhamento elástico ( $G'$ ) para temperaturas baixas e aumento do módulo para temperaturas altas (Corté, 1998).

Observa-se também que ocorre uma diminuição significativa na variação do ângulo de fase ( $\delta$ ) com a temperatura, ao adicionar-se teores crescentes de SBS, o que indica uma diminuição da suscetibilidade térmica (Corté, 1998).

#### 2.3.3.2. *Etileno-vinil-acetato (EVA)*

O Etileno-vinil-acetato (EVA) é produzido pela polimerização do etileno e do vinil acetato, e geralmente é compatível com a estrutura dos ligantes asfálticos. O EVA possui uma estrutura física randômica que é extremamente

compatível com a estrutura química do asfalto. O efeito desse copolímero é o aumento da viscosidade do ligante, sem, no entanto, ocorrerem mudanças significativas nas propriedades elásticas do mesmo (Hunter, 1994).

Esse polímero tem características diferentes conforme seu teor de acetato de vinila. Para teores baixos, terá características próximas às dos polietilenos de baixa densidade, ou seja, enrijecendo a mistura a temperaturas baixas, elevando sua viscosidade, mas não modificando as propriedades elásticas. À medida em que o teor de acetato de vinila aumenta (até 50%), o polímero resultante vai se tornando mais flexível. Entretanto, mesmo com teor mais elevado de acetato, o EVA continua não tendo propriedades elásticas (Hunter, 1994 e DNER, 1998).

Com adição do EVA ocorre a redução da penetração, o aumento da temperatura de anel e bola e a redução da suscetibilidade térmica. A magnitude dessas mudanças está diretamente relacionada com o percentual de polímero adicionado. Um aumento no teor de polímero acarreta um aumento na consistência a altas temperaturas e uma redução da suscetibilidade térmica (Corté, 1998).

## 2.4. MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS: CARACTERÍSTICAS GERAIS

### 2.4.1. Mecanismo de funcionamento

Concretos asfálticos porosos são misturas asfálticas projetadas de forma que, após seu espalhamento e compactação em campo, apresentem um volume de vazios superior a 20%. Essas misturas são utilizadas como camada de rolamento, sendo assentadas necessariamente sobre uma camada impermeável (Heystraeten e Moraux, 1990).

Devido ao seu alto volume de vazios, uma rede de canais é criada dentro da camada porosa, o que possibilita a rápida absorção da água da chuva (Heystraeten e Moraux, 1990).

Para que o revestimento poroso cumpra sua função, é necessário um adequado projeto a nível de pavimento, de forma que a água coletada seja adequadamente conduzida para os coletores laterais. Para isso é necessária a existência de uma camada impermeável com uma adequada declividade transversal, a fim de prevenir que a água atinja a sub-base ou que ocorra a estagnação da mesma no interior do revestimento poroso. Da mesma forma, é necessário que os coletores de água situem-se abaixo da cota da base do revestimento poroso (Heystraeten e Moraux, 1990).

## **2.4.2. Vantagens de utilização**

### *2.4.2.1. Aderência*

A performance de um revestimento convencional é drasticamente prejudicada com a ocorrência de tempo chuvoso. A aderência pneu - pavimento reduz-se sensivelmente e, em pontos críticos, existe ainda a possibilidade de ocorrência do fenômeno da aquaplanagem.

Nos revestimentos porosos, ocorre a absorção de água pelos seus poros, praticamente eliminando a ocorrência de hidroplanagem. Esse é, sem dúvida, o efeito mais importante obtido com esse tipo de pavimento (Campos, 1998).

Na superfície do revestimento poroso fica apenas um filme de água, que deve ser rompido pelas protuberâncias a nível de microrrugosidade, para que não haja prejuízo ao contato pneu-pavimento. Caso o agregado que constitui o revestimento poroso não tenha boas características de

microrrugosidade, poderá ocorrer a viscoplanagem, mesmo com a superfície apenas úmida (Campos, 1998).

A aderência é influenciada pela indentação do pneu nos pavimentos, que é função da área de contato pneu-pavimento. Nos revestimentos porosos, essa área de contato é menor do que em revestimentos convencionais. As forças de resistência à derrapagem a seco, desenvolvidas nos revestimentos porosos, também são menores (Campos, 1998).

#### *2.4.2.2. Visibilidade*

Devido ao fato de reduzirem sensivelmente a lâmina de água sob a pista, os revestimentos porosos diminuem sensivelmente a pulverização e a projeção de água pela passagem dos veículos.

Faure (1991) apresenta uma pesquisa de opinião com usuários franceses, que visou avaliar o incômodo causado por projeção de água em diversos tipos de revestimentos e nas várias condições de película de água. Os resultados mostraram que o revestimento poroso apresenta uma vantagem significativa de conforto quando comparado com revestimentos densos.

A ausência de lâmina de água sobre a pista também elimina o fenômeno de espelhamento da superfície, que ocorre com revestimentos convencionais. Devido a isso, a eficiência da sinalização horizontal com o uso de revestimentos porosos é aumentada significativamente (Lefebvre, 1993).

#### *2.4.2.3. Ruído*

A utilização de revestimentos porosos faz com que ocorra uma redução de ruído de 3 a 7 dB, comparando-se aos revestimentos convencionais.

Isenring et al. (1990) afirmam que a redução do nível de ruído chega a 4 dB, se comparado com revestimentos asfálticos densos, e 7 dB, quando se compara com pavimentos de concreto.

Já Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) observaram que os revestimentos porosos estudados diminuíram os níveis de ruído em 3 dB, se comparados com CBUQ, e 5 dB, se comparados com Microconcreto a frio.

Essa redução deve-se à absorção dos ruídos pelos vazios da mistura e à eliminação de bombeamento de ar na interface pneu-pavimento. Além disso, o contato pneu-pavimento poroso ocasiona uma mudança de frequência do ruído produzido, o que proporciona um melhor conforto sonoro (Isenring et al., 1990).

A propriedade de redução de níveis sonoros foi o principal motivo de utilização do revestimento poroso na Bélgica e na Holanda. Como conseqüência, houve uma diminuição do uso de revestimentos de concreto de cimento, apesar de ser tradição local e da sua comprovada durabilidade e pouca necessidade de manutenção. Dessa forma, os revestimentos porosos são alternativas para as proteções físicas anti-ruídos, definindo-se sua utilização em função de uma comparação custo-benefício (Campos, 1998).

#### *2.4.2.4. Consumo de combustível*

Lefebvre (1993) salienta que uma das vantagens do uso de revestimentos porosos está no fato de que os mesmos

proporcionam uma menor resistência ao rolamento. Esse fato explica que, em alguns casos, a economia de combustível pode ser significativa, da ordem de 1 a 2%.

Fabb (1992), citado por Khalid e Pérez-Jiménez (1996), observou que a utilização de revestimentos porosos ocasiona uma diminuição do consumo de combustível de até 2% em relação aos revestimentos convencionais. O autor acrescenta que a redução no consumo de combustível depende do tipo de revestimento asfáltico usado como comparação.

#### *2.4.2.5. Número de acidentes*

Lefebvre (1993) afirma que os estudos sobre acidentes necessitam de uma ampla amostragem, já que a variabilidade do número de acidentes é considerável. Dessa forma, os estudos sobre acidentes disponíveis não incluem dados suficientes sobre rodovias com concreto asfáltico poroso.

Por outro lado, Lefebvre (1993) acrescenta que na Holanda, apesar de apenas 5% do tempo total ser chuvoso, 15,3% dos acidentes são registrados nesse período. Esse fato sugere que o risco de ocorrência de acidentes com chuva é três vezes maior do que o risco com o tempo seco. Pelo fato de os revestimentos asfálticos porosos apresentarem características de segurança na chuva superiores aos revestimentos convencionais, o autor acredita que ocorre uma redução no nível de acidentes.

Zwan et al. (1990) afirmam que o número de acidentes em tempo chuvoso pode ser reduzido em até 3,5 vezes com a utilização de revestimentos asfálticos porosos. Os autores afirmam que essa conclusão baseou-se nas estatísticas sobre o número de ocorrência de acidentes em tempo chuvoso e seco. Entretanto, deve-se salientar que não existem

pesquisas conclusivas acerca da referida redução com o uso de misturas porosas.

### **2.4.3. Desvantagens de utilização**

#### *2.4.3.1. Custos de construção*

O custo de construção dos concretos asfálticos porosos geralmente é mais alto em função da necessidade de uso de agregados de alta qualidade (boa resistência ao polimento e ao quebramento) e, principalmente, pela necessidade de utilização de ligantes modificados com polímeros (Campos, 1998).

Decoene (1990) afirma que estudos realizados na Bélgica têm mostrado que a utilização de ligantes modificados por polímeros acresce em 40% o custo de construção do revestimento poroso em relação a utilização de ligantes convencionais. Além disso, o autor afirma que o aumento de 1% no percentual de ligante convencional empregado em conjunto com a adição de 0,3% de fibra aumenta o custo do revestimento poroso em torno de 10%.

Lefebvre (1993) afirma que o uso de revestimentos porosos provoca um maior consumo de sinalização horizontal, pois há penetração parcial de tinta. Por outro lado, ocorre um aumento da vida útil da sinalização horizontal devido a maior macrotextura dos concretos porosos.

Em alguns casos, a necessidade da existência de uma camada impermeável subjacente ao revestimento poroso pode aumentar os custos de construção (Lefebvre, 1993).

Pelo fato de a capacidade estrutural do revestimento poroso ser menor do que a do concreto betuminoso

convencional, há a necessidade de utilização de espessuras maiores de revestimento (Lefebvre, 1993; Campos, 1998).

#### 2.4.3.2. *Manutenção*

Com relação à manutenção, um problema crucial é a conhecida redução de permeabilidade do revestimento poroso ao longo do tempo, notadamente nos acostamentos e em rodovias pouco movimentadas. Com o passar dos anos, os detritos acabam por acumular-se nos poros do revestimento fazendo com que a permeabilidade diminua sensivelmente. Em virtude disso, há a necessidade de fazer a desobstrução periódica dos poros do revestimento utilizando equipamentos especiais (Lefebvre, 1993; Campos, 1998).

#### 2.4.3.3. *Vida útil*

Zwan et al. (1990) salientam que a vida de serviço do concreto asfáltico poroso é um fator extremamente importante quando se pretende fazer uma análise custo-benefício.

Esses autores realizaram experimentos em 11 seções ao longo de movimentadas rodovias com tráfegos da ordem de 60.000 veículos por dia. As seções analisadas possuíam extensão total de aproximadamente 10 km e situavam-se em diversas localidades da Holanda.

Com base nesses experimentos, foi concluído que a vida de serviço para as misturas porosas na Holanda é de cerca de 10 anos, contra uma vida de serviço de cerca de 12 anos para concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) (Zwan et al., 1990).

Campos (1998) afirma que o período estipulado para misturas porosas é de 10 a 12 anos.

Lefebvre (1993) acrescenta que a vida de serviço de misturas porosas não se baseia unicamente em critérios convencionais, por exemplo, trincamento e afundamento de trilha de roda. Deve-se considerar, no caso de misturas porosas, quando as condições mínimas de drenabilidade do revestimento vão ser atingidas. O autor salienta que, neste caso, a vida de serviço pode diminuir em até 30%.

#### **2.4.4. Critérios de projeto**

A principal característica mecânica a ser levada em conta no projeto de misturas asfálticas porosas é a resistência ao desgaste. A observação de seções em serviço revela que a ocorrência de desagregação, panelas e arrancamento de agregados é bastante comum nesse tipo de pavimento. Essas deficiências devem-se a queda de coesão da mistura, que a torna inadequada para resistir as ações abrasivas do tráfego. Os revestimentos porosos devem possuir uma adequada resistência ao desgaste a fim de absorver os esforços tangenciais e de sucção devidos ao tráfego (Pérez-Jiménez e Gordillo, 1990).

Ruiz et al (1990) afirmam que o projeto de misturas asfálticas porosas deve contemplar dois aspectos fundamentais. O primeiro deles diz respeito à quantidade mínima de ligante asfáltico a fim de garantir uma boa resistência à desagregação e um bom cobrimento dos agregados. O segundo aspecto importante relaciona-se à máxima quantidade de ligante a fim de evitar o escorrimento do mesmo e, ao mesmo tempo, evitar a diminuição da capacidade drenante do pavimento.

Além da resistência ao desgaste, as misturas asfálticas porosas devem possuir um alto volume de vazios a fim de manter suas características benéficas a médio e longo prazo. As vantagens que esse tipo de mistura oferece ao tráfego de veículos é diretamente proporcional à permeabilidade da mistura empregada. Quanto maior é a permeabilidade, maior é a capacidade do pavimento absorver a água e, conseqüentemente, mais difícil é a ocorrência de aquaplanagem ou derrapagem de veículos (Pérez-Jiménez e Gordillo, 1990).

Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) afirmam que o grande problema de dosagem de misturas asfálticas porosas decorre da existência de dois fatores opostos: porosidade e coesão. Um aumento na porosidade sempre representa uma perda de coesão e a conseqüente queda na resistência à desintegração. Devido a esse motivo, muitas vezes é difícil obter uma solução satisfatória com o uso de ligantes convencionais. Por isso, usualmente recorre-se a utilização de ligantes modificados por polímeros a fim de melhor equacionar esses fatores de projeto opostos. Além disso, a utilização de ligantes modificados por polímeros apresentam outros efeitos favoráveis nas misturas porosas. A sua utilização proporciona o aumento da espessura do filme de ligante sobre o agregado, a redução do risco de escorrimento de ligante, o aumento da coesão da mistura e o aumento da durabilidade da mistura.

Observou-se que a curva granulométrica utilizada nas misturas porosas influencia diretamente a sua capacidade drenante, a resistência à desagregação, a resistência à deformação permanente e a macrotextura. A escolha da curva granulométrica deve ser feita de tal forma a fim de obter-se uma alta quantidade de agregados graúdos. Nos espaços intersticiais desses agregados, são acomodadas as frações

mais finas da curva granulométrica, adicionadas em percentuais suficientemente pequenos a fim de garantir um adequado volume de vazios (Ruiz et al., 1990).

Segundo Ruiz et al. (1990), os agregados graúdos utilizados em misturas asfálticas porosas devem possuir grande resistência à fragmentação, boas características de microtextura e adequado intertravamento. A fragmentação de agregados pode levar ao arrancamento dos mesmos e à colmatação do revestimento poroso.

As características friccionais da superfície do revestimento poroso fazem com que seja necessário o uso de agregados com uma boa e durável microtextura. Em função disso, os autores recomendam que o valor do *Polished Stone Value*<sup>2</sup> (PSV) seja superior a 0,45 para rodovias com volumes de tráfego superiores a 800 caminhões por pista e 0,40 para outros volumes de tráfego (Ruiz et al., 1990).

Constatou-se que é necessário um bom nível de fricção interna entre os agregados graúdos a fim de não ocorrer afundamentos de trilha de roda e diminuição da permeabilidade da camada drenante (Ruiz et al., 1990).

Os autores afirmam que a principal razão de utilizar-se ligantes modificados por polímeros decorre da necessidade de aumentar-se a resistência ao arrancamento de agregados devido ao aumento da coesão. Além disso, o uso de ligantes modificados por polímeros possibilita uma maior durabilidade da mistura em função do aumento da espessura de ligante sobre os agregados. A redução da suscetibilidade térmica da mistura asfáltica também é um fator que justifica o emprego de ligantes modificados por polímeros.

---

<sup>2</sup> O *Polished Stone Value* é uma medida de resistência à abrasão dos agregados. Quanto maior é o valor do PSV, maior é a resistência à abrasão (British Standards Institution, 1989).

Essa redução faz com que a mistura apresente uma maior consistência a altas temperaturas e uma maior flexibilidade a baixas temperaturas (Ruiz et al., 1990).

Zwan et al. (1990) afirmam que na Holanda os fatores utilizados como base de análise de custo/benefício na aplicação de revestimentos porosos são propriedades estruturais (como vida de serviço e resistência mecânica), custo dos materiais, questões relativas à segurança, comportamento do tráfego, custos de manutenção e emissão de ruído.

#### *2.4.4.1. Método tradicional*

O projeto de misturas asfálticas porosas envolve a realização de ensaios de abrasão Cantabro a partir de corpos de prova moldados segundo a metodologia Marshall. Os corpos-de-prova devem possuir menos de 25% de perda no ensaio Cantabro e mais de 20% de volume de vazios. (Ruiz et al., 1990; Campos, 1998; Lefebvre, 1993).

O teor mínimo de asfalto necessário normalmente é dado em função da máxima perda ao desgaste no ensaio Cantabro. Já o teor máximo de ligante é obtido levando-se em consideração o volume de vazios necessários e o valor máximo de escoamento de ligante no transporte (Ruiz et al., 1990; Campos, 1998; Lefebvre, 1993).

Deve-se observar que os teores de asfalto mais altos, dentro dessa faixa admissível, representam películas de ligante mais espessas, o que proporciona maior resistência à oxidação e maior ligação entre os agregados, aumentando a durabilidade do revestimento (Campos, 1998)

#### 2.4.4.2. Metodologia proposta por Khalid e Pérez-Jiménez (1996)

A metodologia proposta por Khalid e Pérez-Jiménez (1996) baseia-se na realização de ensaios de módulo de resiliência, permeabilidade e Cantabro a fim de avaliar, respectivamente, a capacidade estrutural, a drenabilidade e a resistência à desagregação de revestimentos porosos.

