

**CAIO RUBENS GONÇALVES SANTOS**

**AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DO TIPO DE  
LIGANTE E DO VOLUME DE VAZIOS NA VIDA  
DE FADIGA DE ALGUMAS MISTURAS  
ASFÁLTICAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE  
ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, COMO  
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA DE  
TRANSPORTES.

**ORIENTADOR: PROF. DR. GLAUCO TULIO PESSA FABBRI**

**SÃO CARLOS**

**2005**

**“NÃO É UM NOTÁVEL TALENTO O QUE SE EXIGE PARA  
ASSEGURAR O ÊXITO EM QUALQUER EMPREENDIMENTO,  
MAS SIM UM FIRME PROPÓSITO”.**

**THOMAS WITTLAM ATKINSON**

---

## AGRADECIMENTOS

---

- AO PROF<sup>o</sup> GLAUCO TULIO PESSA FABBRI, POR TODO O APRENDIZADO E CRESCIMENTO QUE OBTIVE DURANTE O PERÍODO DE ORIENTAÇÃO ACADÊMICA;
- À CAPES PELA BOLSA CONCEDIDA E À ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO;
- À PROF<sup>a</sup> ELIANE VIVIANI, QUEM PRIMEIRO ME INCENTIVOU E CONSTANTEMENTE AJUDOU NA REALIZAÇÃO DESTE MESTRADO;
- À MINHA FAMÍLIA LUIS CARLOS, LUIZETE, TEREZA, CONRADO E ALBANO, BASE ESSENCIAL EM TODOS OS ASPECTOS DE MINHA VIDA, E À ÂNGELA, POR TODO COMPANHEIRISMO;
- AOS TÉCNICOS DO LABORATÓRIO ANTONIO GIGANTE, PAULO TOYAMA E JOÃO, POR TODO AUXÍLIO NA REALIZAÇÃO DA PARTE EXPERIMENTAL;
- AOS COLEGAS JISELA SANTANNA, BENEDITO COUTINHO E ANA FURLAN, POR TODA AMIZADE, AJUDA NO LABORATÓRIO E NA REVISÃO DE TEXTOS;
- AOS AMIGOS DE UMA VIDA HENRIQUE MAGALHÃES, THIAGO GATTAI, FLAVIA LEITE, HUGO FORNI, EDUARDO STUCHI, CAROLINA HASHIMOTO, AFONSA JANAINA E ANDRÉ EGIDO POR ESTAREM SEMPRE PRESENTES;
- À TODA TURMA DE ENGENHARIA CIVIL DE 1997 DA UNESP-BAURU, DE QUEM GUARDO CINCO ANOS DE ÓTIMAS LEMBRANÇAS;
- AOS AMIGOS ROBERTA, CIRA, ERNESTO, ZANCHETTA, MARCOS, LUCIANA, MARCELA, LUCAS, MANOEL LUCAS, LAROCCA, PABLO, PAULINHA, MICHELLE, GISELLE, MARTA, RODRIGO, KARÊNINA, FABIANA, VITOR, MARCINHA, FRED, ROGÉRIO, GIOVANE, ANDRÉA HELENA, KOBAYASHI, SHIRLEY, VIVIAN, GERALDO, SÉRGIO, TONY, ADSON, JOÃO E TODOS COLEGAS DO STT PELO CONVÍVIO EM SÃO CARLOS;

---

# SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	3
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 -O FENÔMENO DA FADIGA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. HISTÓRICO	6
2.3. FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	7
2.3.1. EFEITOS DAS SOLICITAÇÕES DO TRÁFEGO	8
2.4. VIDA DE FADIGA	10
2.4.1. FATORES DE INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS À FADIGA	19
2.4.1.1. CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO	19
2.4.1.2. CARACTERÍSTICAS DO CORPO-DE-PROVA	23
2.4.1.2.1. TIPO E TEOR DO LIGANTE	23
2.4.1.2.2. TIPO E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	27
2.4.1.2.3. VOLUME DE VAZIOS	28
2.4.1.3. FATORES AMBIENTAIS	30
2.4.2. ENSAIOS DE FADIGA	31
2.4.2.1. ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES	33
2.4.2.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL	35

---

<b>CAPÍTULO 3 -MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
3.1. INTRODUÇÃO	40
3.2. MATERIAIS	40
3.2.1. AGREGADOS	40
3.2.2. LIGANTES ASFÁLTICOS	42
3.2.2.1. ASFALTO CONVENCIONAL – CAP 20	42
3.2.2.2. ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO SBS	42
3.2.2.3. ASFALTO MODIFICADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEU	43
3.3. EQUIPAMENTOS	43
3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA E PLANO DE ENSAIOS	45
3.5. MÉTODOS	47
3.5.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	47
3.5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA	48
3.5.3. FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA	49
<b>CAPÍTULO 4 -APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>51</b>
4.1. INTRODUÇÃO	51
4.2. CONTROLE DO VOLUME DE VAZIOS	51
4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	53
4.4. MÓDULO DE RESILIÊNCIA	57
4.5. RELAÇÃO MR/RT	61
4.6. FADIGA À TENSÃO CONTROLADA	64
4.7. ANÁLISE MECANÍSTICA DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ASFALTO E VOLUME DE VAZIOS NA VIDA DE FADIGA	75
<b>CAPÍTULO 5 -CONCLUSÕES</b>	<b>82</b>
5.1. CONCLUSÕES	82
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE A - DOSAGEM TESTE</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE B - PLANILHAS MOLDAGEM</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE C - TABELAS ENSAIOS DE FADIGA</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE D - TABELA DE SIMULAÇÕES</b>	<b>108</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 2.1 – TENSÕES EM UM PAVIMENTO (MEDINA, 1997). _____	8
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS TIPOS DE SOLICITAÇÕES (PINTO, 1991). _	11
FIGURA 2.3 – DIAGRAMA DE FADIGA COM A INFLUENCIA DO TIPO DE SOLICITAÇÃO NA VIDA DE FADIGA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA (GONTIJO, 1980). _____	13
FIGURA 2.4 – APLICAÇÃO GRÁFICA DA LEI DE MINER (GONTIJO, 1980). _____	17
FIGURA 2.5 – ESTÁGIOS DE COMPORTAMENTO NO ENSAIO DE CREEP. _____	20
FIGURA 2.6 – COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIO CREEP E FADIGA-DINÂMICO (PINTO, 1991). ____	21
FIGURA 2.7 – CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO DINÂMICO - SOLICITAÇÃO SIMPLES. _____	22
FIGURA 2.8 – CONDIÇÕES DE CARREGAMENTOS DINÂMICOS – SOLICITAÇÃO COMPLEXA. ____	22
FIGURA 2.9 – ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DO C.P. _____	36
FIGURA 2.10 – TENSÕES EM UM PONTO QUALQUER DO CORPO-DE-PROVA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (PINTO, 1991). _____	37
FIGURA 3.1 – FAIXA C DO DNER E A COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA UTILIZADA. _____	41
FIGURA 3.2 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL DINÂMICA – MÓDULO DE RESILIÊNCIA E FADIGA. _____	44
FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE LIGANTE. _____	56
FIGURA 4.2 – VARIAÇÃO DA RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO VOLUME DE VAZIOS. _____	57
FIGURA 4.3 – VARIAÇÃO DA MR DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE LIGANTE. _____	59
FIGURA 4.4 – VARIAÇÃO DA MR DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO VOLUME DE VAZIOS. _____	60
FIGURA 4.5 – VARIAÇÃO DO MR E DA RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE ASFALTO. _	60
FIGURA 4.6 – VARIAÇÃO DO MR E RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO VOLUME DE VAZIOS. ____	61
FIGURA 4.7 – VARIAÇÃO DA RELAÇÃO MR/RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE LIGANTE. _____	63

---

<b>FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DA RELAÇÃO MR/RT DAS MISTURAS EM RELAÇÃO AO VOLUME DE VAZIOS.</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.9 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TENSÕES PARA CAP 20.</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.10 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE PARA CAP 20.</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.11 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TENSÕES PARA CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 4.12 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE PARA CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 4.13 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TENSÕES PARA CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 4.14 – CURVAS DE FADIGA EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE PARA CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 4.15 – ESTRUTURAS UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 4.16 – CARREGAMENTO E PONTO ESTUDADO NA SIMULAÇÃO.</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 4.18 – VARIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA E DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM RELAÇÃO AO VOLUME DE VAZIOS.</b>	<b>79</b>
<b>FIGURA 4.19 – VIDA DE FADIGA DAS MISTURAS CALCULADA PELA DEFORMAÇÃO RESILIENTE ESPECÍFICA E PELA DIFERENÇA DE TENSÕES VERSUS O VOLUME DE VAZIOS.</b>	<b>81</b>
<b>FIGURA A.1 – DENSIDADE APARENTE, VOLUME DE VAZIOS E RELAÇÃO BETUME VAZIOS EM FUNÇÃO DO TEOR DE ASFALTO.</b>	<b>93</b>

---

## LISTA DE TABELAS

---

TABELA 2.1 – EFEITO DE ALGUMAS VARIÁVEIS NOS ENSAIOS DE TENSÃO CONTROLADA E DEFORMAÇÃO CONTROLADA (MONISMITH ET AL, 1990).	14
TABELA 2.2 – CRITÉRIOS DE FADIGA (PINTO,1991).	16
TABELA 2.3 – FATORES QUE AFETAM A RIGIDEZ E O COMPORTAMENTO À FADIGA DE CONCRETOS ASFÁLTICOS (MONISMITH ET AL, 1990).	23
TABELA 2.4 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS ENSAIOS DE FADIGA (PINTO, 1991).	32
TABELA 3.1 – FAIXA GRANULOMÉTRICA C DO DNER (DNER – ES 313/97).	41
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CAP 20.	42
TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CAP 20 + SBS 4,5%.	42
TABELA 3.4 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS CAP 20 + BRP 20%.	43
TABELA 3.5 – CARACTERÍSTICAS, QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA E N° DE CPs POR ENSAIO.	45
TABELA 3.6 – TEMPERATURAS DOS COMPONENTES E DAS MISTURAS ASFÁLTICAS NA MOLDAGEM.	46
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20.	52
TABELA 4.2 – CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.	53
TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.	53
TABELA 4.4 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS COM CAP 20.	54
TABELA 4.5 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.	55



---

<b>TABELA 4.6 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.</b>	<b>56</b>
<b>TABELA 4.7 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS COM CAP 20.</b>	<b>58</b>
<b>TABELA 4.8 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5 %.</b>	<b>58</b>
<b>TABELA 4.9 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.</b>	<b>59</b>
<b>TABELA 4.10 – RELAÇÃO MR/RT DAS MISTURAS COM CAP 20.</b>	<b>62</b>
<b>TABELA 4.11 – RELAÇÃO MR/RT DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.</b>	<b>62</b>
<b>TABELA 4.12 – RELAÇÃO MR/RT DAS MISTURAS COM CAP 20 MODIFICADO COM 20% BRP.</b>	<b>63</b>
<b>TABELA 4.13 – VIDA DE FADIGA CAP 20 E VOLUME DE VAZIOS 3%.</b>	<b>65</b>
<b>TABELA 4.14 – VIDA DE FADIGA CAP 20 E VOLUME DE VAZIOS 4%.</b>	<b>65</b>
<b>TABELA 4.15 – VIDA DE FADIGA CAP 20 E VOLUME DE VAZIOS 5%.</b>	<b>66</b>
<b>TABELA 4.16 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + SBS 4,5% E VOLUME DE VAZIOS 3%.</b>	<b>68</b>
<b>TABELA 4.17 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + SBS 4,5% E VOLUME DE VAZIOS 4%.</b>	<b>69</b>
<b>TABELA 4.18 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + SBS 4,5% E VOLUME DE VAZIOS 5%.</b>	<b>69</b>
<b>TABELA 4.19 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + 20% BRP E VOLUME DE VAZIOS 3%.</b>	<b>72</b>
<b>TABELA 4.20 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + 20% BRP E VOLUME DE VAZIOS 4%.</b>	<b>72</b>
<b>TABELA 4.21 – VIDA DE FADIGA CAP 20 + 20% BRP E VOLUME DE VAZIOS 5%.</b>	<b>73</b>
<b>TABELA 4.22 – CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DE FADIGA PARA TODAS AS MISTURAS.</b>	<b>75</b>
<b>TABELA 4.23 – DIFERENÇAS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES OBTIDAS NA SIMULAÇÃO COM SUBLEITO DE CBR=10%.</b>	<b>77</b>
<b>TABELA 4.24 – VIDA DE FADIGA DOS PAVIMENTOS CALCULADA PARA A DIFERENÇA DE TENSÕES E PARA A DEFORMAÇÃO RESILIENTE ESPECÍFICA.</b>	<b>80</b>
<b>TABELA A.1 – DOSAGEM PARCIAL COM ASFALTO CAP 20 MODIFICADO COM SBS 4,5%.</b>	<b>92</b>
<b>TABELA B.1 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20, FAIXA C E VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 3%.</b>	<b>95</b>
<b>TABELA B.2 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20, FAIXA C E VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 4%.</b>	<b>96</b>
<b>TABELA B.3 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20, FAIXA C E VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 5%.</b>	<b>97</b>

---

<b>TABELA B.4 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + SBS 4,5%, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 3%. _____</b>	<b>98</b>
<b>TABELA B.5 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + SBS 4,5%, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 4%. _____</b>	<b>99</b>
<b>TABELA B.6 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + SBS 4,5%, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 5%. _____</b>	<b>100</b>
<b>TABELA B.7 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + 20% BRP, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 3%. _____</b>	<b>101</b>
<b>TABELA B.8 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + 20% BRP, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 4%. _____</b>	<b>102</b>
<b>TABELA B.9 - CARACTERÍSTICAS CORPOS-DE-PROVA COM CAP 20 + 20% BRP, FAIXA C E</b>	
<b>VOLUME DE VAZIOS MÉDIO 5%. _____</b>	<b>103</b>
<b>TABELA C.1 - ENSAIOS DE FADIGA COM CORPOS-DE-PROVA DE CAP 20. _____</b>	<b>105</b>
<b>TABELA D.1 - SIMULAÇÕES DE RESPOSTAS PARA PAVIMENTOS COM SUBLEITO CBR 5%, 10% E 20%. _____</b>	<b>109</b>

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

<b>AASHO</b>	<b>AMERICAN ASSOCIATION STANDARD HIGHWAYS OFFICIALS</b>
<b>ABNT</b>	<b>ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS</b>
<b>ASTM</b>	<b>AMERICAN STANDARDS FOR TESTING MATERIALS</b>
<b>BRP</b>	<b>BORRACHA RECICLADA DE PNEUS</b>
<b>CAP</b>	<b>CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO</b>
<b>CBUQ</b>	<b>CONCRETO BETUMINOSO USINADO À QUENTE</b>
<b>CP</b>	<b>CORPO-DE-PROVA</b>
<b>CR</b>	<b>CRUMB RUBBER</b>
<b>DC</b>	<b>DEFORMAÇÃO CONTROLADA</b>
<b>DNER</b>	<b>DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM</b>
<b>DNER – ES</b>	<b>DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO</b>
<b>DNER – ME</b>	<b>DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – MÉTODO DE ENSAIO</b>
<b>EVA</b>	<b>ETANO-VINILA-ACETIL</b>
<b>FM</b>	<b>FATOR MODO</b>
<b>LVDT</b>	<b>LINEAR VARIABLE DIFERENCIAL TRANSDUCER</b>
<b>MR</b>	<b>MÓDULO DE RESILIÊNCIA</b>
<b>MR/RT</b>	<b>RELAÇÃO MÓDULO DE RESILIÊNCIA – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</b>
<b>RT</b>	<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</b>
<b>SBS</b>	<b>ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO</b>
<b>SHRP</b>	<b>STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM</b>
<b>TC</b>	<b>TENSÃO CONTROLADA</b>
<b>UFRGS</b>	<b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL</b>
<b>WASHO</b>	<b>WEST ASSOCIATION OS STANDART HIGHWAYS OFFICIALS</b>

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$\sigma_t$	TENSÃO DE TRAÇÃO;
$\varepsilon$	DEFORMAÇÃO;
$N$	VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO;
$k$	PARÂMETRO DETERMINADO ATRAVÉS DE ENSAIO DE FADIGA;
$n$	PARÂMETRO DETERMINADO ATRAVÉS DE ENSAIO DE FADIGA;
$N_F$	VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO DETERMINADA ATRAVÉS DE ENSAIO DE FLUÊNCIA;
$B$	PARÂMETRO DETERMINADO ATRAVÉS DE ENSAIO DE FADIGA À FLUÊNCIA;
$b$	PARÂMETRO DETERMINADO ATRAVÉS DE ENSAIO DE FADIGA À FLUÊNCIA;
$\Delta_t$	CORRELAÇÃO DE TEMPO DE ENSAIO DE FLUÊNCIA PARA FADIGA;
$\Delta\sigma$	DIFERENÇA DE TENSÕES (TENSÃO DE TRAÇÃO - TENSÃO DE COMPRESSÃO);
$t$	ESPESSURA DO CORPO-DE-PROVA;
$d$	DIÂMETRO DO CORPO-DE-PROVA;
$F$	CARGA APLICADA NO ENSAIO;
$\sigma_x$	TENSÃO ATUANTE PARALELAMENTE AO EIXO X;
$\sigma_y$	TENSÃO ATUANTE PARALELAMENTE AO EIXO Y;
$\varepsilon_i$	DEFORMAÇÃO RESILIENTE CALCULADA;
$\mu$	COEFICIENTE DE POISSON;
$h$	ALTURA DO CORPO-DE-PROVA;
$\Delta$	DEFORMAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA AFERIDA DURANTE ENSAIO MÓDULO DE RESILIÊNCIA;
$\bar{x}$	MÉDIA AMOSTRAL;
$\mu_0$	MÉDIA A SER TESTADA;
$S$	DESVIO PADRÃO;
$R^2$	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO.

## RESUMO

---

SANTOS, C.R.G. (2005). *Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento à fadiga de algumas misturas asfálticas, à luz de resultados de ensaios de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, realizados em corpos-de-prova, considerando-se a variação de dois fatores: tipo de asfalto e volume de vazios. Para mesmo agregado (basáltico) e mesma faixa granulométrica (centro da faixa C do DNER) foram moldados, segundo os procedimentos do método Marshall, corpos-de-prova com três tipos de ligantes, sendo um asfalto convencional (CAP 20), um asfalto modificado com polímero (CAP 20 + SBS) e um asfalto modificado com borracha reciclada de pneus (CAP + BRP), em três diferentes volumes de vazios 3, 4 e 5%. São apresentados resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e de fadiga. Os modelos de fadiga são apresentados em função das diferenças de tensões e de deformações. Para avaliar o desempenho relativo das misturas, foram simuladas estruturas de pavimentos, dimensionadas pelo Método do DNER, para as quais foram determinadas as tensões e deformações atuantes que, por sua vez, foram utilizadas nos modelos de fadiga com a finalidade de determinar as vidas de fadiga. Os resultados indicam que, para maioria dos casos estudados, as misturas com o CAP 20 + SBS apresentaram melhor desempenho (maior vida de fadiga), seguidas pelas com CAP 20 + BRP e, por último, pelas com CAP 20.

## **ABSTRACT**

---

The purpose of this research is to evaluate the fatigue behavior of some asphalt mixtures, by means of indirect tensile tests with controlled stress. In order to evaluate different asphalt mixtures, it was molded specimens according to Marshall Design Method, considering the variation of two factors: asphalt type and air voids. Asphalt concrete specimens were molded with three types of asphalt (conventional, polymer modified and asphalt rubber) and three air void content (3, 4 and 5%), with the same aggregate (basaltic) and same gradation (center of DNER C gradation). Test results of indirect tensile strength, resilient modulus and fatigue are presented. The fatigue models are constructed in function of the differences of stress and strain. The fatigue behavior of asphalt mixtures was evaluated based on pavement structures (designed according to DNER standards) and stresses and strains estimated with aid of ELSYM5 program. The results indicated that, for almost all studied cases, mixtures with polymer modified asphalt (CAP 20 + SBS) had presented fatigue life higher than the other ones, followed by the ones with asphalt rubber (CAP 20 + BRP) and with conventional asphalt (CAP 20).

## **CAPÍTULO 1**

# **INTRODUÇÃO**

---

No Brasil, a modalidade rodoviária de transporte responde por mais de 65% do volume de toda a carga e aproximadamente 95% dos passageiros numa operação que corresponde a, aproximadamente, 70% do nosso PIB.

Segundo dados de estudos do DNER, uma rodovia em mau estado de conservação representa 58% a mais no consumo de combustível, 38% no custo de manutenção dos veículos, aumenta o tempo de viagem em 100% e provoca um acréscimo de 50% no número de acidentes.

O asfalto é o principal material aglutinante utilizado na construção de rodovias e vias urbanas, entretanto, o aumento do número de veículos comerciais, da carga transportada por eixo e da pressão de pneus, têm levado ao fracasso prematuro dos pavimentos resultando em aumento dos custos de manutenção, engarrafamentos e atrasos aos usuários.

Além disso, por limitação de custos, as técnicas empregadas para manutenção incluem camadas asfálticas delgadas com ligantes extremamente duros, conduzindo às trincas de fadiga e, conseqüentemente, à degradação prematura do pavimento (REIS, 1995).

Ao lado das deformações permanentes de trilhas de roda, as trincas de fadiga figuram como principais defeitos dos pavimentos causados pelo carregamento dinâmico proveniente do tráfego.

Os materiais constituintes de um pavimento obedecem, em geral, a leis de comportamento mecânico intrínseco, cuja descrição completa permite fornecer os parâmetros necessários ao cálculo na previsão dos fenômenos mecânicos. Ora, uma simples observação dos principais tipos de defeitos que ocorrem num pavimento flexível permite identificar, de imediato, os dois mais importantes modos de solicitação mecânica que podem provocar deteriorações: a flexão alternada, que conduz às trincas por fadiga, e a compressão, responsável pelo aparecimento das deformações permanentes.

O comportamento dos materiais sob tais tipos de solicitação pode ser caracterizado qualitativamente por leis fenomenológicas próprias: lei de fadiga e lei de deformação permanente, dois fatores a se ter em conta no dimensionamento de pavimentos. Sendo assim, a concepção racional de pavimentos e a descrição satisfatória das propriedades mecânicas de seus materiais constituintes e das solicitações transmitidas e experimentadas pelas diferentes camadas, fizeram progressos consideráveis, mas ainda há muito a ser explorado e consolidado neste âmbito.

Atualmente no Brasil é utilizado, mais comumente, no projeto de pavimentos rodoviários, o método empírico do DNER, que se baseia nas propriedades de suporte das camadas do pavimento; a solicitação dinâmica do tráfego não recebe importância neste método. Em centros de pesquisa são grandes os esforços na criação de um método mecanístico, onde o pavimento é projetado com uma concepção mais racional, e a solicitação dinâmica recebe neste tipo de método a devida importância e os materiais constituintes são caracterizados, complementarmente, através de ensaios dinâmicos. Um exemplo bem sucedido é o método mecanístico desenvolvido durante algumas décadas na COPPE e na Universidade Federal do Rio de Janeiro. (MOTTA, 1991; BENEVIDES, 2000).

Além dos métodos de dimensionamento, os materiais constituintes dos pavimentos têm motivado pesquisas, com o objetivo de se minimizar os defeitos com a utilização de produtos de melhor qualidade para cada



necessidade. O asfalto é um excelente material aglutinante, fácil de aplicar e barato, porém apresenta algumas limitações:

- em determinadas misturas, a presença de umidade na interface agregado/ligante leva à perda de adesividade e posterior desagregação de material pétreo;
- a resistência à tração do asfalto diminui à medida que é esticado, ou seja, perde a sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões;
- em baixas temperaturas se torna rígido e quebradiço, sujeito a trincas, em altas temperaturas amolece e flui causando deformações plásticas ao pavimento;
- apresenta tendência ao envelhecimento (oxidação).

A especificação de um asfalto que satisfaça exigências técnicas conflitantes, como bom desempenho tanto em temperaturas altas quanto baixas, significa, em outras palavras, melhorar determinadas propriedades em detrimento de outras. Assim sendo, muitos modificadores têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades de fluência e adesão dos asfaltos em aplicações específicas. Entre estes modificadores estão: os polímeros como o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) e o EVA (Etano-Vanila-Acetil) e a borracha reciclada de pneus de veículos. Nos últimos anos, excelentes resultados têm sido obtidos em sistemas poliméricos que apresentam recuperação elástica e resistência mecânica à tração.

## **1.1. OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho é a comparação do desempenho à fadiga de algumas misturas asfálticas utilizando o ensaio de compressão diametral à tensão controlada. São comparadas três misturas asfálticas, sendo todas com mesmo tipo de agregado e mesma granulometria, no centro da faixa C (DNER, 2000), variando apenas os tipos de ligante. Os ligantes utilizados

são: CAP 20, CAP 20 modificado com 4,5% SBS e CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneus. São avaliadas, ainda, as influências do volume de vazios e do tipo de asfalto na vida de fadiga.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Além deste capítulo, a dissertação é composta de mais 4 capítulos.

O capítulo 2, “O Fenômeno da Fadiga”, traz uma revisão bibliográfica acerca do problema da fadiga em materiais continuamente solicitados. O estudo trata do problema do fenômeno da fadiga em pavimentos asfálticos, dos fatores que influem no comportamento mecânico da mistura asfáltica sob solicitação repetida e dos principais tipos de ensaios utilizados no estudo da fadiga.

No capítulo 3, “Materiais e Métodos”, são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, suas caracterizações e os métodos e equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos na pesquisa. Além das características dos corpos-de-prova e do controle estatístico do volume de vazios, são apresentados ainda os resultados dos ensaios para obtenção do módulo de resiliência, da resistência à tração e da vida de fadiga das misturas asfálticas. São apresentadas ainda as curvas de fadiga das misturas. Ainda no capítulo 4 é feita uma análise dos resultados obtidos, comparando-se os prováveis desempenhos à fadiga de seções de pavimentos flexíveis arbitradas com as características dos materiais aqui estudados (módulos de resiliência e curvas de fadiga), através do uso do programa computacional Elsym5.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras nesta mesma linha.

## CAPÍTULO 2

# O FENÔMENO DA FADIGA

---

### 2.1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da fadiga pode ser descrito, tecnicamente, como a diminuição gradual da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas. Este fenômeno torna-se fundamental no estudo de materiais que sejam submetidos a solicitações repetidas, visto que a experiência mostra que a ruptura de um material, quando submetido a estas condições de solicitações repetidas, ocorre com tensão menor que a tensão de ruptura do material determinada através de carregamento estático.

Yoder e Witzak (1975) definiram fadiga como um fenômeno de trincas induzidas pelo carregamento repetido do tráfego devido a repetidos estados de tensão ou deformação inferiores ao estado último de tensão ou deformação do material.

Mais recentemente, Pinto (1991) descreveu o fenômeno da fadiga como um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou fratura completa, após um número suficiente de repetições do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

---

## 2.2. HISTÓRICO

“A deterioração de peças de máquinas submetidas a esforços repetitivos motivou no século XIX os primeiros estudos a respeito da ruptura de materiais por fadiga. Em 1829, o alemão Albert estudou, acredita-se que pioneiramente, os efeitos de trações repetidas em peças de máquinas. Ainda no século XIX, em 1849, na Inglaterra, Hodgkinson realizou ensaios de flexão repetida em pontes metálicas, tendo como objetivo a análise do fenômeno da perda de resistência, após um número de repetições”.(GONTIJO, 1980).

“Os primeiros ensaios de laboratório foram realizados na Alemanha em 1852 por Wöhler, que para o estudo sistemático do fenômeno da fadiga desenvolveu equipamentos especiais para simular o efeito dos carregamentos repetidos. E, em 1867, formulou as primeiras leis fundamentais da fadiga para os metais:

- *O ferro e o aço podem romper-se sob esforços unitários inferiores não somente à carga de ruptura estática, mas também ao limite elástico, desde que esses sejam repetidos um número suficiente de vezes.*
  
- *A ruptura não terá lugar, qualquer que seja o número de solicitações, se a amplitude máxima entre os esforços máximo e mínimo for inferior a um determinado valor limite (Limite de Fadiga – Endurance Limit)”.*  
(GONTIJO, 1980)

O estudo da fadiga ganhou maior importância a partir do início do século XX, com os motores à explosão, mas os estudos eram, ainda, quase que totalmente voltados somente à fadiga dos metais e estruturas metálicas.

Somente em meados do século XX, Porter (1942) realizou estudos precursores que mostraram os fatores que condicionavam a deflexão admissível em um pavimento, entre estes fatores deu-se destaque ao número de repetições de carga. Porter (1942) ainda afirmou que pavimentos flexíveis

poderiam ser conduzidos à ruína sob deflexões da ordem de 0,50 a 0,75 mm, quando repetidas algumas milhões de vezes.

O fenômeno da fadiga em revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis motivou a partir da metade do século XX, novos estudos. Hveem (1955) correlacionou as deflexões sob várias cargas por eixo com o comportamento dos pavimentos, salientando o fato de o fendilhamento ser resultado da fadiga dos materiais, fenômeno este que dependia da amplitude das deflexões e do número de aplicações de carga. Gontijo (1980) realizou também trabalho pioneiro na caracterização da fadiga em misturas asfálticas, onde discute o fenômeno da fadiga, o desenvolvimento geral da lei de fadiga dos materiais asfálticos, os critérios de definição da lei de fadiga e as relações entre os diferentes modos de solicitação e os parâmetros que influenciam o comportamento de misturas asfálticas à fadiga.

Preussler, Pinto e Medina (1981) apresentaram no Brasil os primeiros modelos de fadiga de concretos asfálticos, resultantes de ensaios de laboratório, esboçaram ainda um exemplo de aplicação dos resultados dos ensaios no projeto de reforço de uma estrutura de pavimento, oferecendo assim, uma contribuição no âmbito experimental do mecanismo da fadiga, em caráter pioneiro no país. Os autores deste trabalho contribuíram ainda, nos últimos 20 anos, ao estudo da fadiga em misturas asfálticas com outros trabalhos, onde utilizaram ensaios de carregamento dinâmico repetido na caracterização da fadiga e do módulo de resiliência.

### **2.3. FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

A causa do fendilhamento da camada do revestimento foi por muito tempo atribuída às excessivas deformações plásticas do solo ou das camadas de base e sub-base, contudo verificou-se que as fissuras resultam predominantemente das elevadas deflexões reversíveis a que são submetidos os pavimentos, repetidas vezes, não necessariamente acompanhadas de significativas deformações plásticas.

Uma das principais verificações do WASHO Road Test (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1955) foi a existência de ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos, devido à excessiva flexão imposta, repetidas vezes, sem que houvesse falência das camadas subjacentes. Por outro lado, quando da realização do AASHO Road Test (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1962), verificou-se ser o tráfego pesado o responsável maior pela deterioração do pavimento, resultante da fadiga da camada asfáltica.

### 2.3.1. EFEITOS DAS SOLICITAÇÕES DO TRÁFEGO

As cargas repetidas decorrentes do tráfego aplicadas aos pavimentos, e suas implicações na deterioração estrutural do pavimento vêm motivando muitos estudos em instituições de pesquisa ligadas à pavimentação. Segundo Fernandes Jr. (1994), estas cargas repetidas são a principal causa de deterioração dos pavimentos.

A figura 2.1 ilustra estas solicitações sofridas pelo pavimento quando da repetição das cargas dos veículos. Na superfície do pavimento é aplicada uma carga vertical de compressão, e nas fibras inferiores da camada asfáltica surgem tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido.

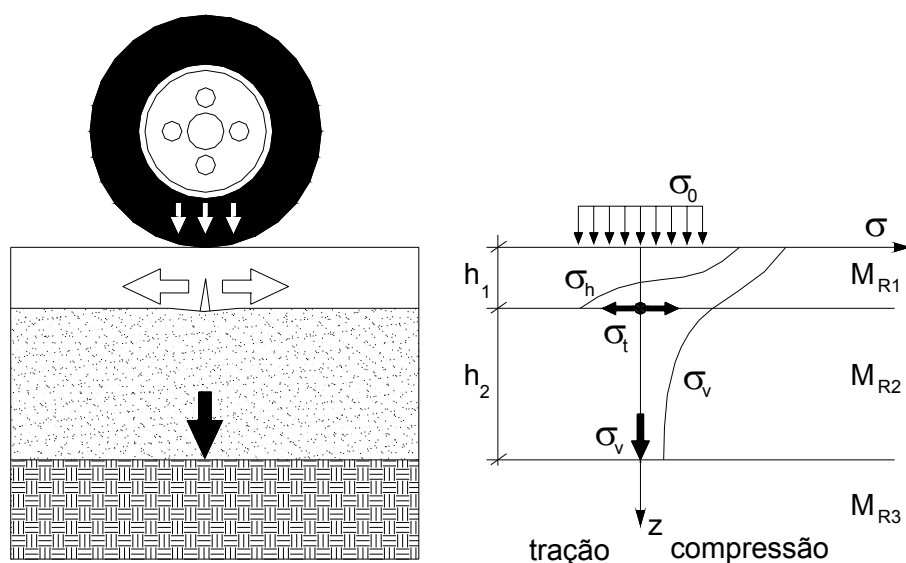


Figura 2.1 – Tensões em um pavimento (MEDINA, 1997).

Como consequência deste estado de tensões no pavimento ocorre uma gradual deterioração. As deformações permanentes na superfície do pavimento podem ser provocadas pelo carregamento vertical de compressão oriundo do tráfego, e podem também ser decorrente da compactação sofrida pelo subleito, devido aos carregamentos do tráfego. O carregamento e descarregamento constante do pavimento, devido ao tráfego, geram ainda deformações elásticas, e nesta movimentação constante de deformação e recuperação surgem tensões de tração nas fibras inferiores da camada (asfáltica) do pavimento.

Um pavimento pode deteriorar-se de acordo com três mecanismos principais: afundamento de trilhas de roda provocada pela deformação permanente vertical excessiva, trincas por fadiga da camada asfáltica devido à repetição do carregamento e fissuração por trincas térmicas, consequência de variações de temperatura. As trincas térmicas ocorrem em regiões de baixa temperatura.

Fernandes Jr (1994) afirmou que as principais formas de deterioração estrutural dos pavimentos são as trincas por fadiga da camada asfáltica ou de camadas cimentadas e a deformação permanente nas trilhas das rodas. Mas um pavimento pode ainda deteriorar-se através de mecanismos resultantes de fatores ambientais, de desgaste por abrasão, irregularidades na distribuição e dosagem do material asfáltico e de outros fatores não associados às solicitações do tráfego.

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformações do sistema estratificado e, assim, o seu desempenho. Em Pinto (1991) foi salientada a importância de um estudo preliminar onde possam ser conhecidas as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e à compressão é caracterizado por fenômenos específicos: fenômeno de fadiga e fenômeno de deformação permanente. Essas leis constituem as leis de comportamento

---

mecânico intrínseco que devem ser abordadas em um projeto estrutural de pavimentos.

O fenômeno da fadiga recebeu então papel de destaque em estudos de comportamento de revestimentos asfálticos. No que concerne ao fenômeno propriamente dito, cada autor define ao seu modo. Alguns procuram defini-lo semiquantitativamente como: “A fadiga é a perda de resistência que sofre um material quando submetido a um esforço repetido” (SINNOT<sup>1</sup> *apud* GONTIJO, 1980). Outros preferem uma definição mais detalhada, de caráter qualitativo: “A fadiga é um processo de degradação estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material submetido, em um ou em vários pontos, a tensões ou deformações repetidas, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após suficiente número de repetições”. (STATE OF CALIFORNIA, DIVISION OF HIGHWAYS<sup>2</sup> *apud* GONTIJO, 1980).

## 2.4. VIDA DE FADIGA

A vida de fadiga de um material asfáltico pode ser dita como o número de aplicações de carga necessário para que a mistura atinja ruptura sob dado estado de tensões. Possivelmente, a maior dificuldade na interpretação dos ensaios de fadiga provém do fato de serem influenciados pelo método de ensaio, pois os corpos-de-prova podem ser ensaiados sob tensão controlada ou deformação controlada, dependendo do tipo do ensaio.

Os equipamentos laboratoriais para ensaios dinâmicos permitem a aplicação de carregamentos cíclicos ao material sob regime de tensão controlada ou constante e de deformação controlada ou constante. Apesar de difícil de ser realizado, há um tipo de ensaio denominado intermediário. A figura 2.2 mostra a representação dos 3 tipos de ensaios e seus respectivos valores de fator modo (FM), parâmetro apresentado a seguir.

---

<sup>1</sup> SINNOT, M.J. *The solid state for engineers* – John Wiley & Sons Inc., New York, 1958.

<sup>2</sup> STATE OF CALIFORNIA, DIVISION OF HIGHWAYS. *Materials Manual – vol.I, Test Methods*, Nº California 301F, USA.



Gontijo (1980) afirmou que uma idéia intuitiva da diferença entre os tipos de ensaio pode ser feita imaginando o que se passa após a aparição de uma primeira fissura no corpo-de-prova: enquanto num ensaio à tensão controlada, esta fissura enfraquece o material e as cargas repetidas subseqüentes provocam uma ruptura extremamente rápida, num ensaio à deformação controlada, a presença de uma fissura não implica necessariamente um aumento de tensões nas partes do corpo-de-prova que permanecem intactas. Neste último, a fissura se propaga mais lentamente.



**TENSÃO CONTROLADA - FM = -1**



**INTERMEDIÁRIO - FM = 0**



**DEFORMAÇÃO CONTROLADA - FM = 1**

Figura 2.2 – Representação Esquemática dos Tipos de Solicitações (PINTO,1991).

---

Segundo Monismith e Deacon (1969) os ensaios de deformação controlada aplicam-se melhor a pavimentos com camadas asfálticas fracas em relação ao seu suporte, pois assim o revestimento adiciona uma pequena rigidez à estrutura como um todo, e quando a carga é aplicada, a sua deformação é controlada pela deformação das camadas subjacentes.

Os ensaios de tensão controlada aplicam-se a pavimentos com camadas asfálticas rígidas em relação ao seu suporte, pois ao resistirem às cargas aplicadas, controlam a magnitude das deformações que podem ocorrer. Assim, o comportamento à tensão controlada ou deformação controlada dependerá tanto da espessura e do módulo de rigidez do revestimento, como do módulo equivalente da estrutura subjacente.

No ensaio de tensão controlada (TC), a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio. Nesta configuração de ensaio não é necessário um controle da evolução das deformações durante a execução. O ensaio de deformação controlada (DC) envolve a aplicação de cargas repetidas que reproduzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz a uma diminuição da carga aplicada, para manter a deformação constante. Em ambos os ensaios há uma redução da rigidez inicial do material a um nível que pode ser pré-estabelecido, a fim de se definir o fim do ensaio.

Monismith e Deacon (1969), com a finalidade de estabelecer uma diferença quantitativa entre os tipos de solicitação dos ensaios, introduziram o conceito do “fator modo” (*mode factor*), parâmetro definido pela expressão (1):

$$FM = \frac{|A| - |B|}{|A| + |B|} \quad (1)$$

onde  $|A|$  e  $|B|$  são respectivamente as variações percentuais sofridas pelas tensões e deformações para uma determinada redução do módulo de rigidez. Pinto (1991) definiu ainda os parâmetros  $|A|$  e  $|B|$  como as variações percentuais

da tensão horizontal e deformação horizontal iniciais, respectivamente, correspondentes a uma determinada redução de rigidez inicial.

O fator modo (FM) tem variação entre  $-1$  e  $1$ , assumindo o valor  $-1$  para a condição de tensão controlada e  $+1$  para a condição de deformação controlada e ainda valores intermediários, no intervalo entre  $-1$  e  $+1$  para os ensaios com sollicitação intermediária, onde seriam observadas variações de tensões e de deformações ao longo do ensaio.

Na figura 2.3 é representado, hipoteticamente, um diagrama de fadiga com os três modos de sollicitação mecânica. Pode-se observar, particularmente, que os ensaios à tensão controlada são os mais severos, uma vez que, embora os níveis iniciais de tensão e deformação sejam idênticos nos três tipos de sollicitação, após um número qualquer de aplicações de carga, os níveis de tensão e deformação correspondentes àquele ensaio são superiores aos demais. Quando comparados, verifica-se que os ensaios de tensão controlada fornecem uma menor vida de fadiga, enquanto que os de deformação controlada fornecem uma maior vida de fadiga, visto que a vida de fadiga do material aumenta na medida que as condições se aproximam do ensaio de deformação controlada.

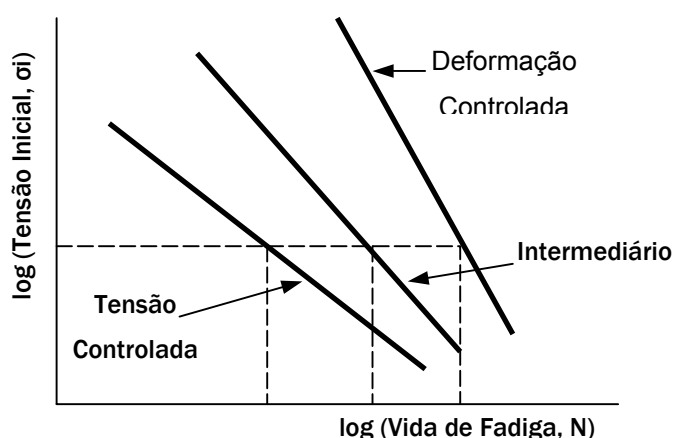


Figura 2.3 – Diagrama de fadiga com a influência do tipo de sollicitação na vida de fadiga de uma mistura asfáltica (GONTIJO, 1980).

Monismith *et al* (1990), no relatório “Project A-003-A” preparado para o Programa SHRP, apresentam uma avaliação comparativa entre os dois tipos de ensaios, tensão controlada (TC) e deformação controlada (DC), analisando o comportamento de algumas variáveis, como critério de fadiga e magnitude da vida de fadiga, nos dois tipos de ensaios. A tabela 2.1 traz esta avaliação comparativa realizada no referido relatório.

Tabela 2.1 – