

*REUS BORTOLOTTO SALINI*

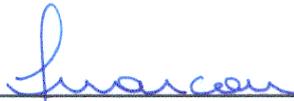
**UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE  
PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

**Dissertação apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil**

**Florianópolis  
2000**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Dissertação defendida e aprovada em 25 de agosto de 2000,  
pela banca examinadora.**



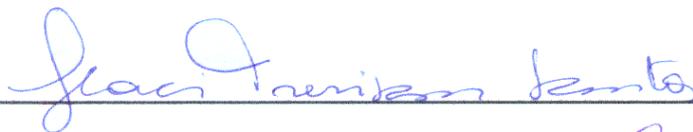
---

Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon - Orientador - Moderador



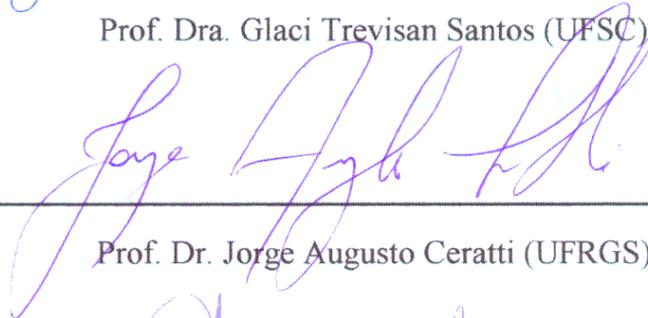
---

Prof. Dr. Leto Momm (UFSC)



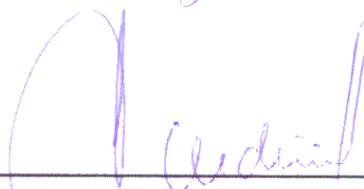
---

Prof. Dra. Glaci Trevisan Santos (UFSC)



---

Prof. Dr. Jorge Augusto Ceratti (UFRGS)



---

Prof. Dr. Jucilei Cordini - Coordenador do PPGEC

# **UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

*REUS BORTOLOTTI SALINI*

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Área de Concentração: Infra-Estrutura e Gerência Viária**

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon**

**Co-orientador: Prof. Dr. Leto Momm**

**Florianópolis  
2000**

SALINI, Reus Bortolotto. *Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas*. Florianópolis, 2000. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Antônio Fortunato Marcon

Defesa: Agosto/2000

**Resumo:**

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o comportamento estrutural e mecânico das misturas asfálticas empregadas na pavimentação rodoviária quando há a incorporação de borracha reciclada de pneus usados. A metodologia empregada resultou em significativa melhoria do desempenho estrutural da mistura asfáltica com borracha quando comparada com uma mistura de referência (sem borracha). Observou-se as alterações no desempenho das misturas variando-se as quantidades de cimento asfáltico e borracha para uma mesma composição granulométrica de agregados. As misturas foram avaliadas com base no Método Marshall e resistência à tração por compressão diametral. As misturas otimizadas também foram submetidas aos ensaios especiais (módulo de resiliência e vida de fadiga). Todos os resultados dos ensaios são apresentados.

**“A FORÇA ESTÁ COMIGO”**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Antônio Fortunato Marcon, pela orientação e auxílio na viabilização deste trabalho.

Ao Prof. Leto Momm, pelo eficiente e oportuno auxílio técnico.

À Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela provisão da bolsa.

À Fundación Mapfre, pelo conveniente e eficaz apoio financeiro.

Ao Departamento Estadual de Estradas de Rodagem de Santa Catarina, pela disponibilização da sua infra-estrutura laboratorial, especialmente ao Eng. Rubens Murilo Schramm e ao laborista Sérgio Luiz Silva.

À COPPE, pela realização dos ensaios especiais, especialmente à Profa. Laura Maria Goretti da Motta e ao Álvaro Augusto Dellê Vianna.

À empresa Pedrita, pela colaboração, especialmente ao Eng. Paulo Roberto Foschi.

À empresa Engisul Borrachas Ltda, pela cooperação e fornecimento de materiais, especialmente ao Eng. Enio De Paris.

À empresa Iguatemi, pelo auxílio na realização de ensaios.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. OBJETIVO DO TRABALHO.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. PROCEDIMENTOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. ESTRUTURA DOS PNEUS.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. HISTÓRIA DO EMPREGO DE BORRACHA RECICLADA         DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. USOS E DESTINOS POSSÍVEIS PARA OS PNEUS USADOS....</b>	<b>12</b>
2.3.1. ARMAZENAGEM A CÉU ABERTO E DISPOSIÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS.....	12
2.3.2. QUEIMA PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA.....	13
2.3.3. PIRÓLISE.....	14
2.3.4. RECAUCHUTAGEM.....	15
2.3.5. TRITURAÇÃO DA BORRACHA.....	15
2.3.6. OUTROS EMPREGOS EM BORRACHAS.....	17
2.3.7. OUTRAS FORMAS DE REAPROVEITAMENTO.....	20
<b>2.4. INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM         MISTURAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>21</b>
2.4.1. PROCESSO SECO.....	22
2.4.1.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS.....	24
2.4.1.2. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	25

2.4.2. PROCESSO ÚMIDO.....	27
2.4.2.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS.....	30
2.4.2.2. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	33
2.4.3. NÍVEL TECNOLÓGICO ATUAL DO EMPREGO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	35
<b>2.5. PROGRAMA ELSYM5.....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS.....</b>	<b>37</b>
3.1. AGREGADOS.....	37
3.2. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO.....	41
3.3. BORRACHA.....	43
3.3.1. MICROMORFOLOGIA.....	43
<b>CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO.....</b>	<b>47</b>
4.1. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDADAS.....	47
4.1.1. DEFINIÇÃO DA MISTURA DE REFERÊNCIA.....	48
4.1.2. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS EXPERIMENTAIS.....	48
4.2. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	49
4.3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	50
4.4. DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA.....	51
4.5. DETERMINAÇÃO DAS VIDAS DE FADIGA.....	52
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS DE LABORATÓRIO, ANÁLISES E CRITÉRIOS DE TOMADAS DE DECISÕES.....</b>	<b>54</b>
5.1. RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL.....	54
5.2. CURVA DE RELAÇÃO BORRACHA/BETUME.....	62

<b>5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....</b>	<b>63</b>
<b>5.4. SELEÇÃO DAS MISTURAS OTIMIZADAS.....</b>	<b>65</b>
<b>5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....</b>	<b>67</b>
5.5.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	67
5.5.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	68
5.5.3. ANÁLISE.....	68
<b>5.6. VIDA DE FADIGA.....</b>	<b>69</b>
5.6.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	70
5.6.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	73
5.6.3. COMPARATIVO - DIFERENÇA DE TENSÕES.....	76
5.6.4. COMPARATIVO - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RESILIENTE INICIAL.....	77
5.6.5. ANÁLISE.....	78
<b>CAPÍTULO 6 - DIMENSIONAMENTO HIPOTÉTICO SIMULADO COM O SOFTWARE ELSYM5.....</b>	<b>80</b>
<b>6.1. ESCOLHA DAS CARGAS.....</b>	<b>81</b>
<b>6.2. CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DAS ESTRUTURAS.....</b>	<b>82</b>
<b>6.3. RESUMO COMPARATIVO DOS RESULTADOS DAS ESTRUTURAS SIMULADAS.....</b>	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO 7 - ANÁLISES E COMENTÁRIOS.....</b>	<b>87</b>
<b>7.1. INTERAÇÃO ENTRE O CAP E A BORRACHA.....</b>	<b>87</b>
<b>7.2. RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO.....</b>	<b>88</b>
<b>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>90</b>

<b>CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>92</b>
---	-----------

<b>ANEXO A - DIMENSIONAMENTO HIPOTÉTICO SIMULADO COM O SOFTWARE ELSYM5 - MEMÓRIA DE CÁLCULO.....</b>	<b>101</b>
<b>A.1. ESTRUTURA 1.....</b>	<b>101</b>
A.1.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	101
A.1.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	103
A.1.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56].....	104
<b>A.2. ESTRUTURA 2.....</b>	<b>106</b>
A.2.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	106
A.2.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	107
A.2.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56].....	109
<b>A.3. ESTRUTURA 3.....</b>	<b>111</b>
A.3.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	111
A.3.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	112
A.3.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56].....	114
<b>A.4. ESTRUTURA 4.....</b>	<b>116</b>
A.4.1. MISTURA DE REFERÊNCIA.....	116
A.4.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA.....	117
A.4.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56].....	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Detalhe da estrutura do pneu radial.....	10
Figura 2.2 - Estabilização de ombreiras com pneus - vista do resultado final.....	18
Figura 2.3 - Proteção de canais com pneus - aspecto final.....	19
Figura 2.4 - Emprego de pneus em obras de drenagem.....	20
Figura 2.5 - Processos e terminologia técnica para o emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.....	21
Figura 3.1 – Curva granulométrica empregada.....	38
Figura 3.2 - Parte do agregado disposto em bandejas para ser colocado na estufa.....	40
Figura 3.3 - O asfalto foi acondicionado em embalagens fechadas de alumínio..	41
Figura 3.4 - Partículas de borracha antes da adição do CAP.....	44
Figura 3.5 - Partículas de borracha antes da adição do CAP.....	45
Figura 3.6 - Partículas de borracha após da adição do CAP.....	45
Figura 3.7 - Partículas de borracha após da adição do CAP.....	46
Figura 4.1 - Compactador elétrico para misturas betuminosas.....	50
Figura 4.2 - Corpos de prova, prestes a serem submetidos ao ensaio de resistência à tração, estão imersos em água com temperatura de 25° C.....	51
Figura 4.3 - Prensa onde foram realizados os ensaios de resistência à tração.....	52
Figura 4.4 - Esquema do equipamento para ensaios de compressão diametral de carga repetida [56].....	53
Figura 5.1 - Gráfico comparativo das densidades aparentes.....	56
Figura 5.2 - Gráfico comparativo das estabilidades Marshall.....	57
Figura 5.3 - Gráfico comparativo dos valores de fluência.....	58
Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos volumes de vazios.....	59
Figura 5.5 - Gráfico comparativo dos vazios do agregado mineral.....	60
Figura 5.6 - Gráfico comparativo das relações betume/vazios.....	61
Figura 5.7 - Equação de cálculo da relação borracha/betume.....	62

Figura 5.8 - Gráfico comparativo das relações borracha/betume.....	62
Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores das resistências à tração.....	64
Figura 5.10 - Gráfico de vida de fadiga da mistura de referência em termos de diferença de tensões.....	71
Figura 5.11 - Gráfico de vida de fadiga da mistura de referência em termos de deformação específica resiliente inicial.....	72
Figura 5.12 - Gráfico de vida de fadiga da mistura experimental otimizada em termos de diferença de tensões.....	74
Figura 5.13 - Gráfico de vida de fadiga da mistura experimental otimizada em termos de deformação específica resiliente inicial.....	75
Figura 5.14 - Gráfico comparativo das curvas de vida de fadiga em termos de diferença de tensões.....	76
Figura 5.15 - Gráfico comparativo das curvas de vida de fadiga em termos de deformação específica resiliente inicial.....	77
Figura 6.1 - Esquema das cargas e estruturas simuladas.....	82
Figura 6.2 - Número de solicitações admissíveis para as estruturas 1 e 2.....	85
Figura 6.3 - Número de solicitações admissíveis para as estruturas 3 e 4.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações típicas entre borracha natural e sintética em pneus.....	9
Tabela 2.2 - Granulometria típica da borracha empregada no processo seco.....	25
Tabela 2.3 - Espessura estrutural equivalente entre misturas asfálticas convencionais e empregando asfalto-borracha [52].....	32
Tabela 3.1 - Composição da curva granulométrica utilizada.....	38
Tabela 3.2 - Granulometria dos materiais utilizados.....	39
Tabela 3.3 - Frações nas quais o agregado foi dividido.....	39
Tabela 3.4 - Densidade real dos agregados.....	40
Tabela 3.5 - Ponto de amolecimento do CAP (ABNT MB 164/72).....	42
Tabela 3.6 - Viscosidade Saybolt-Furol à alta temperatura (135° C) (DNER-ME 04/73).....	42
Tabela 3.7 - Adesividade de ligante ao agregado graúdo (DNER-ME 78/63).....	42
Tabela 3.8 - Densidade real da borracha.....	43
Tabela 4.1 - Teor de CAP das misturas convencionais avaliadas.....	48
Tabela 4.2 - Misturas experimentais avaliadas.....	49
Tabela 5.1 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0.....	54
Tabela 5.2 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0,7....	55
Tabela 5.3 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 1,1....	55
Tabela 5.4 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0,4....	55
Tabela 5.5 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,7 (DNER-ME 138/86) .....	63
Tabela 5.6 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 1,1 (DNER-ME 138/86) .....	63
Tabela 5.7 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,4 (DNER-ME 138/86) .....	63
Tabela 5.8 - Resumo das condições do ensaio de resiliência da mistura de referência.....	67

Tabela 5.9 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura de referência.....	67
Tabela 5.10 - Resumo das condições do ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada.....	68
Tabela 5.11 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada.....	68
Tabela 5.12 - Resumo das condições do ensaio de vida de fadiga da mistura de referência.....	70
Tabela 5.13 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura de referência.....	70
Tabela 5.14 - Resumo das condições do ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada.....	73
Tabela 5.15 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada.....	73
Tabela 6.1 - Modelos de desempenho à fadiga empregados na simulação de cálculo.....	81
Tabela 6.2 - Valores modulares adotados na simulação de dimensionamento....	82
Tabela 6.3 - Valores modulares empregados no dimensionamento simulado.....	83
Tabela 6.4 - Espessuras das camadas de CAUQ simuladas.....	84
Tabela 6.5 - Estrutura 1 (CAUQ = 25 cm).....	85
Tabela 6.6 - Estrutura 2 (CAUQ = 38 cm).....	85
Tabela 6.7 - Estrutura 3 (CAUQ = 50 cm).....	86
Tabela 6.8 - Estrutura 4 (CAUQ = 65 cm).....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

[n] =	Referência bibliográfica número “n”
$\epsilon_i$ =	Deformação específica resiliente inicial
$\epsilon$ =	Deformação específica
$\Delta\sigma$ =	Diferença de tensões
ABNT =	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM =	American Society for Testing and Materials
ARCO =	Arizona Refining Company Inc.
ARPG =	Asphalt Rubber Producers Group
C =	Graus celsius
CALTRANS =	Departamento de Transportes da Califórnia (California Department of Transportation)
CAP =	Cimento asfáltico de petróleo
CAUQ =	Concreto asfáltico usinado a quente
CRREL =	Cold Regions Research Engineering Laboratory
COPPE =	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DER/SC =	Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina
DNER =	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EUA =	Estados Unidos da América do Norte
ISTEA =	Intermodal Surface Transportation Efficiency Act
MNDOT =	Departamento de Transportes de Minnesota (Minnesota Department of Transportation)
N =	Número de ciclos
RUMAC =	Concreto asfáltico modificado com borracha (rubber-modified asphalt concrete)

SAM =	Membrana de absorção de tensões (stress absorbing membrane)
SAMI =	Membrana de absorção de tensões em intercamadas (stress absorbing membrane interlayer)
SUPERPAVE =	Superior performing pavement
UFRJ =	Universidade Federal do Rio de Janeiro
WSDOT =	Departamento de Transportes de Washington (Washington Department of Transportation)

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o comportamento estrutural e mecânico das misturas asfálticas empregadas na pavimentação rodoviária quando há a incorporação de borracha reciclada de pneus usados. A metodologia empregada resultou em significativa melhoria do desempenho estrutural da mistura asfáltica com borracha quando comparada com uma mistura de referência (sem borracha). Observou-se as alterações no desempenho das misturas variando-se as quantidades de cimento asfáltico e borracha para uma mesma composição granulométrica de agregados. As misturas foram avaliadas com base no Método Marshall e resistência à tração por compressão diametral. As misturas otimizadas também foram submetidas aos ensaios especiais (módulo de resiliência e vida de fadiga). Todos os resultados dos ensaios são apresentados.

## **ABSTRACT**

The objective of this work was to characterize the structural and mechanical behavior of asphalt mixtures, when some recycled rubber has been added. The basic asphalt mixture is the one commonly used in asphaltic pavement and the recycled rubber comes from used tires. The research methodology used made possible to optimize the rubber addition so that the structural behavior of the resulting asphalt mixture was improved when compared to the basic mixture without rubber. Keeping the same aggregate size, different amounts of rubber and asphalt cement has been tested to identify the consequent changes in the performance. The mixtures were evaluated by the Marshall Method and indirect tensile test. For the optimized mixtures special tests were performed, such as resilient modulus and fatigue life. All tests results are presented.

# capítulo 1

---

## INTRODUÇÃO

Juntamente com a explosão demográfica ocorrida no século XX houve um aumento exponencial na quantidade e tipos de resíduos gerados pela sociedade, sendo que a maior parte não recebe destino adequado, permanecendo no ambiente por até centenas de anos. A criação de materiais não degradáveis, combinado com o aumento da população, tem resultado em uma crise de disposição ambiental destes detritos. A reciclagem, transformando os rejeitos em produtos ou materiais novamente úteis para a sociedade, é uma alternativa.

Muitas agências governamentais da área rodoviária, organizações privadas e instituições avançam em estudos e pesquisas sobre a forma mais adequada de utilização dos materiais reciclados na construção de estradas. Estes estudos buscam conciliar a crescente necessidade de reutilização de forma econômica dos resíduos com as necessidades técnicas, operacionais e econômicas da indústria da construção rodoviária, através da avaliação do desempenho mecânico.

Nos países do chamado “primeiro mundo” o emprego de borracha reciclada em misturas asfálticas é visto com grande interesse, pois existe uma cultura e um consenso quanto à necessidade de preservação dos recursos naturais, minimização do descarte de detritos, reciclagem e reuso de materiais

outrora considerados inservíveis. As leis severas que disciplinam a preservação do meio ambiente constituem-se em um fator de incentivo ao emprego de materiais reciclados em todos os segmentos das atividades humanas.

Na área de estradas, as grandes extensões a serem pavimentadas e mantidas com recursos financeiros cada vez mais escassos exigem a adoção de medidas eficazes para se estabelecer soluções alternativas mais baratas e que, ao mesmo tempo, maximizem o efeito de cada unidade monetária disponível. O emprego de borracha reciclada de pneus em pavimentos asfálticos constitui-se em uma tecnologia alternativa, ambientalmente correta e eficaz do ponto de vista técnico-econômico, que vem sendo utilizada com cada vez mais ênfase em países desenvolvidos. No Brasil, somente agora iniciam-se os primeiros estudos e avaliações desta tecnologia.

O emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas ainda é pouco conhecido no meio rodoviário e, seguidamente, causa surpresa. Entretanto, este constitui-se num caminho que, pelas melhorias técnicas produzidas no pavimento asfáltico, benefícios ambientais e razoável relação custo-benefício, deverá, inevitavelmente, ser seguido.

## **1.1. JUSTIFICATIVA**

O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial que vem crescendo rapidamente em todos os ramos da atividade econômica e contempla a redução de custos trazendo, por vezes, melhorias e facilidades técnicas e operacionais.

A utilização racional e benéfica dos rejeitos contempla as crescentes preocupações com relação à disposição ambiental de detritos, ao mesmo tempo em que economiza recursos naturais. Um material que pode ser reaproveitado, embora constitua hoje um problema ambiental, é a borracha dos pneus de

veículos rodoviários, pneus estes que, após o uso, são descartados ou, de forma pouco significativa, recauchutados.

Estes pneus geralmente não são depositados nos aterros sanitários por não permitirem compactação. Muitas vezes são queimados liberando gases que contribuem para a formação de chuvas ácidas e outros problemas ambientais. As pilhas de armazenagem de pneus também servem como local para a procriação de mosquitos, ratos e outros vetores de doenças, além de representarem um risco constante de incêndio.

A área de infra-estrutura viária apresenta características que a qualificam de forma impar para o aproveitamento de resíduos. Dentre essas características destaca-se a possibilidade de utilização de materiais em estado bruto e semi-bruto, que dispensam a aplicação de processos de transformação caros e/ou complexos. Também, os sempre grandes volumes de materiais empregados pela construção viária favorecem, em muito, a viabilização técnico-econômica de processos de reciclagem.

O reaproveitamento da borracha de pneus, com o objetivo de incorporá-la às misturas asfálticas possui posição de destaque, pois, além de evitar que os pneus transformem-se em fonte de poluição, o resultado final é um pavimento com características técnicas superiores às verificadas em misturas asfálticas convencionais.

O pneu também é composto por borracha sintética, que possui excelentes propriedades físico-químicas para ser incorporado ao concreto asfáltico trazendo uma série de melhorias que se refletem diretamente na durabilidade do pavimento, dentre as quais podem ser citadas: a incorporação de agentes anti-oxidantes e inibidores da ação de raios ultravioleta que diminuem, sensivelmente, o envelhecimento do CAP, o aumento da resistência à ação química de óleos e combustíveis, a diminuição da sensibilidade à temperaturas extremas e o aumento da deformação de tração admissível, dentre outras. [8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17]

Este novo material que possui características favoráveis, aliado ao seu custo reduzido e maior durabilidade frente ao CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente) convencional, pode transformar-se numa excelente alternativa para a recuperação de pavimentos deteriorados, bem como para a execução de novos pavimentos, em rodovias, vias urbanas ou aeródromos.

## **1.2. OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo do trabalho, em um sentido amplo, é analisar o desempenho mecânico e estrutural do concreto asfáltico usinado a quente que recebe a incorporação de borracha reciclada de pneus pela forma mais fácil, simples e barata de ser implementada em uma usina de asfalto.

Em razão das divergências existentes nos resultados dos estudos disponíveis a respeito do emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas, o autor optou por adotar conceitos próprios aparado na bibliografia disponível, partindo, desta forma, de considerações teóricas diretamente para um trabalho de laboratório de proporções significativas, guiado pela preocupação de simular a situação real e prática de campo que ocorre com o transporte da mistura asfáltica aquecida da usina até o ponto de utilização.

O trabalho ocupou-se em estabelecer critérios para dosagens de misturas em função do comportamento estrutural, mas não houve preocupação com aspectos, comportamentos ou fenômenos químicos.

Em síntese, este trabalho tem por objetivo “avaliar o comportamento mecânico e estrutural do concreto asfáltico quando este recebe a adição de borracha reciclada de pneus”, empregando metodologias de uso corrente e o aparato tecnológico mais avançado existente no país atualmente. A borracha é adicionada à mistura através de um processo semelhante ao “processo seco”, mas buscando-se obter as melhorias estruturais verificadas no “processo úmido”.

### 1.3. PROCEDIMENTOS

Todo o trabalho desenvolve-se em laboratório. Através do Método Marshall foram moldados corpos de prova para quatro traços de concreto asfáltico a partir da mesma curva granulométrica de agregados. O primeiro destes traços não recebeu qualquer adição de borracha e foi denominado de “traço de referência”. Nos três traços restantes foram empregados três diferentes percentuais de borracha reciclada de pneus, um percentual diferente para cada traço. Estes foram denominados “traços experimentais” ou “misturas experimentais”.

Como é usual no Método Marshall, para cada traço foram adotados diferentes teores de cimento asfáltico. Os traços experimentais (com borracha) foram então comparados com o traço de referência (sem borracha). Estes traços, além de utilizarem a mesma curva granulométrica de agregados também empregaram cimento asfáltico de petróleo (CAP) do mesmo lote.

Em todas as etapas e ensaios foram utilizados apenas corpos de prova cilíndricos elaborados com o molde Marshall.

Após compactados os corpos de prova foram colocados na estufa por um período de 1 hora, à temperatura de 160° C, com o objetivo de simular a situação que ocorre no transporte da mistura asfáltica da usina até o local de aplicação.

Com base nos parâmetros estabelecidos no Método Marshall foi estabelecida uma mistura convencional ótima (com teor de CAP otimizado). Também com base no Método Marshall e nos dados relativos à resistência à tração por compressão diametral foi definida uma mistura experimental ótima (com teores de CAP e borracha otimizados). Estas duas misturas ótimas foram submetidas aos ensaios de módulo de resiliência e vida de fadiga.

A partir dos dados de comportamento à fadiga e módulo de resiliência foram efetuados dimensionamentos hipotéticos simulados através do software Elsym5, com o objetivo de estabelecer uma relação de comportamento estrutural e relação custo-benefício entre as duas misturas otimizadas.

## **1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho é composto por nove capítulos e um anexo.

No capítulo 1 é efetuada uma pequena introdução sobre o emprego de borracha reciclada de pneus em pavimentos asfálticos, a justificativa, os objetivos e os procedimentos adotados.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, onde é efetuada uma síntese sobre a composição dos pneus, um resumo da história do emprego da borracha em pavimentos, destinos possíveis para os pneus (estocagem, queima, pirólise, trituração, etc.) e o emprego de pneus na construção viária. O emprego da borracha em misturas asfálticas é abordado de forma aprofundada, com a citação dos principais processos de incorporação, projetos experimentais já efetuados e propriedades estruturais verificadas em outros estudos.

No capítulo 3 é feita a descrição e caracterização dos materiais empregados neste trabalho, a definição da curva granulométrica e são apresentadas algumas fotos contendo a borracha vista ao microscópio.

O capítulo 4 apresenta os procedimentos adotados no laboratório, definições das misturas asfálticas avaliadas e os parâmetros dos ensaios.

No capítulo 5 são enumerados os resultados verificados nos diversos ensaios: Método Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e estudo de vida de fadiga.

No capítulo 6 são apresentados os resultados de dimensionamentos simulados empregando-se o software Elsym5, onde efetuou-se a comparação do desempenho estrutural entre a mistura de referência e a mistura experimental.

No capítulo 7 o autor analisa e comenta os possíveis fenômenos que podem explicar a melhora estrutural verificada e efetua algumas considerações sobre a relação custo/benefício do emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

No capítulo 9 são enumeradas as bibliografias consultadas durante a realização deste trabalho.

O anexo A apresenta a memória de cálculo do dimensionamento simulado com o uso do software Elsym5.

## capítulo 2

---

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados aspectos relativos à composição dos pneus, histórico do emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas, bem como formas básicas de efetuar-se tal adição, e destinos possíveis para os pneus com ênfase nos empregos em engenharia rodoviária.

### 2.1. ESTRUTURA DOS PNEUS

O pneu é atualmente um produto resultado de uma avançada tecnologia e apesar da aparente simplicidade possui um grande número de componentes. A seguir são apresentados os dados característicos típicos para pneus [49]:

- Estrutura em aço, nylon, fibra de aramid, rayon, fibra de vidro e/ou poliéster.
- Borracha natural e sintética, incorporando aí centenas de tipos diferentes de polímeros;
- Reforçadores químicos, como carbono preto, sílica e resinas;
- Anti-degradantes: ceras de parafina antioxidantes e inibidoras da ação do gás ozônio;

- Promotores de adesão: sais de cobalto, banhos metálicos nos arames e resinas;
- Agentes de cura: aceleradores de cura, ativadores, enxofre;
- Produtos auxiliares no processamento dos pneus como óleos.

Um pneu típico, como o modelo P195/75R14, para veículos de passeio e mundialmente bastante difundido possui:

- 2,50 kg de 30 diferentes tipos de borracha sintética;
- 2,05 kg de 8 tipos diferentes de borracha natural;
- 2,27 kg de 8 tipos de carbono preto;
- 0,68 kg de aço para o cinturão;
- 0,45 kg de poliéster e nylon;
- 0,23 kg de arame de aço;
- 1,36 kg de 40 tipos diferentes de componentes químicos, ceras, óleos, pigmentos, etc.

As relações típicas entre borracha sintética e borracha natural, em alguns tipos de pneus, são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Relações típicas entre borracha natural e sintética em pneus

Finalidade do pneu	Borracha sintética	Borracha natural
Veículos de passeio	55%	45%
Veículos de carga leves	50%	50%
Pneus de competição	65%	35%
Pneus tipo fora-de-estrada	20%	80%

A Figura 2.1 apresenta a seção típica de pneus para veículos de passeio, onde estão indicados os principais elementos. A banda de rodagem, parte que entra em contato com a superfície de rolamento, deve apresentar grande resistência ao desgaste e desenhos, constituídos por partes cheias (biscoitos) e vazias (sulcos), auxiliares do desempenho e segurança do veículo. Os talões são formados, internamente, por arames de aço e, externamente,

devem manter o pneu acoplado ao aro sem permitir vazamentos de ar. A carcaça que é a parte resistente do pneu, constituída de lonas de poliéster, nylon ou aço, deve reter o ar que suporta o peso do veículo. Em pneus radiais a carcaça é reforçada com o uso de cinturas. Os flancos protegem a carcaça, são dotados de uma mistura especial de borracha com alto grau de flexibilidade.

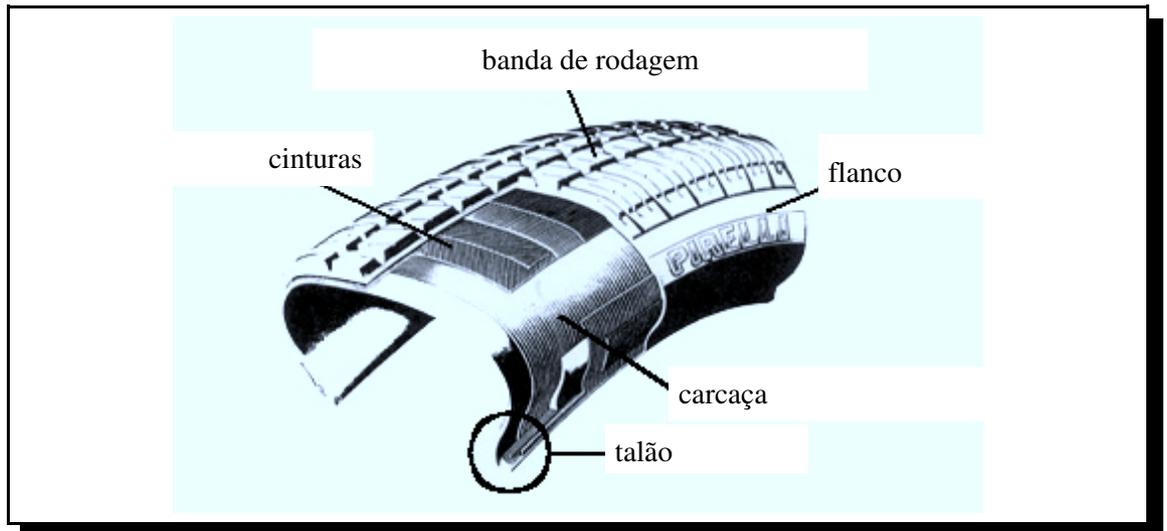


Figura 2.1 - Detalhe da estrutura de um pneu

## 2.2. HISTÓRIA DO EMPREGO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A necessidade de ligantes para a construção de estradas começou juntamente com a construção da primeira estrada. Zenke [19] relata que o Rei George IV (Inglaterra) concedeu uma patente sobre a utilização de borracha natural na construção de estradas para o Sr. Honcock [20] em 1823.

A primeira patente combinando material betuminoso com borracha natural para a construção rodoviária foi concedida para E. E. Cassell em 1844 na Inglaterra [48]. Entretanto, aplicações práticas com asfaltos modificados iniciaram-se somente em 1901 quando a “Societe du Pavage un Asphalt Caoutchoute” se estabeleceu na França. A construção da primeira via

empregando asfalto modificado com borracha ocorreu em 1902 em Cannes [22]. Em 1915 a “Rubber Roadway Ltd. Company” foi estabelecida na Grã-Bretanha [23].

Com a produção dos primeiros polímeros sintéticos nos idos de 1930, imediatamente, aventou-se a possibilidade de adicioná-los às misturas asfálticas. Entretanto até a Segunda Guerra Mundial os processos de modificação empregavam quase que exclusivamente a borracha natural. Somente após a Guerra, com o desenvolvimento de materiais sintéticos de macro-molécula surgiu um novo conjunto de materiais que poderiam ser empregados para a modificação do asfalto.

O principal fator que motiva a incorporação de polímeros no asfalto é aumentar a vida de serviço do pavimento, diminuindo a susceptibilidade da mistura asfáltica às variações térmicas, aos riscos de deformações permanentes e falhas por fadiga. Preferivelmente os polímeros também devem melhorar as características elásticas do pavimento, contribuir para uma maior adesão entre o cimento asfáltico e o agregado, aumentar a resistência ao envelhecimento do cimento asfáltico, entre outras.

O emprego de borracha reciclada de pneus como fonte barata de borracha para modificação do cimento asfáltico sempre recebeu atenção da indústria. Experimentos com esta borracha iniciaram-se na década de 1920. Em 1940, nos EUA, a Rubber Reclaiming Company começou a vender borracha de pneus desvulcanizada e reciclada, denominada Ramflex, como partículas para serem adicionadas em misturas asfálticas para pavimentos.

Na Suécia em 1960 duas empresas desenvolveram um composto que utilizava borracha de pneus, denominado “Rubit”. A borracha era adicionada à mistura na forma de partículas pequenas para funcionarem como agregado. Na década de 1970 este produto foi introduzido nos EUA e patenteado com o nome de “PlusRide”. Em 1976 o Departamento de

Transportes do Alaska (EUA) começou a empregar o PlusRide tornando-se o principal usuário e avaliador do produto [2].

Em 1963, Charles McDonald iniciou o desenvolvimento de um ligante modificado para asfalto usando 25% de borracha triturada, que foi patenteado com o nome de Overflex, embora seja mais conhecido como “Processo McDonald”. Em meados da década de 1970 a Arizona Refining Company Inc. (ARCO) criou um ligante semelhante, contendo 18 a 20 % de borracha reciclada, batizado de “Arm-R-Schild”.

Devido a importância ambiental em se encontrar alternativas para o consumo dos pneus usados, em 1991, nos Estados Unidos da América do Norte, a seção 1038 do Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA) através da Lei Pública N° 102-240 determinou a utilização de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. A partir desta data muitas novas tecnologias começaram a ser pesquisadas e avaliadas. Os estudos começaram com misturas similares ao PlusRide e ao processo de McDonald e atualmente os processos estão em contínuo aperfeiçoamento. Apesar dos grandes esforços que estão sendo feitos, são poucos os processos que conseguiram viabilidade técnica e econômica [21].

## **2.3. USOS E DESTINOS POSSÍVEIS PARA OS PNEUS USADOS**

Os pneus usados podem ter inúmeros destinos, alguns úteis para a sociedade. Os principais são aqui analisados.

### **2.3.1. ARMAZENAGEM A CÉU ABERTO E DISPOSIÇÃO EM ATERROS SANITÁRIOS**

A armazenagem de pneus para uso posterior é problemática, pois as pilhas de pneus rapidamente se transformam em local de procriação de ratos,

insetos e outros vetores de doenças e representam risco constante de incêndio. Muitos governos já estudam a viabilidade de proibir completamente a armazenagem a céu aberto.

A disposição em aterros sanitários é igualmente difícil. Os pneus precisam ser picados antes que seja efetuada a disposição, pois inteiros não permitem compactação. Cortar os pneus em pedaços é um processo oneroso, pois requer equipamentos especiais e, mesmo assim, os pneus necessitam de grande espaço para a disposição. Esta prática é indesejada mesmo nos países que operam com aterros sanitários geridos pela iniciativa privada e onde o cidadão precisa pagar para que os seus pneus sejam recebidos, pois a margem de lucro nesta operação é extremamente exígua, em comparação com outros detritos, e os pneus, seguidamente, figuram como motivo de atritos entre estes operadores privados e as autoridades públicas. [24]

### **2.3.2. QUEIMA PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA**

Os pneus também podem ser aproveitados como fontes de energia, principalmente em substituição ao carvão em fornos de altas temperaturas, pois possuem elevada quantidade de calorías. No país existem experiências para o emprego em fornos da indústria de cimento. Do ponto de vista econômico esta atividade praticamente não gera lucros, pois a indústria não aceita pagar para receber estes pneus ou paga um valor suficiente apenas para cobrir custos de transporte e trituração. Para serem utilizados como combustível os pneus normalmente são cortados em partículas com tamanhos de 50 mm a 150 mm. Algumas indústrias também exigem que os pedaços de borracha estejam livres de partes metálicas.

Em países que tradicionalmente utilizam carvão com elevado nível de enxofre não foram verificadas diferenças significativas entre a emissão de gases poluentes produzidos por borracha de pneus e pelo carvão. Relatórios também sugerem que algumas empresas que utilizam pneus como combustível têm problemas para controlar os níveis de emissão de poluentes. Também já foram

identificados níveis elevados de zinco e cromo nas cinzas resultantes da queima. Parece haver uma tendência de que os pneus continuem sendo utilizados como combustíveis ainda por algum tempo, até que a recuperação da borracha dos pneus para reaproveitamento seja feita de forma mais eficiente e em maior escala.

### **2.3.3. PIRÓLISE**

A pirólise implica no aquecimento dos pneus a uma temperatura superior a 1000° C, em um ambiente com teor de oxigênio muito baixo ou muito elevado e com pressão abaixo da atmosférica. O objetivo deste processo é superaquecer a borracha sem levá-la à combustão. Sob temperatura e pressão apropriadas a fração de óleo existente e algumas associações orgânicas são liberadas na forma líquida enquanto outras frações são liberadas na forma de gases voláteis. Os gases podem ser recuperados e queimados para produzir vapor ou empregados como combustível em motores apropriados. A fração líquida pode ser utilizada como combustível ou mesmo refinada, extraindo-se então frações leves e pesadas. A parte remanescente do pneu é basicamente um esqueleto de carbono (carvão), que pode ser prensado para formar blocos ou granulado.

O carbono produzido por este processo é invariavelmente contaminado por elevados teores de zinco e outros metais, e o seu valor de venda normalmente é baixo. A qualidade dos produtos provenientes da pirólise pode ser melhorada se a parte metálica existente nos pneus for previamente retirada, entretanto este pré-processamento necessita de ainda mais equipamentos e instalações industriais.

Também foram constatados problemas relacionados à saúde dos trabalhadores que operam estes sistemas, sendo que há fortes suspeitas de aumento na ocorrência de câncer relacionado à inalação de partículas deste carbono, sendo necessária a adoção de medidas rigorosas e seguidamente caras para controlar estas partículas.

A pirólise não é atualmente considerada viável do ponto de vista econômico devido ao baixo valor de venda dos produtos gerados e complexidade do processo.

#### **2.3.4. RECAUCHUTAGEM**

A recauchutagem pode ser considerada uma boa forma de reaproveitamento dos pneus, entretanto parece não ter boa aceitação, principalmente, entre os proprietários de veículos leves e, mesmo com os avanços tecnológicos ocorridos nos últimos anos, que possibilitam uma performance boa, os motoristas ainda preferem pneus novos.

Esta realidade é diferente no setor de veículos rodoviários de carga, onde, a nível nacional, três de cada quatro pneus em circulação são recauchutados. As empresas transportadoras chegam, inclusive, a utilizar como critério de escolha para compra o número de vezes que um pneu pode ser recauchutado.

A prática da recauchutagem não elimina o problema ambiental causado pelos pneus, apenas retarda a sua ocorrência pois, em última instância, também os pneus recauchutados necessitam ser descartados

#### **2.3.5. TRITURAÇÃO DA BORRACHA**

O método que oferece maiores vantagens de reciclagem é a trituração em partículas pequenas, com a separação do aço, das fibras e da borracha. Todos os componentes são reaproveitáveis, o aço é enviado para siderurgia enquanto a borracha e as fibras possuem muitas aplicações.

Os pneus podem ser triturados, basicamente, através de dois processos: a tecnologia criogênica ou em temperatura ambiente.

No processo criogênico o pneu é congelado em temperaturas extremamente baixas (-87° C a -198° C) através da exposição ao nitrogênio

líquido ou ar líquüefeito, este último, o mais incomum. Nesta temperatura a borracha torna-se extremamente frágil. O pneu congelado passa então por uma série de moinhos de martelo que o reduzem ao tamanho de partículas finas ou superfinas (geralmente de 0,5 mm a 0,1 mm).

Há dois problemas fundamentais com o processo criogênico. O primeiro é o elevado custo operacional e o segundo está relacionado às características físicas da borracha produzida. Neste processo o consumo de energia é muito baixo, quando comparado à trituração em temperatura ambiente, entretanto os custos com gases criogênicos são elevados, sendo necessário de 0,7 a 1,2 litros de gás para cada quilograma de borracha produzida. Isso significa que a viabilidade comercial só pode ser alcançada com a produção de borracha extremamente fina e em larga escala. O segundo problema está relacionado à qualidade da borracha produzida, que possui características técnicas inferiores àquela obtida à temperatura ambiente. O processo de redução do tamanho da partícula faz com que as mesmas possuam arestas polidas e pequena superfície específica, o que diminui sua interação com outros materiais. Para aplicações em misturas asfálticas, a borracha triturada à temperatura ambiente recebe ampla preferência dos usuários.

O processo de trituração a temperatura ambiente é realizado em uma série de estágios (freqüentemente até seis), através dos quais as partículas são progressivamente reduzidas de tamanho. Normalmente as partículas são trituradas com tamanhos de 3,0 mm à 0,5 mm. Neste processo o aço é retirado por eletroimãs, sendo que os equipamentos mais modernos permitem a retirada deste aço por inteiro já no primeiro estágio. As fibras presentes nas lonas dos pneus são retiradas por peneiramento.

A borracha produzida oferece características físicas superiores àquelas produzidas pelo processo criogênico, sendo a principal a elevada superfície específica das partículas. Mas também há desvantagens, como alterações químicas na borracha, produzidas pelo calor gerado pelo atrito resultante do processamento, quando este não for controlado adequadamente,

e há a necessidade de um controle eficiente para evitar o espalhamento das partículas de borracha dentro das instalações de trituração. As partículas passam por estágios sucessivos de trituração até que seja obtida a granulometria desejada. Este processo é o mais empregado atualmente por possuir a melhor relação custo-benefício.

### **2.3.6. OUTROS EMPREGOS EM ESTRADAS**

Além de ser empregado na mistura asfáltica, o pneu também pode ser aproveitado na construção viária de várias outras formas.

Cortados em pedaços, tiras, triturados ou até mesmo inteiros, os pneus tem sido utilizados como material de enchimento em aterros desde meados da década de 1980. Conforme Epps [25], em 1991 nos Estados Unidos da América do Norte, 10 Estados utilizavam os pneus em aterros, onde foram verificados alguns benefícios:

- Evita a disposição dos pneus em aterros sanitários;
- Substitui o agregado;
- É um material leve;
- Melhora as características de drenagem (é permeável);
- Não é biodegradável, mesmo se ficar abaixo do lençol freático; e,
- É barato.

Neste tipo de aplicação são consideradas partículas grandes as compreendidas entre 76 mm e 305 mm, sendo este último o tamanho máximo recomendado. Tamanhos considerados normais estão situados entre 12 mm e 76 mm. Em aterros que requerem controle de compactação é recomendado o uso de partículas com no máximo 50 mm. [26]

Apesar das vantagens, há ainda algumas questões pendentes em relação ao emprego de pneus em aterros. A principal delas é relativa à causa, ou causas, de reações exotérmicas que provocaram três incêndios em aterros no ano de 1995 nos Estados Unidos da América do Norte [31]. Também há carência de estudos avaliando o comportamento estrutural deste tipo de aterro,

determinando proporções ótimas entre solo e o granular de borracha, tipos de solo mais adequados e tamanhos ideais dos granulares de borracha.

Em 1985, no Estado de Minnesota, foi proposto o emprego de pneus como uma espécie de geogrelha em regiões com solo mole, e várias seções experimentais foram executadas. Após dois anos de observações, os recalques verificados variaram entre 30 cm e 45 cm, situando-se entre 30 cm e 60 cm menores que os esperados em condições convencionais (sem reforço da fundação de aterro). [25]

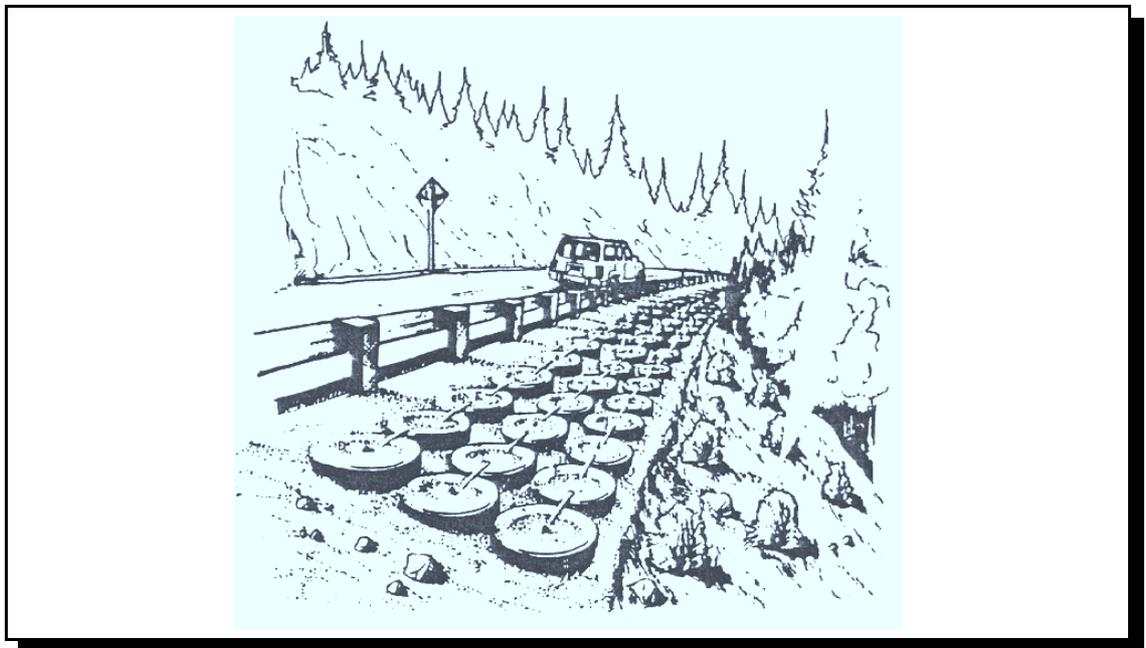


Figura 2.2 - Estabilização de ombreiras com pneus - vista do resultado final

Os pneus também tem sido empregados na estabilização de ombreiras substituindo outras soluções (como gabiões, por exemplo) com grande vantagem econômica. No Estado estadunidense da Califórnia foram elaboradas especificações para este emprego [26]. A Figura 2.2 ilustra o aspecto final deste tipo de estabilização, onde também pode-se observar a amarração dos pneus efetuada com dispositivos metálicos.

Também na Califórnia foram elaboradas especificações para uso na proteção de taludes em canais e rios (Figura 2.3).

Para o emprego em proteção de taludes o CALTRANS recomenda diversos cuidados, que também são válidos para a estabilização de ombreiras. Os pneus devem ser dispostos e empilhados de tal forma que mantenham a sua forma geométrica original. Os clips metálicos utilizados para prender um pneu ao outro precisam ser confeccionados com barras de aço de diâmetro de 12,5 mm. O material escavado para a colocação da proteção pode ser empregado em um eventual reaterro atrás da barreira (proteção) de pneus, sendo recomendada, neste caso, a compactação através de compactadores manuais. O CALTRANS também recomenda que os pneus fiquem em locais não visíveis aos motoristas, ocultados pela vegetação e/ou pintados para ficarem mais bem dissimulados no ambiente.

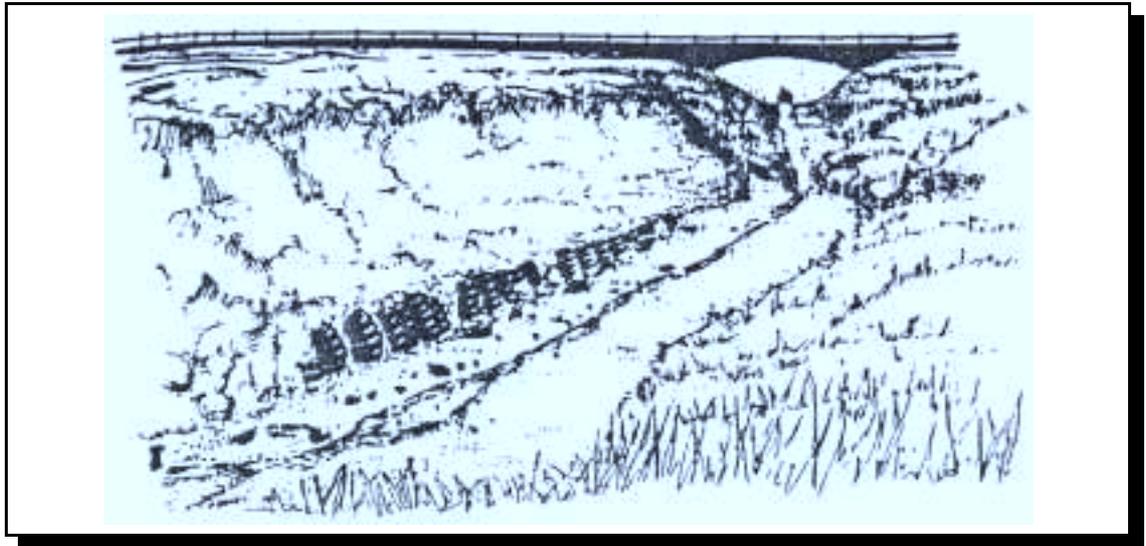


Figura 2.3 - Proteção de canais com pneus - aspecto final

Em regiões desérticas ou próximas à dunas de areia, barreiras de pneus também podem ser empregadas para evitar ou diminuir o carreamento de areia para a rodovia devido à ação do vento. Também há iniciativas para o emprego de pneus em proteção de taludes sujeitos a erosões.

No Estado estadunidense de Connecticut, na junção das Rodovias (Routes) 2 e 17, em 1975, foram feitas avaliações de barreira de inércia atenuadora de impactos de veículos construídas com pneus e areia. Os custos de implantação se mostraram bastante abaixo daquele apresentado pelas soluções tradicionais. O estudo indicou que este tipo de barreira possui uma performance satisfatória em termos de desaceleração do veículo, custos de reposição e manutenção, mas os resultados não foram considerados conclusivos quanto à redução de outros danos decorrentes da colisão. [27, 28]

Também há iniciativas para o emprego de pneus em obras de drenagem, em substituição aos bueiros. Para formar um tubo, os pneus são presos uns aos outros para comporem módulos. Nos Estados estadunidenses de Vermont e Georgia esta prática tem sido adotada e apresentou um desempenho aceitável [29]. A Figura 2.4 apresenta um módulo composto por cerca de 15 pneus. Também pode-ser observar a haste metálica utilizada para a amarração dos pneus.



Figura 2.4 - Emprego de pneus em obras de drenagem

### **2.3.7. OUTRAS FORMAS DE REAPROVEITAMENTO**

Existem vários outros processos desenvolvidos para a trituração/redução dos pneus para aplicações diversas. Alguns são

rudimentares enquanto outros envolvem sistemas bastante avançados, com o emprego de ultra-som ou microondas, ou processos químicos, entretanto a participação destes no mercado é insignificante ou simplesmente não estão disponíveis a nível comercial.

## 2.4. INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A borracha de pneu pode ser incorporada às misturas asfálticas através de dois métodos básicos, convencionalmente denominados de “processo seco” e “processo úmido”.

No processo úmido a borracha triturada atua como modificadora do cimento asfáltico, enquanto no processo seco os grânulos de borracha são empregados como agregado. Os Estados Unidos da América do Norte é o país com maior tradição no emprego de borracha reciclada de pneus em pavimentos asfálticos.

A Figura 2.5 apresenta uma síntese esquemática dos processos de incorporação de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas e os produtos resultantes.

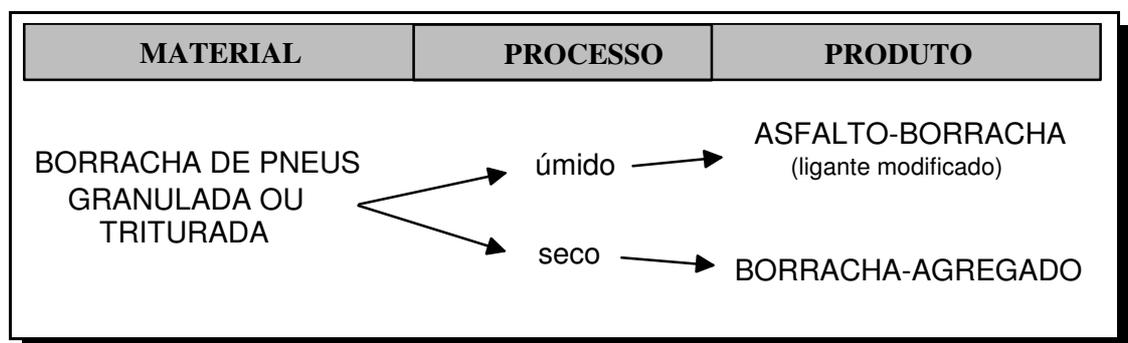


Figura 2.5 - Processos e terminologia técnica para o emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas

### 2.4.1. PROCESSO SECO

O processo seco (do inglês “dry process”) pode ser usado para misturas asfálticas a quente, sejam elas do tipo aberta ou fechada. Ele não pode ser usado em outros tipos de pavimentos, como misturas asfálticas a frio, fechamento de trincas ou tratamentos superficiais.

No processo seco a borracha é empregada como substituta de uma pequena parte dos agregados finos (usualmente 1% a 3% do peso total da mistura). As partículas de borracha são adicionadas ao agregado antes da adição do cimento asfáltico. Este processo também é freqüentemente chamado de “borracha-agregado” ou “concreto asfáltico modificado com borracha” (do inglês “rubber-modified asphalt concrete - RUMAC”).

O processo seco atualmente empregado foi desenvolvido na década de 1960 na Suécia e originalmente denominado “Rubit”. Foi, posteriormente, introduzido nos Estados Unidos da América do Norte com o nome de “PlusRide”. Neste processo é acrescentado de 1% a 3% de borracha granulada em relação ao peso total da mistura asfáltica, com os grânulos de borracha variando de 6,3 mm a 2,0 mm. O objetivo é que esta borracha preencha os vazios que normalmente situam-se entre 2% e 4%, que é usualmente obtido com um conteúdo de cimento asfáltico variando entre 7,5% e 9%, segundo HEITZMAN [2].

Conforme ZANZOTTO [51], as misturas asfálticas que incorporam borracha reciclada de pneus pelo processo PlusRide apresentam as seguintes melhorias:

- aumento da flexibilidade;
- aumento da durabilidade;
- melhor controle da propagação prematura de trincas;
- diminuição das fissuras por fadiga;
- melhor aderência dos veículos ao pavimento;
- redução no nível de ruído provocado pelo atrito pneu-pavimento;
- propriedades descongelantes.

Por outro lado, ZANZOTTO [51] também enumera algumas desvantagens:

- introdução de mais um material (borracha reciclada) na usina de asfalto;
- incrementos na quantidade ótima de cimento asfáltico;
- aumento na temperatura de usinagem;
- pagamento de royalties para uso de processos patenteados.

Outro processo, conhecido como “processo seco genérico” (do inglês “generic dry process”) foi desenvolvido no final da década de 1980 e início da década de 1990 para produzir misturas quentes do tipo densas. O conceito foi desenvolvido por Barry Takallou como resultado de suas pesquisas e experiências práticas no emprego do PlusRide [2]. Este processo emprega partículas de borracha de vários tamanhos com o objetivo de criar um gradiente granulométrico e obter também alguma modificação do ligante. As partículas de borracha podem precisar de um pré-tratamento ou pré-reação com um agente catalisador para se obter um certo inchamento das partículas. Neste sistema, usualmente o conteúdo de borracha não excede a 2% do peso total da mistura. Seções experimentais foram executadas em vários locais, como Flórida, Nova Iorque, Oregon e Ontário [25].

O Corpo de Engenheiros do exército estadunidense, através do Laboratório de Pesquisas de Engenharia para Regiões Frias (Cold Regions Research Engineering Laboratory - CRREL) investigou o emprego do processo seco para amenizar o problema da formação de gelo sobre os pavimentos. Deste estudo resultou a recomendação de se utilizar partículas de borracha maiores que 4,75 mm e com tamanho máximo de 9,5 mm. Esta tecnologia também é chamada de “processo seco com partículas de borracha grandes” (do inglês “chunk rubber process”) [25]. As propriedades Marshall, o módulo de resiliência e testes de remoção de gelo foram efetuados em laboratório com concentrações de borracha de 3, 6 e 12% em peso de agregado. Estes testes indicaram que quantidades elevadas de borracha podem aumentar a incidência de trincas no gelo formado sobre o pavimento,

facilitando o degelo e a remoção [32]. HEITZMAN afirma que o Corpo de Engenheiros também avaliou, no laboratório, concentrações de borracha de 25, 57 e 100% em peso de agregado [2]. Segundo EPPS [25] este processo ainda não foi avaliado em nível de campo.

#### 2.4.1.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS

O desempenho verificado em seções experimentais empregando borracha pelo processo seco nos Estados Unidos da América do Norte é muito variável.

Desde 1977 o Departamento de Transportes de Washington (WSDOT) empreendeu algumas obras empregando o processo seco e usando partículas de borracha com até 6,3 mm. O desempenho de sete trechos, nos quais foi empregada a tecnologia PlusRide variou de excelente até falha imediata. Problemas construtivos foram verificados em muitos trechos. O WSDOT concluiu que o PlusRide não aparenta melhorar o desempenho do pavimento [37].

Em Nova Iorque dois projetos experimentais de restauração com misturas asfálticas empregando borracha pelo processo seco foram construídos em 1989 para comparar o desempenho com misturas convencionais. Foram aplicadas camadas com 37,5 mm de espessura sobre um pavimento rígido de concreto de cimento portland. Em ambos os projetos foi empregada a tecnologia PlusRide com 1, 2 ou 3% de borracha granulada [35]. Após 3 anos o Departamento de Transportes do estado de Nova Iorque não considerou estes projetos econômicos ou que tenham obtido sucesso.

O Departamento de Transportes de Minnesota (MNDOT) utilizou o processo seco em pelo menos dois diferentes projetos, desde 1979. Nos dois projetos foi empregada a tecnologia PlusRide, usando borracha granulada em concretos asfálticos do tipo aberto, com o objetivo de criar um pavimento “autodescongelante”. O desempenho do pavimento foi considerado bom, mas não foram detectadas melhorias compatíveis com o incremento do custo do

pavimento e não foi verificada nenhuma capacidade de autodescongelamento significativa [34].

O Departamento de Transportes da Califórnia (California Department of Transportation - CALTRANS) construiu quatro projetos utilizando a tecnologia PlusRide. Foram observados alguns problemas de transporte da mistura até o local de aplicação em três destes projetos. Em termos gerais, foi verificado que em dois dos quatro projetos a mistura pelo processo seco teve desempenho superior ao do concreto asfáltico convencional do tipo denso e, num terceiro projeto, o desempenho foi similar. O quarto projeto não foi dimensionado adequadamente e necessitou uma restauração [33].

Em termos gerais o desempenho de misturas asfálticas que empregam borracha pelo processo seco é bastante irregular. Pistas em serviço, depois de muitos anos, tendem a apresentar uma pequena melhoria sobre misturas asfálticas convencionais.

#### 2.4.1.2. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Algumas propriedades da borracha granulada são particularmente interessantes para a adição em misturas asfálticas pelo processo seco, incluindo a granulometria, formato das partículas e tempo de reação.

A Tabela 2.2 traz uma graduação para as partículas de borracha, apresentada por EMERY [38] em 1995.

Tabela 2.2 - Granulometria típica da borracha empregada no processo seco

Peneira	Percentual passando em peso
6,3 mm (1/4")	100
4,75 mm (N° 4)	76 - 100
2,0 mm (N° 10)	28 - 42
0,85 mm (N° 20)	16 - 24

As formas das partículas estão intrinsecamente associadas às peculiaridades dos equipamentos que as produzem. Partículas produzidas por granuladores costumam ter um formato cúbico e com uma superfície específica baixa, enquanto partículas produzidas através de trituradores costumam ter formato irregular e uma elevada superfície específica.

Partículas cúbicas com pequena superfície específica é uma característica de agregados convencionais (pétreos) e é desejável para partículas de borracha que vão funcionar como agregado em misturas pelo processo seco. Partículas de formato irregular e com elevada superfície específica são melhores quando se deseja uma reação com o cimento asfáltico, sendo, por isso, mais adequadas para o emprego no processo úmido.

Limitando-se o tempo com que as partículas cúbicas de borracha são mantidas em contato com o cimento asfáltico à temperatura necessária para uma reação e devido à baixa superfície específica das mesmas, estas partículas mantêm o seu formato e rigidez, o que é desejável quando o objetivo é a incorporação de um agregado de baixa rigidez e que aumente a flexibilidade do pavimento, característica necessária em locais de frio extremo. Além do formato cúbico, as partículas produzidas por granuladores também costumam possuir faces relativamente polidas, o que as tornam ainda menos susceptíveis à reações com o cimento asfáltico.

O tempo disponível para reação entre a borracha e o cimento asfáltico pelo processo PlusRide é relativamente pequeno, não havendo muita oportunidade para combinação entre eles. No processo seco genérico, que utiliza borracha de vários tamanhos, geralmente pré-tratadas com um catalisador, as partículas estão aptas para reagir (combinar-se), de forma limitada, com o cimento asfáltico [25].

As propriedades estruturais da mistura asfáltica produzida pelo processo seco que despertam maior interesse são a estabilidade, a vida de

fadiga, o módulo de resiliência, susceptibilidade à deformação permanente e comportamento quanto à propagação de trincas.

A estabilidade geralmente apresenta valores inferiores àqueles de misturas convencionais (sem borracha) quando avaliadas pelo método Marshall ou Hveem.

Misturas contendo borracha granulada possuem módulo de resiliência tipicamente menor que o verificado em misturas asfálticas a quente sem borracha. Misturas asfálticas produzidas pelo processo seco apresentam, geralmente, módulo de resiliência 10 a 20 % superior aos de misturas produzidas pelo processo úmido.

Estudos indicam que misturas asfálticas contendo borracha são mais susceptíveis às deformações permanentes quando comparadas com misturas asfálticas convencionais. Entretanto, a vida de fadiga, geralmente, apresenta-se significativamente superior [25].

A adição de borracha pode exercer influência no comportamento relativo à propagação de trincas. Para que a mistura asfáltica retarde a propagação de trincas deve ser adicionada uma quantidade pequena de borracha, normalmente entre 1% e 2% em peso de agregado. Embora o peso seja pequeno, devido a baixa densidade o volume é significativo. A reação (ou combinação) entre a borracha e o cimento asfáltico não aparenta ter importância significativa sobre este aspecto do comportamento das misturas projetadas pelo processo seco [25].

#### **2.4.2. PROCESSO ÚMIDO**

O cimento asfáltico contendo borracha reciclada de pneus e modificado pelo processo úmido (do inglês “wet process”) pode ser empregado em misturas asfálticas quentes, capas selantes, tratamentos superficiais, membranas absorvedoras de tensão, selamento de trincas e outras aplicações. No processo úmido as partículas de borracha não são incorporadas à mistura

asfáltica, mas ao cimento asfáltico antes deste ser adicionado ao agregado. Usualmente são empregados teores de borracha que variam de 18 a 26% do peso de ligante [50].

Quando o cimento asfáltico e a borracha triturada são misturados, ocorre uma combinação destes materiais. Esta combinação ou reação é influenciada pela temperatura em que a mistura é feita, o tempo em que esta temperatura se mantêm, se há agitação mecânica e a intensidade desta, os tipos de componentes aromáticos (óleos maltenos) presentes no ligante e o tamanho, textura e superfície específica das partículas de borracha. O resultado desta reação é a absorção de óleos aromáticos pelas cadeias de polímeros que formam a estrutura da borracha natural e sintética que, por sua vez, são os principais componentes das partículas de borracha de pneus. A velocidade desta reação pode ser aumentada pelo incremento da superfície específica das partículas de borracha e pelo aumento da temperatura de reação. A viscosidade é o principal parâmetro para se acompanhar a reação. Quando ocorre esta reação, o ligante modificado também é chamado de “asfalto-borracha”. Um tempo mínimo de reação, variável de acordo com a temperatura estabelecida, é necessário para que ocorra a estabilização da viscosidade deste ligante modificado. [25]

As aplicações do processo úmido foram inicialmente efetuadas com base no Processo McDonald e no produto Arm-R-Schild desenvolvido pela ARCO. Existe um significativo número de patentes depositadas com base nestas duas tecnologias, algumas já expiraram e outras ainda não. [25, 41]

Um processo de mistura contínuo foi desenvolvido na Flórida no final da década de 1980 e seguidamente é citado como “processo úmido da Flórida” (do inglês “Florida wet process”). Neste processo, partículas finas de borracha (0,18 mm) são adicionadas ao cimento asfáltico em percentuais baixos (8 a 10%), com baixa temperatura de mistura e pequeno tempo de reação. Segundo EPPS [25] este processo não foi patenteado.

Segundo ZANZOTTO e a empresa Asphalt Rubber Producers Group (ARPG) [51], o cimento asfáltico modificado com borracha reciclada de pneus, ou simplesmente asfalto-borracha, apresenta as seguintes características:

- Diminuição da sensibilidade às variações térmicas, quando comparado ao CAP convencional;
- Aumento da elasticidade;
- Melhor adesividade aos agregados;
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Maior resistência ao envelhecimento, propagação de trincas e formação de trilhas de roda;
- Permite a redução da espessura do pavimento;
- Proporciona melhor aderência pneu-pavimento;
- Redução no ruído provocado pelo tráfego entre 65 e 85%.

Bons resultados tem sido verificados com o emprego do asfalto-borracha em membranas de absorção de tensões e membranas de absorção de tensões em intercamadas [36]. Estas membranas (do inglês “Stress Absorbing Membrane - SAM” e “Stress Absorbing Membrane Interlayer - SAMI”) consistem em uma camada betuminosa delgada aplicada sobre toda a superfície de um pavimento asfáltico envelhecido. São utilizadas com o objetivo de aumentar a resistência da superfície à propagação de trincas em pavimentos asfálticos que apresentam trincas de fadiga generalizada. Neste caso a borracha reciclada de pneus é incorporada ao ligante na proporção de 25% a 30% em peso de ligante. Após o tempo de interação, a viscosidade do asfalto-borracha aumenta e normalmente é necessário o emprego de querosene para diminuí-la e permitir a borrifação [53].

FREDDY et al. [53] também relatam o bom desempenho das partículas de borracha reciclada de pneus para o fechamento de trincas em pavimentos asfálticos. As trincas alteram o seu volume conforme as variações térmicas e solicitações do tráfego, entretanto, os selantes convencionais conseguem apenas variar a sua forma. Selantes convencionais muito rígidos possuem baixa adesividade às paredes das trincas e acabam sendo arrancados pelo tráfego, por outro lado, selantes de baixa viscosidade possuem alta sensibilidade

térmica e podem escorrer para fora das trincas ou tornam-se grudentos, aderindo aos pneus dos veículos. Diferentemente, as partículas de borracha propiciam características ideais de viscosidade e baixa sensibilidade a temperaturas, mas o principal benefício é a capacidade das partículas permitirem variações volumétricas. Cientes disso, empresas produtoras de materiais para fechamento de trincas, como a Shell Chemical e a Crafcoc Inc., têm empregado a borracha na formulação de seus produtos. Embora o custo da borracha reciclada seja relativamente baixo, há a agregação de um valor muito grande devido a significativa melhora de desempenho técnico nos produtos para fechamento de trincas.

#### 2.4.2.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS

O desempenho verificado em trechos experimentais construídos pelos departamentos de transportes estadunidenses é bastante variável.

No Estado de Kansas, o Departamento de Transportes construiu cinco obras empregando pavimentos com asfalto-borracha em camadas intermediárias durante a década de 1980. Em dois destes projetos verificou-se que houve redução na propagação de trincas. Nas outras três obras houveram diferenças entre as seções de controle e as experimentais, prejudicando a análise. Em termos globais o Departamento de Transportes do Kansas concluiu que o aumento de custo na mistura asfáltica com asfalto-borracha não justifica o seu emprego. [44]

No Estado de Washington também foram executadas obras para avaliação desta tecnologia desde 1977. O Departamento Estadual de Transportes concluiu que o emprego de asfalto-borracha em membranas absorvedoras de tensão não apresenta boa relação custo-benefício. Pavimentos asfálticos com camadas finais do tipo abertas empregando asfalto-borracha apresentaram desempenho avaliado como bom ou muito bom [47].

Desde o final dos anos de 1970 cerca de 5000 km de estradas foram construídas nos Estados de Phoenix e Arizona com a tecnologia de asfalto-borracha. No anos de 1990, o uso de camadas selantes foi interrompido em favor do emprego regular de uma camada de 25 mm de mistura asfáltica à quente com asfalto-borracha. Cerca de 1000 km de ruas foram pavimentadas usando capa de asfalto-borracha. O desempenho do asfalto-borracha foi classificado como bom quando aplicado em camadas retardadoras da propagação de trincas e quando a abertura destas trincas era inferior a 6,3 mm. Comparadas com capas selantes convencionais, o “overlay” com 25 mm apresentou uma melhor superfície de rolamento reduzindo com isso o ruído provocado pelo tráfego. [41]

O Departamento de Transportes da Flórida construiu entre Março de 1989 e Setembro de 1990 três projetos empregando asfalto-borracha, sendo dois projetos com misturas abertas e um com mistura asfáltica densa. Em todos foi empregado o chamado “processo úmido da Flórida”. Embora os pavimentos não tenham sido avaliados a longo prazo, os dados sugerem que camadas finais com asfalto-borracha, principalmente as do tipo aberto, possuem durabilidade superior às misturas convencionais. [43]

Em outro estado estadunidense, Minnesota, as autoridade estaduais construíram pelo menos seis projetos empregando o processo úmido desde 1979. Foram construídas duas membranas absorvedoras de tensão, três membranas absorvedoras de tensão de intercamadas e uma camada final do tipo densa. Das duas membranas absorvedoras de tensão executadas uma obteve sucesso enquanto a outra não. Apenas problemas pequenos foram verificados nas membranas absorvedoras de tensão de intercamadas. A propagação de trincas foi amenizada, mas não eliminada. Neste estado concluiu-se que a relação custo-benefício do asfalto-borracha não é compensadora. [45]

No Texas, misturas asfálticas empregando borracha reciclada de pneus vem sendo utilizadas desde 1976. O uso mais freqüente é em restaurações, como membrana de absorção de tensões. Até 1992 mais de 3000

km já haviam sido executados. Após muitos anos de experiências e avaliações, os texanos concluíram que o emprego de asfalto-borracha apresenta bom comportamento para o fechamento de trincas e fissuras, mas não ocorre melhoria no que se refere à diminuição das fissuras por retração térmica. Experiências executadas com misturas de asfalto-borracha do tipo densas apresentaram bons resultados. [36]

O Departamento de Transportes da Califórnia (CALTRANS) também tem usado ligante do tipo asfalto-borracha desde 1978 e efetuou pelo menos 17 restaurações e camadas finais com misturas asfálticas incorporando borracha pelo processo úmido. Desde 1987 as espessuras das camadas asfálticas com borracha tem sido reduzidas em relação às necessárias para pavimentos convencionais. A Tabela 2.3 apresenta algumas correlações de espessuras entre misturas asfálticas convencionais e misturas com asfalto-borracha estabelecidas pelo CALTRANS.

Tabela 2.3 - Espessura estrutural equivalente entre misturas asfálticas convencionais e empregando asfalto-borracha [52]

Espessura da mistura asfáltica convencional à quente (cm)	Espessura equivalente em mistura asfáltica que emprega asfalto-borracha à quente (cm)	
	usada como camada estrutural	usada como membrana absorvedora de tensões
4,5	3,0	-
6,0	3,0	-
7,6	4,5	3,0
9,1	4,5	3,0
10,6	6,0	4,5
12,1	6,0	4,5

O CALTRANS também reporta que em termos gerais os pavimentos com asfalto-borracha possuem um desempenho muito bom, requerendo menos manutenção e tolerando deflexões superiores às de pavimentos convencionais [33].

Em Ontário, no Canadá, também foram executados vários projetos empregando misturas asfálticas modificadas com borracha reciclada de pneus pelo processo úmido. Os resultados de desempenho foram considerados promissores e a durabilidade aparentou ser superior à de misturas asfálticas convencionais [1].

#### 2.4.2.2. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

As características e as propriedades de maior importância para misturas asfálticas com borracha executadas pelo processo úmido incluem a viscosidade do cimento asfáltico, ponto de amolecimento, módulo de resiliência, susceptibilidade à deformação permanente, sensibilidade a temperaturas extremas e resistência ao envelhecimento.

Segundo HEITZMAN [2], a maioria dos ensaios padrão para cimentos asfálticos também são válidos para asfaltos-borracha. Apenas os viscosímetros que empregam tubos capilares não são adequados para a avaliação do ligante asfáltico modificado com borracha. O equipamento normalmente utilizado para a aferição da viscosidade é o viscosímetro de campo com palheta giratória, especificado pela norma ASTM D 2994 [57].

A adição da borracha ao cimento asfáltico acarreta um aumento significativo na viscosidade do ligante modificado (asfalto-borracha). Querosene e outros diluentes tem sido usados para ajustar (diminuir) esta viscosidade. Em alguns casos pode ser necessário o emprego de quantidades bastante significativas de diluentes. Segundo EPPS [25], a temperatura em que ocorre a reação (combinação) entre o cimento asfáltico e as partículas de borracha também influencia a viscosidade. Ligante com viscosidade elevada produz misturas asfálticas de baixa trabalhabilidade e difícil compactação, entretanto ocorrem melhorias como a redução da propagação de trincas, diminuição da susceptibilidade à formação de trilhas de roda, menor sensibilidade às variações de temperatura, maior durabilidade do ligante, menos susceptibilidade à desagregação e melhor adesividade do cimento asfáltico aos agregados.

De acordo com a experiência estadunidense [25], ligantes do tipo asfalto-borracha usualmente apresentam ponto de amolecimento entre 11° C e 14° C acima dos verificados em ligantes convencionais, resultando em diminuição da susceptibilidade a variações térmicas e formação de trilhas de roda. A modificação com borracha reciclada de pneus também aumenta a elasticidade do ligante, proporcionando uma vida de fadiga superior.

O módulo de resiliência medido em misturas asfálticas compostas de agregados convencionais e ligante do tipo asfalto-borracha são, geralmente, inferiores àqueles medidos em misturas asfálticas similares elaboradas com ligantes convencionais. Melhorias (aumentos) significativas nos valores modulares das misturas com asfalto-borracha costumam ocorrer em temperaturas elevadas quando comparadas ao emprego de ligantes convencionais.

O comportamento à deformação permanente de misturas asfálticas que empregam ligantes asfálticos modificados com borracha apresenta-se, normalmente, similar ao de misturas que empregam ligantes convencionais, podendo, em alguns casos apresentar-se mais sensível.

Embora não seja um problema em regiões tropicais, há significativa redução na sensibilidade ao aparecimento de fraturas de origem térmica (devido à retração por congelamento) nos pavimentos que empregam ligantes de asfalto-borracha. Geralmente a temperatura crítica de fratura diminui entre 5,5° C e 8,5° C em relação às misturas asfálticas com ligantes convencionais. Estudos de vida de fadiga a baixas temperaturas também confirmam a elevada resistência ao fraturamento devido ao congelamento. Isso ocorre pelo fato do asfalto-borracha ser mais elástico que o asfalto convencional e preservar esta elasticidade mesmo em temperaturas mais baixas.

Estudos de laboratório também indicam que misturas com asfalto-borracha são mais resistentes ao envelhecimento do ligante e apresentam vida de fadiga superior à de misturas com ligantes asfálticos convencionais. [25]

### **2.4.3. NÍVEL TECNOLÓGICO ATUAL DO EMPREGO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Existem, atualmente, muitas dúvidas e lacunas de conhecimento relativas ao emprego de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas, principalmente no processo seco, devido a preferência pelo emprego do processo úmido, e relativas ao desempenho de campo a longo prazo.

Foram executados nos, Estados Unidos da América do Norte, pelo menos seis projetos de reciclagem de pavimento. Na metade destes projetos o pavimento original havia sido executado com a adição de borracha pelo processo seco e o restante empregando borracha pelo processo úmido. Não foram verificados problemas com a reciclagem do pavimento devido a presença da borracha em nenhum caso, mas, devido às extensões pequenas, os dados não podem ser considerados conclusivos.

Apesar dos dados serem limitados, não há evidências de que a presença da borracha nas usinas de asfalto a quente provoque alterações nas emissões de gases para a atmosfera ou produza outros impactos ambientais. Avaliações feitas no Estado estadunidense de New Jersey em 1992, onde um pavimento originalmente construído com borracha pelo processo seco foi reciclado e incrementado com a adição de 20% de agregados novos, indicaram que as emissões de gases não excederam os níveis permitidos.

A inconstância do desempenho das misturas asfálticas que empregam borracha (pelo processo seco ou úmido) indicam claramente a necessidade de avaliações maiores e mais aprofundadas, principalmente em campo, com rigoroso controle executivo e registro detalhado das particularidades de cada obra, inclusive dados climáticos. Além disso é necessário que seja efetuado o adequado acompanhamento de longo prazo, de modo a se obter curvas de desempenho que contemplem toda a vida útil do pavimento.

Pesquisas adicionais são necessárias para determinar a real influência do emprego de borracha nas misturas e ligantes asfálticos e também há a necessidade de definições mais claras quanto às propriedades desejáveis e os critérios de dosagem para misturas asfálticas deste tipo. [25, 40]

## **2.5. PROGRAMA ELSYM5**

O programa Elsym5 - Elastic Layered System - foi empregado neste trabalho para a avaliação do comportamento estrutural dos pavimentos simulados. O programa efetua o cálculo através do método das diferenças finitas. Permite avaliar até 10 cargas e, no caso de haver mais de uma carga, adota o princípio da superposição dos efeitos. Aceita estruturas com até 5 camadas. [56]

Como dados de entrada, são fornecidos ao software as informações necessárias para caracterizar a estrutura (o número de camadas, módulo, coeficiente de poisson e espessura de cada camada) as cargas (quantidade, disposição e valor das cargas) e a localização dos pontos de estudo. Como resultados de saída, são determinados os valores das tensões, deformações e deslocamentos nos pontos de estudo previamente definidos pelo usuário.

## capítulo 3

---

### MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados agregados, cimento asfáltico e borracha triturada de pneus. Estes materiais foram caracterizados seguindo-se as normas ou procedimentos específicos.

#### 3.1. AGREGADOS

O agregado mineral empregado é oriundo da empresa Pedrita (pedreira do Rio Tavares), da cidade de Florianópolis (Santa Catarina) e constitui-se de granito britado em três faixas granulométricas básicas: brita 19 mm (19,1 - 9,5 mm; 17%), pedrisco (9,5 - 4,8 mm; 18%) e pó-de-pedra (4,8 - 0,0 mm; 65%).

A Figura 3.1 apresenta a curva granulométrica adotada, plotada juntamente com os limites máximos e mínimos, para cada fração, especificados na Faixa C do DER/SC. A Tabela 3.1 e a Tabela 3.2, apresentam a distribuição das frações granulares, individualmente, para cada material e as totais (brita + pedrisco + pó-de-pedra), respectivamente. Houve a preocupação de que esta curva se mantivesse dentro dos limites da Faixa C das Especificações Gerais para Obras Rodoviárias do DER/SC [58].

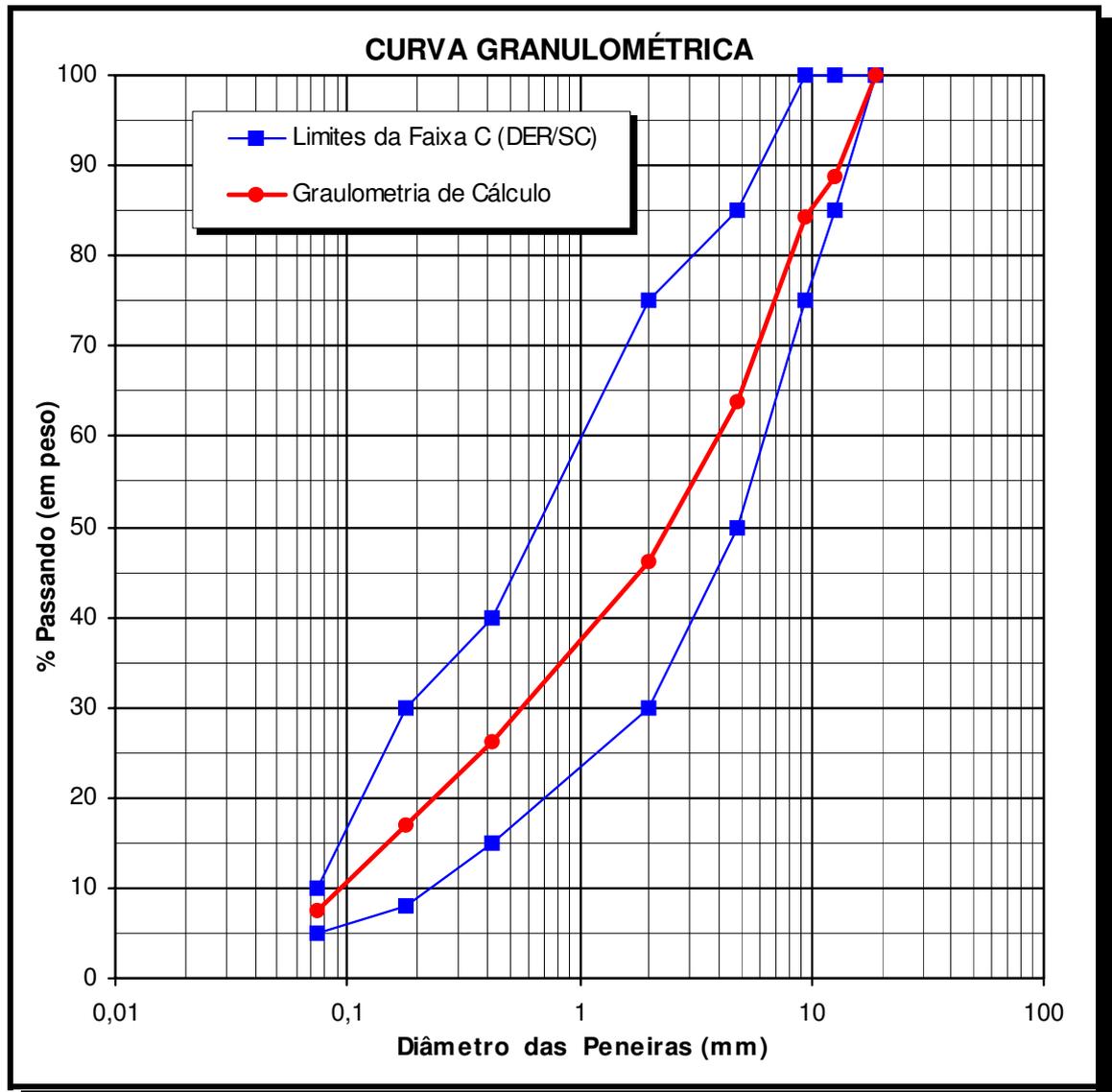


Figura 3.1 – Curva granulométrica empregada

Tabela 3.1 - Granulometria dos materiais utilizados

Peneiras		Percentual passando (em peso)		
mm	polegadas/número	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó-de-pedra
19,1	3/4"	100,00	100,00	100,00
12,7	1/2"	34,71	100,00	100,00
9,5	3/8"	6,88	100,00	100,00
4,8	Nº 4	0,29	7,50	96,16
2,0	Nº 10	0,18	3,00	70,00
0,42	Nº 40	0,08	2,10	39,80
0,18	Nº 80	0,05	1,80	25,65
0,075	Nº 200	0,02	1,50	11,00

Tabela 3.2 - Composição da curva granulométrica utilizada

Peneira (mm)	Limites da faixa C - DER/SC		Curva Utilizada *
	Inferior *	Superior *	
19,1	100	100	100,00
12,7	85	100	88,90
9,5	75	100	84,17
4,8	50	85	63,90
2,0	30	75	46,07
0,42	15	40	26,26
0,18	8	30	17,00
0,075	5	10	7,42

\* Percentual passante, em peso.

Para facilitar o peneiramento, manuseio e pesagens, o agregado foi dividido em frações significativas, apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Frações nas quais o agregado foi dividido

Material	Divisão de frações
Brita 19,1 mm	Passante na peneira 3/4" e retido na peneira 1/2" Passante na 1/2" e retido na 3/8" Passante na 3/8"
Pedrisco	Passante na 1/2" e retido na N° 4 Passante na N° 4
Pó de pedra	Passante na N° 4 e retido na N° 10 Passante na N° 10 e retido na N° 40 Passante na N° 40

Também foi efetuado o ensaio para determinação da densidade real dos agregados com base nos métodos DNER-ME 85/64 (material finamente pulverizado) [59], DNER-ME 84/94 (agregado miúdo) [60], DNER-ME 81/64 (agregado graúdo) [61]. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Densidade real dos agregados

Material	Densidade média real	Norma
Agregado graúdo	2,640	DNER-ME 81/64
Agregado miúdo	2,638	DNER-ME 84/94
Finamente pulverizado	2,618	DNER-ME 85/64

O agregado, inicialmente foi disposto em caixas próprias para a secagem e evaporação da umidade excessiva. Após, os agregados foram dispostos em bandejas pequenas para secagem final em estufa. A Figura 3.2 apresenta algumas bandejas antes de serem colocadas na estufa.



Figura 3.2 - Parte do agregado disposto em bandejas para ser colocado na estufa

### 3.2. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) foi acondicionado em embalagens fechadas de alumínio para evitar a contaminação e melhor conservação ao longo da execução dos trabalhos de laboratório. Na Figura 3.3 pode-se ver 4 embalagens abertas e 2 já lacradas, também são visíveis algumas bandejas com agregado.



Figura 3.3 - O asfalto foi acondicionado em embalagens fechadas de alumínio.

Foi empregado cimento asfáltico de petróleo do tipo CAP 20 (classificação por viscosidade) pertencente a um único lote proveniente da Refinaria de Araucária (Paraná). A densidade do cimento asfáltico foi determinada em 1,03, com base no método DNER-ME 16/64 [62].

Através do ensaio de “anel e bola”, especificado no método ABNT MB 164/72 [63], foi determinado o ponto de amolecimento em duas amostras, conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Ponto de amolecimento do CAP (ABNT MB 164/72)

Amostra	Temperatura (°C)	Média (°C)
1	48	48
2	48	

Seguindo-se a norma DNER-ME 04/73 [64], foi determinada a viscosidade Saybolt-Furol a altas temperaturas submetendo-se duas amostras de cimento asfáltico à temperatura de 135° C (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Viscosidade Saybolt-Furol à alta temperatura (135° C) (DNER-ME 04/73)

Amostra	Tempo	Média
1	183"	181"
2	178"	

Através da norma DNER-ME 78/63 [65] foi efetuado o ensaio de adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso (cimento asfáltico), conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Adesividade de ligante ao agregado graúdo (DNER-ME 78/63)

Porcentagem de aditivo (DOP)	Resultado
0,00%	adesividade satisfatória
0,50%	adesividade satisfatória
1,00%	adesividade satisfatória
1,50%	adesividade satisfatória

O agregado apresentou boa adesividade, dispensando o emprego de aditivos melhoradores de adesividade.

### 3.3. BORRACHA

A borracha empregada foi obtida por trituração do material resultante da decapagem de pneus de veículos comerciais leves, com granulometria máxima de 2,4 mm e com 70% ficando retido na peneira 0,297 mm (peneira nº 50).

Pelo fato de inexistir um ensaio rodoviário específico, a determinação da densidade real da borracha foi efetuada a partir da média de quatro leituras de deslocamento de fluido (querosene) à temperatura de 25° C. Este procedimento foi adotado por ser de fácil execução e permitir boa precisão. Em um recipiente graduado de laboratório (bequer) foram colocados 12 ml de querosene e foi determinado o peso inicial. A seguir foram adicionados 2 ml de borracha e o conjunto foi novamente pesado (peso final). Conhecendo-se o volume de borracha adicionado e a diferença de peso (peso final - peso inicial) foi possível determinar a densidade da borracha. As leituras efetuadas nas quatro amostras são apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Densidade real da borracha

Número da amostra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Densidade da amostra	Densidade média
1	42,95	45,3	1,18	1,16
2	42,75	45,09	1,17	
3	42,75	45,04	1,15	
4	42,73	45,05	1,16	

#### 3.3.1. MICROMORFOLOGIA

As partículas de borracha foram observadas ao microscópio ótico sem que houvesse a preocupação de seguir qualquer norma ou procedimento, constituindo-se em informação adicional. As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam as partículas antes de ser adicionado o CAP, enquanto as Figuras 3.6 e 3.7 apresentam as partículas de borracha após esta mistura. Para a realização desta observação, o contato entre o CAP e a borracha deu-se de forma similar

ao que ocorreu por ocasião da moldagem dos corpos de prova, ou seja, após a mistura os dois componentes foram mantidos aquecidos à temperatura de 160° C por um período de uma hora.

Na Figura 3.4 pode-se observar a presença de partículas de pequeno tamanho (~0,1 mm) e o formato irregular de algumas.

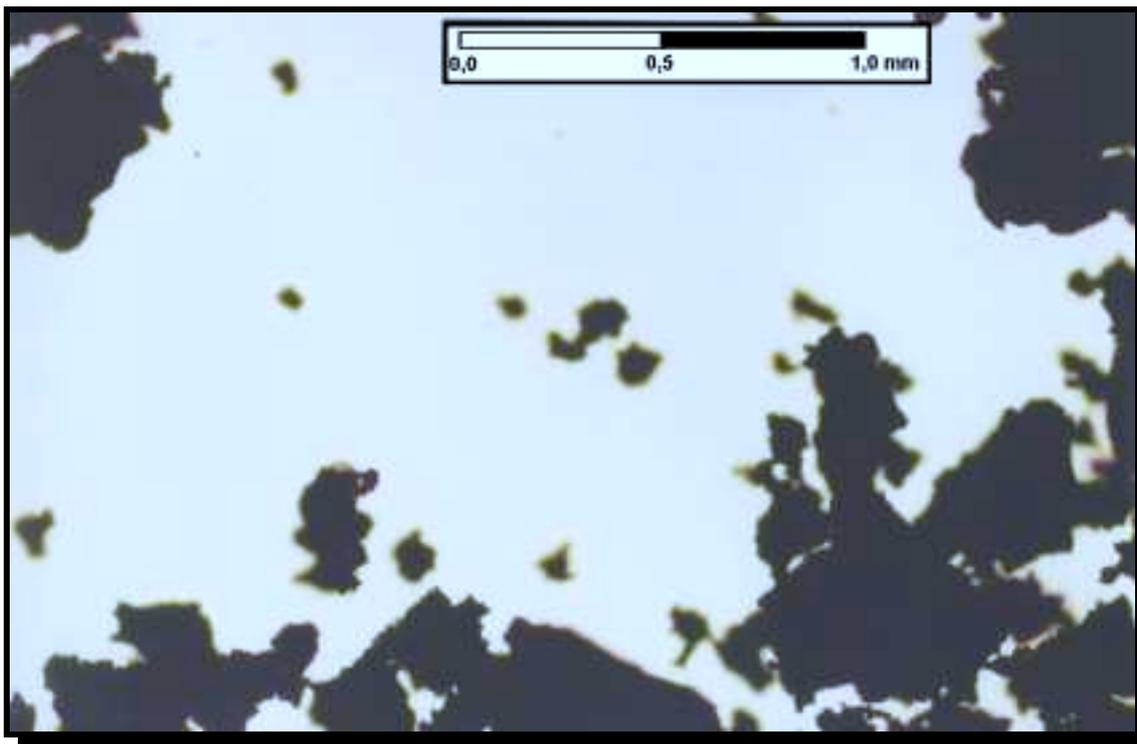


Figura 3.4 - Partículas de borracha antes da adição do CAP

Na Figura 3.5 pode-se visualizar as partículas maiores de borracha (~1,0 mm), algumas com regiões irregulares e outras com formato relativamente regular.

Na Figura 3.6 é apresentada, parcialmente, uma estrutura resultante do contato entre o CAP e as partículas de borracha. Pode-se observar que trata-se de uma estrutura relativamente grande.

A Figura 3.7 é particularmente interessante por apresentar uma estrutura tridimensional complexa, desejável em pavimentos asfálticos que recebem polímeros.

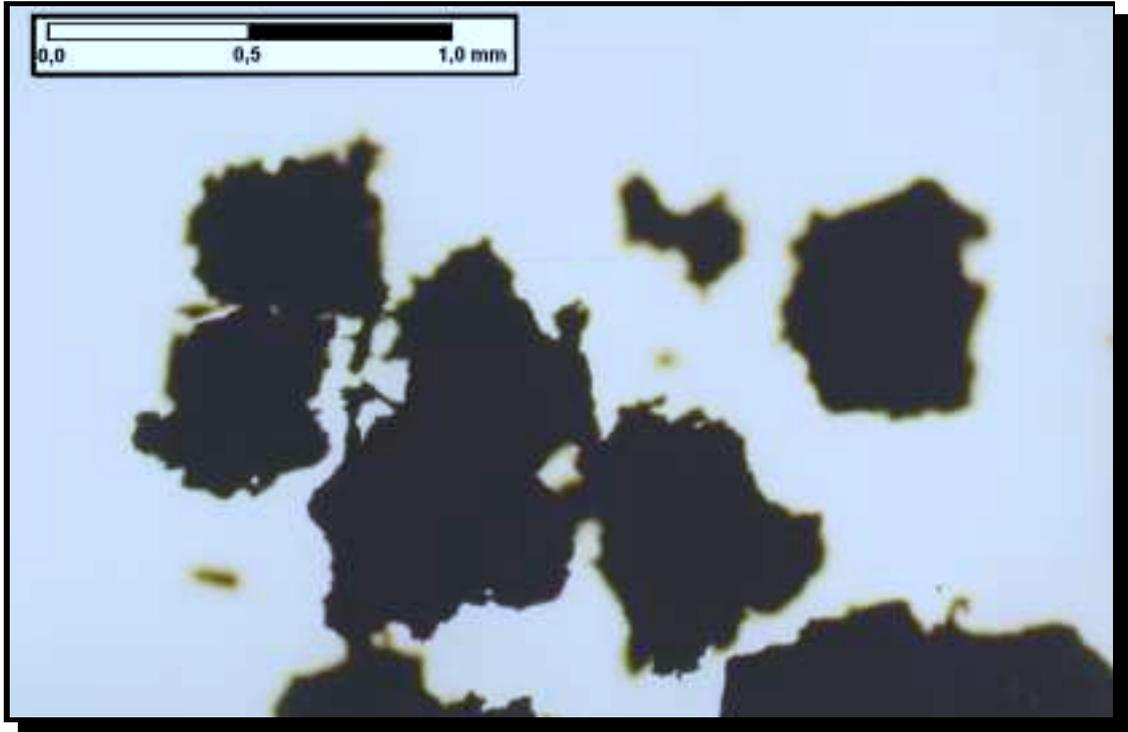


Figura 3.5 - Partículas de borracha antes da adição do CAP

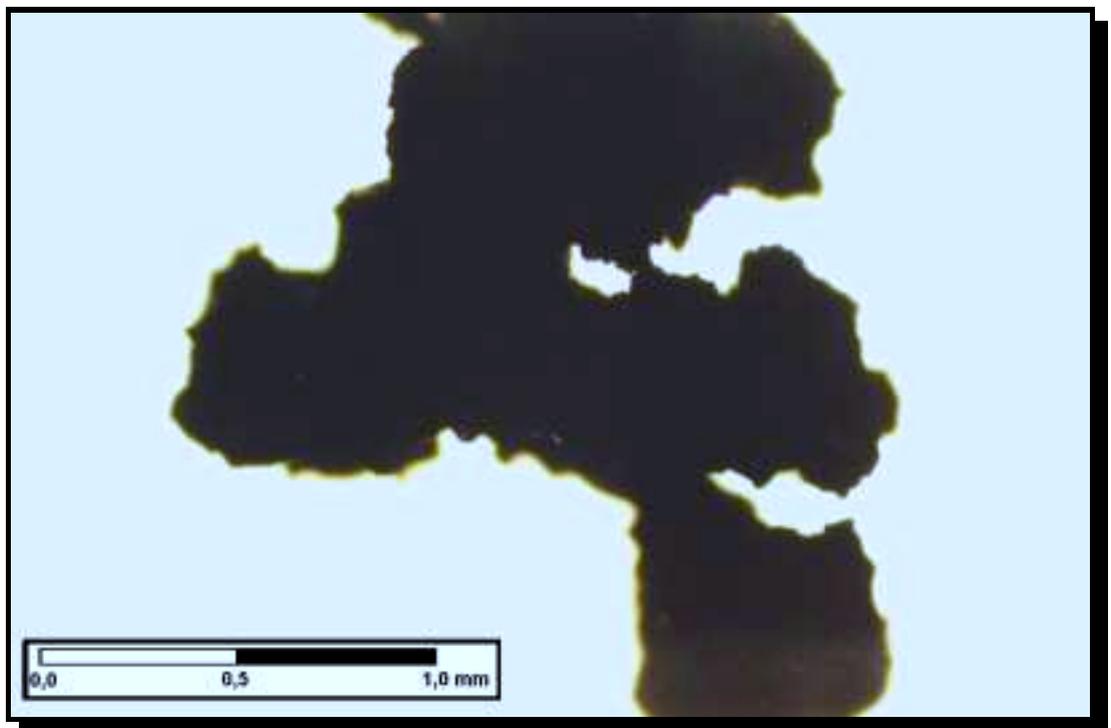


Figura 3.6 - Partículas de borracha após da adição do CAP



Figura 3.7 - Partículas de borracha após da adição do CAP

## capítulo 4

---

# PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

Para que os objetivos do trabalho fossem atingidos foi adotado um conjunto de procedimentos, através dos quais foram definidas as misturas asfálticas, método de moldagem dos corpos de prova e execução dos ensaios. Os aspectos relevantes destes procedimentos serão agora descritos.

### 4.1. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDADAS

Os percentuais de CAP para a moldagem dos corpos de prova foram inicialmente estabelecidos com base na experiência do corpo técnico envolvido com os trabalhos. No Traço 0 (convencional, sem borracha) e Traço 0,7 (primeiro traço experimental executado) foram utilizados 5 percentuais diferentes de CAP para obter-se uma amplitude maior nos ensaios.

O Traço 0,7 forneceu indicações de comportamento estrutural que permitiram racionalizar a execução do Traço 1,1 e, posteriormente, do Traço 0,4. Tendo sido possível identificar com mais precisão a faixa provável onde se situava o teor ótimo de CAP, foi possível reduzir de 5 para 3 o número de percentuais de CAP avaliados no Traço 1,1 e Traço 0,4, sem perda significativa da amplitude da avaliação. Esta racionalização no número de corpos de prova

permitiu agilizar a execução dos trabalhos e reduzir a quantidade total de agregado necessária, onde o consumo de algumas frações se mostrou acima do esperado, podendo vir a comprometer a conclusão dos ensaios.

#### 4.1.1. DEFINIÇÃO DA MISTURA DE REFERÊNCIA

A curva granulométrica considerada ótima foi adotada durante todas as fases desta pesquisa (para as misturas convencionais e para as experimentais). Com base nesta curva foi elaborado o Traço 0, convencional (0% de borracha) e com 5 diferentes percentuais de CAP, conforme é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Teor de CAP das misturas convencionais avaliadas

Percentuais de CAP (Traço 0)	
	4,0
	4,5
	5,0
	5,5
	6,0

Analisando-se os resultados do Método Marshall estabeleceu-se o percentual ótimo de CAP para o traço convencional, a partir do qual foram moldados novos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de vida de fadiga e módulo de resiliência. Esta mistura convencional otimizada também é chamada de “mistura de referência”.

#### 4.1.2. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS EXPERIMENTAIS

A borracha foi incorporada ao agregado simultaneamente à adição do CAP, seguindo-se o processo seco. Foram formulados três traços experimentais a partir de três diferentes percentuais de borracha, denominados Traço 0,7, Traço 1,1 e Traço 0,4, totalizando 11 combinações de dosagens entre CAP e borracha. O percentual de CAP é referenciado ao peso total da mistura (agregado + CAP + borracha) enquanto o percentual de borracha é em relação ao peso de agregado. A Tabela 4.2 demonstra a gama de valores utilizados.

Tabela 4.2 – Misturas experimentais avaliadas

Traços de misturas experimentais	Percentuais de borracha	Percentuais de CAP
0,7	0,7	3,97
		4,47
		4,97
		5,46
		5,96
1,1	1,1	4,65
		5,25
		5,84
0,4	0,4	4,68
		5,28
		5,88

Analisando-se os resultados do método Marshall e do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram estabelecidos os percentuais ótimos de CAP e borracha para a mistura experimental, a partir dos quais foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios de vida de fadiga e módulo de resiliência. A mistura elaborada com estes percentuais ótimos de CAP e borracha também é denominada “mistura experimental otimizada”.

## 4.2. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Seguindo-se o Método Marshall especificado pelo DNER-ME 43/64 [66], foram moldados corpos de prova com aproximadamente 1200 g de massa total cada e diâmetro de 10 cm, empregando-se 75 golpes por face do corpo de prova. A Figura 4.1 apresenta o compactador elétrico empregado, da marca Soiltest.

Houve a tentativa de simular a situação prática de obra, que ocorre com o transporte da mistura asfáltica da usina até o local da pavimentação. Considerou-se que 1 hora representa o tempo médio que transcorre durante as etapas de carga, transporte, execução e compactação da mistura asfáltica, e que 160° C representa a temperatura média em que a mistura asfáltica é mantida neste período (em obras que possuem controle tecnológico adequado). Desta forma, os corpos de prova das misturas experimentais foram colocados na estufa, imediatamente após a moldagem, por um período de 1 hora à temperatura de 160° C.



Figura 4.1 - Compactador elétrico para misturas betuminosas

### **4.3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Este ensaio foi executado empregando-se corpos de prova cilíndricos padrão Marshall, seguindo-se as prescrições da norma DNER-ME

138/86 [67] e com temperatura de 25° C. Para cada teor de CAP foram moldados três corpos de prova.

A Figura 4.2 apresenta alguns corpos de prova durante a imersão em água a 25° C para a estabilização da temperatura e a Figura 4.3 apresenta um corpo de prova posicionado na prensa, antes da execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 4.2 - Corpos de prova, prestes a serem submetidos ao ensaio de resistência à tração, estão imersos em água com temperatura de 25° C

#### **4.4. DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA**

O módulo de resiliência foi determinado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ em corpos de prova padrão Marshall submetidos à compressão diametral, com solicitações de 0,1 segundos intercaladas com 0,9 segundos de descanso. A temperatura de ensaio foi de 25° C e foram adotados os procedimentos especificados no método de ensaio DNER-ME 133/94.



Figura 4.3 - Prensa onde foram realizados os ensaios de resistência à tração

#### **4.5. DETERMINAÇÃO DAS VIDAS DE FADIGA**

A determinação da vida de fadiga foi efetuada no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e determinada em corpos de prova cilíndricos padrão Marshall submetidos a cargas repetidas de compressão diametral.

O ensaio foi efetuado com tensão controlada e solicitações de carga de 0,1 segundos alternadas com 0,9 segundos de repouso. As cargas foram aplicadas por meio de dois frisos opostos, produzindo tensões relativamente uniformes no plano diametral vertical. A ruptura é caracterizada pelo rompimento do corpo de prova em duas metades.

O esquema do equipamento é mostrado na Figura 4.4, onde pode-se observar a presença de dois dispositivos LVDT responsáveis pela mensuração das deformações horizontais diametrais e o corpo de prova (amostra).

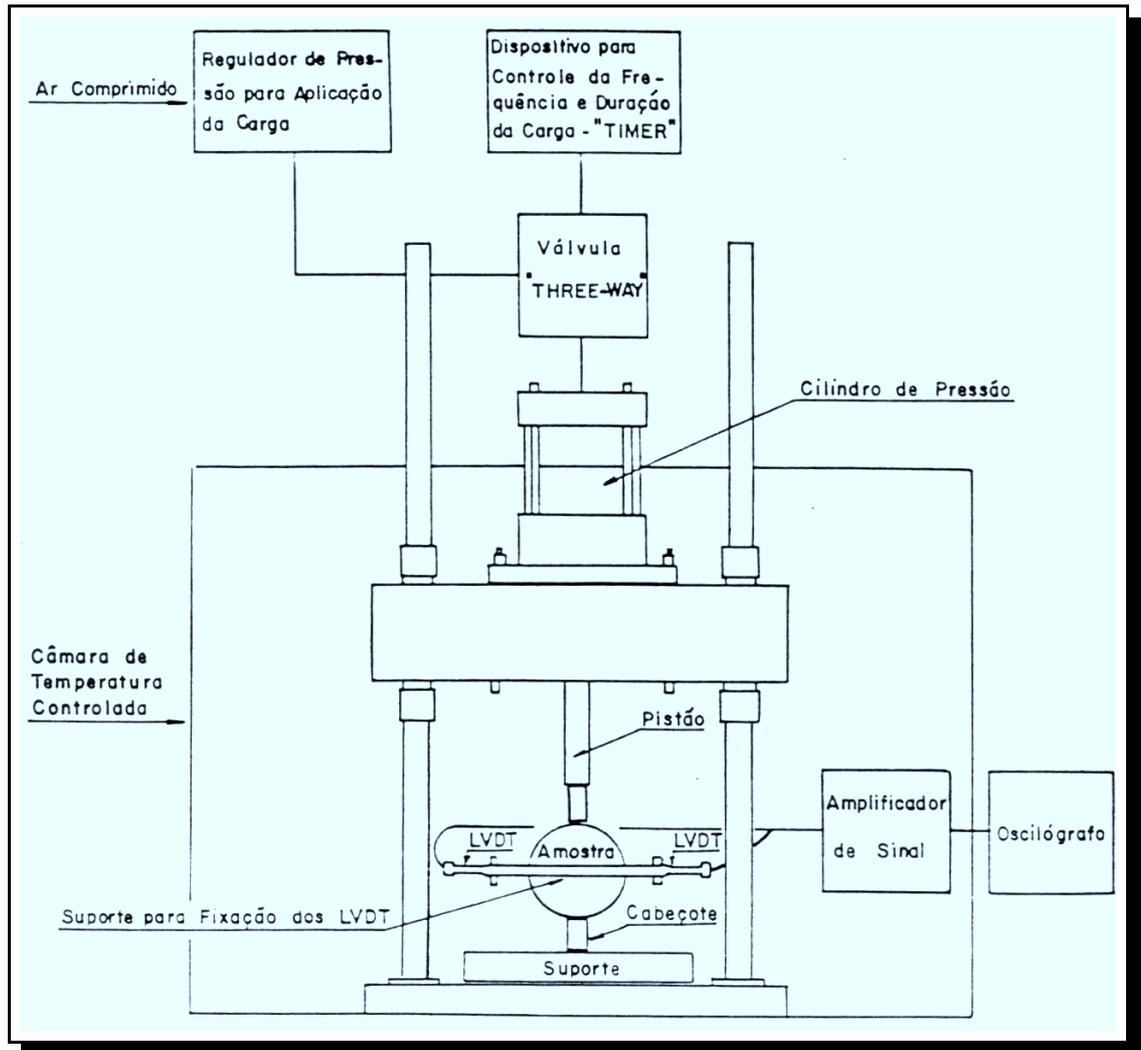


Figura 4.4 - Esquema do equipamento para ensaios de compressão diametral de carga repetida [56]

## capítulo 5

# RESULTADOS DE LABORATÓRIO, ANÁLISES E CRITÉRIOS DE TOMADA DE DECISÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga. Também são descritos e comentados os critérios de tomada de decisões.

### 5.1. RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL

A seguir são relacionados os parâmetros obtidos no Ensaio Marshall para as misturas convencionais (sem borracha) e experimentais (com borracha) e levados em consideração para a escolha da mistura experimental otimizada, sendo que cada valor corresponde a média de leituras em três corpos de prova. Os dados são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 e nos gráficos correspondentes (Figuras 5.1 a 5.6 ).

Tabela 5.1 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0

RESUMO DO TRAÇO 0	% DE CAP				
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
DENSIDADE APARENTE	2,277	2,308	2,314	2,346	2,338
ESTABILIDADE	1240	1347	1122	1384	1195
FLUÊNCIA	14,8	13,5	13,8	12,4	13,9
% VOLUME DE VAZIOS	8,28	6,35	5,42	3,42	3,06
% VOLUME BETUME	8,84	10,08	11,23	12,53	13,62
% V. A. M.	17,12	16,43	16,65	15,95	16,68
% RELAÇÃO BETUME/VAZIOS	51,6	61,4	67,4	78,6	81,7

Tabela 5.2 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0,7

RESUMO DO TRAÇO 0,7	% DE CAP				
	3,97	4,47	4,97	5,46	5,96
DENSIDADE APARENTE	2,219	2,230	2,253	2,290	2,289
ESTABILIDADE	944	950	974	1.013	909
FLUÊNCIA	9,0	9,4	9,5	8,0	10,8
% VOLUME DE VAZIOS	9,94	8,84	7,24	5,05	4,42
% VOLUME BETUME	8,56	9,68	10,86	12,15	13,25
% V. A. M.	18,50	18,52	18,11	17,20	17,67
% RELAÇÃO BETUME/VAZIOS	46,27	52,26	60,00	70,63	74,97
% Relação Borracha/Betume	16,80	14,86	13,30	12,03	10,97
% Relação Borracha/Granular	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Tabela 5.3 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 1,1

RESUMO DO TRAÇO 1,1	% DE CAP		
	4,65	5,25	5,84
DENSIDADE APARENTE	2,190	2,230	2,260
ESTABILIDADE	670	845	888
FLUÊNCIA	11,1	12,4	10,8
% VOLUME DE VAZIOS	10,06	7,30	5,39
% VOLUME BETUME	9,87	11,37	12,81
% V. A. M.	19,92	18,67	18,21
% RELAÇÃO BETUME/VAZIOS	49,53	60,90	70,38
% Relação Borracha/Betume	22,30	19,65	17,54
% Relação Borracha/Granular	1,10	1,10	1,10

Tabela 5.4 - Resumo dos dados obtidos no ensaio Marshall para o Traço 0,4

RESUMO DO TRAÇO 0,4	% DE CAP		
	4,68	5,28	5,88
DENSIDADE APARENTE	2,278	2,302	2,316
ESTABILIDADE	925	961	1.057
FLUÊNCIA	8,1	9,3	9,8
% VOLUME DE VAZIOS	6,91	5,11	3,72
% VOLUME BETUME	10,36	11,80	13,22
% V. A. M.	17,26	16,91	16,94
% RELAÇÃO BETUME/VAZIOS	59,99	69,77	78,04
% Relação Borracha/Betume	8,11	7,15	6,38
% Relação Borracha/Granular	0,40	0,40	0,40

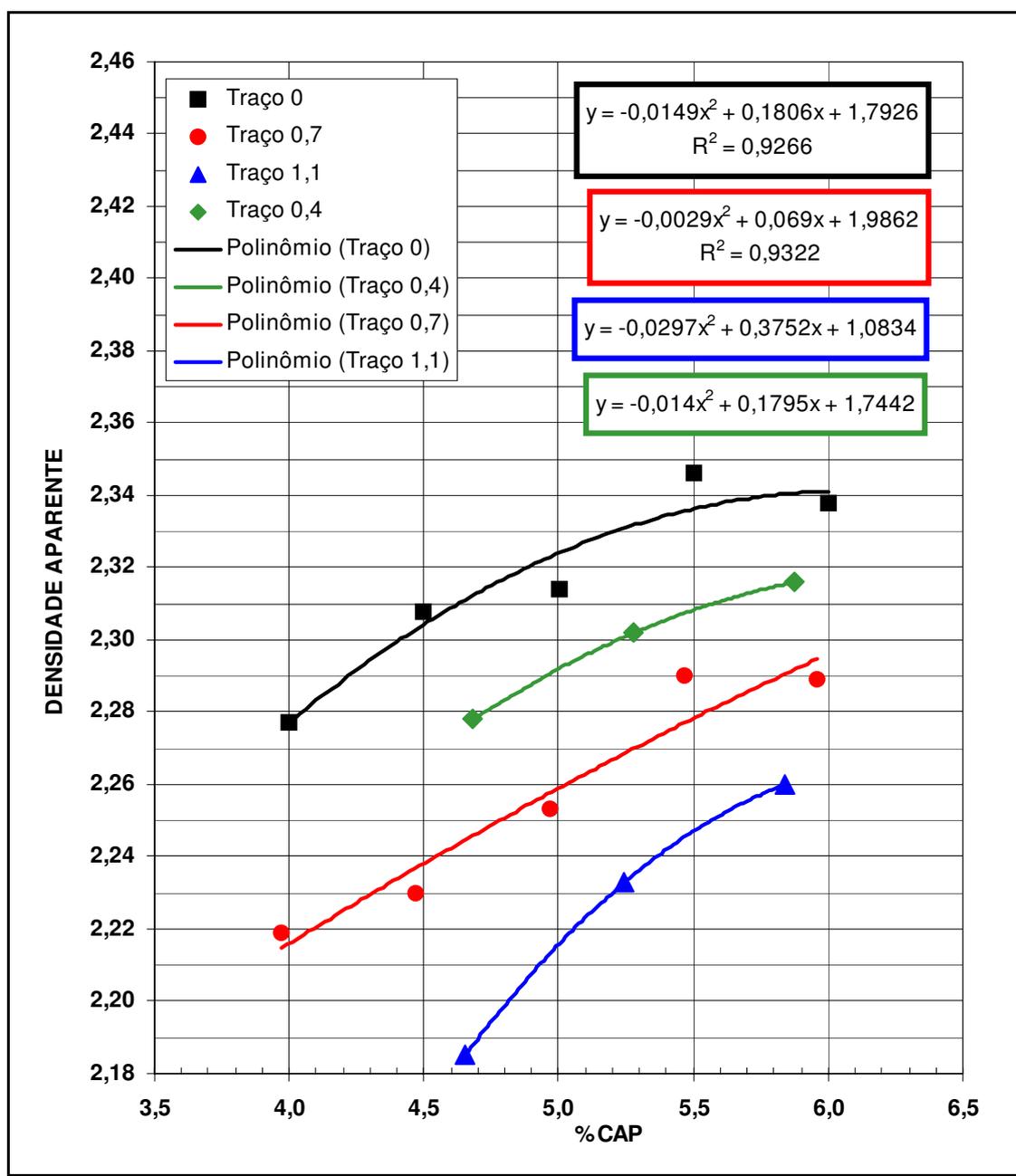


Figura 5.1 - Gráfico comparativo das densidades aparentes

A densidade aparente (Figura 5.1) apresentou um comportamento rigorosamente condizente com o emprego de borracha, ou seja, com a adição de mais um material leve (a borracha) a densidade da mistura final diminui proporcionalmente. Cabe lembrar que nas regressões estatísticas, à polinômios de segundo grau, efetuadas para o Traço 1,1 e Traço 0,4, que possuem três pontos plotados, o valor do R<sup>2</sup> não é apresentado por ser igual a 1.

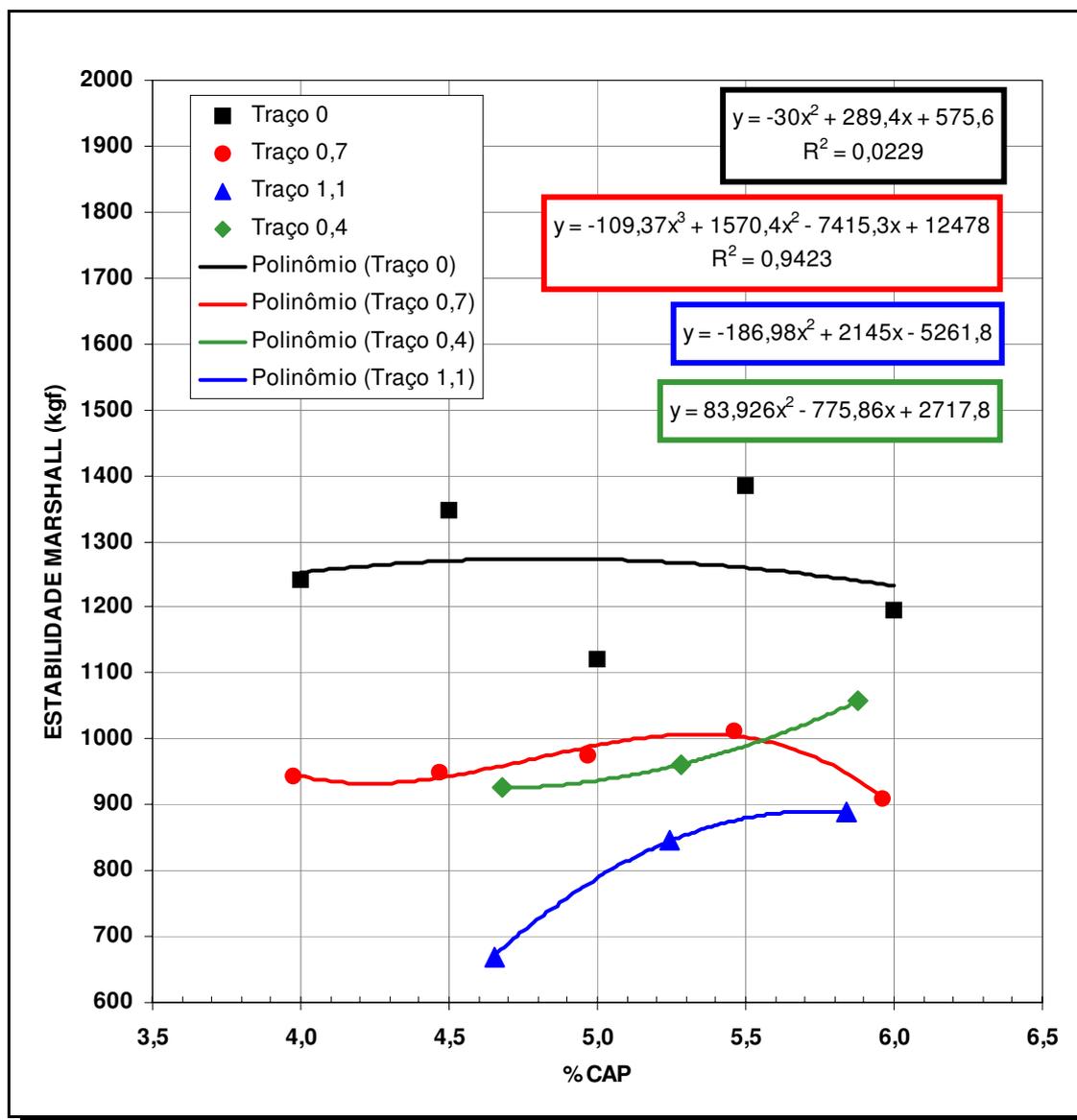


Figura 5.2 - Gráfico comparativo das estabilidades Marshall

A estabilidade (Figura 5.2) das misturas com borracha apresentou-se significativamente abaixo da verificada no traço convencional, fenômeno já antecipado por EPPS [25]. O Traço 0,7 apresentou uma tendência de estabilidade máxima quando é empregado um teor de CAP por volta de 5,3%. O Traço 1,1 apresentou valores de estabilidade baixos em todos os teores de CAP, sendo um indicativo claro de que 1,1% de borracha é uma quantidade muito elevada para ser adicionada em misturas asfálticas dentro da metodologia adotada.

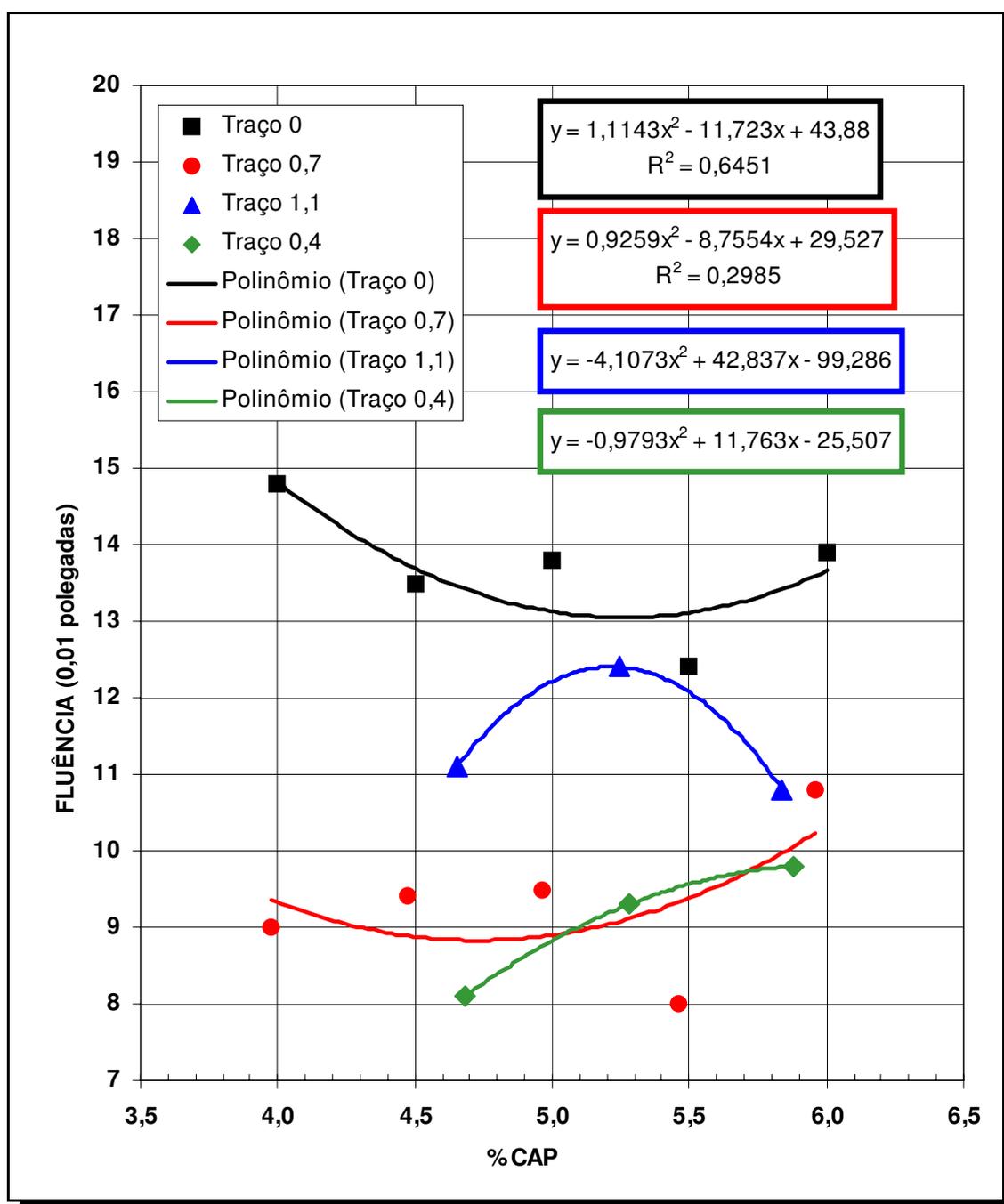


Figura 5.3 - Gráfico comparativo dos valores de fluência

A fluência (Figura 5.3) nos traços experimentais manteve-se abaixo daquela observada no Traço 0, diferindo do comportamento previsto por EPPS [25].

Os valores da fluência em todos os traços experimentais apresentaram uma tendência de convergência quando o percentual de CAP situa-se em torno de 6%, indicando que, nesta situação, a quantidade de ligante torna-se um fator preponderante para a determinação do comportamento à fluência. Os valores da fluência no Traço 0,7 apresentaram-se significativamente abaixo dos encontrados no Traço 0, sendo que após cerca de 5,3% de CAP há um aumento na tendência de crescimento dos valores. No Traço 1,1 os valores da fluência apresentaram-se abaixo daqueles do traço de controle até o percentual de 5,4% de CAP, apresentando comportamento semelhante a partir de então. No Traço 0,4 o comportamento à fluência foi similar ao verificado no Traço 0,7 em toda a gama de valores analisados.

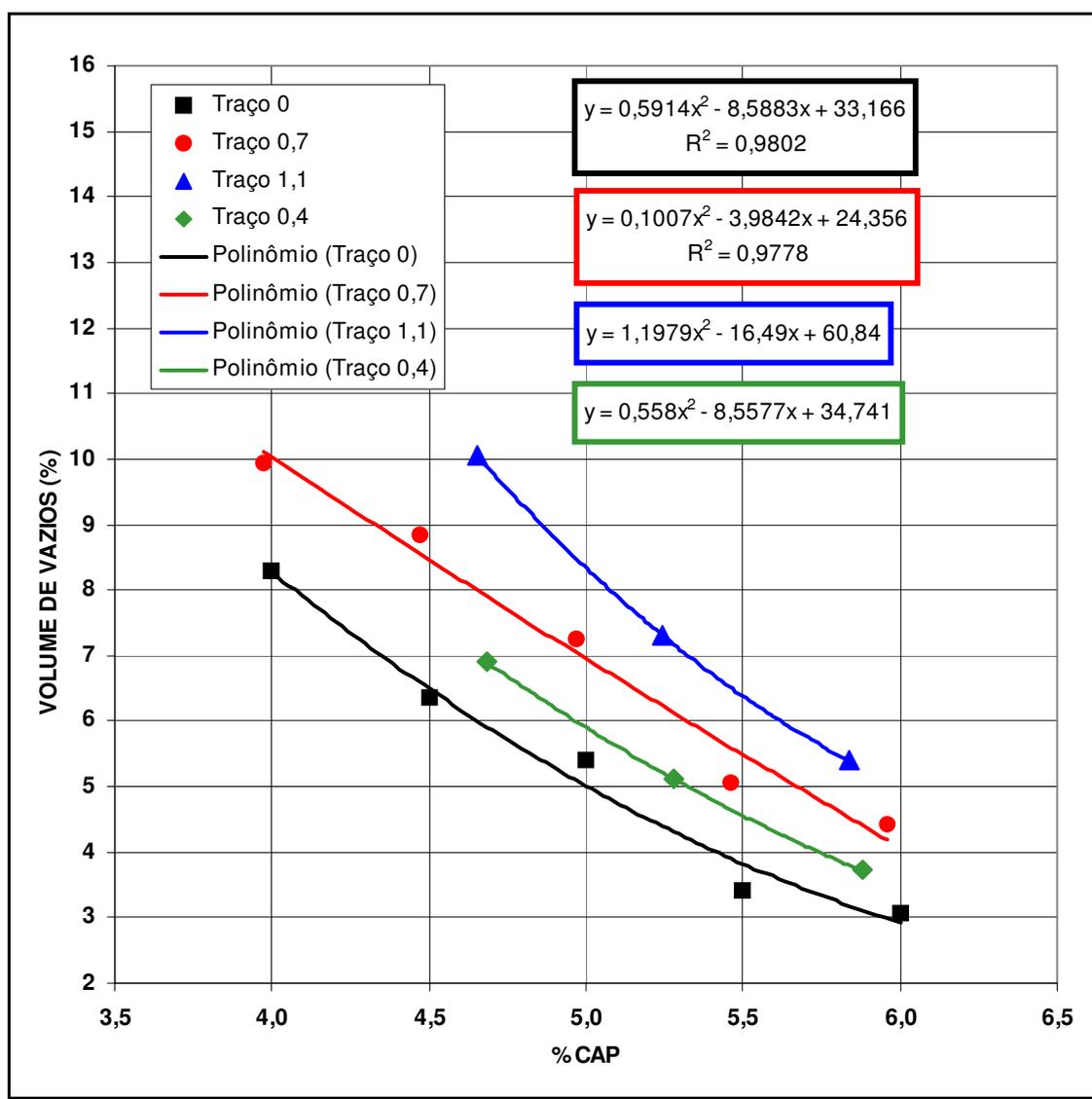


Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos volumes de vazios

O volume de vazios (Figura 5.4) apresentou um comportamento bastante regular em todos os traços avaliados. Verificou-se que há um aumento no volume de vazios proporcional à quantidade de borracha adicionada para um mesmo teor de CAP.

Também observa-se que com a adição da borracha ocorre o aumento do percentual de vazios decorrente da dificuldade em compactar a mistura, dificuldade esta que também colabora para a diminuição da densidade.

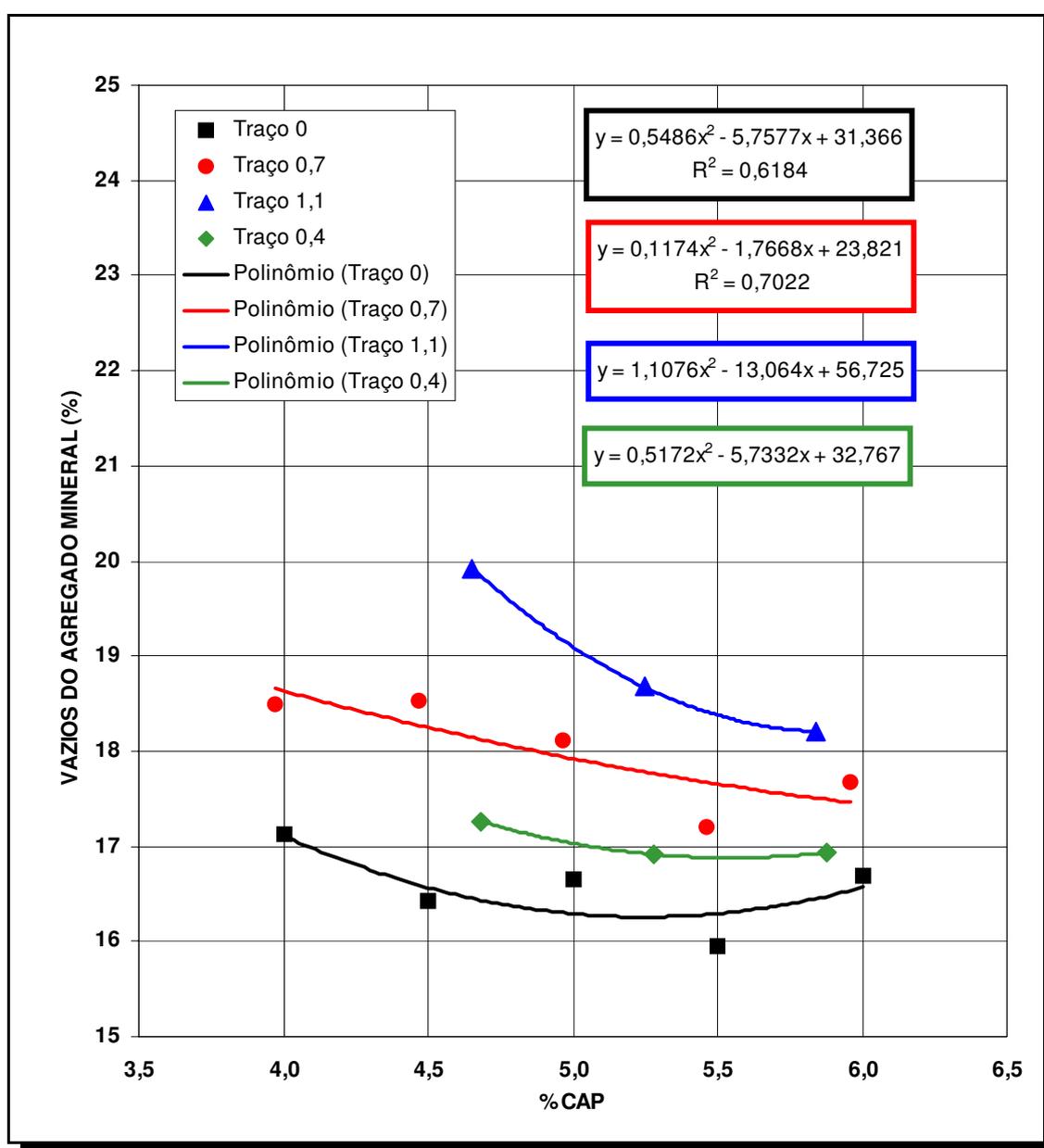


Figura 5.5 - Gráfico comparativo dos vazios do agregado mineral

O volume de vazios do agregado mineral (Figura 5.5) também apresentou comportamento regular e de acordo com o esperado, ou seja, com a adição de mais um material não mineral na mistura asfáltica, o volume de vazios do agregado mineral aumenta proporcionalmente.

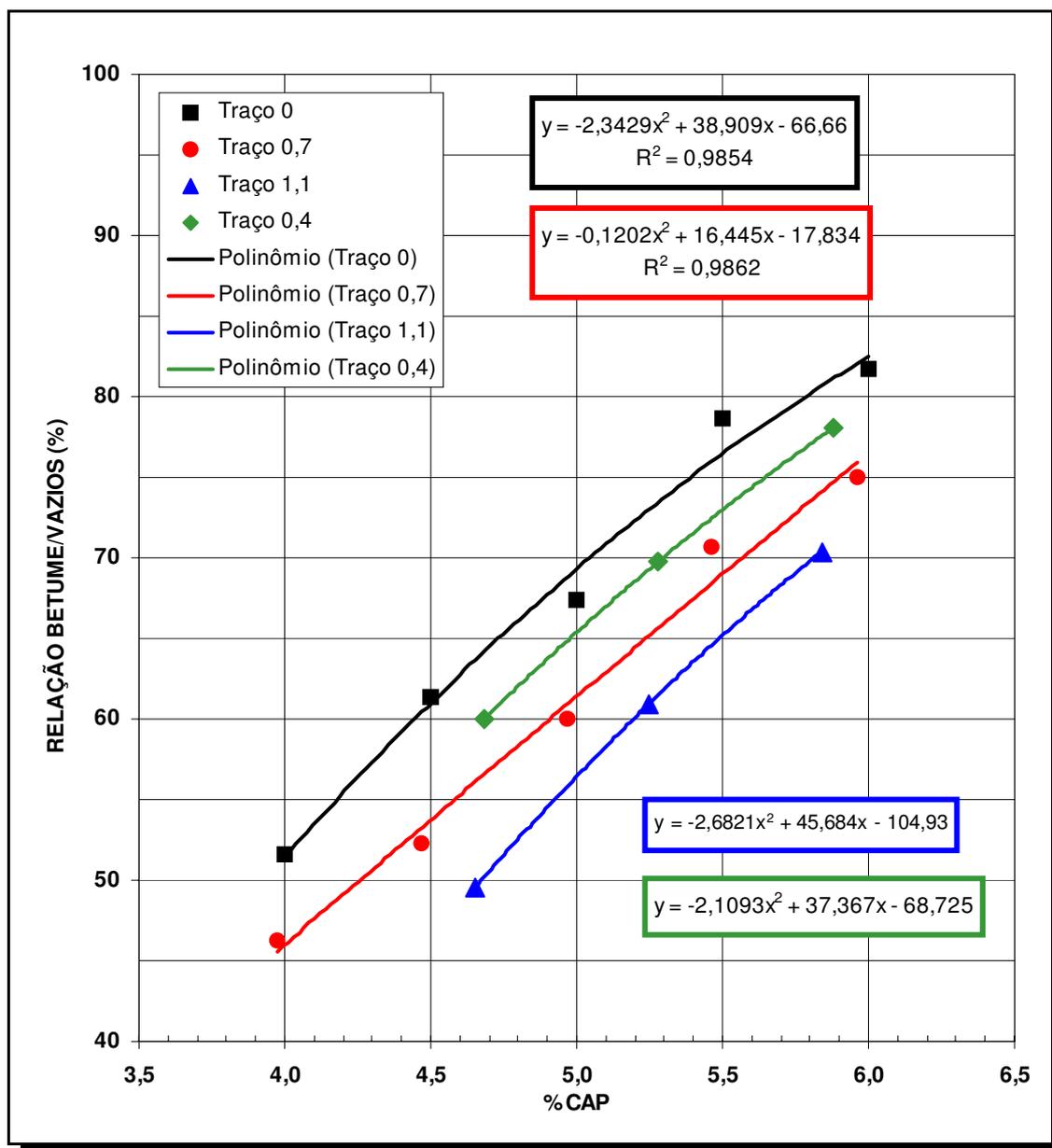


Figura 5.6 - Gráfico comparativo das relações betume/vazios

Os valores da relação betume/vazios (Figura 5.6) caem devido à incorporação de borracha para um mesmo percentual de CAP. Os valores registrados geraram curvas de comportamento bastante regular.

## 5.2. CURVA DE RELAÇÃO BORRACHA/BETUME

A relação percentual borracha/betume foi calculada conforme a equação da Figura 5.7.

$$\text{relação percentual borracha / betume} = \frac{\text{peso de borracha}}{\text{peso de CAP}} \cdot 100$$

Figura 5.7 - Equação de cálculo da relação borracha/betume

A relação borracha/betume constitui-se em um parâmetro auxiliar de análise e foi plotada para facilitar a compreensão e comparação desta pesquisa com os dados apresentados por outros pesquisadores, que, algumas vezes e principalmente no processo úmido, são referenciados em percentual de borracha relativa à quantidade de cimento asfáltico.

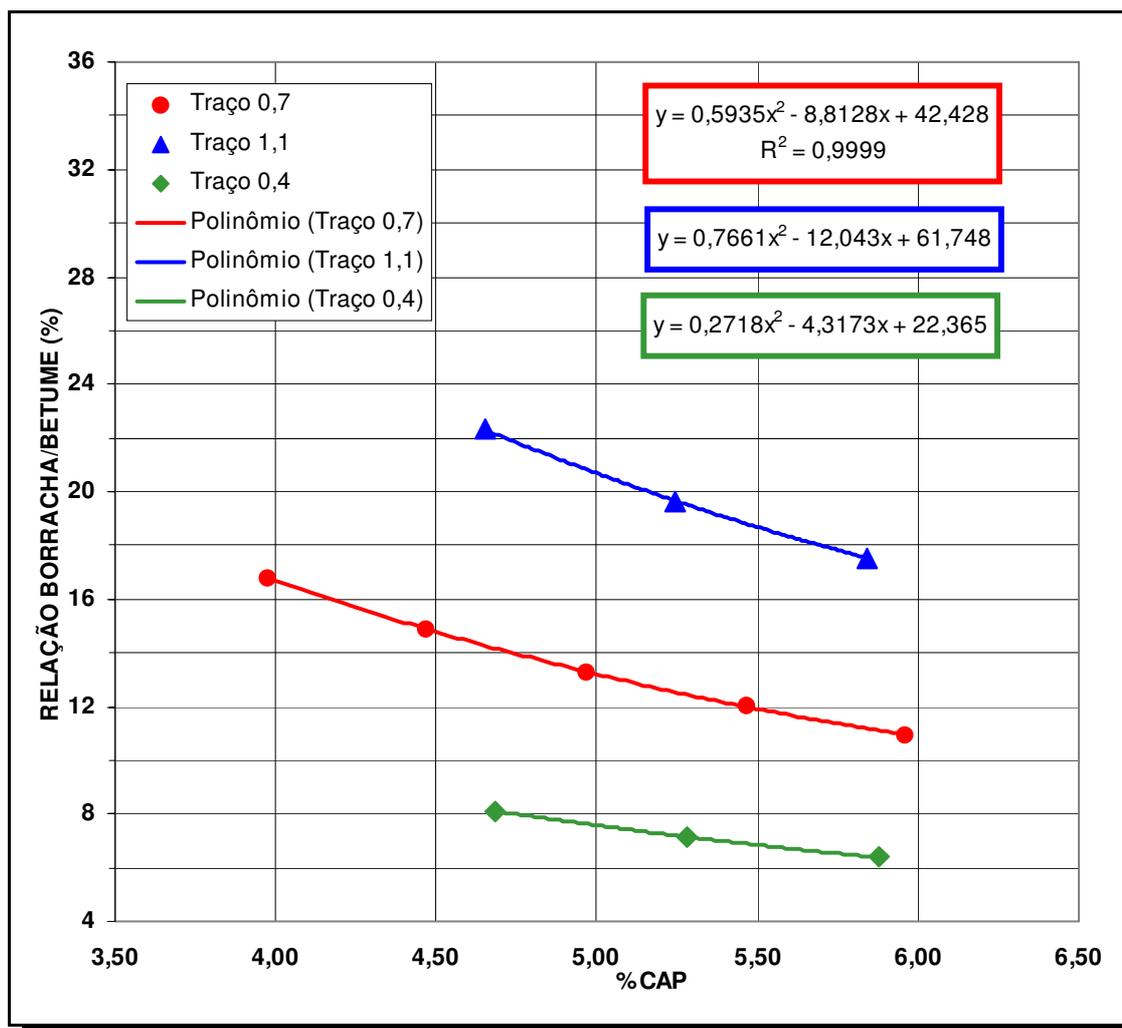


Figura 5.8 - Gráfico comparativo das relações borracha/betume

### 5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os dados verificados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral executados conforme a norma DNER-ME 138/86.

Tabela 5.5 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,7 (DNER-ME 138/86)

TRAÇO 0,7		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à tração (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	3,97	5,88
2	4,47	6,47
3	4,97	6,70
4	5,46	6,94
5	5,96	6,17

Tabela 5.6 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 1,1 (DNER-ME 138/86)

TRAÇO 1,1		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à Tração (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	4,65	5,50
2	5,25	5,97
3	5,84	6,38

Tabela 5.7 - Resumo do ensaio de resistência à tração do Traço 0,4 (DNER-ME 138/86)

TRAÇO 0,4		
Mistura	Teor CAP (%)	Resistência à Tração (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	4,68	7,69
2	5,28	7,25
3	5,88	6,38

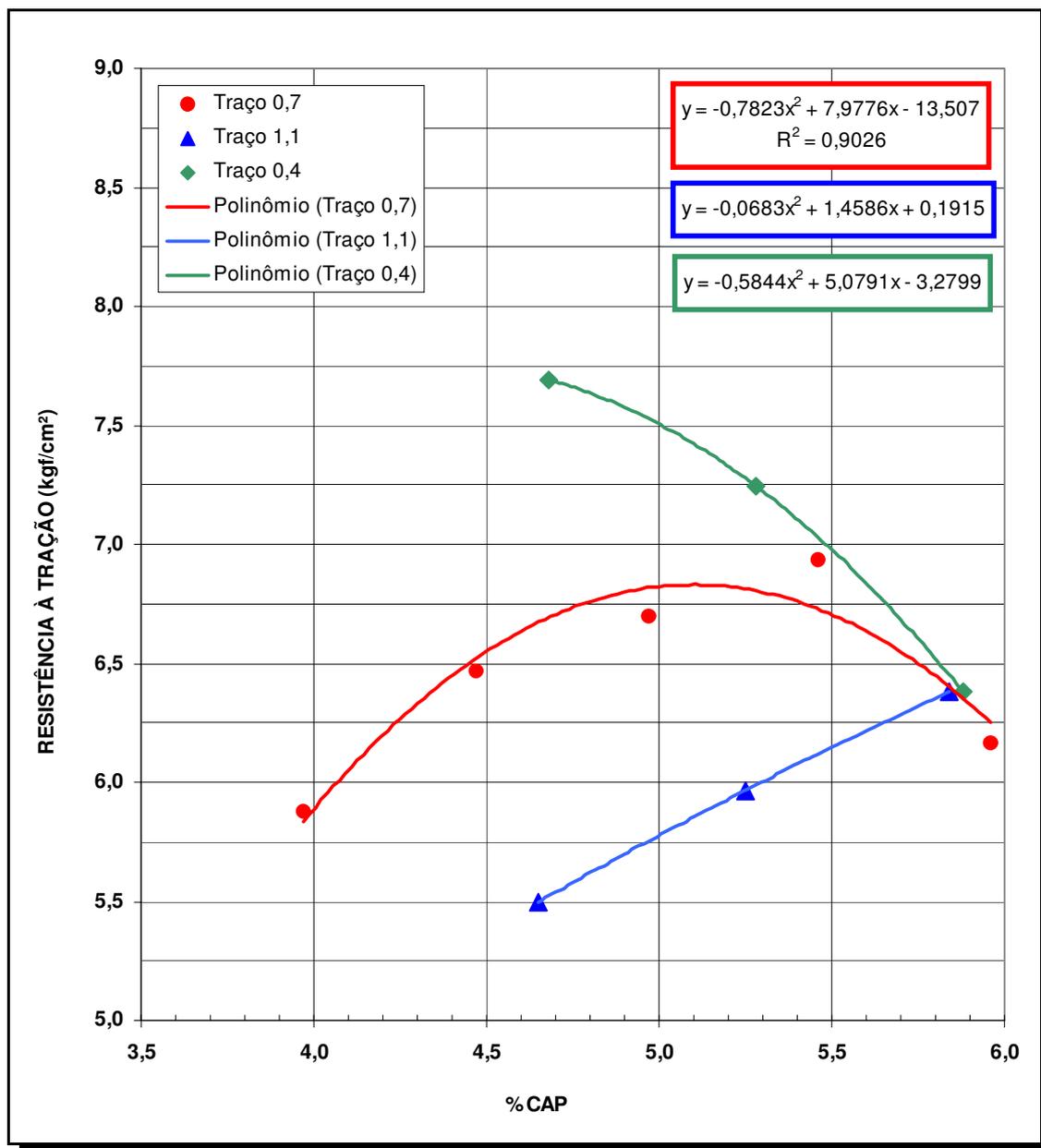


Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores das resistências à tração

Observa-se uma queda da resistência à tração (Figura 5.9) com o aumento da quantidade de borracha na mistura, comportamento que, em primeira análise, é o oposto daquele esperado, ou seja, com o incremento da quantidade de borracha havia a expectativa de que a resistência à tração aumentasse.

O comportamento verificado, entretanto, pode ser explicado pela redução da viscosidade da mistura devido ao aumento da quantidade de

borracha, uma vez que a velocidade de aplicação da carga é a mesma para todos os corpos de prova. A viscosidade final da mistura asfáltica (agregado + CAP + borracha) é dada pela combinação das viscosidades individuais dos seus componentes, assim, quando há a adição de uma quantidade maior de borracha a viscosidade final da mistura diminui. A mistura com mais borracha é menos viscosa e deforma mais rapidamente, oferecendo uma resistência menor à aplicação da carga, ou seja, para poder efetuar uma comparação em bases iguais seria necessário ajustar a velocidade de aplicação da carga de acordo com a viscosidade do corpo de prova para os diferentes percentuais de borracha.

Há a convergência dos valores obtidos quando o teor de CAP se aproxima de 5,8%, indicando que, nesta situação, a quantidade de cimento asfáltico possui influência decisiva na determinação da resistência à tração, em outras palavras, a relação borracha/betume é tal que a importância da quantidade de borracha existente na mistura para a determinação da resistência à tração é muito pequena em relação a quantidade de CAP. A curva granulométrica, por ser a mesma para todas as misturas, não possui influência.

Não foi determinada a resistência à tração por compressão diametral para o Traço 0 por haver o entendimento, na época da realização dos ensaios, que a comparação da resistência à tração para misturas com e sem borracha não era válida. Entretanto, valores de resistência à tração para as misturas de referência e experimental otimizada foram determinados durante o ensaio de vida de fadiga e são apresentados nas Tabelas 5.12 e 5.14, respectivamente.

#### **5.4. SELEÇÃO DAS MISTURAS OTIMIZADAS**

O percentual ótimo de CAP para a mistura de referência foi estabelecido com base nas prescrições de MOUTIER [54], que determinou que o teor ótimo de CAP situa-se próximo de 4,8%, e os resultados verificados no Método Marshall. Dentre os parâmetros do Método Marshall foi dada mais atenção aos valores do volume de vazios, cuja faixa ótima situa-se entre 4% e 8% [54], e ao volume de vazios do agregado mineral, que deve ser o mais

baixo possível. Desta forma foi estipulado em 4,8% o teor ótimo de CAP da mistura de referência, que resulta em volume de vazios (teórico) dentro da faixa ótima (5,6%) prescrita por MOUTIER [54] e volume de vazios do agregado mineral próximo do valor mínimo verificado nos ensaios (Figura 5.5).

Para a seleção da mistura experimental otimizada foram analisados, criteriosamente, todos os parâmetros fornecidos pelo método Marshall e os dados referentes à resistência à tração por compressão diametral. Conforme EPPS [25], o teor ótimo de CAP para misturas asfálticas que empregam borracha é sempre superior ao de misturas convencionais, sendo que, como regra geral, pode-se adotar que quando há a adição de borracha, o teor ótimo de CAP irá aumentar em percentual aproximadamente igual ao da borracha adicionada (percentuais sobre o peso total da mistura).

Analisando os valores de fluência (Figura 5.3) e da estabilidade Marshall (Figura 5.2) do Traço 1,1, verificou-se que a estabilidade apresenta valores sempre inferiores aos dos demais traços experimentais, enquanto a fluência apresenta-se sempre superior. Através destes dois critérios concluiu-se que o Traço 1,1 possui, dentro da metodologia de incorporação de borracha empregada neste trabalho, quantidade de borracha superior à ideal, sendo, desta forma, abandonado.

O Traço 0,7 e Traço 0,4 apresentaram valores de estabilidade e fluência similares na região próxima daquela especificada pela regra geral de EPPS (aproximadamente entre 5,2% e 5,5% de CAP). Os demais parâmetros do Método Marshall (densidade, volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios) sempre apresentaram comportamento coerente com a quantidade de borracha adicionada. A resistência à tração por compressão diametral apresentou ponto de máximo melhor definido no Traço 0,7, com tendência de máximo quando o teor de CAP se aproxima de 5,1%. Considerando estas constatações, optou-se por adotar para a mistura experimental otimizada 0,7% de borracha. O teor ótimo de CAP foi estabelecido em 5,3%, que corresponde à região de máxima estabilidade Marshall (Figura 5.2), baixa fluência (Figura 5.3) e elevada resistência à tração (Figura 5.9) do

Traço 0,7, além de situar-se próximo dos valores recomendados pela regra geral apresentada por EPPS [25].

Para que fosse possível efetuar uma análise aprofundada e comparativa do comportamento estrutural da mistura de referência e da mistura experimental otimizada foram executados, com estas, os ensaios de módulo de resiliência e determinação da vida de fadiga.

## 5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A seguir são apresentados os valores medidos em laboratório para os módulos de resiliência das misturas de referência e experimental otimizada.

### 5.5.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

Tabela 5.8 - Resumo das condições do ensaio de resiliência da mistura de referência

MISTURA DE REFERÊNCIA	
Temperatura do ensaio:	25° C
Constante dos LVDTs:	0,00177771 mm/mV
Calibração do cil. de carga:	$F_{(man. de 0-1)} = 145,09 Pm + 16,973 \Leftrightarrow F_{(man. de 0-10)} = 182,47 - 14,267$

Tabela 5.9 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura de referência

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm <sup>2</sup> )	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (MPa)	Módulo Resiliente Médio (MPa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2814	6,47	3,0	3,0	1	533,1	0,001067	4306	4314
		3,5	3,5	1	624,4	0,001244	4322	
2819	6,47	2,5	3,0	1	441,9	0,001067	3569	3630
		3,0	3,5	1	533,1	0,001244	3691	
2827	6,40	3,5	2,5	1	624,4	0,000889	6117	5563
		4,0	3,5	1	715,6	0,001244	5008	
Módulo de resiliência médio final $\Rightarrow$								4502

### 5.5.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA

Tabela 5.10 - Resumo das condições do ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada

MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA	
Temperatura do ensaio:	25° C
Constante dos LVDTs:	0,00177771 mm/mV
Calibração do cil. de carga:	$F_{(man. de 0-1)} = 145,09 Pm + 16,973 \text{ } \langle \rangle \text{ } F_{(man. de 0-10)} = 182,47 - 14,267$

Tabela 5.11 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resiliência da mistura experimental otimizada

Número do corpo de prova	Altura do C.P. (cm)	Pressão Manom. (kgf/cm <sup>2</sup> )	OSCILÓGRAFO		Carga (kgf)	Deformação Resiliente (cm)	Módulo Resiliente (MPa)	Módulo Resiliente Médio (MPa)
			Registro (div)	Sens. (mV/div)				
2953	6,59	2,5	2,7	1	441,9	0,000960	3893	3345
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3170	
		3,5	5,0	1	624,4	0,001778	2970	
2967	6,49	2,5	3,3	1	441,9	0,001173	3234	3100
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3219	
		3,5	5,3	1	624,4	0,001884	2845	
2962	6,56	2,5	5,3	1	441,9	0,001884	1992*	2630
		3,0	4,0	1	533,1	0,001422	3185	
		3,5	5,5	1	624,4	0,001955	2713	
Módulo de resiliência médio final $\Rightarrow$								3025

(\*) Expurgado para a etapa de dimensionamento simulado

Para o emprego na etapa de dimensionamento simulado com o software Elsym5, através de análise estatística, e utilizando-se como critério de expurgo o valor médio (+) ou (-) dois desvios padrões, foi expurgado o valor medido em laboratório e igual a 1992 MPa e uma nova média foi calculada em 3153 MPa.

### 5.5.3. ANÁLISE

A mistura de referência apresentou módulo resiliente médio de 4502 MPa, o que constitui um valor elevado se comparado com módulos tipicamente encontrados em concretos asfálticos nacionais.

O valor modular da mistura experimental otimizada apresentou significativa queda em relação ao da mistura de referência, fenômeno lógico, pois há a incorporação da borracha (material de baixa rigidez), e tendência também encontrada em misturas asfálticas que empregam polímeros virgens e avaliadas à 25° C [46]. Entretanto, apesar desta queda, o valor modular de 3153 MPa pode ser considerado muito bom e apresenta-se dentro da média recomendada pelo DNER para obras federais que não empregam borracha (2500 à 3500 MPa).

## **5.6. VIDA DE FADIGA**

A seguir são apresentados os dados do ensaio de vida de fadiga das misturas de referência e experimental otimizada. O ensaio foi efetuado com tensão controlada.

As Tabelas 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam os resumos das condições de ensaio, onde constam os dados necessários à elaboração dos gráficos apresentados nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

As curvas de fadiga em termos de diferença de tensões (Figuras 5.10 e 5.12) reproduzem a diferença de tensões plotada contra o número de ciclos que cada corpo de prova resistiu. A diferença de tensões é dada pela tensão de compressão vertical subtraída da tensão de tração horizontal e reproduz o estado biaxial de esforços aos quais os corpos de prova são submetidos durante o ensaio.

As curvas de fadiga em termos de deformação específica resiliente inicial (Figuras 5.11 e 5.5.13) apresentam o número de ciclos aos quais cada corpo de prova resistiu plotados contra a deformação específica resiliente inicial. Esta deformação é determinada no início do ensaio com cada corpo de prova no conjunto de ciclos em que a deformação (horizontal) permanece aproximadamente constante (normalmente entre as 100 e 300 primeiras

aplicações de carga). É calculada pela quociente entre o diâmetro do corpo de prova deformado pela aplicação da carga e o diâmetro indeformado do mesmo.

### 5.6.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

Tabela 5.12 - Resumo das condições do ensaio de vida de fadiga da mistura de referência

Mistura de referência	
Temperatura do ensaio	25° C
Módulo resiliente médio da amostra	4502 MPa
Tensão de tração estática máxima, $\sigma_{Tmax} =$	10,3 kgf/cm <sup>2</sup>
Equação do cil. de carga ( 6 pol )	$Pm_{(0-1)} = 0,0069 F - 0,1166$ ; $Pm_{(0-10)} = 0,0055 F + 0,0804$
	$F_{(0-1)} = 145,09 Pm + 16,973$ ; $F_{(0-10)} = 182,47 Pm - 14,267$

Tabela 5.13 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura de referência

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
2.811	6,40	10,20	10	105,6	0,61	0,0000224	0,40	98.939
2.812	6,44	10,20	15	159,4	0,98	0,0000336	0,61	14.179
2.813	6,50	10,19	20	214,3	1,26	0,0000449	0,81	1.836
2.815	6,42	10,20	20	211,9	1,25	0,0000449	0,81	2.551
2.816	6,44	10,19	30	318,5	1,83	0,0000673	1,21	2.273
2.817	6,46	10,20	30	319,8	1,84	0,0000673	1,21	1.071
2.818	6,48	10,19	40	427,3	2,43	0,0000897	1,62	352
2.820	6,51	10,19	40	429,3	2,44	0,0000897	1,62	407
2.821	6,43	10,18	15	158,9	0,98	0,0000336	0,61	9.743
2.822	6,44	10,20	20	212,6	1,25	0,0000449	0,81	11.794
2.823	6,22	10,18	20	204,9	1,21	0,0000449	0,81	3.303
2.824	6,48	10,17	20	213,2	1,25	0,0000449	0,81	3.879

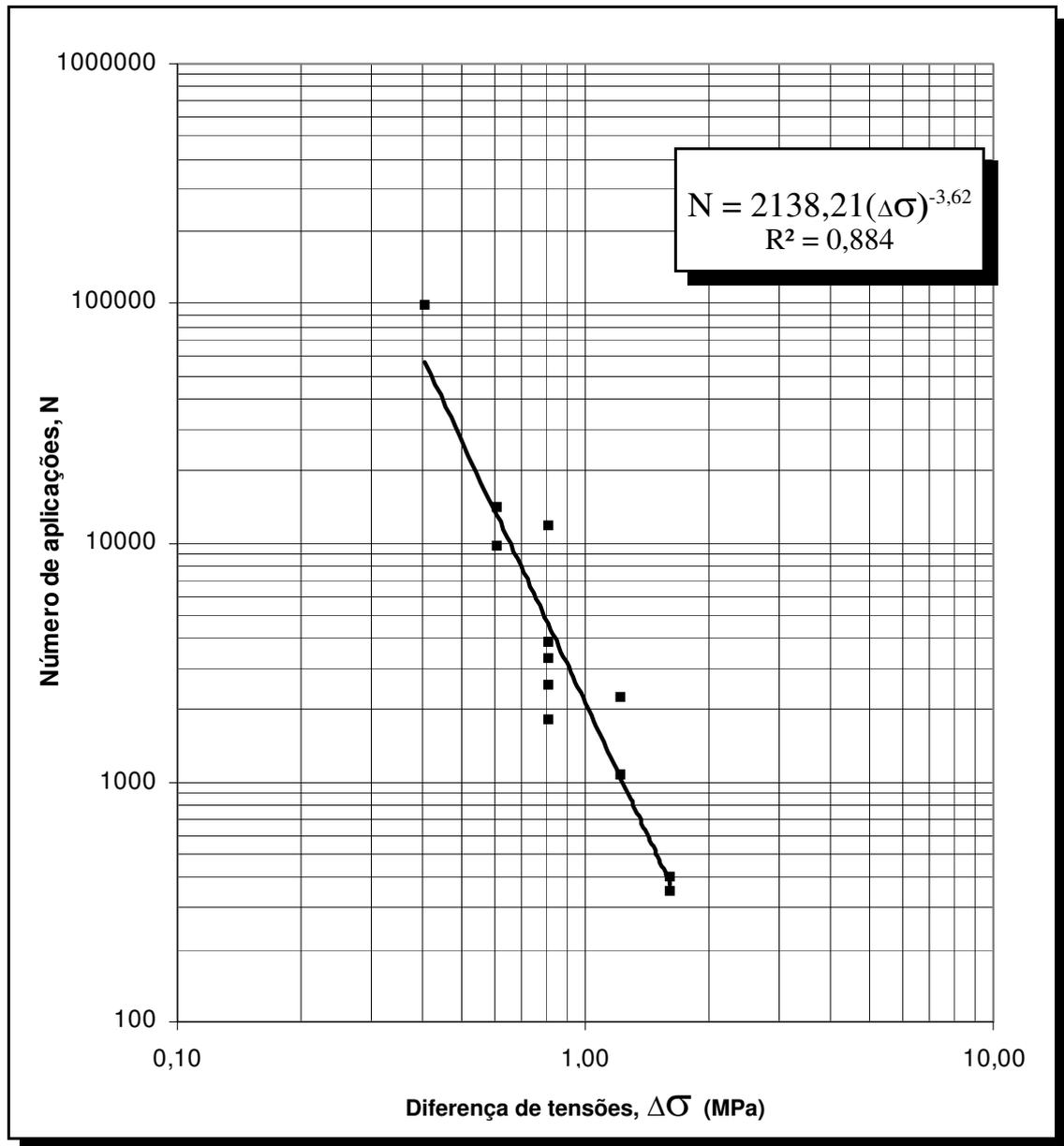


Figura 5.10 - Gráfico de vida de fadiga da mistura de referência em termos de diferença de tensões

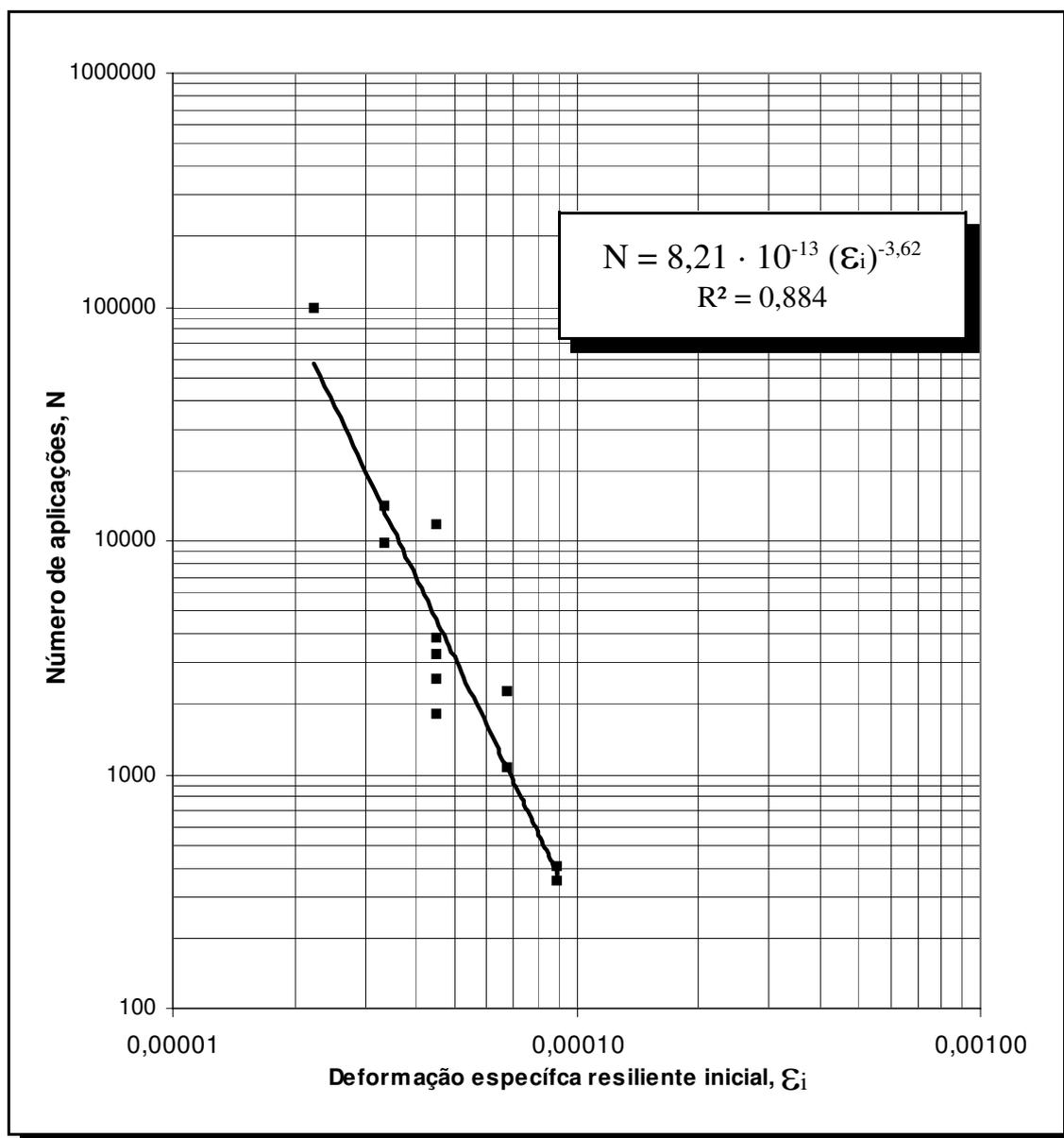


Figura 5.11 - Gráfico de vida de fadiga da mistura de referência em termos de deformação específica resiliente inicial

### 5.6.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA

Tabela 5.14 - Resumo das condições do ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada

MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA	
Temperatura do ensaio	25° C
Módulo resiliente médio da amostra	3025 MPa
Tensão de tração estática máxima, $\sigma_{Tmax} =$	8,80 kgf/cm <sup>2</sup>
Equação do cil. de carga (6 pol)	$Pm_{(0-1)} = 0,0069 F - 0,1166$ ; $Pm_{(0-10)} = 0,0055 F + 0,0804$
	$F_{(0-1)} = 145,09 Pm + 16,973$ ; $F_{(0-10)} = 182,47 Pm - 14,267$

Tabela 5.15 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga da mistura experimental otimizada

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
2.950	6,56	10,20	10	94,3	0,53	0,0000291	0,35	135.770
2.951	6,55	10,18	10	94,0	0,53	0,0000291	0,35	*
2.955	6,53	10,21	20	188,0	1,11	0,0000582	0,70	5.052
2.954	6,60	10,18	20	189,5	1,12	0,0000582	0,70	5.210
2.956	6,68	10,19	30	287,9	1,66	0,0000873	1,06	1.229
2.757	6,61	10,18	30	284,6	1,65	0,0000873	1,06	1.465
2.959	6,63	10,20	40	381,4	2,18	0,0001164	1,41	537
2.960	6,64	10,18	40	381,2	2,18	0,0001164	1,41	268
2.961	6,66	10,17	40	382,0	2,18	0,0001164	1,41	336
2.963	6,61	10,17	50	473,9	2,69	0,0001455	1,76	*
2.965	6,55	10,21	15	141,4	0,86	0,0000436	0,53	20.534
2.966	6,57	10,19	15	141,6	0,86	0,0000436	0,53	19.655

(\*) Não foi necessário utilizar todos os corpos de prova moldados

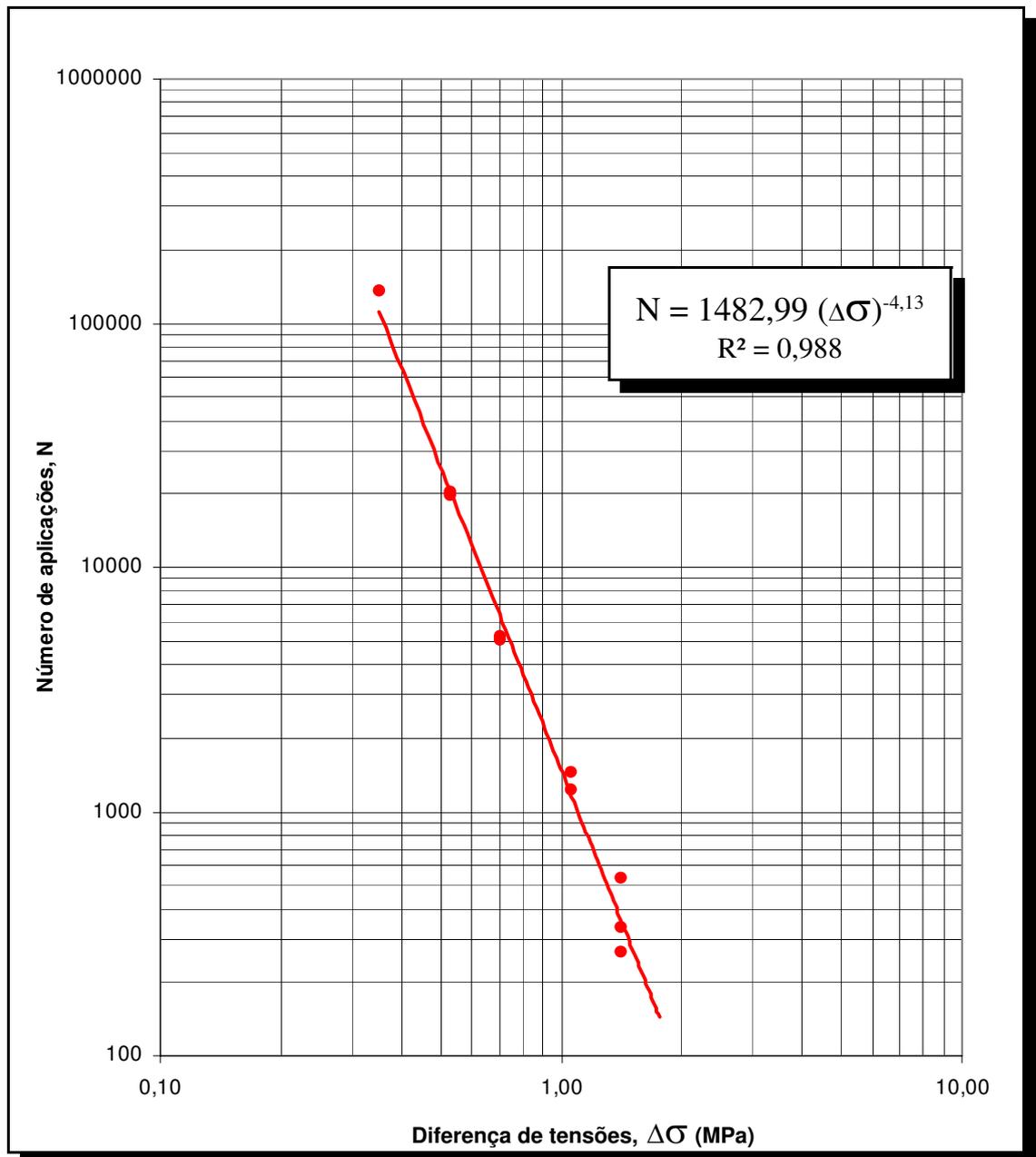


Figura 5.12 - Gráfico de vida de fadiga da mistura experimental otimizada em termos de diferença de tensões

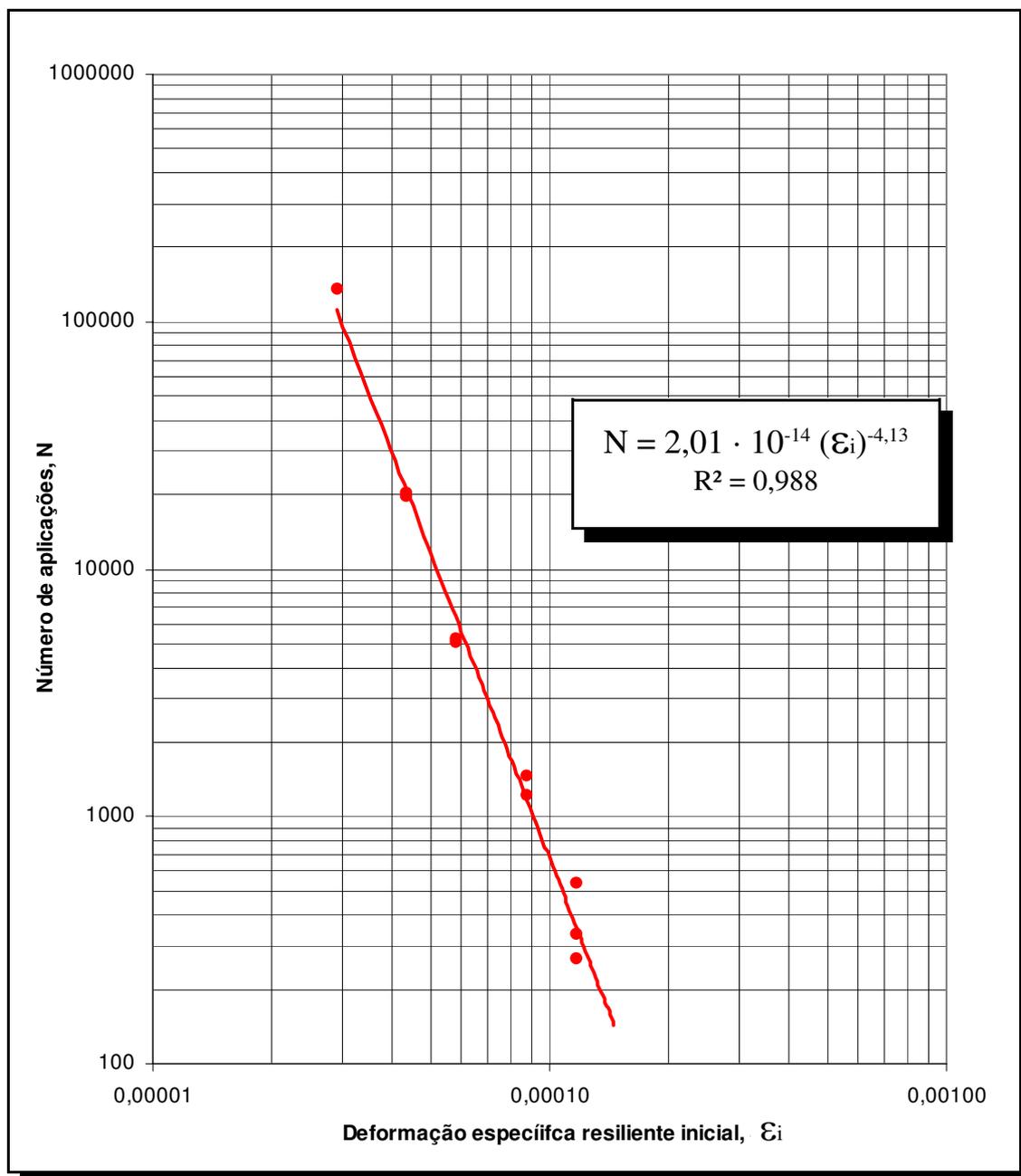


Figura 5.13 - Gráfico de vida de fadiga da mistura experimental otimizada em termos de deformação específica resiliente inicial

### 5.6.3. COMPARATIVO - DIFERENÇA DE TENSÕES

A Figura 5.14 apresenta as curvas de fadiga das misturas de referência e experimental otimizada em termos de diferença de tensões sobrepostas, facilitando a comparação entre ambas. Adicionalmente também foi plotada a curva de vida de fadiga encontrada por PINTO [56] para a mesma metodologia de ensaio e cimento asfáltico idênticos aos utilizados neste trabalho.

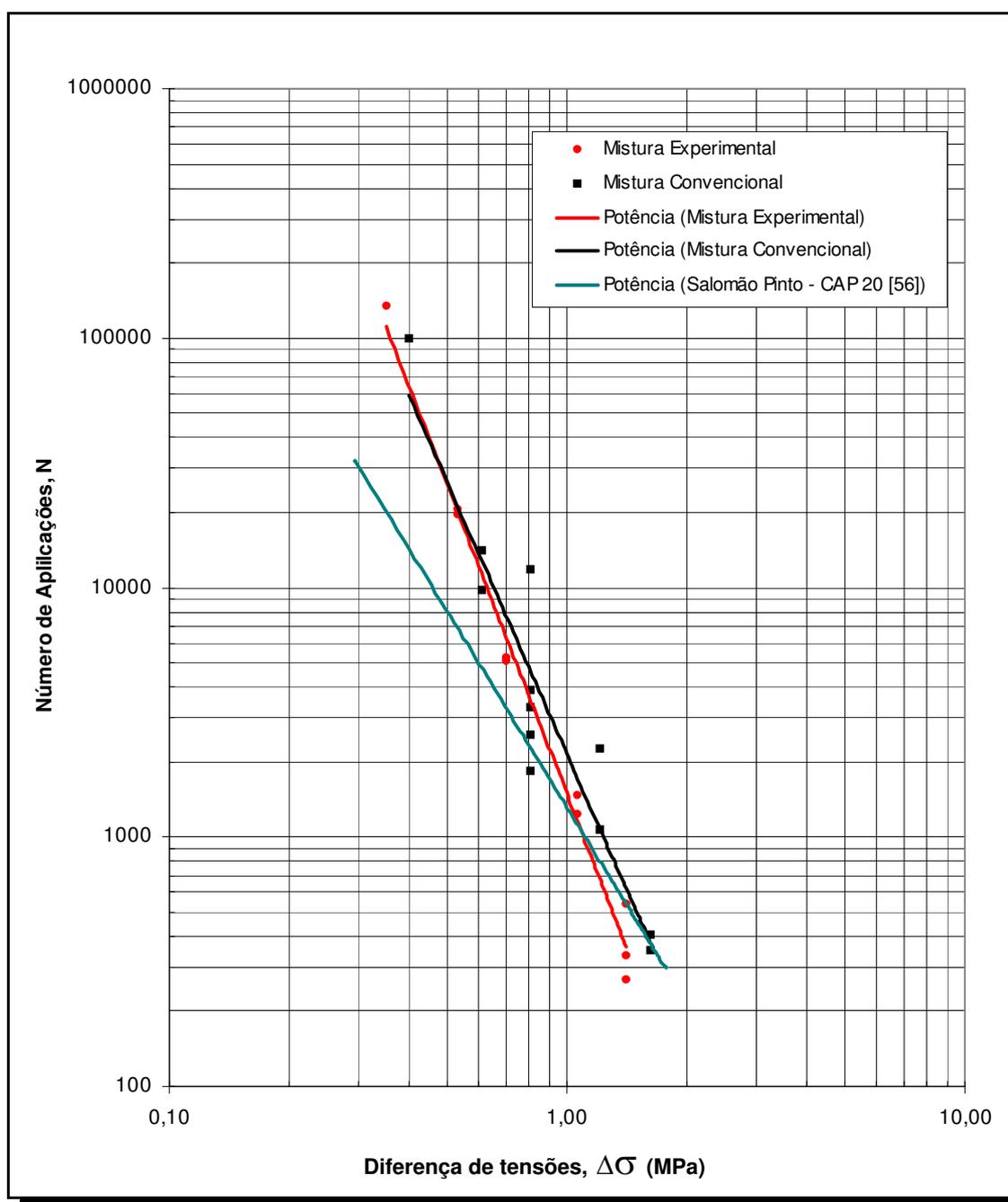


Figura 5.14 - Gráfico comparativo das curvas de vida de fadiga em termos de diferença de tensões

#### 5.6.4. COMPARATIVO - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RESILIENTE INICIAL

A Figura 5.15 apresenta as curvas de fadiga das misturas de referência e experimental otimizada em termos de deformação específica resiliente inicial, facilitando a comparação entre ambas. Também foi plotada a curva de vida de fadiga encontrada por PINTO [56] para metodologia de ensaio e cimento asfáltico idênticos aos utilizados neste trabalho.

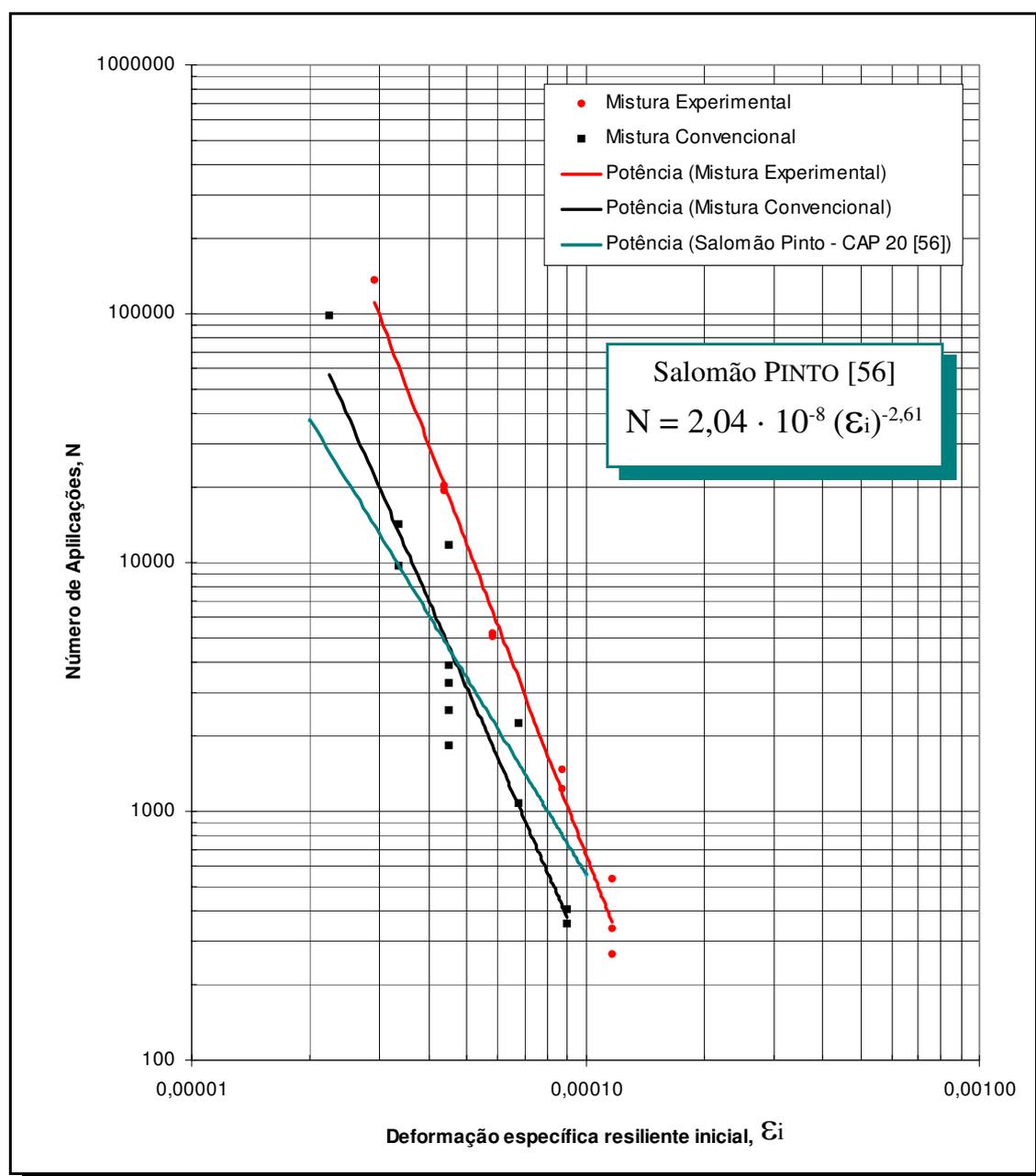


Figura 5.15 - Gráfico comparativo das curvas de vida de fadiga em termos de deformação específica resiliente inicial

### 5.6.5. ANÁLISE

A vida de fadiga registrada em termos de diferença de tensões apresentou comportamento bastante similar entre a mistura de referência e a mistura experimental otimizada. Esta coincidência de curvas permite afirmar, sem a necessidade da realização de nenhum cálculo, que a mistura experimental otimizada, por possuir módulo de resiliência inferior, apresentará uma durabilidade superior à mistura de referência. Cabe lembrar que módulo inferior significa deformações maiores e tensões internas menores.

As curvas geradas neste trabalho quando comparadas com a encontrada por PINTO [56], em função da diferença de tensões, verifica-se que ambas possuem um comportamento à fadiga melhor em uma ampla faixa de valores, sendo que esta diferença se torna mais saliente quando as diferenças de tensões são baixas (dentro da amplitude dos ensaios). Também verifica-se que as curvas apresentam-se menos suscetíveis às variações do tráfego (inclinação da reta) que aquela encontrada por PINTO [56].

Se analisada em termos de deformação específica resiliente inicial, a curva de fadiga da mistura experimental otimizada apresenta números de ciclos sempre muito superiores aos da mistura de referência, exibindo valor praticamente dez vezes maior na região mais favorável (deformações menores). A análise pura e simples do comportamento à fadiga em termos de deformação específica não permite afirmar qual das misturas possui comportamento final (combinação entre vida de fadiga e módulo de resiliência) melhor, já que o módulo de resiliência da mistura experimental otimizada apresentou-se menor. Desta forma faz-se necessário o dimensionamento simulado por computador.

Comparando-se as curvas deste trabalho com a encontrada por PINTO [56], em função da deformação específica resiliente inicial, verifica-se que a mistura experimental otimizada apresenta comportamento superior em toda a gama de deformações específicas avaliadas. Se comparada com a

curva da mistura de referência, o comportamento à fadiga encontrado por PINTO [56] apresenta-se melhor quando as deformações são elevadas, e pior quando as deformações são baixas. A curva estabelecida por PINTO sempre apresenta-se mais suscetível às variações do tráfego (inclinação da reta).

## capítulo 6

---

# **DIMENSIONAMENTO HIPOTÉTICO SIMULADO COM O SOFTWARE ELSYM5**

Com o objetivo de hierarquizar o comportamento estrutural das misturas de referência e experimental otimizada efetuou-se o dimensionamento hipotético simulado com o auxílio do software Elsym5 e empregando-se as curvas de fadiga em função da deformação específica resiliente inicial.

Adicionalmente, efetuaram-se simulações de cálculo com um modelo de desempenho à fadiga consagrado no meio técnico e estabelecido por Salomão PINTO (Figura 5.15), à página 182 da sua tese de doutoramento [56], para CAP 20 em ensaio idêntico ao adotado neste trabalho e, inclusive, efetuado no mesmo laboratório. Esta mistura será doravante denominada de “mistura Salomão PINTO [56]”.

Em cada estrutura simulada foram empregadas combinações idênticas de materiais e espessuras de camadas, variando-se apenas o módulo de resiliência e o comportamento à fadiga da camada asfáltica.

Os dados de fadiga empregados são provenientes de curvas de fadiga de laboratório, portanto, a comparação foi efetuada entre a mistura de

referência de laboratório (Figura 5.11), a mistura experimental otimizada de laboratório (Figura 5.13) e a mistura Salomão PINTO [56] também elaborada em laboratório (Figura 5.15). Não foi empregado nenhum coeficiente de ajuste campo-laboratório (do inglês “shift factor”), pois implicaria em incluir, desnecessariamente, uma informação com nível de incerteza significativo e que poderia deturpar a fidelidade dos resultados. A Tabela 6.1 apresenta um resumo dos modelos de comportamento à fadiga utilizados.

Devido a não utilização do coeficiente de ajuste campo-laboratório as espessuras das camadas empregadas são tipicamente grandes e os valores dos números de solicitações admissíveis (N) baixos. Isso não acarreta qualquer prejuízo para a análise, pois esta foi efetuada comparando-se dados obtidos em laboratório e segundo critérios similares, onde o importante não são os valores individuais de “N”, mas a relação entre o número de solicitações admissíveis (N) encontrado para as várias misturas em cada estrutura.

Tabela 6.1 - Modelos de desempenho à fadiga empregados na simulação de cálculo

Mistura	Modelo de desempenho à fadiga
De referência	$N = 8,21 \cdot 10^{-13} (\epsilon_i)^{-3,62}$
Experimental otimizada	$N = 2,01 \cdot 10^{-14} (\epsilon_i)^{-4,13}$
Salomão PINTO [56]	$N = 2,04 \cdot 10^{-8} (\epsilon_i)^{-2,61}$

Onde: N = número de ciclos  
 $\epsilon_i$  = deformação específica resiliente inicial

## 6.1. ESCOLHA DAS CARGAS

Em todas as estruturas foi adotado um carregamento típico composto de um eixo simples de roda dupla com carga total de 8,2 tf (2,05 tf por pneu), sendo que foram consideradas no cálculo apenas as cargas de dois pneus (carga de um dos lados do eixo). A Figura 6.1 apresenta um esquema das cargas e da estrutura.

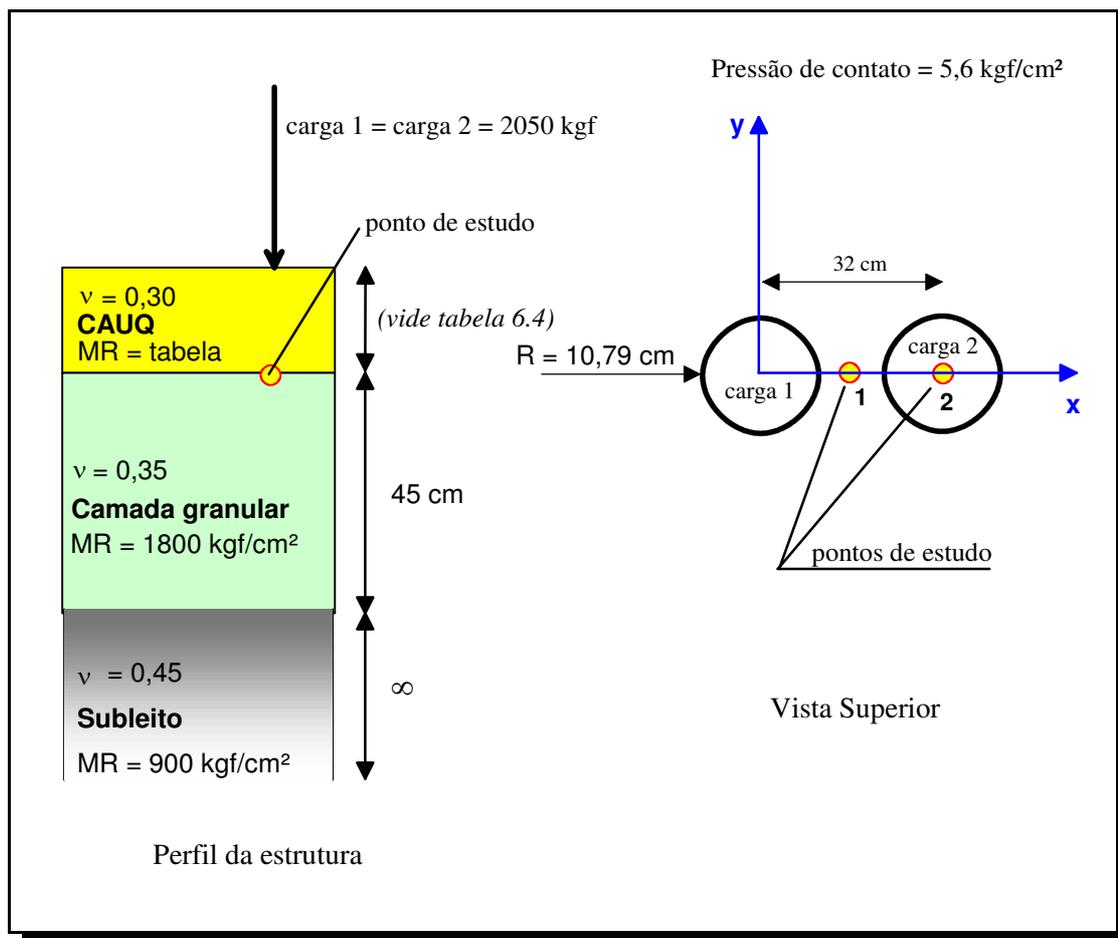


Figura 6.1 - Esquema das cargas e estruturas simuladas

## 6.2. CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DAS ESTRUTURAS

Os valores modulares do subleito e da camada granular foram adotados pelo autor e são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Valores modulares adotados na simulação de dimensionamento

Camada	Módulo ( $\text{kgf/cm}^2$ )
CAUQ	(vide tabela 6.3)
Camada granular	1800
Subleito	900

Os valores dos módulos de resiliência das misturas de referência e experimental otimizada adotados foram determinados em laboratório. O valor modular para a mistura Salomão PINTO [56], seguindo a premissa de se adotar valores típicos consagrados no meio técnico, foi estabelecido em 30000 kgf/cm<sup>2</sup>, que também corresponde ao valor médio recomendado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem<sup>1</sup> (DNER). A Tabela 6.3 apresenta um resumo dos valores modulares empregados na camada de CAUQ.

Tabela 6.3 - Valores modulares empregados no dimensionamento simulado

Mistura asfáltica (CAUQ)	Módulo de resiliência (kgf/cm <sup>2</sup> )
De referência	45020
Experimental otimizada	31530
Salomão PINTO [56]	30000

A definição das espessuras das camadas asfálticas e de brita graduada (base), e valores modulares para as camadas de base e subleito, para cada estrutura analisada, foi efetuada de forma tal que os valores das deformações específicas ficassem posicionados ao longo da faixa de deformações contemplada pelas curvas de fadiga em termos de deformação específica resiliente inicial.

Desta forma foi possível analisar o comportamento estrutural relativo entre as misturas em toda a extensão das curvas de fadiga, verificando-se a variabilidade nos resultados devido a diferença de declividade entre as curvas de fadiga das misturas. A Tabela 6.4 apresenta as espessuras empregadas para a camada de CAUQ.

---

<sup>(1)</sup> Para o projeto de duplicação da Rodovia BR-101, em Santa Catarina no ano de 1999, o DNER recomendou, para a camada de CAUQ, valores modulares entre 25000 e 35000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Tabela 6.4 - Espessuras das camadas de CAUQ simuladas

Estrutura	Espessura (cm)
1	25
2	38
3	50
4	65

### 6.3. RESUMO COMPARATIVO DOS RESULTADOS DAS ESTRUTURAS SIMULADAS

As Tabelas 6.5 a 6.8 e as Figuras 6.2 e 6.3 apresentam as vidas úteis de serviço para o concreto asfáltico, em cada estrutura simulada. Pode-se observar que, quanto menores forem as deformações específicas de tração na fibra inferior da camada betuminosa, maior é a diferença entre a vida útil estimada para o pavimento construído com a mistura experimental otimizada em relação às misturas de referência e Salomão PINTO [56]. O cálculo completo é apresentado no Anexo A.

O emprego do ajuste campo-laboratório, se efetuado de forma adequada e sem distorcer a hierarquia de desempenho apresentada nos ensaios de vida de fadiga, implica, necessariamente, em aumentar a diferença de desempenho final da mistura experimental otimizada em relação às demais, pois, quanto mais delgada for a camada de CAUQ, menor é a importância desta na determinação da deformação específica de tração na fibra inferior da camada betuminosa, ou seja, esta deformação específica recebe maior influência das camadas subjacentes. Considerando que, para efeito comparativo, as camadas subjacentes devem, obrigatoriamente, ser idênticas, há a tendência de que as deformações específicas encontradas sejam mais próximas, de tal forma que, quando a espessura da camada de CAUQ tende a zero (zero centímetros), a deformação específica de tração na fibra inferior desta camada de CAUQ tende a ser igual, independentemente do módulo de resiliência empregado. Nesta situação hipotética, a diferença de desempenho estaria condicionada exclusivamente aos valores apresentados no ensaio de

vida de fadiga, onde a mistura experimental otimizada apresenta vida útil até (aproximadamente) 10 vezes superior à mistura de referência.

Tabela 6.5 - Estrutura 1 (CAUQ = 25 cm)

Mistura	N	Deformação específica ( $\epsilon$ ) máxima na fibra inferior da camada de CAUQ
De referência	455	0,0000846
Experimental otimizada	509	0,0001067
Salomão PINTO [56]	437	0,0001101

Tabela 6.6 - Estrutura 2 (CAUQ = 38 cm)

Mistura	N	Deformação específica ( $\epsilon$ ) máxima na fibra inferior da camada de CAUQ
De referência	4518	0,0000449
Experimental otimizada	6381	0,0000579
Salomão PINTO [56]	2144	0,0000599

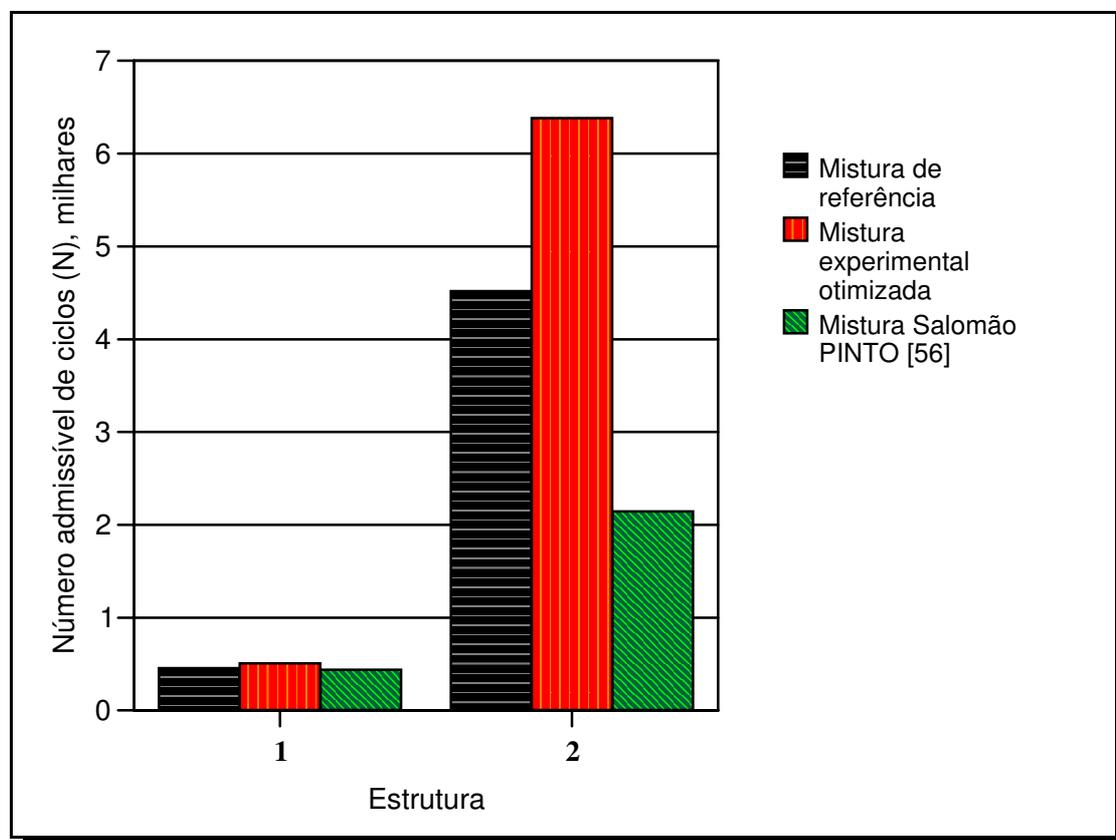


Figura 6.2 - Número de solicitações admissíveis para as estruturas 1 e 2

Tabela 6.7 - Estrutura 3 (CAUQ = 50 cm)

Mistura	N	Deformação específica ( $\epsilon$ ) máxima na fibra inferior da camada de CAUQ
De referência	25159	0,0000279
Experimental otimizada	43830	0,0000363
Salomão PINTO [56]	7218	0,0000376

Tabela 6.8 - Estrutura 4 (CAUQ = 65 cm)

Mistura	N	Deformação específica ( $\epsilon$ ) máxima na fibra inferior da camada de CAUQ
De referência	131898	0,0000177
Experimental otimizada	307296	0,0000226
Salomão PINTO [56]	24749	0,0000235

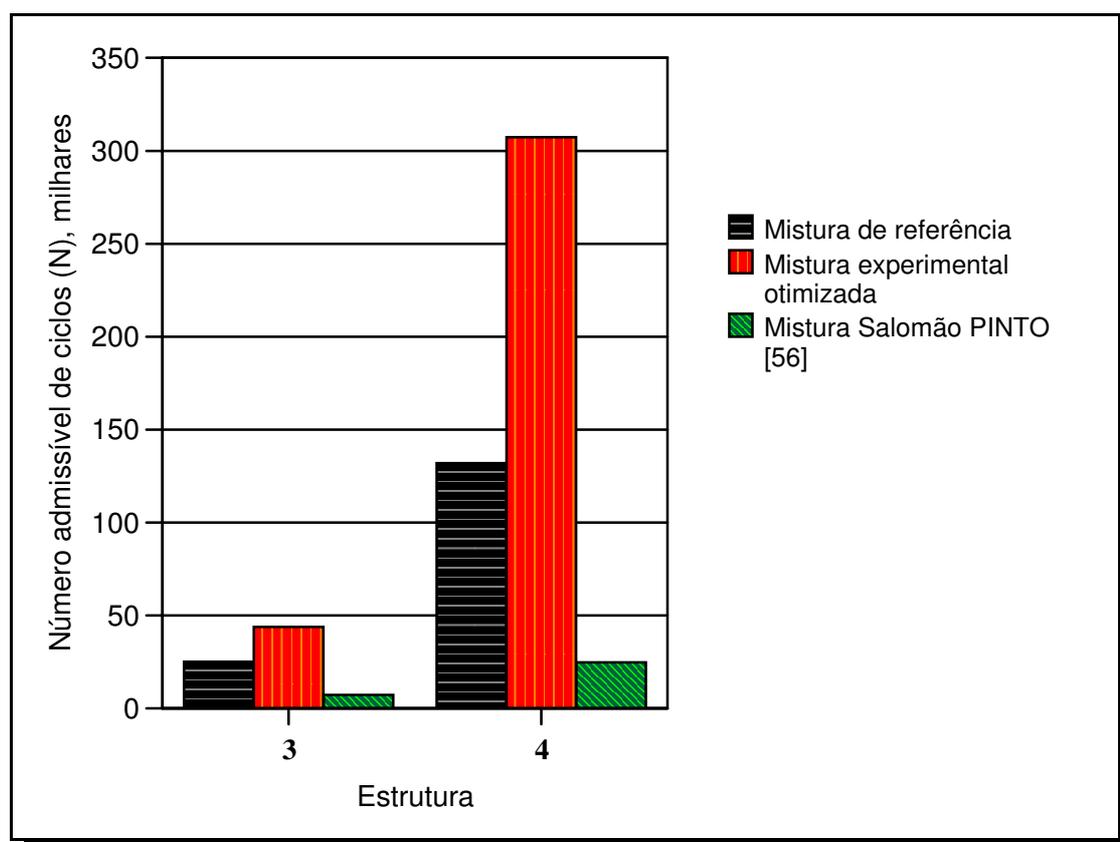


Figura 6.3 - Número de solicitações admissíveis para as estruturas 3 e 4

# capítulo 7

---

## ANÁLISES E COMENTÁRIOS

Neste capítulo são enumerados alguns fenômenos que podem explicar as melhorias estruturais observadas e algumas considerações quanto a relação custo/benefício do emprego de borracha triturada de pneus em misturas asfálticas.

### 7.1. INTERAÇÃO ENTRE O CAP E A BORRACHA

É difícil estabelecer qual é o fenômeno que ocorre no concreto asfáltico e que propicia a melhora estrutural verificada com a incorporação de borracha reciclada de pneus. Apenas é possível afirmar que se trata de um fenômeno físico e não químico. O autor possui as seguintes hipóteses para tentar explicar a melhora estrutural:

- Há interação entre a borracha e o CAP: a temperatura elevada existente na mistura asfáltica aliada ao efeito de solvente do CAP são suficientes para proporcionar uma combinação com a borracha, mesmo que parcial, criando uma rede polimérica tridimensional;
- Não há interação entre a borracha e o CAP: a melhora no desempenho do material dá-se devido a alterações nas características de compressão, principalmente na parte superior da camada asfáltica. Nesta hipótese a borracha funcionaria como um

amortecedor entre os agregados, permitindo uma maior deformação de compressão e, desta forma, melhorando o comportamento à flexão. Com isso a solicitação máxima de tração na fibra inferior da camada asfáltica diminui;

- Não há interação entre a borracha e o CAP: o CAP funciona como uma cola entre as partículas de borracha, beneficiando o intertravamento das mesmas e, de certa forma, permitindo que as partículas formem uma rede tridimensional;
- Não há interação entre a borracha e o CAP: a borracha intercalada com o asfalto diminui o comprimento das fibras de asfaltenos do CAP. Nessa hipótese o aumento na vida de fadiga seria obtido devido ao fato de que fibras curtas são mais resistentes que fibras longas.

Também é possível que a melhoria ocorra devido à combinação destes fatores.

Os ensaios foram realizados com o Método Marshall em que a energia de compactação é constante, contudo o incremento da quantidade de borracha ocasionou o aumento de vazios das misturas, fator de grande influência nas misturas asfálticas quanto a módulo de resiliência e vida de fadiga.

## **7.2. RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO**

De forma geral, pode-se afirmar que a durabilidade (combinação entre módulo de resiliência e vida de fadiga) da mistura experimental otimizada é, aproximadamente, o dobro da mistura de referência. Em termos de relação custo/benefício, mesmo que a mistura com borracha custasse o dobro da mistura sem borracha ainda assim os custos versus vida útil do pavimento ficariam iguais e ainda haveria o benefício ambiental da retirada dos pneus usados do meio ambiente.

Embora seja difícil quantificar monetariamente, este benefício ambiental não pode ser desprezado, pois é muito significativo. Podem ser citados ainda a preservação da área de disposição em aterros sanitários; diminuição do hábitat de ratos e insetos transmissores de doenças (sobretudo de mosquitos), que acarreta diminuição de casos de doenças (como a dengue), diminuição da ocupação de leitos hospitalares ocasionado por estas doenças, diminuição de faltas ao trabalho, etc.; diminuição da poluição visual; diminuição de riscos de incêndios em pilhas de estocagem de pneus, diminuição do nível de ruído em até 90% [25], entre outros.

## capítulo 8

---

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Devido à incorporação de borracha nos limites do experimento observou-se que:

- A densidade da mistura asfáltica diminui com o aumento da incorporação de borracha;
- A estabilidade Marshall apresentou uma tendência de máximo para a incorporação de 0,7% de borracha;
- O volume de vazios e vazios do agregado mineral aumentaram com o incremento da quantidade de borracha;
- O incremento da quantidade de borracha ocasionou o decréscimo nos valores da resistência à tração por compressão diametral;
- A mistura experimental otimizada submetida ao ensaio de módulo de resiliência apresentou valores modulares inferiores à mistura de referência, constatação que é costumeiramente observada em misturas que empregam polímeros virgens;

- A mistura asfáltica com borracha apresentou curva de fadiga menos susceptível às solicitações impostas pelo tráfego (inclinação da curva) e valores de números de ciclos sempre superiores aos da mistura de referência.

Por fim, com o dimensionamento simulado verificou-se a vantagem da combinação entre vida de fadiga e módulo de resiliência da mistura experimental otimizada em relação às misturas de referência e Salomão pinto [56] em todas as estruturas avaliadas, sendo que, em média, a durabilidade do pavimento com a mistura experimental otimizada é igual ao dobro da mistura de referência.

Como recomendações para os próximos trabalhos a serem realizados pode-se citar:

- Realização de pesquisas com uma quantidade maior de curvas de fadiga;
- Repetição desta pesquisa utilizando-se como critério de moldagem dos corpos de prova volumes de vazios iguais;
- Análise da vida de fadiga através do ensaio de flexão alternada; e,
- Realização de trabalhos similares mas empregando-se o processo úmido de adição de borracha.

## capítulo 9

---

# REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] EMERY, J. **Evaluation of Rubber-Modified Asphalt Demonstartion Projects**. Regina: Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, 1994.
- [2] HEITZMAN, M. A. **Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier**. Transportation Research Record 1339. Washington: Transportation Research Board,1992. p. 1-8.
- [3] KANDHAL, P., HANSON D. **Crumb Rubber Modifier (CRM) Technologies**. Crumb Rubber Modifier Workshop. Spokane: 1993. Session 5, 5.1-5.20.
- [4] MCDONALD, C. H. **Low Viscosity Asphalt Rubber Paving Material**. US Patent No. 4,085,078.
- [5] ROUSE, M. **Ultrafine Asphalt Cements**. Brochure 628. Rouse Rubber Industries Inc. 1992.

- [6] **PLUSRIDE II Asphalt User's Manual**. EnviroTire Inc. June, 1992.
- [7] TAKALLOU, M.B., SAINTON, A. **Advances in Technology of Asphalt Paving Materials Containing Used Tire Rubber**. Transportation Research Record 1339. Washington: Transportation Research Board. 1992.
- [8] **BROCHURE on Asphalt Rubber**. International Surfacing Inc. Chandler, Arizona.
- [9] HANSEN, R., ANDERTON, G. **A Laboratory Evaluation of Recycled Tire Rubber in Hot-Mix Asphalt Paving Systems**. ASTM Special Technical Publication STP 1193. Philadelphia: ASTM, 1993. p. 69-83.
- [10] ROBERTS, F. **Crumb Rubber Modifier (CRM) Technologies**. Crumb Rubber Modifier Workshop. Spokane: 1993. Session 8, 8.1-8.10.
- [11] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Federal Highway Administration. **State of Practice - Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier**. Publication No. FHWA-SA-92-022, 1992.
- [12] AMIRKHANIAN, S. N. **Utilization of Scrap Tires in Flexible Pavements - Review of Technology**. ASTM Special Technical Publication STP 1193. Philadelphia: 1993. p. 233-250.
- [13] **TEICHER Works with Sacramento County to Test New Rubberized Asphalt**. In *Teicher Home Page* [online]. Arquivo consultado em 21 de Agosto de 1998, 13:00 hs. Disponível na World Wide Web: <http://teichert.com/tt/tt95f02.htm>.

- [14] CALTRANS - California State Department of Transportation. **Asphalt Rubber Hot Mix - Graded Thickness Determination Guide**. 1992.
- [15] CALTRANS - California State Department of Transportation. **Rubberized Asphalt Concrete - Status Report**. 1994.
- [16] HANNON, J. **Suggested Guidelines for New Construction Dense Graded Hot Mix**. CALTRANS, 1994.
- [17] DOTY, R. **Flexible Pavement Rehabilitation using Asphalt Rubber Combinations - A Report**. California State Department of Transportation - Caltrans. 1988.
- [18] ONTARIO. Ministry of Environment and Energy. **Evaluation of Rubber Modified Demonstaration Projects**. 1994.
- [19] ZENKE, G. **Polymer-modifizierte Strassenbaubitumen im Spiegel von Versuch eines Resumes**. Teil I In: Die Asphaltstrasse (1) 5-16 (1985); Teil II In: ibid (4) (1985 170-182.; Teil III In: ibid (6) 264-284 1985.
- [20] HANCOCK, T. **British Patent No. 4768**. 1823.
- [21] **HISTORY of Crumb Rubber**. In *Bei Emulsion Home Page* [online]. Arquivo consultado em 21 de Agosto de 1998, 13:00 hs. Disponível na World Wide Web: <http://www.bei-emulsions.com/rubber-1.htm>.
- [22] TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. **Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavements**. Canadá: 1996. 180 p.

- [23] ZENKE, G. Zur. **Theorie der Polymermodifizierten Bitumen**. Das Stationäre Mischwerk, No. 5, May, 1979.
- [24] **LINK ...A new era in Tyre Recycling**. LINK Pty Ltd. Austrálie. 2000.
- [25] EPPS, Jon A. **Use of Recycled Rubber Tires in Highways**. NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 198. Washington: Transportation Research Board, 1994.
- [26] NGUYEN, M. X., WILLIAMS, J. A. **Implementation Package for Using Discarded Tires in Highway Maintenance**. Report No. CA/TL-89/10. California Department of Transportation, 1989.
- [27] LANE, K. R. **Installation of a Sand-Tire Inertial Barrier System in Connecticut**. Connecticut Department of Transportation. Agosto, 1975.
- [28] BUTTON, E. F. **Performance of a Tire-Sand Inertial Barrier System in Connecticut - Final Report**. Report No. FHWA-CT-RD-343-F-77-6. Connecticut Department of Transportation, 1977.
- [29] **MEMO from S. A. Sabol** of NCHRP on Whole Truck Tires Used as Culvert, based on meeting with C. Bocash of Town of Georgia, Vermont. 1992.
- [30] BOSSCHER, Peter J., TUNCER, B. Edil, NEIL, N. Eldin. **Construction and Performance of a Shredded Waste-Tire Test Embankment**. Presented at the 71st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington: January, 1992.

- [31] HUMPHREY, Dana N. **Investigation of Exothermic Reaction in Tire Shred Fill Located on SR100 in Ilwaco, Washington.** Washington: Federal Highway Administration, 1996.
- [32] OLIVER, J. W. H. **Modification of Paving Asphalts by Digestion with Scrap Rubber.** Transportation Research Record No. 821. Washington: Transportation Research Board, 1981.
- [33] KIRK, Van, JACK, L. **Caltrans Experience with Rubberized Asphalt Concrete.** Presented at the Technology Transfer Session of an Introduction to Rubberized Asphalt Concrete. Topeka, Kansas: 1991.
- [34] TURGEON, Curtis M. **The Use of Asphalt-Rubber Products in Minnesota.** Presented at the National Seminar on Asphalt-Rubber. Kansas City, Missouri: October, 1989.
- [35] SHOOK, James F. **Experimental Construction of Rubber-Modified Asphalt Mixtures for Asphalt Pavements in New York State.** ARE Inc., Riverdale, Maryland. Report Submitted to the New York State Department of Transportation, May, 1990.
- [36] ESTAKHRI, Cindy K., BUTTON, Joe W., FERNANDO, Emmanuel G. **Use, Availability, and Cost-Effectiveness of Asphalt Rubber in Texas.** Transportation Research Record No. 1339, Transportation Research Board, Washington, DC, 1992.
- [37] SWEARINGEN, David L., JACKSON, Newton C., ANDERSON, Keith W. **Use of Recycled Materials in Highway Construction,** Report No. WA-RD 252.1. Olympia, Washington: Washington State Department of Transportation, February, 1992.

- [38] EMERY, John. **Evaluation of Rubber Modified Asphalt Demonstration Projects**. Presented at the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington: January, 1995.
- [39] ALLEN, Harvey S., TURGEON, Curtis M. **Evaluation of "PlusRide" (A Rubber Modified Plant Mixed Bituminous Surface Mixture)**. Minnesota Department of Transportation in cooperation with the Federal Highway Administration. St. Paul, Minnesota: January, 1990.
- [40] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION AND U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A Study of the Use of Recycled Paving Material - Report to Congress**. Report No. FHWA-RD-93-147 and EPA/600/R-93/095. Washington: June, 1993.
- [41] CHARAMIA, Equbalali, CANO, Joe A., SCHNORMEIER, Russell N. **Twenty Year Study of Asphalt-Rubber Pavements in the City of Phoenix, Arizona**. Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington: January, 1991.
- [42] ISO 690-2. **Information and documentation - Bibliographic references - Part 2: Electronic documents or parts thereof**. International Standard Organization. 1998.
- [43] PAGE, Gale C., BYRON, E. Ruth, WEST, Randy C. **Florida's Approach Using Ground Tire Rubber in Asphalt Concrete Mixtures**. Transportation Research Record No. 1339. Washington: Transportation Research Board, 1992. pp. 16-22.
- [44] PARCELLS, W. H. **Asphalt-Rubber for Stress Absorbing Membrane to Retard Reflective Cracking - Final Report**. Topeka, Kansas: Kansas Department of Transportation, 1989.

- [45] TURGEON, Curtis M. **The Use of Asphalt-Rubber Products in Minnesota**. Presented at the National Seminar on Asphalt-Rubber, Kansas City, MO, October 30-31, 1989.
- [46] REIS, Rafael M. M. De, SANTO, Nelson R. E. **Asfalto Modificado com Polímero**. 3 ed. Ipiranga Asfaltos, 1999.
- [47] SWEARINGEN, David L., JACKSON, Newton C., ANDERSON, Keith W. **Use of Recycled Materials in Highway Construction**. Washington State Department of Transportation, Report No. WA-RD 252.1. Olympia, Washington: 1992.
- [48] CASSELL, E. E. **British Patent No. 10327**. 1844.
- [49] **Pirelli Brazil: Pneus, informações técnicas**. In *Pirelli Home Page* [online]. Arquivo consultado em 30 de Julho de 2000, 20:20 hs. Disponível na World Wide Web:  
<http://www.pirelli.com.br/pr/pneumatici/infotek/index.htm>
- [50] KANDHAL, Prithvi S. **Waste Materials in Hot Mix Asphalt - an Overview**. NCAT Report No. 92-6. National Center for Asphalt Technology, 1992.
- [51] ZANZOTTO, Ludo, SVEC, Otto. **Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavement**. Ottawa: Transportation Association of Canada, 1996.
- [52] **DESIGN Guide for ARHM Grap Graded - Thickness Determination Guide**. California Department of Transportation - CALTRANS.

- [53] FREDDY, Roberts L., KANDHAL, Prithvi S., BROWN, E. Ray; DUNNING, Robert L. **Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt**. NCAT Report No. 89-3. National Center for Asphalt Technology, 1989.
- [54] MOUTIER, Francis. **Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés bitumineux sur leur comportement en fatigue et leur module complexe**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 172. p. 71-79. 1991.
- [55] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Background of Superpave Asphalt Mixture Design en Analysis**. Publication N° FHWA-SA-95-003. National Asphalt Training Center. Demonstration Project 101. 1995. 160p.
- [56] PINTO, Salomão. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1991. Tese de Doutorado.
- [57] ASTM D 2994. **Standard Test Methods for Rubberized Tar**. Washington: 1998.
- [58] DER/SC. **Especificações Gerais para Obras Rodoviárias**. Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina. Florianópolis: 1992.
- [59] DNER ME 85/64. **Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real - Método de Ensaio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1964.
- [60] DNER ME 84/94. **Agregado miúdo - determinação de densidade real - Método de Ensaio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1994.

- [61] DNER ME 81/64. **Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo - Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1964.
- [62] DNER ME 16/64. **Densidade de materiais betuminosos .** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1964.
- [63] ABNT MB 164/72. **Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos (método do anel e bola).** Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1972.
- [64] DNER ME 04/73. **Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura - Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1973.
- [65] DNER ME 78/63. **Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso - Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1963.
- [66] DNER ME 43/64. **Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall - Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1964.
- [67] DNER ME 138/86. **Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração Por compressão diametral - Método de Ensaio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1986.

## anexo A

# DIMENSIONAMENTO HIPOTÉTICO SIMULADO COM O SOFTWARE ELSYM5 - MEMÓRIA DE CÁLCULO

## A.1. ESTRUTURA 1

### A.1.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

#### SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	45020,	0,300	25,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL.....	2050,00 kgf
TENSÃO DE CARGA....	5,60 kgf/cm <sup>2</sup>
RAIO DA CARGA.....	10,79 cm

#### LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

#### PROFUNDIDADE:

Z = 25,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 25,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX	0,3507E+01	0,3745E+01
SYX	0,4746E+01	0,4601E+01
SZZ	-0,3763E+00	-0,3686E+00

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,5885E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,4746E+01	0,4601E+01
PS 2	0,3507E+01	0,3746E+01
PS 3	-0,3763E+00	-0,3694E+00

TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,2561E+01	0,2485E+01
PSS 2	0,6194E+00	0,4274E+00
PSS 3	0,1942E+01	0,2058E+01

DESLOCAMENTOS

UX	0,0000E+00	0,8474E-03
UY	0,0000E+00	0,0000E+00
UZ	0,2407E-01	0,2379E-01

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX	0,4879E-04	0,5499E-04
EYY	0,8455E-04	0,7969E-04
EZZ	-0,6336E-04	-0,6380E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY	0,0000E+00	0,0000E+00
EXZ	0,0000E+00	-0,3399E-05
EYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1	0,8455E-04	0,7969E-04
PE 2	0,4879E-04	0,5501E-04
PE 3	-0,6336E-04	-0,6383E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1	0,1479E-03	0,1435E-03
PSE 2	0,3577E-04	0,2468E-04
PSE 3	0,1121E-03	0,1188E-03

## A.1.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA

### SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	31530,	0,300	25,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

### LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

### PROFUNDIDADE:

Z = 25,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 25,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

### TENSÕES NORMAIS

SXX	0,2925E+01	0,3204E+01
SYY	0,4106E+01	0,4001E+01
SZZ	-0,4585E+00	-0,4512E+00

### TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,7394E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

### TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,4106E+01	0,4001E+01
PS 2	0,2925E+01	0,3206E+01
PS 3	-0,4585E+00	-0,4527E+00

### TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,2282E+01	0,2227E+01
PSS 2	0,5903E+00	0,3976E+00
PSS 3	0,1692E+01	0,1829E+01

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,1026E-02  
 UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 UZ 0,2627E-01 0,2578E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,5807E-04 0,6785E-04  
 EYY 0,1067E-03 0,1007E-03  
 EZZ -0,8144E-04 -0,8286E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 EXZ 0,0000E+00 -0,6097E-05  
 EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,1067E-03 0,1007E-03  
 PE 2 0,5807E-04 0,6791E-04  
 PE 3 -0,8144E-04 -0,8293E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,1882E-03 0,1836E-03  
 PSE 2 0,4868E-04 0,3279E-04  
 PSE 3 0,1395E-03 0,1508E-03

**A.1.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56]**

## SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	30000,	0,300	25,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

## LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 25,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 25,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX	0,2845E+01	0,3129E+01
SYX	0,4016E+01	0,3917E+01
SZZ	-0,4708E+00	-0,4637E+00

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,7622E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,4016E+01	0,3917E+01
PS 2	0,2845E+01	0,3131E+01
PS 3	-0,4708E+00	-0,4653E+00

TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,2244E+01	0,2191E+01
PSS 2	0,5857E+00	0,3931E+00
PSS 3	0,1658E+01	0,1798E+01

DESLOCAMENTOS

UX	0,0000E+00	0,1052E-02
UY	0,0000E+00	0,0000E+00
UZ	0,2658E-01	0,2607E-01

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX	0,5938E-04	0,6977E-04
EYY	0,1101E-03	0,1039E-03
EZZ	-0,8431E-04	-0,8592E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY	0,0000E+00	0,0000E+00
EXZ	0,0000E+00	-0,6605E-05
EYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1	0,1101E-03	0,1039E-03
PE 2	0,5938E-04	0,6984E-04
PE 3	-0,8431E-04	-0,8599E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1	0,1944E-03	0,1899E-03
PSE 2	0,5076E-04	0,3407E-04
PSE 3	0,1437E-03	0,1558E-03

## A.2. ESTRUTURA 2

### A.2.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

#### SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	45020,	0,300	38,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA..... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

#### LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

#### PROFUNDIDADE:

Z = 38,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 38,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

#### TENSÕES NORMAIS

SXX 0,2252E+01 0,2086E+01  
 SY Y 0,2639E+01 0,2466E+01  
 SZZ -0,1878E+00 -0,1799E+00

#### TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 SXZ 0,0000E+00 -0,3040E-01  
 SYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

#### TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1 0,2639E+01 0,2466E+01  
 PS 2 0,2252E+01 0,2086E+01  
 PS 3 -0,1878E+00 -0,1803E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,1413E+01 0,1323E+01  
 PSS 2 0,1933E+00 0,1898E+00  
 PSS 3 0,1220E+01 0,1133E+01

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,5408E-03  
 UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 UZ 0,1736E-01 0,1754E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,3369E-04 0,3110E-04  
 EYY 0,4485E-04 0,4207E-04  
 EZZ -0,3676E-04 -0,3432E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 EXZ 0,0000E+00 -0,1756E-05  
 EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,4485E-04 0,4207E-04  
 PE 2 0,3369E-04 0,3111E-04  
 PE 3 -0,3676E-04 -0,3434E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,8162E-04 0,7640E-04  
 PSE 2 0,1116E-04 0,1096E-04  
 PSE 3 0,7045E-04 0,6544E-04

**A.2.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA**

## SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO		ESPESSURAS
	ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	
1	31530,	0,300	38,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

## LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

## RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

## PROFUNDIDADE:

Z = 38,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 38,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

## TENSÕES NORMAIS

SXX	0,1975E+01	0,1815E+01
SYX	0,2346E+01	0,2176E+01
SZZ	-0,2354E+00	-0,2227E+00

## TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,3974E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,2346E+01	0,2176E+01
PS 2	0,1975E+01	0,1815E+01
PS 3	-0,2354E+00	-0,2235E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,1291E+01	0,1200E+01
PSS 2	0,1854E+00	0,1801E+00
PSS 3	0,1105E+01	0,1019E+01

## DESLOCAMENTOS

UX	0,0000E+00	0,6770E-03
UY	0,0000E+00	0,0000E+00
UZ	0,1901E-01	0,1910E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX	0,4256E-04	0,3897E-04
EYY	0,5785E-04	0,5386E-04
EZZ	-0,4858E-04	-0,4503E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY	0,0000E+00	0,0000E+00
EXZ	0,0000E+00	-0,3277E-05
EYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1	0,5785E-04	0,5386E-04
PE 2	0,4256E-04	0,3900E-04
PE 3	-0,4858E-04	-0,4506E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO  
 PSE 1 0,1064E-03 0,9892E-04  
 PSE 2 0,1529E-04 0,1485E-04  
 PSE 3 0,9113E-04 0,8407E-04

### A.2.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56]

SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	30000,	0,300	38,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL.....	2050,00 kgf
TENSÃO DE CARGA....	5,60 kgf/cm <sup>2</sup>
RAIO DA CARGA.....	10,79 cm

LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 38,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 38,00 CAMADA N<sup>o</sup> 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX	0,1935E+01	0,1777E+01
SY Y	0,2303E+01	0,2135E+01
SZZ	-0,2427E+00	-0,2293E+00

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,4120E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1 0,2303E+01 0,2135E+01  
PS 2 0,1935E+01 0,1778E+01  
PS 3 -0,2427E+00 -0,2302E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,1273E+01 0,1183E+01  
PSS 2 0,1841E+00 0,1786E+00  
PSS 3 0,1089E+01 0,1004E+01

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,6977E-03  
UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
UZ 0,1925E-01 0,1932E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,4390E-04 0,4017E-04  
EYY 0,5986E-04 0,5569E-04  
EZZ -0,5048E-04 -0,4676E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
EXZ 0,0000E+00 -0,3571E-05  
EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,5986E-04 0,5569E-04  
PE 2 0,4390E-04 0,4021E-04  
PE 3 -0,5048E-04 -0,4680E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,1103E-03 0,1025E-03  
PSE 2 0,1596E-04 0,1548E-04  
PSE 3 0,9438E-04 0,8701E-04

## A.3. ESTRUTURA 3

### A.3.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	45020,	0,300	50,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAO DA CARGA..... 10,79 cm

LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 50,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 50,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX	0,1518E+01	0,1416E+01
SYY	0,1677E+01	0,1610E+01
SZZ	-0,1148E+00	-0,1120E+00

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,1813E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,1677E+01	0,1610E+01
PS 2	0,1518E+01	0,1416E+01
PS 3	-0,1148E+00	-0,1122E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,8961E+00 0,8612E+00  
 PSS 2 0,7984E-01 0,9689E-01  
 PSS 3 0,8163E+00 0,7643E+00

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,3760E-03  
 UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 UZ 0,1420E-01 0,1410E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,2330E-04 0,2147E-04  
 EYY 0,2791E-04 0,2707E-04  
 EZZ -0,2384E-04 -0,2265E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 EXZ 0,0000E+00 -0,1047E-05  
 EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,2791E-04 0,2707E-04  
 PE 2 0,2330E-04 0,2148E-04  
 PE 3 -0,2384E-04 -0,2266E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,5175E-04 0,4973E-04  
 PSE 2 0,4611E-05 0,5595E-05  
 PSE 3 0,4714E-04 0,4414E-04

### A.3.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA

## SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO	COEFICIENTE	
	ELÁSTICO	POISSON	ESPESSURAS
1	31530,	0,300	50,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

## DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA..... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAIO DA CARGA..... 10,79 cm

## LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

## RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

## PROFUNDIDADE:

Z = 50,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 50,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

## TENSÕES NORMAIS

SXX	0,1353E+01	0,1237E+01
SYY	0,1507E+01	0,1423E+01
SZZ	-0,1444E+00	-0,1388E+00

## TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,2408E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,1507E+01	0,1423E+01
PS 2	0,1353E+01	0,1237E+01
PS 3	-0,1444E+00	-0,1392E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,8255E+00	0,7809E+00
PSS 2	0,7679E-01	0,9255E-01
PSS 3	0,7487E+00	0,6883E+00

## DESLOCAMENTOS

UX	0,0000E+00	0,4784E-03
UY	0,0000E+00	0,0000E+00
UZ	0,1545E-01	0,1549E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX	0,2995E-04	0,2702E-04
EYY	0,3628E-04	0,3467E-04
EZZ	-0,3179E-04	-0,2971E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY	0,0000E+00	0,0000E+00
EXZ	0,0000E+00	-0,1986E-05
EYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1	0,3628E-04	0,3467E-04
PE 2	0,2995E-04	0,2704E-04
PE 3	-0,3179E-04	-0,2972E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO  
 PSE 1 0,6807E-04 0,6439E-04  
 PSE 2 0,6332E-05 0,7632E-05  
 PSE 3 0,6174E-04 0,5676E-04

### A.3.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56]

SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	30000,	0,300	50,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 50,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 50,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX 0,1329E+01 0,1212E+01  
 SYY 0,1482E+01 0,1396E+01  
 SZZ -0,1490E+00 -0,1429E+00

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 SXZ 0,0000E+00 -0,2503E-01  
 SYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1 0,1482E+01 0,1396E+01  
PS 2 0,1329E+01 0,1213E+01  
PS 3 -0,1490E+00 -0,1434E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,8155E+00 0,7699E+00  
PSS 2 0,7630E-01 0,9186E-01  
PSS 3 0,7392E+00 0,6781E+00

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,4941E-03  
UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
UZ 0,1564E-01 0,1569E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,3099E-04 0,2787E-04  
EYY 0,3760E-04 0,3586E-04  
EZZ -0,3308E-04 -0,3085E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
EXZ 0,0000E+00 -0,2169E-05  
EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,3760E-04 0,3586E-04  
PE 2 0,3099E-04 0,2789E-04  
PE 3 -0,3308E-04 -0,3087E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,7068E-04 0,6673E-04  
PSE 2 0,6612E-05 0,7961E-05  
PSE 3 0,6407E-04 0,5877E-04

## A.4. ESTRUTURA 4

### A.4.1. MISTURA DE REFERÊNCIA

SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	45020,	0,300	65,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAO DA CARGA..... 10,79 cm

LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 65,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 65,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX	0,1002E+01	0,9750E+00
SYY	0,1066E+01	0,1067E+01
SZZ	-0,7181E-01	-0,7054E-01

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,1026E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,1066E+01	0,1067E+01
PS 2	0,1002E+01	0,9751E+00
PS 3	-0,7181E-01	-0,7064E-01

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,5688E+00 0,5686E+00  
 PSS 2 0,3197E-01 0,4572E-01  
 PSS 3 0,5369E+00 0,5229E+00

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,2516E-03  
 UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 UZ 0,1176E-01 0,1107E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,1563E-04 0,1502E-04  
 EYY 0,1748E-04 0,1766E-04  
 EZZ -0,1537E-04 -0,1517E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 EXZ 0,0000E+00 -0,5928E-06  
 EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,1748E-04 0,1766E-04  
 PE 2 0,1563E-04 0,1502E-04  
 PE 3 -0,1537E-04 -0,1517E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,3285E-04 0,3284E-04  
 PSE 2 0,1847E-05 0,2640E-05  
 PSE 3 0,3101E-04 0,3020E-04

## A.4.2. MISTURA EXPERIMENTAL OTIMIZADA

## SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO	COEFICIENTE	ESPESSURAS
	ELÁSTICO	POISSON	
1	31530,	0,300	65,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAIO DA CARGA..... 10,79 cm

## LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

## RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

## PROFUNDIDADE:

Z = 65,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 65,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

## TENSÕES NORMAIS

SXX	0,8932E+00	0,8539E+00
SYY	0,9548E+00	0,9418E+00
SZZ	-0,8943E-01	-0,8769E-01

## TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY	0,0000E+00	0,0000E+00
SXZ	0,0000E+00	-0,1379E-01
SYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1	0,9548E+00	0,9418E+00
PS 2	0,8932E+00	0,8541E+00
PS 3	-0,8943E-01	-0,8790E-01

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1	0,5221E+00	0,5148E+00
PSS 2	0,3081E-01	0,4383E-01
PSS 3	0,4913E+00	0,4710E+00

## DESLOCAMENTOS

UX	0,0000E+00	0,3248E-03
UY	0,0000E+00	0,0000E+00
UZ	0,1279E-01	0,1235E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX	0,2009E-04	0,1896E-04
EYY	0,2264E-04	0,2258E-04
EZZ	-0,2042E-04	-0,1987E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY	0,0000E+00	0,0000E+00
EXZ	0,0000E+00	-0,1137E-05
EYZ	0,0000E+00	0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1	0,2264E-04	0,2258E-04
PE 2	0,2009E-04	0,1896E-04
PE 3	-0,2042E-04	-0,1988E-04

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO  
 PSE 1 0,4306E-04 0,4245E-04  
 PSE 2 0,2540E-05 0,3614E-05  
 PSE 3 0,4051E-04 0,3884E-04

### A.4.3. MISTURA SALOMÃO PINTO [56]

SISTEMA ELÁSTICO

CAMADA	MÓDULO ELÁSTICO	COEFICIENTE POISSON	ESPESSURAS
1	30000,	0,300	65,000 cm
2	1800,	0,350	45,000 cm
3	900,	0,450	SEMI-INFINITO

DUAS CARGAS, CADA CARGA POSSUI:

CARGA TOTAL..... 2050,00 kgf  
 TENSÃO DE CARGA.... 5,60 kgf/cm<sup>2</sup>  
 RAI0 DA CARGA..... 10,79 cm

LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS

CARGA	X	Y
1	0,000	0,000
2	32,000	0,000

RESULTADOS SOLICITADOS PARA AS POSIÇÕES:

PROFUNDIDADE:

Z = 65,00

Pontos x-y

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

Z = 65,00 CAMADA Nº 1

X	Y
16,00	0,00
32,00	0,00

TENSÕES NORMAIS

SXX 0,8781E+00 0,8371E+00  
 SY Y 0,9393E+00 0,9244E+00  
 SZZ -0,9222E-01 -0,9035E-01

TENSÕES DE CISALHAMENTO

SXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
 SXZ 0,0000E+00 -0,1435E-01  
 SYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

TENSÕES PRINCIPAIS

PS 1 0,9393E+00 0,9244E+00  
 PS 2 0,8781E+00 0,8373E+00  
 PS 3 -0,9222E-01 -0,9057E-01

## TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO

PSS 1 0,5158E+00 0,5075E+00  
PSS 2 0,3062E-01 0,4353E-01  
PSS 3 0,4852E+00 0,4640E+00

## DESLOCAMENTOS

UX 0,0000E+00 0,3361E-03  
UY 0,0000E+00 0,0000E+00  
UZ 0,1294E-01 0,1254E-01

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NORMAIS

EXX 0,2080E-04 0,1956E-04  
EYY 0,2345E-04 0,2335E-04  
EZZ -0,2125E-04 -0,2063E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS POR CISALHAMENTO

EXY 0,0000E+00 0,0000E+00  
EXZ 0,0000E+00 -0,1244E-05  
EYZ 0,0000E+00 0,0000E+00

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS

PE 1 0,2345E-04 0,2335E-04  
PE 2 0,2080E-04 0,1957E-04  
PE 3 -0,2125E-04 -0,2064E-04

## DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS PRINCIPAIS POR CISALHAMENTO

PSE 1 0,4470E-04 0,4398E-04  
PSE 2 0,2654E-05 0,3772E-05  
PSE 3 0,4205E-04 0,4021E-04

**M.Sc. Thesis:** Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas

**Institution:** Santa Catarina Federal University  
Department of Civil Engineering  
Florianópolis, Brazil

**Language:** Portuguese

**Pages:** 138

**Published date:** August 2000

**Author:** Reus Salini

## Cite

Copy and paste a formatted citation or import into a bibliography manager

**MLA**  
7th edition Salini, Reus. "Utilização de Borracha Reciclada de Pneus Em Misturas Asfálticas." Santa Catarina Federal University, 2000. Web.

**APA**  
6th Edition Salini, R. (2000). *Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas*. Santa Catarina Federal University. Retrieved from <http://www.mediafire.com/download/99t3hl6vqd3hzyh/>

**Chicago**  
16th edition Salini, Reus. 2000. "Utilização de Borracha Reciclada de Pneus Em Misturas Asfálticas." Santa Catarina Federal University. <http://www.mediafire.com/download/99t3hl6vqd3hzyh/>.

**Harvard**  
(author-date) Salini, R., 2000. *Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas*. Santa Catarina Federal University. Available at: <http://www.mediafire.com/download/99t3hl6vqd3hzyh/>.

**Vancouver** Salini R. Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas [Internet]. Santa Catarina Federal University; 2000. Available from: <http://www.mediafire.com/download/99t3hl6vqd3hzyh/>

Import citation to:



BIBTEX

.BIB file



RefMan

.RIS file



THOMSON REUTERS  
ENDNOTE

.XML file (EndNote v8, X1, X2)

Right-click the paperclip and select *save embedded file as*  
or check the [Attached Files](#) tab in your PDF reader software.