Além desses aspectos, é recomendada a investigação acerca do potencial de escoamento de ligante de misturas porosas através de um ensaio complementar.

O Quadro 2.5 reproduz a metodologia de projeto proposta.

QUADRO 2.5: Metodologia de projeto (Khalid e Pérez-Jiménez, 1996)

Teor de ligante	Propriedade da mistura	Requerido
Máximo	Escoamento de ligante	$\leq 0,3\%$
Mínimo	Módulo de resiliência (20°C)	$\geq 2.000$ MPa
Máximo	Drenabilidade: a. Vazios b. Permeabilidade	$>16\%$ $>25$ m/dia
Mínimo	Resistência à desintegração (Ensaio Cantabro a 20°C)	$\leq 25\%$

A fim de avaliar a desintegração causada pela água, é recomendado também que a mistura, após 24h imersa em água a 20°C, apresente um módulo residual de pelo menos 70% do valor inicial.

A mesma condição pode ser utilizada com o ensaio Cantabro a fim de avaliar a adesividade do ligante, especialmente com a utilização de ligantes modificados ou com a adição de fibras.

#### 2.4.4.3. Metodologia proposta por Mallick et al. (2000)

Mallick et al. (2000) afirmam que o projeto de misturas asfálticas porosas inicia-se com a seleção dos materiais constituintes.

A escolha do ligante deve ser baseada em critérios relativos ao clima, tráfego e expectativa da performance da mistura em campo. Ligantes mais rígidos, modificados com polímeros, são recomendados para climas quentes, médios a altos volumes de tráfego e misturas com volume de vazios superior a 22%. A adição de fibra também é recomendável nessas condições, além de diminuir o escoamento de ligante.

A segunda parte do processo de dosagem consiste na escolha da faixa granulométrica que, segundo os autores, deve ser semelhante à apresentada na Tabela 2.2.

TABELA 2.2: Faixa granulométrica a ser utilizada (Mallick et al., 2000)

Peneira	Passante (%)
19mm (3/4")	100
12,5mm (1/2")	85-100
9,5mm (3/8")	55-75
4,75mm (n° 4)	10-25
2,36mm (n° 8)	5-10
0,075mm (n° 100)	2-4

Para isso, devem ser selecionadas três amostras diferentes, englobando os pontos médios da faixa granulométrica e os seus limites superior e inferior. Para cada amostra, deve ser determinado os vazios na fração graúda, ou seja, o "*voids in coarse aggregate*" ( $VCA_{DRC}$ ).

A seguir, para cada curva granulométrica deve-se moldar corpos-de-prova com teores de asfalto entre 6 e 6,5% e determinar o VCA da mistura compactada. Se o VCA da mistura compactada for menor ou igual que o  $VCA_{DRC}$ , então existe o embricamento dos agregados graúdos, que

possibilita um bom comportamento à deformação permanente. Dentre as amostras que satisfizerem esses requisitos, deve-se escolher a que tiver maior volume de vazios.

Escolhidos a curva granulométrica e o tipo de ligante, deve-se selecionar três misturas com incrementos no teor de asfalto de 0,5%. As amostras devem ser ensaiadas ao escorrimento de ligante, a uma temperatura 15°C mais elevada do que a temperatura de produção. Os corpos-de-prova devem ser submetidos a diferentes ensaios, conforme apresenta o Quadro 2.6.

QUADRO 2.6: Critérios de projeto para revestimentos porosos segundo Mallick et al. (2000).

Ensaio	Requisitos
- Índice de vazios	- Superior a 18%.
- Cantabro	- Perda inferior a 20%.
- Cantabro com amostras envelhecidas	- Perda inferior a 30%.
- Deformação permanente (opcional)	-
- Permeabilidade (opcional)	- Superior a 100m/dia.

#### 2.4.5. Recomendações construtivas

Apesar de revestimentos asfálticos porosos serem utilizados em pavimentos novos, a principal aplicação refere-se ao reparo de camadas asfálticas sem danos estruturais. Essa alternativa pode ser mais vantajosa, sob o ponto de vista da durabilidade, do que o uso de misturas convencionais densas, micro asfaltos ou tratamentos superficiais (Ruiz et al., 1990).

Ruiz et al. (1990) afirmam que as normas do *General Direction of Roads of MOPU* preconizam o uso de camadas drenantes com espessuras de 4 cm, que seriam suficientes para garantir uma boa drenabilidade. Camadas menos espessas acarretariam uma má performance do revestimento sujeito a

chuvas intensas associada a uma redução da durabilidade da camada.

A espessura usualmente utilizada para revestimentos porosos na Holanda é de 50 mm, o que garante que apenas em situações excepcionais a água estará na superfície do revestimento (Zwan et al., 1990).

Para pavimentos com base granular ou asfáltica, misturas convencionais abertas ou semi abertas podem ser substituídas por misturas asfálticas porosas de espessura semelhante. Já os pavimentos com bases tratadas com cimento, nos quais o principal objetivo da camada asfáltica é evitar a reflexão de trincas, deve-se majorar espessura total da camada em 2cm quando utiliza-se revestimentos porosos. Esse procedimento possibilita a prevenção da ocorrência de reflexão de trincas, evitando assim complexas intervenções na estrutura do pavimento (Ruiz et al., 1990).

A aplicação da camada porosa sobre o revestimento antigo deve ser precedida de reparo e nivelamento de grandes irregularidades. A utilização de revestimentos porosos em pavimentos com reflexão de trincas na superfície não é uma solução adequada (Ruiz et al., 1990).

A utilização de revestimentos porosos deve ser cuidadosamente estudada em áreas urbanas ou industriais, onde existe a ocorrência de derramamentos de produtos químicos sobre a pista e em áreas com forte tendência a ocorrer reflexão de trincas, seja por retração ou por fadiga. O mesmo se aplica a pavimentos de pontes, especialmente em regiões frias (Ruiz et al., 1990).

Ruiz et al. (1990) afirmam que antes da execução do revestimento poroso deve assegurar-se da existência de uma

camada subjacente impermeável e com uma satisfatória capacidade estrutural.

#### **2.4.6. Propriedades físicas e mecânicas**

##### *2.4.6.1. Resistência ao desgaste*

Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) afirmam que a resistência à desagregação é a propriedade mais importante das misturas porosas. Segundo os autores, é na resistência ao desgaste que os efeitos decorrentes da utilização de ligantes modificados ficam mais evidentes.

Os resultados dos ensaios Cantabro obtidos pelos autores apresentaram uma clara vantagem na utilização de ligantes modificados por polímeros em relação aos ligantes convencionais. Utilizando o mesmo percentual de ligante e com o mesmo volume de vazios, o uso de ligante modificado reduz a perda em massa entre 15 e 20% em peso total do corpo de prova. Além disso, os autores constataram que a não utilização de polímeros adicionados ao ligante acarretou a rejeição de quase todas as misturas estudadas segundo a norma espanhola, que preconiza que a perda em massa deve ser de no máximo 35%. Apenas a mistura com 5,5% de ligante convencional atendeu a normalização espanhola, mas com a conseqüente redução de permeabilidade e possibilidade de escorrimento do ligante devido à utilização de altas quantidades do mesmo (Pérez-Jiménez e Gordillo, 1990).

Campos (1998) executou um trecho piloto de concreto asfáltico na Rodovia dos Bandeirantes. Os resultados obtidos foram comparados com um trecho de referência executado com CBUQ, conforme apresenta o Quadro 2.7.

QUADRO 2.7 - Porcentagem de área de desagregação nos trechos piloto e de referência (Campos, 1998)

Ano	Trecho piloto	Trecho de referência
1993 (ano 1)	0	0
1995 (ano3)	0	0
1996 (ano 4)	33 (NSB)	33 (NSB)
1997 (ano 5)	50 (NSM)	33 (NSB)

NSB: nível de severidade baixo; NSM: nível de severidade médio.

Constatou-se que a inadequada resistência ao desgaste do revestimento aplicado acarretou a sua desagregação precoce. O autor observou que para valores de tráfego da ordem dos que ocorrem na Rodovia dos Bandeirantes ( $5 \times 10^6$  solicitações por ano), devem ser cogitadas exigências mais restritivas com relação à perda no ensaio Cantabro em misturas porosas a serem aplicadas (Campos, 1998).

Verhaegue (1993) realizou estudos de laboratório a fim de avaliar misturas porosas com ligantes convencionais e com ligantes modificados por polímeros. Os ensaios realizados indicaram que a perda ao desgaste é menor em misturas porosas com ligante modificado por polímeros, particularmente com o SBS.

Khalid e Pérez-Jiménez (1996) observaram que a perda ao desgaste decresce com o aumento do teor de asfalto. Os ensaios foram realizados a 20°C com dois tipos diferentes de asfalto (100pen e 200pen) e teores variando de 4,2 a 6,3%. Independentemente do tipo de asfalto, todos os corpos-de-prova apresentaram semelhante comportamento ao desgaste para o mesmo teor de ligante.

Mallick et al. (2000) afirmam que ocorre um aumento da resistência ao desgaste com o acréscimo do teor de asfalto. Entretanto, essa resistência é também dependente das propriedades reológicas do ligante. Misturas asfálticas porosas executadas com asfaltos modificados apresentam um

melhor comportamento ao desgaste quando comparadas com misturas feitas de ligantes comuns.

Os autores constataram que a perda ao desgaste pode ser reduzida utilizando-se asfaltos modificados com polímeros combinados com a adição de fibras. Os ensaios realizados mostraram que ocorre o aumento da perda ao desgaste conforme diminui-se a quantidade de agregados passante na peneira 4,75mm (Mallick et al., 2000).

#### *2.4.6.2. Módulo de resiliência*

Lefebvre (1993) afirma que é difícil estabelecer uma equivalência de espessuras entre revestimentos porosos e misturas densas. O autor acrescenta que alguns países consideram que uma camada de 4 cm de concreto asfáltico poroso é equivalente a 3 cm de uma mistura densa. Outros mais conservadores estabelecem para os revestimentos porosos um módulo de resiliência de cerca de 50% do módulo de revestimentos convencionais.

Zwan et al. (1990) constataram através de ensaios de fadiga que o módulo de resiliência inicial de revestimentos porosos é da ordem de 80% do valor do módulo do CBUQ. Em função disso, pode-se esperar uma contribuição estrutural entre 80 e 90% da contribuição do CBUQ, dependendo da espessura do pavimento.

Campos (1998) afirma que, no que diz respeito a recomendações estruturais, existem sugestões para que, utilizando-se uma camada porosa, deva-se majorar a espessura especificada de concreto asfáltico convencional em 60%. Dessa forma, poderia-se tirar partido tanto das características de drenabilidade e atrito desse material,

como da melhor característica estrutural do concreto asfáltico.

Jair (1997) afirma que as experiências de determinação de módulo de resiliência feitas na Europa apontaram para módulos da ordem de 2000 a 4000 MPa, que situariam-se entre 50 e 75% dos valores para misturas convencionais.

Khalid e Pérez-Jiménez (1996) realizaram ensaios de módulo de resiliência a 20°C para misturas porosas aplicadas na Inglaterra e Espanha. Foram utilizados dois tipos diferentes de asfalto e variados os respectivos teores. Os resultados apresentam valores de módulo de resiliência que variam entre 1.600 MPa e 3.300 MPa, dependendo da formulação de cada mistura. Constatou-se que ocorre a diminuição do módulo de resiliência com o aumento do teor de asfalto.

Campos (1998) realizou ensaios de módulo de resiliência a 10°C e a 25°C. Os resultados mostraram valores de módulo muito baixos, o que, segundo o autor, é coerente com o relatado na bibliografia internacional de que a contribuição estrutural da camada porosa pode ser, em alguns casos, nula.

Campos (1998) afirma que, para pavimentos do tipo dos existentes na Rodovia dos Bandeirantes, espessos e de características semi-rígidas, a utilização combinada de CBUQ e revestimento poroso pode reduzir de forma significativa os valores de deflexão elástica inicial. Contudo, a utilização de 10 cm de CBUQ no trecho de referência teve maior eficiência, sob o ponto de vista de redução de deflexões, do que a aplicação de 6 cm de CBUQ e 4 cm de revestimento poroso.

#### 2.4.6.3. Condutividade hidráulica

Campos (1998) realizou ensaios de permeabilidade que consistiram em retirar corpos de prova do revestimento, encaixá-los em um tubo com o mesmo diâmetro do corpo de prova e impermeabilizar os pontos de contato, de forma que a água passasse apenas pelas suas faces. Impondo uma coluna de água constante, o autor mediu a vazão e deduziu a permeabilidade. As amostras foram retiradas do trecho experimental logo após a construção e após transcorridos 1, 2 e 5 anos. Os resultados obtidos indicam uma perda de 60% da permeabilidade inicial para uma idade de 5 anos.

Ruiz et al. (1990) observaram que o rápido decréscimo da permeabilidade das misturas porosas com índices de vazios menores do que 20% dependia das condições da área e do tipo de tráfego. Segundo os autores, quanto mais fechadas eram as misturas e maior era o volume de tráfego, menor era o tempo de colmatação da camada drenante.

Já Khalid e Pérez-Jiménez (1996) utilizaram um equipamento similar, no que diz respeito aos princípios de funcionamento, aos permeômetros utilizados *in situ* na Espanha e na Suíça. O equipamento consiste em um cilindro de vidro com 83,5 mm de diâmetro. O cilindro é colocado em contato com um corpo de prova Marshall. Mede-se o tempo de percolação da água entre duas marcas do cilindro. Se o tempo de escoamento for maior do que 180 segundos, o corpo de prova é rejeitado. Os resultados apresentaram uma alta variabilidade, tendo o desvio padrão atingido 40% do valor da média aritmética.

Semelhante conclusão teve o estudo desenvolvido pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1998), cujos resultados apresentaram uma alta variabilidade. O trabalho desenvolvido teve como objetivo a aplicação de

revestimento drenante na Rodovia Presidente Dutra. Dentre outros, foi utilizado o ensaios proposto por Heystrasten e Moraux (1990).

Serfass e Samanos (1996) afirmam que a combinação de um alto teor de asfalto com a adição de fibras resulta em um grande volume de ligante, que passa a ocupar um maior espaço na mistura, ocasionando, dessa forma, a diminuição da permeabilidade.

Mallick et al. (2000) afirmam que resultados obtidos em pavimentos executados em campo, seis anos após a construção, mostraram que o uso de fibras de celulose faz com que diminua-se a perda da permeabilidade com o passar do tempo.

Huet et al. (1990), em estudos realizados em pista experimental, observaram que a utilização de fibras manteve as características hidráulicas do revestimento constante ao longo do experimento.

Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) constataram que o volume de vazios inicial do revestimento influencia significativamente a sua permeabilidade a longo prazo. Os resultados obtidos demonstraram que revestimentos porosos apresentando um volume de vazios entre 16% e 18% tiveram problemas de colmatação a curto prazo, ao contrário de revestimentos com volumes de vazios superiores.

#### *2.4.6.4. Resistência à tração*

Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) realizaram ensaios de resistência à tração por compressão diametral nas temperaturas de 5°C e 45°C e com uma velocidade de carregamento de 50,8 mm/min. Os resultados obtidos atestam

a melhor performance dos corpos de prova feitos com o ligante modificado por polímeros. Segundo os autores, a diferença nos resultados é mais significativa a 45°C do que a 5°C. Isso pode ser explicado em função da baixa velocidade de aplicação do carregamento que manifestou a diferença de flexibilidade e rigidez dos dois ligantes utilizados. Os resultados obtidos demonstram um aumento da resistência à tração de 20 a 30% em relação ao ligante convencional com a utilização de ligante modificado.

#### 2.4.6.5. Deformação Permanente

Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) observaram que, nos ensaios de deformação plástica do tipo "*wheel tracking test*" realizados a 60°C, os corpos de prova confeccionados com ligante modificado apresentaram uma maior resistência a deformações plásticas do que os corpos de prova com ligante convencional. Constatou-se também que o uso de ligantes modificados pode diminuir o efeito de pós compactação devido ao tráfego, bastante comum em revestimentos porosos.

Huet et al. (1990), em ensaios realizados em pista experimental, constataram que a seção na qual foi adicionado 1% de fibra mineral apresentou deformações permanentes significativamente inferiores às obtidas por seções sem fibras.

Campos (1998) observou que os valores apresentados de afundamentos de trilhas de roda em revestimentos porosos foram muito baixos, indicando a boa resistência desta mistura a deformações plásticas, visto que não foram observados outros tipos de deformações permanentes no período de acompanhamento. O autor constatou que ocorre o

aumento das deformações permanentes com o acréscimo de asfalto.

Mallick et al. (2000) realizaram ensaios de deformação permanente a uma temperatura de 64°C e 8.000 ciclos de carregamento. Os resultados indicaram um melhor comportamento de misturas com asfaltos modificados com polímeros. Constatou-se que o uso combinado de fibras e ligantes modificados apresentou as menores deformações permanentes.

Zwan et al. (1990) afirmam que estudos realizados na Holanda têm demonstrado que os revestimentos porosos utilizados naquele país apresentam uma boa resistência a deformações permanentes.

Lefebvre (1993) atribui o bom comportamento às deformações permanentes ao embricamento dos agregados graúdos e às pequenas espessuras normalmente utilizadas.

Com o objetivo de estudar os papéis da estrutura dos agregados e do ligante na resistência a deformações permanentes, Brown e Gibb (1996) realizaram ensaios em pista experimental, ensaios de *creep* sem tensão de confinamento, ensaios de *creep* com tensão de confinamento e ensaios do tipo *wheel tracking*. Os resultados obtidos indicam que a aplicação de tensão de confinamento é importante para misturas cujo mecanismo de resistência a deformações permanentes deve-se à fricção e ao intertravamento entre os agregados. Por esse motivo, a utilização de ensaios com confinamento é recomendada para misturas asfálticas porosas.

## CAPÍTULO III

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental teve como objetivo avaliar a influência do percentual de asfalto e teor de fibra nas propriedades do concreto asfáltico poroso.

Para tanto, o programa experimental foi dividido em três fases distintas e cronologicamente sucessivas: planejamento do experimento, moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios propostos.

No planejamento do experimento utilizou-se a teoria de projeto de experimentos a fim de se obter a completa caracterização do comportamento da mistura estudada com um mínimo de corpos de prova necessários.

A moldagem dos corpos de prova obedeceu as premissas obtidas na fase de planejamento do experimento e o número de corpos de prova necessários para a realização de todos os ensaios planejados.

Os ensaios propostos buscaram avaliar não somente as propriedades básicas de misturas asfálticas porosas (permeabilidade, resistência à tração, módulo de

resiliência a 25°C e a 45°C), mas também as propriedades relacionadas com alguns dos mecanismos de deterioração conhecidos (desgaste e deformação permanente). Dessa forma, foi possível fazer uma análise mais ampla da influência dos fatores controláveis (teor de fibra, percentual de asfalto e percentual de agregados) nas propriedades do concreto asfáltico poroso estudado.

### 3.2. PROJETO DO EXPERIMENTO

O projeto do experimento contou com o auxílio do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da UFRGS. O objetivo a ser atingido através dessa metodologia é o de possibilitar a utilização de ferramentas de análise mais poderosas do que as utilizadas usualmente e diminuir o número de corpos de prova a serem moldados. Para isto utilizou-se a teoria de planejamento de experimentos.

Essa teoria baseia-se na escolha de fatores controláveis, que são aqueles pertinentes ao estudo de um determinado comportamento. Além disso, é escolhida a faixa de intervalos a ser estudada para cada fator controlável. Neste contexto existem também alguns fatores controláveis que são mantidos fixos. Esses fatores são aqueles que, apesar de influenciarem no comportamento de um determinado experimento, estão fora do escopo de um trabalho por questões financeiras ou temporais.

Em um planejamento de experimentos existem as chamadas variáveis de resposta que são grandezas mensuráveis utilizadas para representar as características de qualidade do objeto de estudo, com as quais possuem forte relação.

No presente trabalho os fatores controláveis estudados foram: teor de asfalto (TA), teor de fibra (TF) e percentual de agregados (PAgr.). Definindo-se os fatores controláveis a serem estudados partiu-se para a escolha dos intervalos de variação dos mesmos. Esta escolha baseou-se nas experiências brasileira e internacional. A tabela 3.1 apresenta os fatores controláveis estudados bem como os intervalos analisados.

TABELA 3.1. Fatores controláveis de interesse.

<b>Fator controlável</b>	<b>Faixa de variação (%)</b>
Teor de asfalto	3,5 - 6,5
Teor de fibra	0 - 1
Percentual de agregados	92,5 - 96,5

A partir da escolha dos intervalos de interesse foram definidos o número de corpos de prova necessários para cada experimento, bem como os teores de cada um deles. A tabela 3.2 apresenta os corpos de prova necessários para a realização de um experimento qualquer sem repetição.

TABELA 3.2. Resumo dos teores usados na confecção dos corpos de prova tipo

<b>CP</b>	<b>Teores (%)</b>		
	<b>Agregados</b>	<b>Asfalto</b>	<b>Fibra</b>
1	95,73	4,12	0,15
2	95,17	3,98	0,85
3	93,83	6,02	0,15
4	93,27	5,88	0,85
5	95,84	3,66	0,50
6	93,16	6,34	0,50
7	94,90	5,10	0
8	94,10	4,90	1,00
9	94,50	5,00	0,50
10	94,50	5,00	0,50

Em função de limitações do número de corpos de prova, alguns fatores pertinentes no desempenho de misturas asfálticas foram mantidos constantes. Estes fatores são os chamados fatores controláveis mantidos fixos e apresentam-se na tabela 3.3.

TABELA 3.3. Fatores controláveis mantidos fixos no programa experimental

<b>Fator controlável</b>	<b>Nível fixado</b>
Tipo de fibra	Vidro
Comprimento de fibra	6,4 mm
Tipo de polímero adicionado ao asfalto	SBS
Teor de polímero adicionado ao asfalto	4%
Rocha de origem dos agregados	basalto
Faixa granulométrica	conforme fig. 3.1
Filer adicionado	cal
Teor de filer adicionado	2%

Após a realização dos ensaios, efetuou-se análises de regressão múltipla, estudos de correlação e análise de variância de forma a modelar da melhor maneira possível o comportamento das misturas asfálticas porosas estudadas.

### 3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

#### 3.3.1. Agregados

Os revestimentos porosos necessitam de agregados de altíssima qualidade que sejam oriundos de processo de britagem, apresentando índice de forma superior a 0,5 e uma curva granulométrica adequada para manter o volume de vazios entre 18 % e 25 %.

Os agregados utilizados neste trabalho foram obtidos na pedreira do Consórcio Construtor TRS - *Freeway*, localizado no Município de Santo Antônio da Patrulha. A rocha constituinte da pedreira é basáltica. O índice de forma deste material é de 0,8, segundo a normalização ME 086/94 do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER.

A coleta do material foi feita em silo quente, que possibilitava separá-lo em três frações: agregado graúdo, pedrisco e pó. O material coletado foi peneirado

manualmente, a fim de situar-se exatamente no meio da faixa granulométrica escolhida.

Utilizaram-se duas faixas granulométricas neste trabalho. Como a primeira delas (faixa francesa) não apresentou as características de qualidade necessárias, resolveu-se adotar uma faixa espanhola. Ambas as faixas utilizadas encontram-se apresentadas na tabela 3.4 e na figura 3.1.

TABELA 3.4. Faixas granulométricas utilizadas no programa experimental

PENEIRAS		PASSANDO			
		FRANÇA		ESPAÑHA	
ABNT	mm	FAIXA	CURVA	FAIXA	CURVA
3/4"	19,0			100	100
1/2"	12,5	100	100	75 - 100	87,5
3/8"	9,5	85 - 90	87,5	60 - 80	70
n° 4	4,75	20 - 22	21	32 - 46	39
n° 8	2,38	12 - 14	13	10 - 18	14
n° 30	0,59	-	-	6 - 12	9
n° 200	0,075	1 - 2	1,5	3 - 6	4,5

No preparo dos corpos de prova substituiu-se 2% em peso do material passante na peneira n° 200 por igual quantidade de cal hidratada da marca Primor. A adição desse filer está de acordo com diversas recomendações da literatura nacional e internacional. Segundo Lefebvre (1993), o objetivo da adição de cal é melhorar a adesividade entre o asfalto e os agregados.

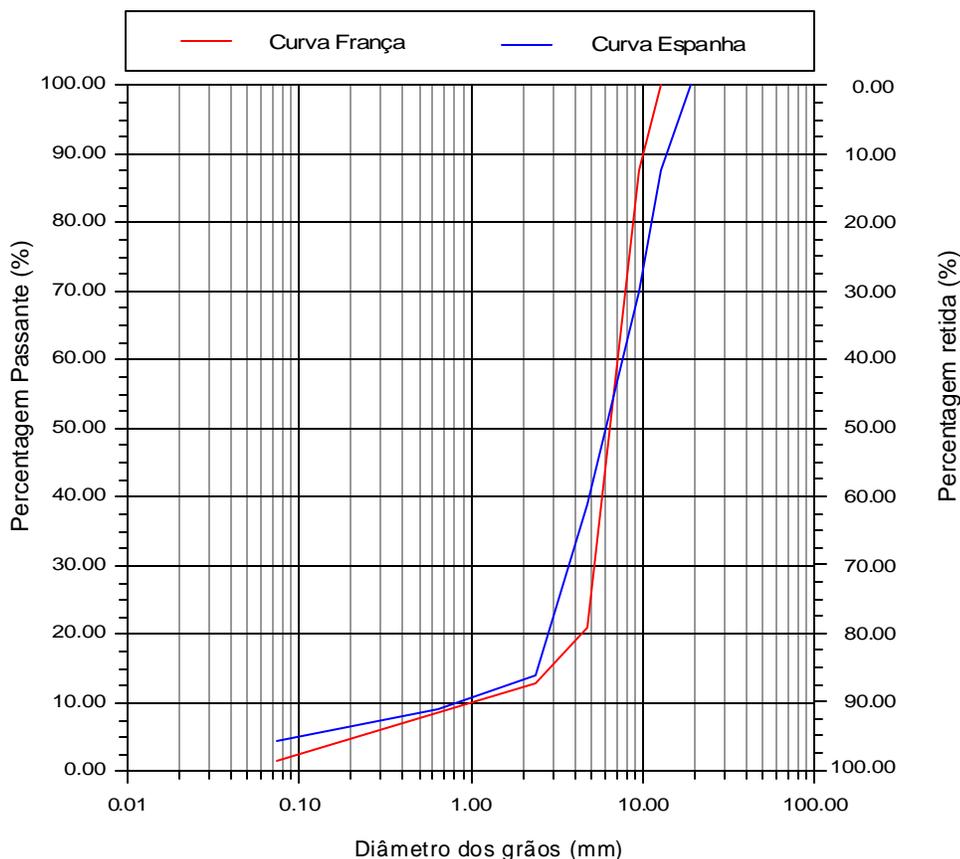


FIGURA 3.1. Curva granulométrica dos agregados

### 3.3.2. Ligante Asfáltico

O ligante utilizado na moldagem dos corpos de prova foi o asfalto modificado com 4 % de polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) produzido pela Ipiranga Asfaltos. A escolha deste tipo de asfalto deveu-se a experiências anteriores que comprovaram o melhor desempenho da adição de polímero SBS em comparação com outros tipos de polímeros (Verhaeghe, 1993). O percentual de 4% de SBS adicionado ao asfalto foi escolhido em função de fatores relacionados a desempenho e custo, sendo este percentual o que se supunha ter a melhor relação custo - benefício. A tabela 3.5 apresenta as propriedades físicas e químicas do ligante utilizado.

TABELA 3.5. Propriedades do ligante asfáltico

ENSAIO	RESULTADO
Recuperação elástica (10°C, 20 cm)	67,9
Penetração (100g, 5s, 15°C)	27 dmm
Penetração (100g, 5s, 25°C)	49 dmm
Penetração (100g, 5s, 35°C)	105 dmm
Penetração (100g, 5s, 15°C - após ECA)	16 dmm
Penetração (100g, 5s, 25°C - após ECA)	35 dmm
Penetração (100g, 5s, 35°C - após ECA)	80 dmm
Índice de penetração*	+0,4
Índice de penetração após ECA	+0,5
Densidade relativa (25°C/25°C)	1,028
Ponto de amolecimento	56,5°C
Ponto de amolecimento após ECA	59,5°C
Ductilidade, 25°C	130 cm
Ductilidade, 25°C após ECA	106 cm
Ponto de fulgor (vaso aberto Cleveland)	297°C
Efeito Calor e Ar, Penetração Original	71,4%
Efeito Calor e Ar, Variação em peso	0,004%
Viscosidade Saybolt Furol, 135°C, seg	522,1 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 145°C, Seg	307,2 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 155°C, Seg	211,6 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 165°C, seg	143,2 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 175°C, seg	95,6 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 135°C, Seg após ECA	637,6 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 145°C, Seg após ECA	379,6 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 155°C, Seg após ECA	240,4 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 165°C, Seg após ECA	154,8 SSF
Viscosidade Saybolt Furol, 175°C, Seg após ECA	107,2 SSF
Viscosidade Absoluta, 60°C	13.850 Poise
Viscosidade Absoluta, 60°C após ECA	35.440 Poise
Viscosidade Absoluta, 135°C	11,62 Poise
Viscosidade Absoluta, 145°C	6,95 Poise
Viscosidade Absoluta, 155°C	4,58 Poise
n'/n	2,56
Teor de betume, % em peso	95,77
Índice de Ruptura Fraas	-18°C
Índice de Ruptura Fraas, após ECA	-11°C

ECA: efeito do calor e do ar.

\*O índice de penetração é utilizado para quantificar a suscetibilidade térmica de um ligante.

### 3.3.3. Fibras

Na moldagem dos corpos de prova foram utilizadas fibras de vidro com comprimento de 6,4 mm, produzidas pela empresa "Owens Corning". As fibras são do tipo "Chopped

*Strand*", ou seja, são mechas formadas por centenas de filamentos unidos por uma resina. Cada filamento possui aproximadamente 13  $\mu\text{m}$ . As fibras são originadas do vidro tipo E. A tabela 3.6 apresenta as propriedades do vidro tipo E.

TABELA 3.6. Composição química do vidro tipo E.

<b>Composição química</b>	<b>Peso (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	55,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,8
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,3
MgO	3,3
CaO	18,7
Na <sub>2</sub> O	0,3
K <sub>2</sub> O	0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3
Fe <sub>2</sub>	0,3

Fonte: Ulbrich (1997)

As propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelas fibras são: densidade relativa de 2,62, resistência à tração entre 870 e 1800 MPa, módulo de elasticidade de 73 GPa e alongamento na ruptura entre 1,2 e 2,5%. A figura 3.2 apresenta a microscopia eletrônica das fibras empregadas no presente trabalho.

O comprimento de 6,4 mm foi escolhido em função de aspectos técnicos e econômicos. A utilização de comprimentos superiores ao escolhido poderia dificultar o processo de moldagem. Por outro lado, o uso de comprimentos menores do que 6,4 mm tornaria impossível o corte das fibras em campo, aumentando sensivelmente o custo de produção.

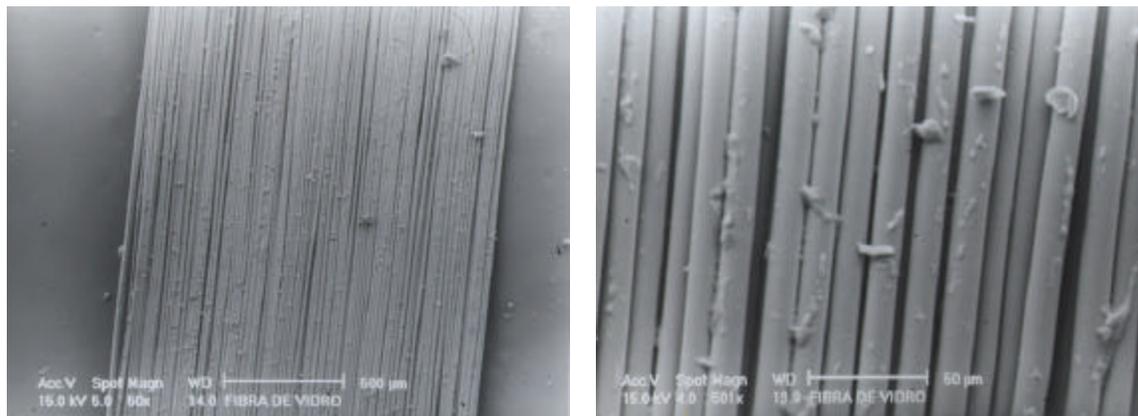


FIGURA 3.2. Fibras de vidro: microscopia eletrônica  
(Ulbrich, 1997)

#### 3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova foi executada no laboratório do Consórcio Construtor TRS - *Freeway*, em Santo Antônio da Patrulha.

Inicialmente, foi utilizado uma curva francesa na moldagem dos corpos de prova. Infelizmente, os corpos de prova obtidos com esta curva apresentaram volume de vazios bastante superiores aos usuais para revestimentos porosos. Isso acarretou sérias dificuldades na moldagem, as quais inviabilizaram o prosseguimento da mesma com esta faixa. A explicação dos problemas com a moldagem das misturas francesas deve-se a insuficiência de finos presentes na mistura. Isso acarreta uma fácil desagregação devido à falta de coesão da mistura.

Procurando contornar esse problema, adotou-se uma nova curva de moldagem que apresentasse uma maior quantidade de finos. A curva escolhida baseia-se na experiência espanhola. Os corpos de prova obtidos com essa curva apresentaram um volume de vazios entre 19% e 25%,

estando perfeitamente de acordo com as recomendações internacionais.

Dessa forma, foram moldados cerca de 180 corpos de prova executando-se controles rigorosos de temperatura e energia de compactação. A temperatura de mistura foi de aproximadamente 160°C e a temperatura de compactação situou-se ao redor de 145°C. Utilizou-se um equipamento mecânico Marshall para a moldagem dos corpos de prova, assegurando-se assim uma correta energia de compactação para todos os CPs. A compactação foi feita com 50 golpes por face.

As médias das densidades e dos volumes de vazios dos corpos de prova moldados estão apresentadas na tabela 3.7.

TABELA 3.7. Densidades e volumes de vazios médios dos CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Densidade aparente	1,988	1,983	2,013	2,010	1,981	2,011	1,997	2,008	2,018	2,013
Volume de vazios	24,08	24,47	21,01	21,25	24,81	20,79	22,92	22,21	21,75	22,23

### 3.5. PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Nos corpos de prova obtidos foram realizados ensaios de desgaste Cantabro, permeabilidade, módulo de resiliência a 25°C e 45°C, resistência à tração e deformação permanente.

#### 3.5.1. Ensaio de desgaste Cantabro

O ensaio de desgaste Cantabro tem sido largamente utilizado para o projeto de misturas porosas. Esse ensaio visa inferir sobre a resistência ao desgaste da mistura

porosa. O método tem sido utilizado diretamente no projeto de misturas asfálticas porosas, definindo o teor mínimo de asfalto necessário a fim de garantir uma perda aceitável por desgaste. Em misturas asfálticas porosas a serem aplicadas como revestimentos, essa perda deve ser menor do que 25% para uma temperatura de 25°C.

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova Marshall, moldado com 50 golpes por face, a 300 rotações no equipamento *Los Angeles* sem as esferas abrasivas. O ensaio deve ser realizado a uma velocidade entre 30 e 33 r.p.m. e a uma temperatura de 25°C. A figura 3.3 mostra a realização do ensaio em um equipamento de abrasão *Los Angeles*.



FIGURA 3.3. Execução de ensaio de desgaste Cantabro no equipamento *Los Angeles*.

Após o ensaio, quantifica-se a perda em massa do corpo de prova. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em porcentagem, é dado pela fórmula:

$$PC = \frac{P - P'}{P} \times 100$$

, onde:

PC: perda no ensaio de desgaste Cantabro(%);

P: peso inicial do corpo de prova (g);

P': peso após a realização do ensaio (g).

O aspecto visual dos corpos de prova após a realização do ensaio de desgaste Cantabro encontra-se apresentado na figura 3.4.



FIGURA 3.4. Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de desgaste Cantabro.

### **3.5.2. Ensaio de condutividade hidráulica**

O ensaio de condutividade hidráulica foi executado com um permeâmetro de paredes rígidas adaptado por Mirtes Caron Peres Ramires, cujo trabalho ainda não foi objeto de publicação. O ensaio consiste em medir o tempo em que uma quantidade de água conhecida leva para percolar através do corpo de prova, aplicando-se uma carga variável.

Os testes realizados no equipamento, comparando a vazão com amostra e sem amostra, satisfizeram o parâmetro proposto por Daniel (1994). Esse autor afirma que a vazão do equipamento sem amostra deve ser, no mínimo, igual a 10 vezes a vazão do equipamento com uma amostra do material a ser ensaiado.

O equipamento é composto por um colchão drenante colocado na base do corpo de prova, um dispositivo que força a passagem da água somente através do corpo de prova e um tubo de acrílico transparente, pelo qual mede-se o tempo em que a água leva para percorrer a distância entre duas marcas. A figura 3.5 mostra um corte esquemático do permeâmetro de paredes rígidas empregado.

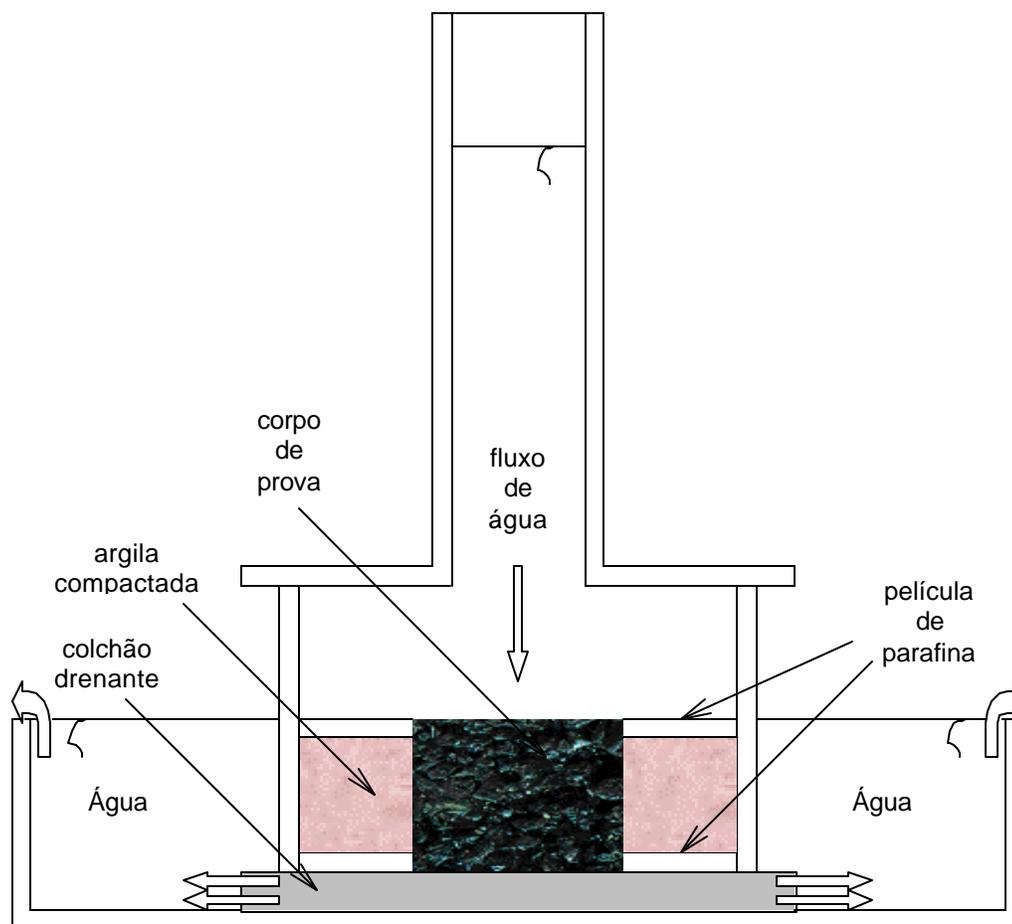


FIGURA 3.5. Corte esquemático do permeâmetro.

A configuração de ensaio foi montada com o objetivo de medir a condutividade hidráulica no sentido do eixo do corpo de prova. Para isto, o corpo de prova foi envolvido por uma película de PVC, sobreposta de uma fita adesiva para que não houvesse fluxo parasita entre a amostra e a camada de argila. O CP era então colocado sobre o colchão drenante e um anel de papelão era posto no seu entorno a fim de não permitir a entrada de parafina no colchão drenante. Após a colocação da parafina (Fig. 3.6a) compactava-se a argila em várias camadas a fim de garantir uma total impermeabilização entre o CP e o corpo do equipamento (Fig. 3.6b e Fig. 3.6c). A etapa final de preparação consistiu em impermeabilizar o topo da camada argilosa com uma película de parafina (Fig. 3.6d), para que não fosse carregado material argiloso para dentro do corpo

de prova. Feito isto colocava-se o cilindro de acrílico transparente sobre a base metálica e executava-se o ensaio (Fig. 3.6e e 3.6f).



a) Vedação com parafina



b) colocação da argila



c) compactação da argila



d) vista do aparato após a compactação e a impermeabilização com parafina



e) vista do equipamento pronto para o ensaio



f) realização do ensaio

FIGURA 3.6. Seqüência da realização do ensaio de condutividade hidráulica

### 3.5.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro para a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland.

Os corpos de prova de concreto asfáltico poroso foram ensaiados à tração por compressão diametral a 25°C, segundo o método do DNER-ME 138/94.

O ensaio é feito aplicando-se uma taxa de deformação constante no corpo de prova e anotando-se a leitura máxima que atinge o defletômetro do anel dinamométrico. Dessa forma, a resistência à tração de um dado corpo de prova é dada pela seguinte fórmula:

$$s_R = \frac{2 \times F}{100 \times p \times D \times H}$$

onde:

$\sigma_R$ : resistência à tração (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro do corpo de prova (cm);

H: altura do corpo de prova (cm).

No ensaio realizado foi utilizada uma prensa hidráulica da marca LTM com capacidade de 70 kN. A prensa utilizada é apresentada na figura 3.7.



FIGURA 3.7. Vista do equipamento de compressão diametral

#### **3.5.4. Ensaio de módulo de resiliência**

O módulo de resiliência de misturas betuminosas é determinado em ensaios de compressão diametral, sendo a relação entre a tensão de tração normal ao plano vertical diametral e a respectiva deformação específica resiliente nesse plano.

A teoria da elasticidade aplicada à solução da distribuição de tensões e deformações em cilindros carregados diametralmente permite exprimir o módulo de elasticidade em função da força vertical aplicada,  $F$ , e do deslocamento horizontal produzido e mensurável, bastando conhecer o coeficiente de Poisson do material e as dimensões do corpo de prova.

O ensaio foi realizado a 25°C e 40°C a partir do condicionamento dos corpos de prova aplicando-se 200 repetições de uma carga vertical, de forma a produzir uma tensão à tração igual a 30% da resistência à tração. A

frequência de aplicação da carga é de 1 Hz e sua duração é de 0,1 segundo.

Após o condicionamento da amostra, continua-se com a aplicação da carga e mede-se as deformações com o auxílio de um "*Linear Variable Differential Transducer*" (LVDT) a cada 100 repetições. Dessa forma, registram-se os deslocamentos horizontais máximos após 300, 400 e 500 aplicações da carga F. O módulo resiliente do corpo de prova ensaiado é a média dos valores calculados para os vários deslocamentos medidos.

O módulo de resiliência dos corpos de prova foi determinado através dos métodos DNER-ME 133/94 e ASTM D-4123-82. O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,30. A fórmula empregada para o cálculo do módulo de resiliência foi a seguinte:

$$E_{RI} = \frac{F_v \times (n_{RI} + 0,27)}{t \times \Delta H_I}$$

onde:

$E_{RI}$ : módulo de resiliência instantâneo (MPa);

$\nu_{RI}$ : coeficiente de Poisson instantâneo;

$F_v$ : carga vertical repetida aplicada no corpo de prova (N);

t: espessura do corpo de prova (mm);

$\Delta H_I$ : deformação horizontal instantânea recuperável (mm).

O equipamento é composto por um sistema de aplicação de carga, que é constituído por um regulador de pressão e uma válvula "*three way*" controlada por um temporizador (figura 3.8). Esse temporizador permite controlar a duração da carga aplicada, bem como a sua frequência de aplicação.

A válvula "three-way" é ligada diretamente a um pistão acoplado a um pórtico metálico. As medidas de deformação são feitas através de um LVDT ligado a uma placa de aquisição de dados de um computador.

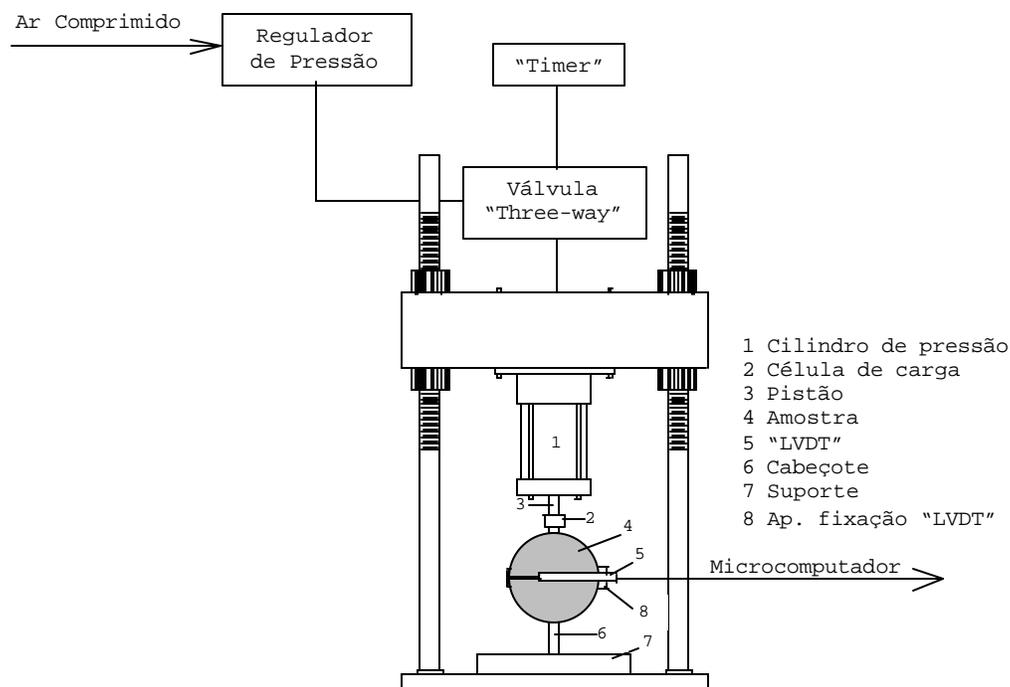


FIGURA 3.8. Desenho esquemático do equipamento utilizado nos ensaios de módulo de resiliência (SPECHT, 2000)

O equipamento utilizado encontra-se no interior de uma câmara termo-regulável, permitindo assim a realização de ensaios nas mais diversas temperaturas. As figuras 3.9 e 3.10 mostram o equipamento durante a realização dos ensaios.

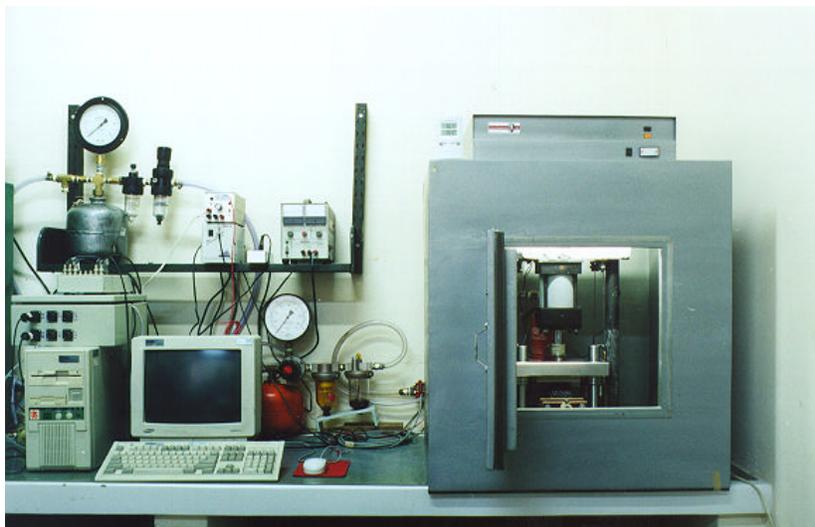


FIGURA 3.9. Equipamento de módulo de resiliência.

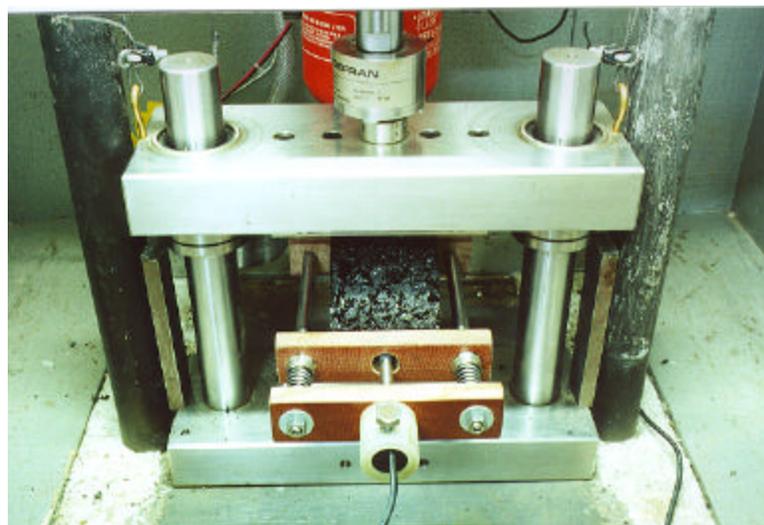


FIGURA 3.10. Vista do interior do equipamento de módulo de resiliência durante a execução do ensaio.

#### 4.5.5. Ensaio de deformação permanente

O ensaio realizado procurou avaliar qualitativamente o comportamento de corpos-de-prova de concreto asfáltico poroso no que diz respeito às deformações permanentes. Dessa forma, utilizou-se o procedimento previsto por Mallick, Ahlrich e Brown (1995). Esse procedimento foi escolhido porque possibilita resultados correlacionáveis

aos observados em campo a partir de amostras cilíndricas Marshall.

O procedimento original trata-se de um ensaio realizado a 60°C em uma câmara triaxial, onde é possível aplicar uma tensão confinante e uma tensão desvio. No estudo preconizado por Mallick, Ahlrich e Brown (1995) foram utilizadas uma tensão normal de 826,8 kPa (tensão desvio de 689 kPa) e uma tensão confinante de 137,8 kPa.

Já os ensaios realizados preliminarmente em corpos de prova de concreto asfáltico poroso apontaram para a necessidade de diminuição da temperatura e da tensão desvio originais. Essa diminuição foi necessária em função de os corpos-de-prova inicialmente ensaiados não terem suportado as tensões originais. Portanto, manteve-se a mesma tensão de confinamento, modificando-se, entretanto, a tensão normal (343,2 kPa) e a temperatura de ensaio (45°C).

Dessa forma, o ensaio foi realizado a 45°C, a partir do condicionamento do corpo de prova com uma tensão de confinamento de 137,8 kPa, aplicando-se 30 repetições de uma tensão desvio de 82,7 kPa. A frequência de aplicação da carga foi de 1 Hz, com uma duração de 0,1 segundo.

Após o condicionamento da amostra, aplicou-se uma tensão desvio de 205,4 kPa durante uma hora. A frequência de aplicação do carregamento foi de 1 Hz, com uma duração de 0,1 segundo. Depois da aplicação da carga, registraram-se as deformações de expansão durante 15 minutos. A deformação acumulada ao final desse período foi considerada como sendo a deformação permanente.

Com o objetivo de executar os procedimentos propostos por Mallick, Ahlrich e Brown (1995) foi feito o projeto de um equipamento com características tais que possibilitassem

a realização do experimento preconizado. Após o projeto, partiu-se para a confecção e a compra dos materiais necessários. Depois dessa etapa foram realizados a montagem do equipamento, a confecção do programa em *HP-Vee*, a calibração dos instrumentos eletrônicos, os testes preliminares para o ajuste do carregamento e a realização dos ensaios.

O equipamento é composto por um sistema de aplicação de carga e uma câmara triaxial situados no interior de uma câmara termo-regulável. O corte esquemático do equipamento pode ser visualizado na figura 3.11.

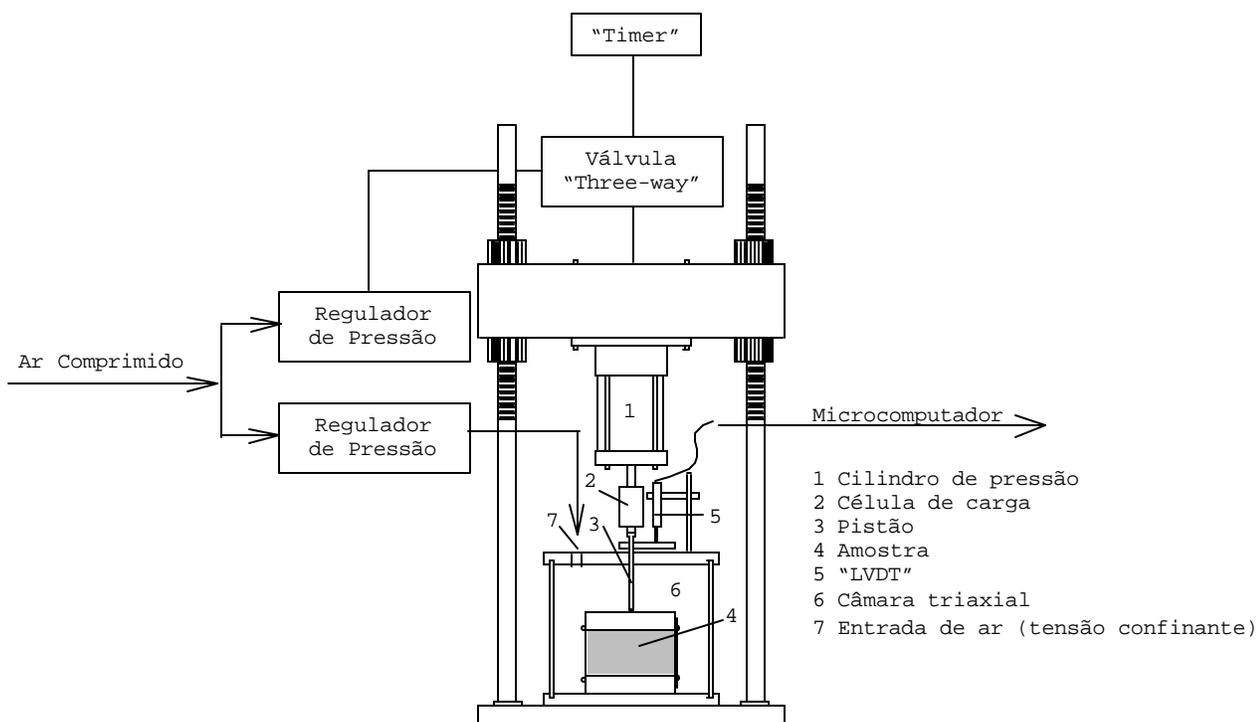


FIGURA 3.11. Corte esquemático do equipamento de deformação permanente

O sistema de aplicação de cargas é semelhante ao utilizado no ensaio de módulo de resiliência. Compõe-se de um regulador de pressão com um manômetro, uma válvula *three-way*, que permite a aplicação da carga periodicamente e um temporizador que manda o sinal elétrico para a válvula

*three-way*, controlando a frequência e a duração do carregamento.

Na câmara triaxial o corpo de prova é colocado sobre uma base. A pressão de confinamento é aplicada através de um regulador de pressão e medida através de um manômetro.

Existe ainda um sistema de ar auxiliar que é utilizado para erguer o pistão de aplicação de carga antes do início do ensaio.

O sistema eletrônico está preparado para fazer leituras da célula de carga e do LVDT. A célula de carga somente é utilizada para fazer a calibração inicial do sistema de aplicação de carga. Durante os ensaios não é feito nenhum tipo de leitura deste equipamento. Já o LVDT é lido durante toda a execução do ensaio. Para isto é utilizado um computador com uma placa de aquisição de dados e um programa feito em *HP-Vee*, que permite uma interface amigável com o usuário (figura 3.12).

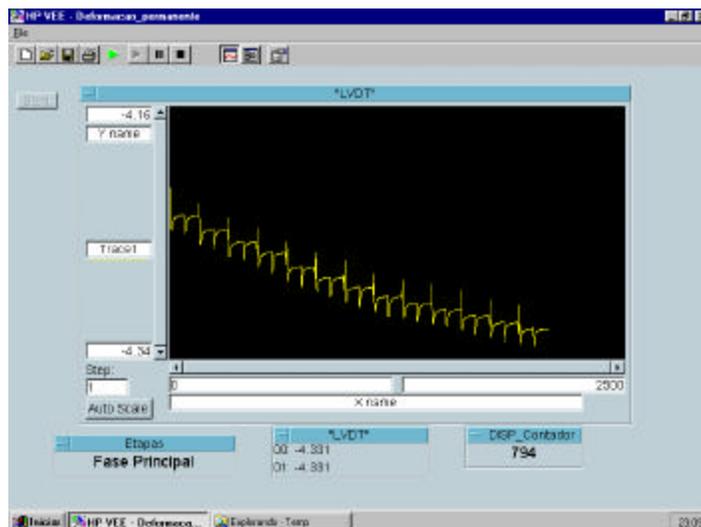


FIGURA 3.12. Interface do ensaio de deformação permanente

Nas figuras 3.13 e 3.14 pode-se visualizar o equipamento de deformação permanente desenvolvido.

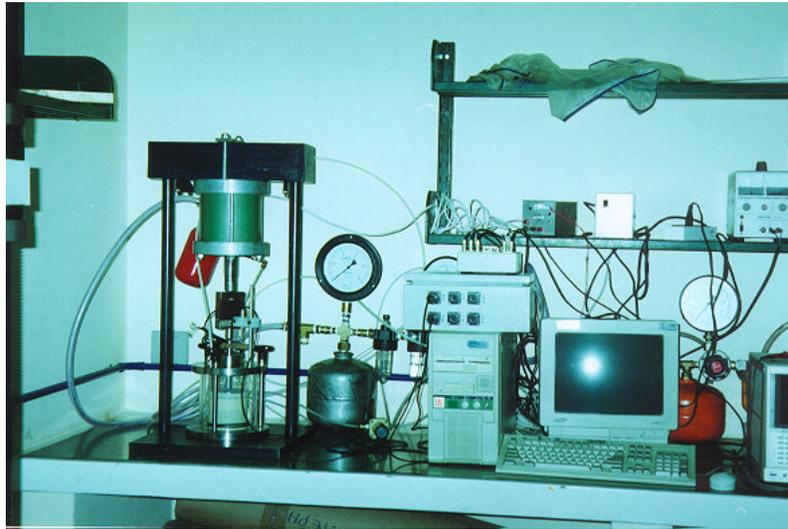


FIGURA 3.13. Equipamento de deformação permanente antes da colocação da câmara termo-regulável

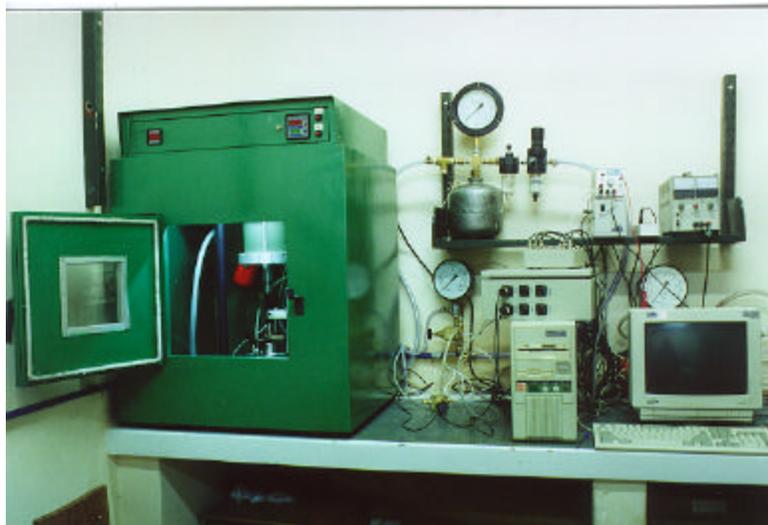


FIGURA 3.14. Vista do equipamento de deformação permanente.

## CAPÍTULO IV

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar as propriedades dos corpos-de-prova em função de teores distintos de asfalto e fibra. Nos ensaios realizados foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, moldados segundo a metodologia Marshall.

Para análise dos resultados obtidos, utilizou-se técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada um dos fatores controláveis, teor de asfalto (TA) e teor de fibra (TF), bem como suas interações e efeitos quadráticos nas variáveis de resposta. Para tanto, foram realizadas análises de regressão múltipla e análise de variância (ANOVA) para cada variável de resposta. O nível de significância adotado para essas análises foi de 0,1, ou seja, ao se aceitar a hipótese de que o modelo representa significativamente os pontos experimentais há, no máximo, uma probabilidade de 10% dessa hipótese não ser verdadeira.

Na análise de regressão múltipla realizada, foram utilizadas as variáveis transformadas " $w_1$ " e " $w_2$ ", equacionando-se as variáveis de estudo da seguinte forma:

$$TA = 5 + 1,341641 \times w_1 - 0,09891 \times w_2$$

$$TF = 0,494535 \times w_2 + 0,5$$

$$TAgr = 94,5 - 1,341641 \times w_1 - 0,395628 \times w_2$$

Sendo:

$$-1 \leq w_1 \leq 1 \quad \text{e} \quad -1 \leq w_2 \leq 1$$

Onde:

TA: teor de asfalto;

TF: teor de fibra;

TAgr: teor de agregados.

Maiores informações acerca das ferramentas estatísticas utilizadas encontram-se detalhadas nos trabalhos de Nanni e Ribeiro (1991) e Pasa (1996).

#### 4.2. DESGASTE CANTABRO

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de desgaste Cantabro para todos os níveis de teor de asfalto (TA) e teor de fibra (TF).

Com base nesses resultados, foi executada uma análise de regressão múltipla que indicou o modelo composto pela Equação 4.1 como sendo adequado para representar os ensaios realizados.

$$PC = 9,8566 \times w_1 \times w_2^2 + 9,3275 \times w_1^2 - 14,0018 \times w_1 + 6,3297 \quad (4.1)$$

Esse modelo possui um nível de confiança de 98% e explica 86,3% dos resultados de perda ao desgaste Cantabro (PC). Ao modelo está associado um erro padrão de 3,41% de perda.

TABELA 4.1. Resultados experimentais da perda ao desgaste no Ensaio Cantabro.

CP	Teores (%)			Resistência ao desgaste (% perda)		
	Agregados	Asfalto	Fibra			
1	95,73	4,12	0,15	13,7	10,9	15,0
2	95,17	3,98	0,85	22,1	12,4	23,9
3	93,83	6,02	0,15	3,2	2,5	4,5
4	93,27	5,88	0,85	3,8	3,2	3,8
5	95,84	3,66	0,50	34,0	29,9	28,4
6	93,16	6,34	0,50	2,1	3,0	3,2
7	94,90	5,10	0	13,9	11,5	6,5
8	94,10	4,90	1,00	4,0	5,2	-
9	94,50	5,00	0,50	4,8	5,7	6,3
10	94,50	5,00	0,50	6,9	5,3	-

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a superfície de resposta e as linhas de contorno (ou curvas iso-PC) para PC.

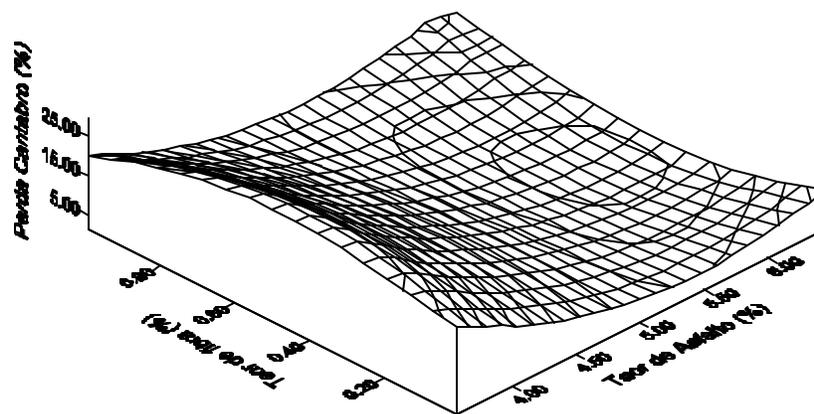


FIGURA 4.1. Superfície de resposta PC x TF x TA.

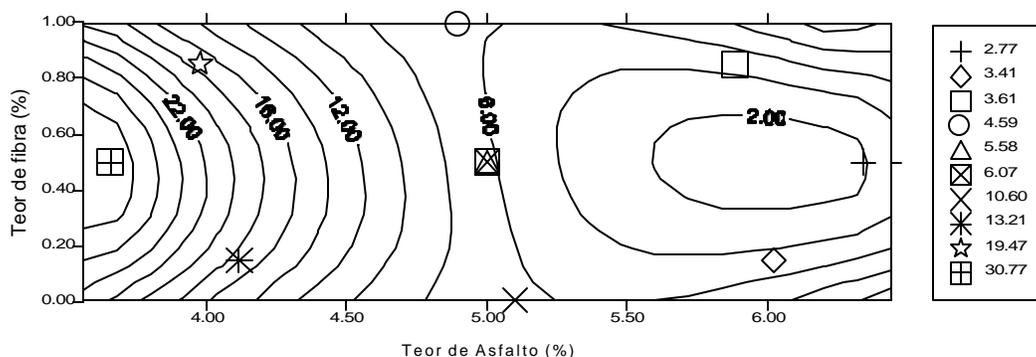


FIGURA 4.2. Comparação entre resultados experimentais e a previsão da perda ao desgaste Cantabro pelo modelo estatístico.

Através da Figura 4.1 observa-se que, apesar de tanto o teor de asfalto quanto o teor de fibra influenciarem a variável de resposta, é o teor de asfalto que influencia mais significativamente a perda ao desgaste.

A Figura 4.2 apresenta a influência de TF e TA no desgaste Cantabro na forma de superfícies de resposta. Nela são apresentadas as médias dos valores obtidos nos ensaios realizados.

Nota-se que, como regra geral, um aumento no teor de asfalto leva a uma conseqüente melhoria da resistência ao desgaste. Com relação ao teor de fibra, o modelo indica a inexistência de um comportamento uniforme.

Observa-se que, para teores de asfalto entre 3,5% e 5%, as maiores perdas ao desgaste situam-se próximas a um teor de 0,5% de fibra, enquanto teores próximos de 0% e 1% de fibra possuem perdas ao desgaste menores.

Para teores de asfalto situados acima de 5%, observa-se que teores de fibra próximos a 0,5% possuem um melhor comportamento ao desgaste. Constata-se que, entre 0 e 0,5% de teor fibra, qualquer aumento no teor deste traduz-se na

conseqüente redução da perda ao desgaste. A partir de 0,5% de fibra, observa-se o contrário: adicionando-se teores crescentes de fibra, produz-se um aumento na perda ao desgaste.

Acrescenta-se que na Figura 4.2 encontra-se ressaltada a linha que indica perda ao desgaste igual a 20%, valor este que foi considerado o máximo aceitável. Constata-se que apenas os corpos de prova n° 5 apresentaram a média dos resultados superior ao valor máximo, enquanto os corpos de prova n° 2 apresentaram apenas valores individuais superiores ao máximo aceitável.

Para fins de projeto, utilizando-se materiais similares aos da presente pesquisa e semelhante curva granulométrica, pode-se considerar que a utilização de teores de asfalto superiores a 4,1% satisfaz com segurança o critério de aceitabilidade usualmente utilizado para misturas asfálticas porosas no que diz respeito à perda ao desgaste.

A Tabela 4.2 apresenta a comparação entre os resultados obtidos na presente dissertação (em negrito) e os resultados de diversos autores. Apesar de a comparação direta entre os resultados não ser recomendada, tendo em vista os diferentes tipos de ligantes e agregados utilizados, pode-se fazer algumas considerações sob o ponto de vista qualitativo. Observa-se que existe uma variabilidade razoável dos resultados, quer seja nos corpos de prova com ligantes modificados, ou nos que utilizaram ligantes comuns.

Inicialmente, constata-se que o aumento do teor de asfalto provoca uma diminuição da perda ao desgaste. Por outro lado, tanto os resultados da presente pesquisa, quanto

os obtidos por Decoene (1990), indicam que o comportamento ao desgaste não apresenta aumento ou diminuição linear com a adição de teores crescentes de fibra.

TABELA 4.2: Comparação entre os resultados obtidos e os resultados da bibliografia consultada.

Autor	Características da Mistura			Perda ao Desgaste (%)	Temperatura de ensaio
	Tipo de Asfalto	Asfalto (%)	Fibra (%) - Tipo		
	<b>Modificado com 4% de SBS</b>	<b>3,66 a 6,34</b>	<b>0 a 1% - Vidro</b>	<b>2,1 a 34,0</b>	<b>25°C</b>
Khalid e Pérez-Jiménez (1996)	Comum: 100pen	4,2 5,2 6,3	- - -	7,2 6,4 5,5	20°C
Mallick et. al. (2000)	Comum: PG 64-22	5,5	-	8,1 a 14,7	25°C
Pérez-Jiménez e Gordillo (1990)	Comum: B 60/70	3,5	-	46,0	18°C
		4,5	-	40,0	
		5,5	-	33,0	
	Modificado com EVA	3,5	-	30,0	
		4,5	-	20,0	
		5,5	-	15,0	
Decoene (1990)	Comum: 80/100	4,5	-	15,9	Não informado
		5,5	0,3 - Celulose	16,6	
		5,5	0,5 - Celulose	18,0	
Verhaeghe (1993)	Comum 60/70 Comum 80/100 4% EVA 4% SBR 4% SBS	5,0	-	7,5	25°C
		5,0	-	4,1	
		5,0	-	7,6	
		5,0	-	11,4	
		5,0	-	5,3	
Campos (1998)	Modificado com 5,5% de SBS	3,0	-	52,9	25°C
		4,0	-	22,2	
		5,0	-	18,7	

Salienta-se também que os resultados obtidos na presente dissertação encontram-se, de certa forma, de acordo com os resultados de outros autores. Particularmente, o

resultado obtido por Verhaeghe (1993), que utilizou ligante modificado com 4% de SBS, apresenta perda ao desgaste muito próxima dos valores encontrados, quando utilizado teor de asfalto igual a 5%.

#### 4.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

##### 4.3.1. Ensaio realizados a 25°C

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência a 25°C são apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3. Resultados experimentais de Módulo de Resiliência a 25°C.

CP	Teores (%)			Módulo de Resiliência (MPa)			
	Agregados	Asfalto	Fibra	(25°C)			
1	95,73	4,12	0,15	2998	3037	2807	-
2	95,17	3,98	0,85	2526	3706	3367	2837
3	93,83	6,02	0,15	2465	1658	1277	2117
4	93,27	5,88	0,85	2246	2206	-	-
5	95,84	3,66	0,50	3059	2782	2673	2701
6	93,16	6,34	0,50	2054	2123	1984	-
7	94,90	5,10	0	1690	2439	2314	2155
8	94,10	4,90	1,00	2277	2359	2812	2496
9	94,50	5,00	0,50	2519	2647	2415	2537
10	94,50	5,00	0,50	2470	3291	3043	2656

Da análise de regressão múltipla resultou o modelo representado pela Equação 4.2 para estimar o módulo de resiliência da mistura asfáltica porosa estudada. O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ) encontrado é igual a 0,537 e o erro padrão de estimativa  $\epsilon_p$ , igual a 55,99 MPa.

$$MR_{25}(MPa) = 2500,02 - 364,854 \times w_1 + 167,624 \times w_2 - 662,893 \times w_1 \times w_2^2 \quad (4.2)$$

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, a superfície de resposta TA x TF x MR<sub>25</sub> e as linhas de contorno (ou iso-MR<sub>25</sub>) para o Módulo de Resiliência.

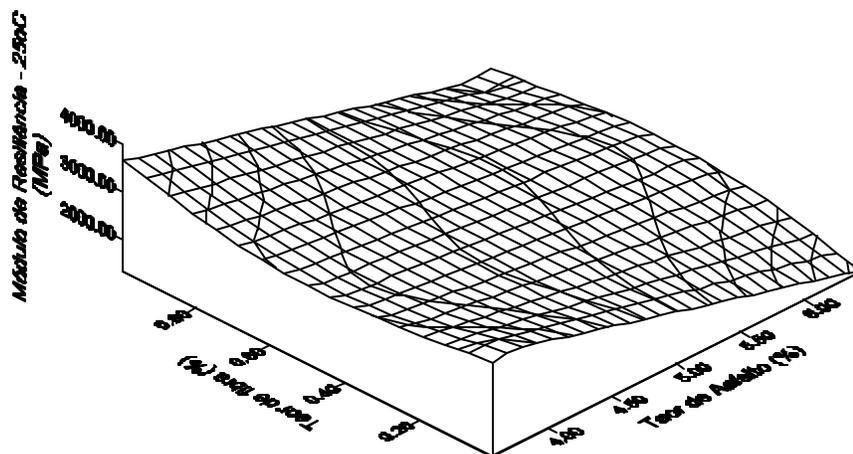


FIGURA 4.3: Superfície de Resposta MR<sub>25</sub> x TF x TA.

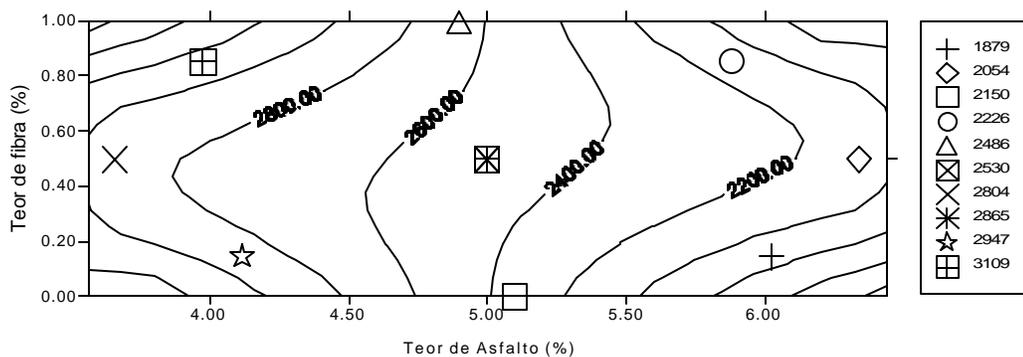


FIGURA 4.4. Comparação entre resultados experimentais e a previsão do Módulo de Resiliência a 25°C.

#### 4.3.2 Ensaio realizados a 45°C

Os resultados obtidos nos ensaios de Módulo de Resiliência realizados a 45°C são apresentados na Tabela 4.4.

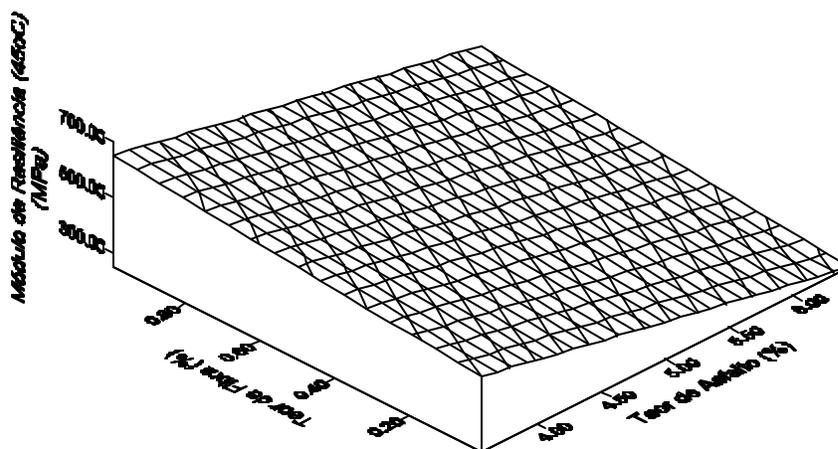
TABELA 4.4. Resultados experimentais de Módulo de Resiliência a 45°C.

CP	Teores (%)			Módulo de Resiliência (MPa)		
	Agregados	Asfalto	Fibra	(45°C)		
1	95,73	4,12	0,15	460	595	-
2	95,17	3,98	0,85	-	691	581
3	93,83	6,02	0,15	292	310	421
4	93,27	5,88	0,85	517	402	347
5	95,84	3,66	0,50	519	487	611
6	93,16	6,34	0,50	249	310	328
7	94,90	5,10	0	299	566	291
8	94,10	4,90	1,00	531	628	526
9	94,50	5,00	0,50	320	574	269
10	94,50	5,00	0,50	499	484	363

Com base nesses resultados, obteve-se o modelo representado pela Equação 4.3. Esse modelo apresenta um nível de confiança de 99% e responde por 50,5% da variabilidade de  $MR_{45}$ . O erro padrão da estimativa é de 90,54 MPa.

$$MR_{45}(MPa) = 451,781 - 126,665 \times w_1 + 77,493 \times w_2 \quad (4.3)$$

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a influência de TF e TA sobre o Módulo de Resiliência a 45°C, segundo o modelo obtido com os dados experimentais.

FIGURA 4.5: Superfície de Resposta  $MR_{45}$  x TF x TA.

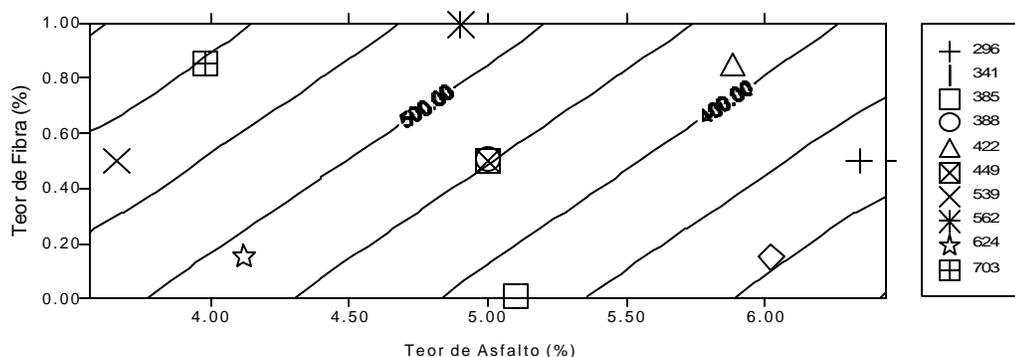


FIGURA 4.6. Comparação entre resultados experimentais e a previsão do Módulo de Resiliência a 45°C.

#### 4.3.2. Comparação entre os resultados obtidos: $Mr_{25}$ e $Mr_{45}$

Conforme esperado, os ensaios realizados, tanto a 25°C quanto a 45°C, mostraram que, com o aumento do teor de asfalto, ocorre a diminuição do módulo de resiliência.

Nos ensaios realizados a 25°C, constatou-se que o teor de asfalto influenciou a variável de resposta mais significativamente do que o teor de fibra. Já o mesmo não ocorreu nos ensaios realizados a 45°C, cujos resultados mostraram que as variações nos teores de fibra e asfalto são igualmente significativas.

Ainda, nos ensaios realizados a 25°C observa-se que, quanto ao teor de fibra, ocorrem comportamentos distintos, de acordo com a variação do teor de asfalto:

- TA entre 3,5% e 4,5%: até 0,5% de fibra, quanto maior o teor de fibra menor o módulo. Após 0,5% de fibra, quanto maior o teor de fibra maior o módulo;

- TA próximo a 5%: quanto maior o teor de fibra, maior é o módulo. Entretanto, constatou-se que esta variação não é muito significativa;
- TA entre 5,5% e 6,5%: até 0,6% de fibra, quanto maior o teor de fibra, maior é o módulo. Após 0,6% de fibra, quanto maior o teor de fibra, menor é o módulo.

Nos ensaios realizados a 45°C, observou-se um comportamento mais uniforme do módulo de resiliência com a variação do teor de fibra. Nesse caso, constatou-se um aumento do módulo de resiliência com o aumento do teor de fibra.

Esse aumento na rigidez da mistura, observado claramente ao adicionar-se teores crescentes de fibra, já não ocorreu quando o ensaio foi realizado a 25°C.

Os resultados indicam que existe uma contribuição cada vez mais positiva da adição de fibra no módulo de resiliência, com o aumento da temperatura.

Na Tabela 4.5 apresenta-se um comparativo entre os resultados obtidos na presente pesquisa e os dados observados na literatura.

Observando-se a referida tabela, constata-se que os resultados obtidos a 25°C estão bastante próximos dos resultados publicados por Khalid e Pérez-Jiménez (1996), com uma temperatura de 20°C.

Semelhante afirmação não pode ser feita em relação aos resultados obtidos por Campos (1998), que apresentaram

resultados excessivamente baixos para o módulo de resiliência a 25°C. Observa-se que os valores de módulo de resiliência obtidos por esse autor a 10°C são inclusive menores do que os valores obtidos por Khalid e Pérez-Jiménez (1996) a 20°C.

TABELA 4.5: Comparação entre os resultados obtidos e os resultados da bibliografia consultada.

Autor	Características da Mistura			Temperatura (°C)	Módulo de Resiliência (MPa)	
	Tipo de Asfalto	% Asfalto	% Fibra - Tipo			
	<b>Modificado com 4% de SBS</b>	<b>3,66 a 6,34</b>	<b>0 a 1% - Vidro</b>	<b>25</b>	<b>1277 a 3706</b>	
				<b>45</b>	<b>249 a 691</b>	
Khalid e Pérez-Jiménez (1996)	Comum: 100pen	4,2	-	20	3000	
		5,2	-		2800	
		6,3	-		1600	
	Comum: 200pen	4,2	-		2300	
5,2		-	2100			
		6,3	-	1050		
Campos (1998)	Modificado com 5,5% de SBS	3,8	-	10	520 e 1070	
		4,5	-		1350 e 1070	
		5,0	-		940 e 1090	
			4,5	-	25	420
			5,0	-		500

Com relação ao critério de aceitabilidade de misturas asfálticas porosas no que diz respeito ao módulo de resiliência, optou-se por seguir o preconizado por Khalid e Pérez-Jiménez (1996). Esses autores propuseram que o valor do módulo a 20°C deveria ser superior a 2000MPa.

Em razão de os resultados terem sido obtidos a uma temperatura de 25°C e, mesmo assim, somente um tipo de corpo de prova (CP 3) ter apresentado a média dos módulos inferior a 2000MPa, pode-se dizer que o todos os corpos de prova satisfazem o critério de aceitabilidade proposto.

## 4.4. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os resultados obtidos nos 25 ensaios de condutividade hidráulica realizados estão apresentados na Tabela 4.6.

TABELA 4.6. Resultados experimentais da Condutividade Hidráulica.

CP	Teores (%)			Condutividade Hidráulica (m/s) (25°C)					
	Agregados	Asfalto	Fibra						
1	95,73	4,12	0,15	1,80E-03	1,34E-03	-	-	-	-
2	95,17	3,98	0,85	1,45E-03	1,18E-03	-	-	-	-
3	93,83	6,02	0,15	1,15E-03	9,88E-04	-	-	-	-
4	93,27	5,88	0,85	8,20E-04	6,18E-04	8,54E-04	-	-	-
5	95,84	3,66	0,50	2,09E-03	1,14E-03	-	-	-	-
6	93,16	6,34	0,50	6,09E-04	5,35E-04	-	-	-	-
7	94,90	5,10	0	1,22E-03	1,57E-03	8,54E-04	-	-	-
8	94,10	4,90	1,00	1,13E-03	5,39E-04	7,92E-04	1,07E-03	6,43E-04	-
9	94,50	5,00	0,50	1,29E-03	1,19E-03	-	-	-	-
10	94,50	5,00	0,50	7,63E-04	9,15E-04	-	-	-	-

A análise de regressão múltipla realizada apontou o modelo representado pela Equação 4.4 como sendo representativo dos dados analisados. O modelo possui 98,4% de nível de confiança e explica 55,1% dos resultados obtidos. O erro padrão da estimativa é de  $2,6 \times 10^{-4}$ .

$$CH(m/s) = 0,001096 - 0,000435 \times w_1 - 0,000196 \times w_2 \quad (4.4)$$

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam, respectivamente, a superfície de resposta TA x TF x CH e as linhas de contorno (ou iso-CH) para a Condutividade Hidráulica.

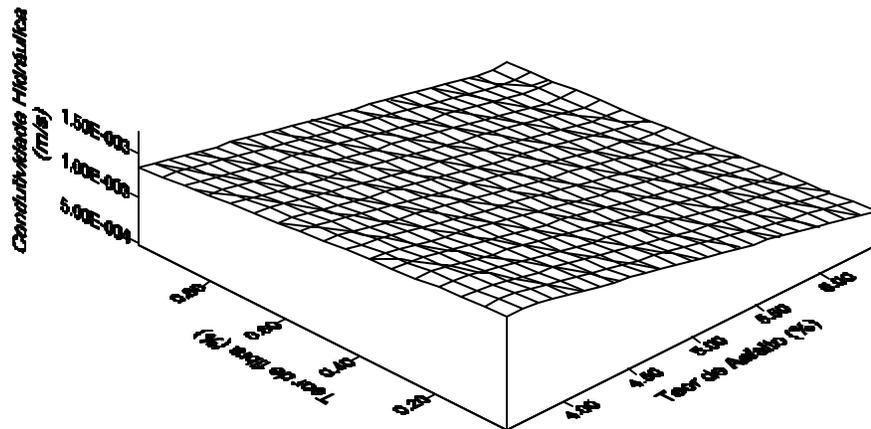


FIGURA 4.7: Superfície de Resposta CH x TF x TA.

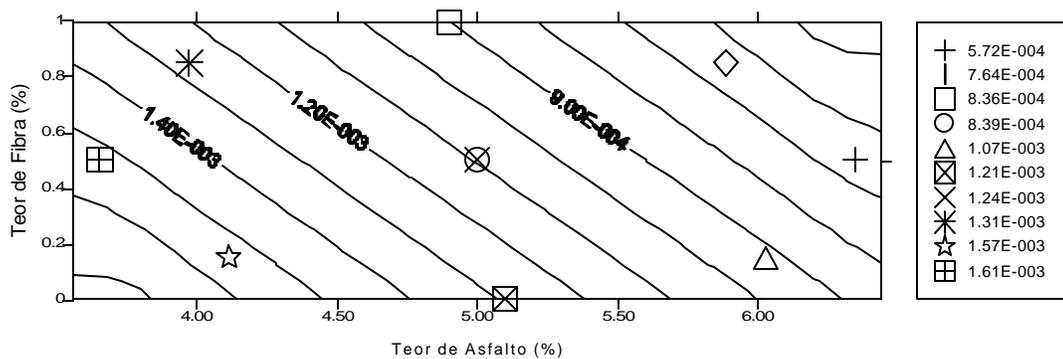


FIGURA 4.8. Comparação entre resultados experimentais e a previsão da Condutividade Hidráulica.

Observa-se, com base na Figura 4.8, que, tanto o teor de asfalto, quanto o teor de fibra influenciam igualmente na condutividade hidráulica. Essa constatação pode ser melhor visualizada ao observar-se o ângulo das linhas "iso-CH" na Figura 4.8.

Conforme esperado, ao aumentar-se o teor de asfalto ocorre uma diminuição da condutividade hidráulica. Semelhantes resultados foram obtidos também por diversos autores (Serfass e Samanos, 1996; Mallick et al., 2000; Khalid e Pérez-Jiménez, 1996).

Com base nos ensaios realizados, conclui-se também que quanto maior o teor de fibra menor é a condutividade hidráulica. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de a interação asfalto-fibra diminuir a permeabilidade. A combinação de asfalto com a adição de fibra resulta em um elevado volume de ligante, que passa a ocupar um maior volume de vazios na mistura, ocasionando, dessa forma, a diminuição da permeabilidade. Esse comportamento foi observado também por Serfass e Samanos (1996) quando do acompanhamento da permeabilidade em seções experimentais realizadas em campo.

A comparação direta entre os resultados obtidos e os resultados constatados por outros autores não é simples, na medida que existe uma variabilidade razoável entre os métodos de ensaios utilizados. Entretanto, selecionou-se cuidadosamente os ensaios que foram realizados em condições semelhantes à presente pesquisa, ou seja, feitos com permeâmetro de carga variável e com corpos-de-prova cilíndricos.

A Tabela 4.7 apresenta uma comparação entre os resultados do presente trabalho (em negrito) e os resultados obtidos por outros autores.

TABELA 4.7: Comparação entre os resultados obtidos com dados da literatura consultada.

Autor	Características da Mistura			Condutividade hidráulica (m/s)
	Tipo de Asfalto	% Asfalto	% Fibra - Tipo	
	<b>Modificado com 4% de SBS</b>	<b>3,66 a 6,34</b>	<b>0 a 1% - Vidro</b>	<b>5,4E-4 a 2,1E-3</b>
Khalid e Pérez-Jiménez	Comum: 100pen	4,2	-	2,7E-3
		5,2	-	1,2E-3
		6,3	-	5,0E-4
Mallick et. al.	Comum: PG 64-22	5,5	-	2,4E-4 a 2,7E-3
Campos	Modificado com 5,5% de SBS	3,8	-	3,0E-3

Observando a Tabela 4.7, constata-se que os resultados obtidos são coerentes com os resultados pesquisados na literatura.

Ainda, cabe-se acrescentar que todos os corpos de prova ensaiados satisfizeram o parâmetro previsto na proposta de projeto para misturas porosas de Khalid e Pérez-Jiménez (1996), pois todos os resultados apresentaram condutividade superior a 25m/dia, ou seja,  $2,89E-04m/s$ .

#### 4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração realizados em 20 corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 4.8.

TABELA 4.8. Resultados experimentais de Resistência à Tração.

CP	Teores (%)			Resistência à Tração (kPa)	
	Agregados	Asfalto	Fibra		
1	95,73	4,12	0,15	574,5	636,1
2	95,17	3,98	0,85	553,8	537,6
3	93,83	6,02	0,15	494,5	491,1
4	93,27	5,88	0,85	519,6	522,3
5	95,84	3,66	0,50	533,3	552,3
6	93,16	6,34	0,50	514,3	496,2
7	94,90	5,10	0	442,8	529,1
8	94,10	4,90	1,00	569,6	539,4
9	94,50	5,00	0,50	520,6	511,9
10	94,50	5,00	0,50	490,6	547,0

Com base nesses resultados, obteve-se o modelo representado pela Equação 4.5. Esse modelo apresenta um nível de confiança de 96% e explica 50,8% dos resultados obtidos. O erro padrão da estimativa é de 27,96 kPa.

$$RT(kPa) = 528,8334 + 34,2786 \times w_2 + 43,5182 \times w_1 \times w_2 - 89,9599 \times w_1^2 \times w_2 - 95,8835 \times w_1 \times w_2^2 \quad (4.5)$$

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam, respectivamente, a superfície de resposta TA x TF x RT e as linhas de contorno (ou iso-RT) para a Resistência à Tração.

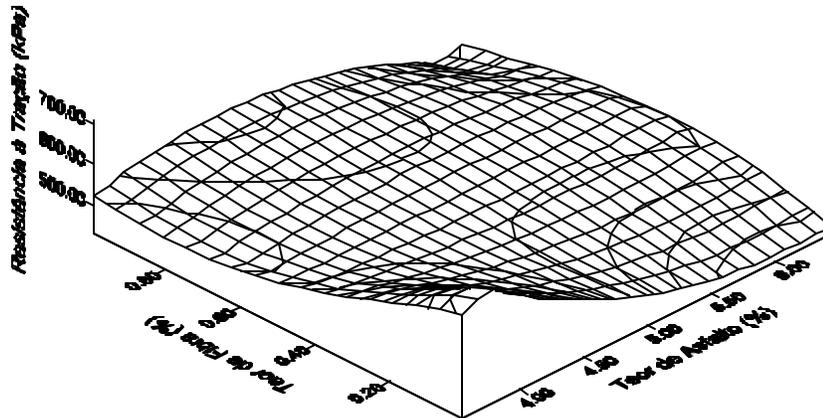


FIGURA 4.9: Superfície de Resposta RT x TF x TA.

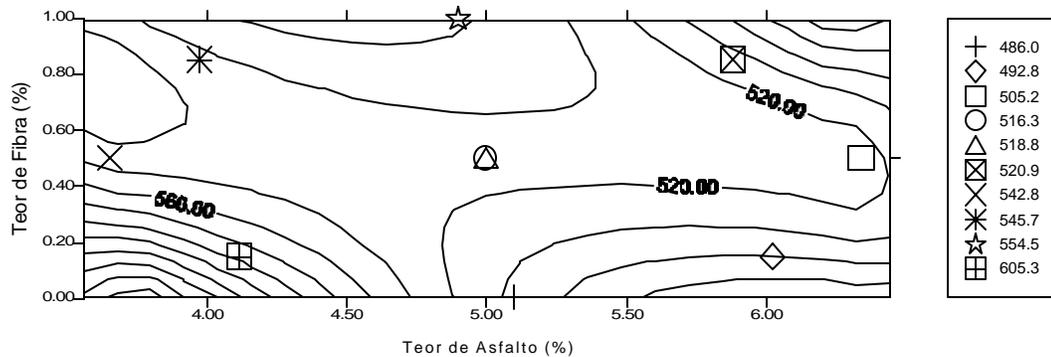


FIGURA 4.10. Comparação entre resultados experimentais e a previsão de Resistência à Tração.

Observando-se as Figuras 4.9 e 4.10, constata-se que para teores de fibra próximos a 0% ocorre a diminuição na resistência à tração com o aumento do teor de asfalto. Entretanto, semelhante constatação não ocorre para todo o intervalo de variação do teor de fibra.

Da mesma forma que para o teor de fibra, a variação do teor de asfalto não traduz-se em variação uniforme na resistência à tração. Apesar de poder-se genericamente dizer que o aumento do teor de asfalto provoca uma diminuição na resistência à tração, essa afirmação não é válida para todo o intervalo estudado.

A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos no presente estudo e os ensaios realizados por Pérez-Jiménez e Gordillo (1990).

TABELA 4.9: Comparação entre os resultados obtidos e os dados de Pérez-Jiménez e Gordillo (1990).

Autor	Características da Mistura			Temperatura (°C)	Resistência à tração (kPa) - (kp/cm <sup>2</sup> )*
	Tipo de Asfalto	% Asfalto	% Fibra - Tipo		
	<b>Modificado com 4% de SBS</b>	<b>3,66 a 6,34</b>	<b>0 a 1% - Vidro</b>	<b>25</b>	<b>442,8 a 636,1</b>
Pérez-Jiménez e Gordillo (1990)	Modificado: 80/100 + EVA	3,5	-	5	71,5
		4,5	-		72,5
		5,5	-		70,5
		3,5	-	45	3,8
		4,5	-		3,5
		5,5	-		3,1
	Comum: B-60/70	3,5	-	5	65,4
		4,5	-		69,6
		5,5	-		71,0
		3,5	-	45	2,9
		4,5	-		2,9
		5,5	-		2,7

\* Resultados da presente pesquisa em kPa. Resultados de Pérez-Jiménez e Gordillo em kp/cm<sup>2</sup>.

Os resultados apresentados por Pérez-Jiménez e Gordillo (1990) também demonstram um comportamento não uniforme da resistência à tração com a variação do teor de asfalto.

#### 4.6. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Os resultados dos ensaios de deformação permanente realizados a 45°C estão apresentados na Tabela 4.10.

TABELA 4.10. Resultados experimentais de Deformação Permanente.

CP	Teores (%)			Deformação Permanente (mm/cm)	
	Agregados	Asfalto	Fibra		
1	95,73	4,12	0,15	0,0493	-
2	95,17	3,98	0,85	0,0613	0,0830
3	93,83	6,02	0,15	-	-
4	93,27	5,88	0,85	0,1058	0,1144
5	95,84	3,66	0,50	0,0560	0,0286
6	93,16	6,34	0,50	0,1617	0,1211
7	94,90	5,10	0	0,0711	0,0608
8	94,10	4,90	1,00	0,0993	0,1042
9	94,50	5,00	0,50	0,0360	0,0327
10	94,50	5,00	0,50	0,0449	0,0303

A análise de regressão múltipla realizada apontou o modelo representado pela Equação 4.6 como sendo representativo dos dados analisados. O modelo possui 96,4% de nível de confiança e explica 85,41% dos resultados obtidos. O erro padrão da estimativa é de 0,0146.

$$DP(mm/mm) = 0,36013 + 0,041574 \times w_1 + 0,013965 \times w_2 + 0,053696 \times w_1^2 + 0,045685 \times w_2^2 \quad (4.6)$$

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a influência de TF e TA sobre a Deformação Permanente, segundo o modelo obtido com os dados experimentais.

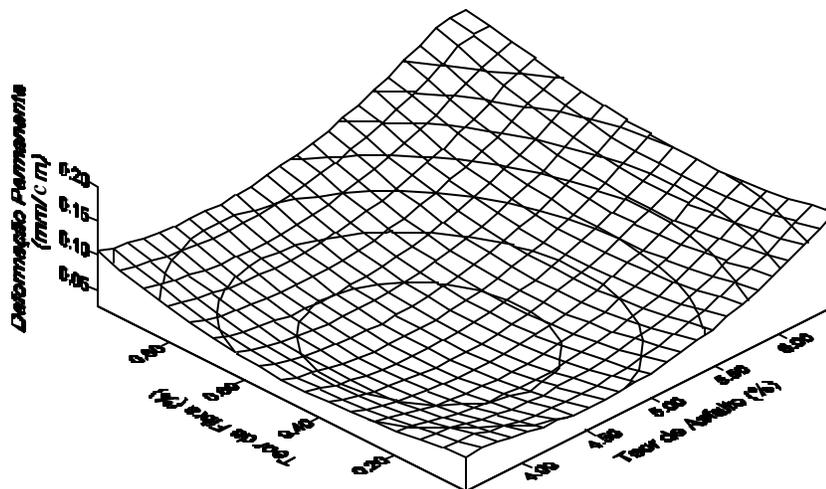


FIGURA 4.11. Superfície de Resposta DP x TF x TA.

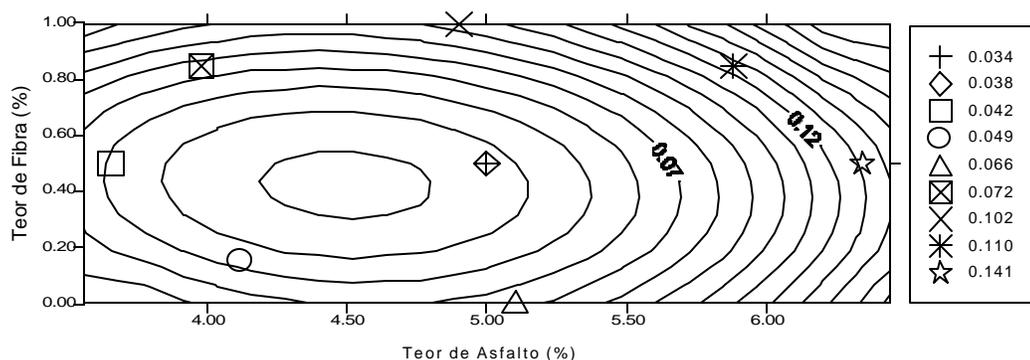


FIGURA 4.12. Comparação entre resultados experimentais e a previsão de Deformação Permanente (mm/cm).

O modelo obtido indica que misturas com teor de asfalto de 4,5% e teor de fibra de 0,4% devem apresentar o melhor comportamento quanto à deformação permanente.

Até 4,5% de asfalto, ao aumentar-se o teor do mesmo, ocorre uma diminuição da deformação permanente.

Após 4,5% de asfalto, qualquer aumento no teor do mesmo traduz-se num aumento da deformação permanente.

Conforme esperado, a deformação permanente foi menor para teores mais baixos de asfalto.

Quanto ao comportamento da DP com a adição de fibras, observa-se o seguinte:

- Até 0,4% de fibra, ocorre uma diminuição da DP com o acréscimo de fibra;
- Após 0,4% de fibra, ocorre o aumento da DP com o acréscimo de fibra.

Os resultados indicam que o "comportamento ótimo" da deformação permanente, no que diz respeito à quantidade de fibra, ocorre em teores próximos a 0,4%.

A Tabela 4.11 apresenta a comparação entre os dados obtidos com o ensaio realizado com outras pesquisas acerca das deformações permanentes em concreto asfáltico poroso.

TABELA 4.11: Comparação entre os resultados obtidos e os dados da literatura.

Autor	Características da Mistura			Deformação permanente (%)	Características do ensaio		
	Tipo de Asfalto	% Asfalto	% Fibra - Tipo		Tipo	Temperatura (°C)	Número de ciclos
	<b>Modificado com 4% de SBS</b>	<b>3,66 a 6,34</b>	<b>0 a 1% - Vidro</b>	<b>0,29 a 1,62</b>	<b>Creep com tensão confinante</b>	<b>45</b>	<b>3.600</b>
Mallick et. al. (2000)	Comum: PG 64-22	5,5	-	3,41* a 4,29*	Creep com tensão confinante	64	8.000
			-	6,3			
			0,37% - celulose	5,2			
	6,5	0,37% - mineral	5,0				
		-	4,7				
		-	3,8				
Comum PG 76-22	0,37% - mineral	2,7					
Pérez-Jiménez e Gordillo (1990)	Comum: 60/70	4,0	-	7,3*	Wheel tracking test	60	Não informado
		4,5	-	8,0*			
	80/100 + EVA	4,0	-	1,5*			
		4,5	-	2,0*			
Huet et. al. (1990)	Comum	4,5	-	13,8	Pista experimental	Ambiente - variação do período não informada	1.100.000
	Modificado com SBS	4,5	-	13,5			
		4,5	-	13,4			
	Comum	6,0	1% - mineral	4,8			
Sainton (1990)	Comum: 60/70	4,7	-	6,5	Creep com tensão confinante	30	Não informado
	Modificado com polímeros	5,5	-	5,5			
	Modificado com borracha	6,8	-	5,0			
Campos (1998)	Modificado com 5,5% de SBS	3,8	-	3,0	Wheel tracking test	60	3.000
		4,5	-	4,5			
		5,0	-	6,0			

\* Resultados em mm.

Constata-se que a comparação entre os valores obtidos nos mais diversos experimentos não é válida, tendo em vista as discrepâncias entre as características dos ensaios realizados. Alia-se a esse fato, a natureza dos ensaios realizados na presente pesquisa, cujo objetivo não foi a obtenção de correlações entre os resultados de laboratório e de campo, e sim, o de fornecer impressões acerca do comportamento da mistura quando do aumento ou diminuição dos teores de fibra e de asfalto.

Entretanto, se comparações entre valores absolutos das diversas pesquisas apresentadas na Tabela 4.11 não são possíveis, pode-se analisar os resultados obtidos de forma qualitativa, ou seja, comparando-se os comportamentos observados pelos diversos autores.

Inicialmente, é importante salientar os baixos valores das deformações obtidas na presente pesquisa, quando comparadas com os dados da literatura. Conforme já ressaltado, os resultados obtidos são qualitativos e o nível de deformação permanente atingido em cada experimento depende, fundamentalmente, das condições de carregamento e temperatura impostas aos corpos de prova. No presente caso, tendo em vista o tipo de instrumento utilizado para medição das deformações, optou-se por trabalhar com níveis de carregamento e temperatura não muito severos.

Conforme esperado, observa-se na Tabela 4.11 que o aumento do teor de asfalto provoca um aumento na deformação permanente.

Mallick et. al. (2000) e Huet et. al. (1990) constataram que a adição de fibra provocou a diminuição da

deformação permanente. Semelhante constatação foi obtida na presente pesquisa para teores de fibra de até 0,8%, sendo as deformações permanentes, a partir desse teor, superiores aos valores da mistura sem a presença de fibras. Essa constatação, no entanto, difere, de certa forma, dos resultados obtidos por Huet et. al. (1990) que obteve uma diminuição na deformação permanente ao adicionar 1% de fibra mineral.

Mallick et al. (2000) afirma que no estudo desenvolvido não foi possível a recomendação de uma deformação permanente crítica, tendo em vista a insuficiência de resultados. Semelhante constatação obteve-se no estudo realizado, pois além de ser necessária uma maior quantidade de ensaios realizados, haveria a necessidade de obter a correlação entre os resultados de laboratório com a deformação permanente observada em campo.

## CAPÍTULO V

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos em 154 ensaios de laboratório, apresentados, analisados e interpretados nos capítulos anteriores, bem como a avaliação crítica dos resultados relatados na literatura, permitiram estabelecer as seguintes conclusões principais para o comportamento das misturas asfálticas porosas estudadas:

a) Quanto à resistência ao desgaste

- Constatou-se que, apesar de tanto o teor de asfalto quanto o teor de fibra influenciarem a variável de resposta, é o teor de asfalto que influencia mais significativamente a resistência ao desgaste.
- Observou-se que o aumento no teor de asfalto leva a uma conseqüente melhora da resistência ao desgaste.
- Com relação ao acréscimo de fibra, os resultados indicaram um comportamento não uniforme,

contrariando uma das hipóteses testadas, de que a adição de fibras acarretaria no aumento da resistência ao desgaste.

- Para fins de projeto, pode-se considerar que para as misturas testadas a utilização de teores de asfalto superiores a 4,1% satisfaz o parâmetro mínimo de resistência ao desgaste.

b) Quanto ao módulo de resiliência

- Os resultados indicam que o aumento do teor de asfalto provoca uma diminuição no módulo de resiliência.
- Os ensaios realizados a 25°C mostraram a inexistência de uma tendência geral do módulo de resiliência com a adição de fibras. Semelhante constatação não foi obtida nos ensaios realizados a 45°C, que mostraram indubitavelmente um aumento do módulo com a adição de fibras. Essas observações indicam que existe uma contribuição cada vez mais positiva da adição de fibras sobre o módulo de resiliência, com o aumento da temperatura.
- Todas as amostras ensaiadas satisfizeram o critério de aceitabilidade para o projeto de misturas asfálticas porosas previsto por Khalid e Pérez-Jiménez (1996).

c) Quanto à condutividade hidráulica

- Observou-se que tanto o teor de asfalto quanto o teor de fibra influenciaram igualmente a condutividade hidráulica.
- Foi corroborada uma das hipóteses iniciais, de que a permeabilidade é reduzida com o aumento do teor de asfalto.
- Constatou-se que o aumento no teor de fibra provoca a diminuição da condutividade hidráulica.
- Todas as amostras ensaiadas satisfizeram a condutividade hidráulica mínima prevista por Khalid e Pérez-Jiménez (1996).

d) Quanto à resistência à tração

- A hipótese de que ocorre um aumento da resistência à tração com a adição de fibras não pôde ser comprovada, pois os resultados obtidos não foram conclusivos.
- O comportamento de resistência à tração com a adição de asfalto não mostrou-se uniforme, apesar de genericamente poder-se afirmar que ocorre o aumento da resistência com teores crescentes de ligante.

e) Quanto à deformação permanente

- Os resultados indicaram que a deformação permanente foi mínima para um teor de asfalto de 4,5% e um teor de fibra de 0,4%.
- Constatou-se que ocorre a diminuição da deformação permanente com a adição de teores de fibra até 0,8%, fato este que confirmou parcialmente uma das hipóteses previstas inicialmente.
- A deformação permanente foi menor para baixos teores de asfalto, tendo a mesma aumentado para teores a partir de 4,5%.

Para fins de projeto de futuras misturas sugere-se a adoção de um teor de asfalto de 4,5% sem fibras, o que satisfaz plenamente os critérios de aceitabilidade para a resistência ao desgaste, módulo de resiliência e condutividade hidráulica. Com relação a utilização de fibras, os ensaios realizados não demonstraram significativa vantagem em relação a misturas sem fibras.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de complementar a pesquisa apresentada nesta dissertação, sugere-se:

- a) A utilização de outros tipos de fibras em misturas asfálticas porosas, a fim de efetuar-se uma comparação com os resultados obtidos com as fibras de vidro.
- b) A realização de pesquisa sobre as fibras existentes na região, tanto manufaturadas quanto recicladas, para a utilização em misturas asfálticas.

- c) O estabelecimento de correlações entre os resultados obtidos com o equipamento de deformação permanente desenvolvido e dados colhidos através de simulador de tráfego ou trecho experimental.
- d) A execução de trecho experimental a fim de avaliar o comportamento das misturas estudadas em situações reais de campo.
- e) A realização de ensaios complementares a fim de avaliar o envelhecimento das misturas asfálticas porosas.
- f) O estabelecimento de critérios de desempenho mínimos para diferentes volumes de tráfego.
- g) A comparação entre o desempenho de misturas asfálticas porosas com a utilização de asfalto modificado por polímeros ou com o uso de asfalto comum e fibras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures**. D 4123 - 82. In: ASTM... Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1987.

ANDERSON, D., YOUTCHEFF, J. e ZUPANICK, M. **Asphalt binders** -. Transportation in the New Millenium. - Transportation Research Board - Web repport, 2000.

ASIAN DEVELOPMENT BANK e N. D. LEA INTERNATIONAL LTD. **Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4**. International Study of Highway Development and Management Tools, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles**. NBR 6465, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Solo: Análise granulométrica - Método de ensaio**. NBR 7181, 1988.

BIANCHETTO, H., NOSETTI, R. e DAGUERRE, L. **Experiencias en laboratorio con mezclas drenantes utilizando materiales**

**locales.** In: 9º Congresso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 277 - 293 Asunción, 1997.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION **Method for determination of the polished stone value.** BIS, BS 812: Part 114, London, 1989.

BROWN, S. F. e GIBB, J. M. **Validation Experiments for Permanent Deformation Testing of Bituminous Mixtures.** Asphalt Pavement Technology 1996. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1996, Vol 65, pp. 255-299.

CAMPOS, O. S. **Análise do comportamento de trecho piloto de revestimento poroso com asfalto modificado por polímero.** Tese (D. Sc., Engenharia) USP São Paulo, 1998.

COELHO, V. **Considerações sobre Deformações Permanentes em Camadas Asfálticas de Pavimentação.** 12º Encontro de Asfalto - Instituto Brasileiro do Petróleo - IBP - Rio de Janeiro, 1994.

CORTÉ, J. F. **Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumens Additives in Pavement Applications -** Permanent International Association of Road Congresses

(PIARC) Technical Committee on Flexible Roads - Italy, 1998.

DANIEL, D. E. **State-of-the-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils.** Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport In Soil, ASTM STP 1142, David E. Daniel e Stephen J. Trautwein, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

DECOENE, Y. **Contribution of Cellulose Fiber to the Performance of Porous Asphalts.** Transportation Research Record, nº 1265 - pp. 82 - 86 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM **Concreto Asfáltico**, Separata do Boletim do DAER, 1970.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **Agregado: determinação do índice de forma.** DNER - ME 086/94.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência.** DNER - ME 133/94. Rio de Janeiro 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral**. DNER - ME 138/94. Rio de Janeiro, 1986, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM **Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros**. Tomos 1, 2 e 3. DNER, 1998.

DUNN, K. D., RICKS, R. G. and GOWER, J **Performance Factors and Quality Control/Quality Assurance for Porous Pavements**. Transportation Research Record, nº 1575 - pp. 10 - 17 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1997.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) **Bituminous Mixtures: Material Specifications: Porous Asphalt**. (Draft) - prEN 13108-7, Brussels, 1998.

FAURE, B., VÉRHÉE, F. e LUCAS, J. **Techniques nouvelles de couches de roulement - les enrobés drainants**. Bouletin de Liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées, n. 172, pp. 47-61, 1991.

FELTRE, R. **Fundamentos da Química: volume único**. 1ª edição, Editora Moderna. São Paulo, 1990.

GAL, J. F. **Evolution de la perméabilité des enrobés drainants**. Revue Générale des Routes et des Aerodromes, RGRA n° 702, pp. 118-119, 1992.

GALLEGO, J., TOMÁS, R., NOSETTI, A., BIANCHETTO, H. e DAGUERRE, L. **Opciones Técnicas y Económicas para la Obtención de Mezclas Porosas**. In: 10° Congresso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 2075 - 2087 Sevilla, 1999.

HANNANT, L. **Fibre-reinforced cements and concretes**. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behaviour. 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon., 1994. P. 359-403

HARTMAN, D. R., GREENWOOD, M. E. e MILLER, D. M. **High Strength Glass Fibers** - Owens Corning Technical Paper. Ohio, 1996.

HEYSTRASTEN, G. V. e MORAUX, C. **Porous Asphalt in Belgium**. Transportation Research Record, n° 1265 - pp. 34 - 40 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and

behaviour. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 2ed., 1994. p 321-358.

HUET, A., DE BOISSOU DY, J., GRAMSAMMER, C., BAUDUIN, A. and SAMANOS, J. - **Experiments with Porous Asphalt on the Nantes Fatigue Test Track**. Transportation Research Record, n<sup>o</sup> 1265 - pp. 54 - 58 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

HUNTER, R. N. - **Bituminous Mixtures in Road Construction**. Thomas Telford, 441 p. Great Britain, 1994.

ISENRING, T., KÖSTER, H. e SCAZZIGA, I. - **Experiences with Porous Asphalt In Switzerland**. Transportation Research Record, n<sup>o</sup> 1265 - pp. 41 - 53 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

JAIR, M. R. **Mezclas drenantes: estado actual de la técnica y desarrollo futuro**. In: 9<sup>o</sup> Congreso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 325 - 336 Asunción, 1997.

KANDHAL, P. S. e MALLICK, R. B. **Open Graded Asphalt Friction Course: State of the Practice**. National Center for Asphalt Technology - Auburn University - NCAT Report n<sup>o</sup> 98-7, 1998.

KANDHAL, P. S. e MALLICK, R. B. **Design of New Generation Open-Graded Friction Courses**. National Center for Asphalt Technology - Auburn University - NCAT Report n° 99-3, 1999.

KHALID, H e PÉREZ-JIMÉNEZ, F. K. **Performance assessment of spanish and british porous asphalt**. Performance and Durability of Bituminous Materials, pp. 137 - 157. E & FN Spon, London, 1996.

KIGGUNDU, B. M. e ROBERTS, F. L. **Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-art and Critical Review of Test Methods**. National Center for Asphalt Technology - Auburn University - NCAT Report n° 88-2, 1988.

LEFEBVRE, G. **Porous Asphalts** - Permanent International Association of Road Congresses (PIARC) Technical Committee on Flexible Roads - Belgium, 1993.

LILLI, F. e LOCKHART, J. M. **Aporte Estructural de las Capas Drenantes**. In: 10° Congreso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 1537 - 1554 Sevilla, 1999.

MALLICK, R. B., AHLRICH, R. e BROWN, E. R. **Potencial of dynamic creep to predict rutting** - Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their

Performance - pp. 194 - 212 - ASTM STP 1265, Philadelphia, 1995.

MALLICK, R. B., KANDHAL, P. S., COOLEY Jr., L. A. e WATSON, D. E. **Design, Construction, and Performance of New-Generation of Open-Graded Friction Courses** - Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance - National Center for Asphalt Technology - Auburn University - NCAT Report n° 2000-1, 2000.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, 1997. 380 p.

NANNI, L. F. e RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1991 (Caderno de Engenharia 17/87).

NASCIMENTO, H. R. C. e REIS, R. M. M. **Camadas porosas de atrito com utilização de asfalto modificado com polímeros**. Ipiranga Asfaltos, 1999.

PASA, G. S. - **Método de otimização experimental de formulações**. Porto Alegre, 1996. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - UFRGS.

PÉREZ-JIMÉNES, F. and GORDILLO, J. - **Optimization of Porous Mixes Through the Use of Special Binders** - Transportation Research Record, n<sup>o</sup> 1265 - pp. 59 - 68 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

QUIÑONES, P. E. e MONTEVERDE, H. **Primeras Experiencias Uruguayas con Asfaltos Modificados y Mezclas Drenantes**. In: 10<sup>o</sup> Congresso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 775 - 779 Sevilla, 1999.

RAMSAMOOJ, D. V. e RAMADAN, J. **Prediction of Permanent Deformation of Asphalt Concrete in Cyclic and Monotonic Loading**, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 27, N<sup>o</sup>. 5, 1999, pp. 320-326.

REIS, R. M. M. e SANTO, N. R. E. **Asfalto modificado com polímero**. Ipiranga Asfaltos, 1998.

RUIZ, A., ALBEROLA, R., PÉREZ, F. e SÁNCHEZ, B. - **Porous Asphalt Mixtures in Spain** - Transportation Research Record, n<sup>o</sup> 1265 - pp. 87 - 94 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

SAINTON, A. - **Advantages of Asphalt Rubber Binder for Porous Asphalt Concrete** - Transportation Research Record,

n<sup>o</sup> 1265 - pp. 69 - 81 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.

SAMANOS, J., SERFASS, J. P., BASIN, G, RIEUNIER, J. B. **Experiment of a new fiber for asphalt mixes**, RGRA n<sup>o</sup> 691, 1991.

SANCHEZ, J. C. LORANCA, R. L. A. **Evaluación de la Permeabilidad en los Firmes Drenantes**. 10<sup>o</sup> Congresso Ibero Latino-americano del Asfalto, pp. 971 - 979 Sevilla, 1999.

SERFASS, J. P. and SAMANOS, J. **Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior**. Asphalt Pavement Technology 1996. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1996.

SPECHT, L. P. **Estudo de Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha**. Seminário de Doutorado - UFRGS, 2000.

TAYLOR, G. D. - **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994. 284p.

ULBRICH, L. A. **Aspectos do Comportamento Mecânico de um Solo Reforçado com Fibras**. Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS.

VERHAEGHE, F. C. - **Properties of Polimer and Fibre Modified Porous Asphalt Mixes.** In: Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1993, p. 262-280.

ZWAN, J. T., GOEMAN, T., GRUIS, H., SWART, J. H. e  
OLDENBURGER, R. H. - **Porous Asphalt Wearing Courses In the Netherlands: State of the Art Review** - Transportation Research Record, n<sup>o</sup> 1265 - pp. 95 - 110 - Transportation Research Board - National Research Council, Washington, 1990.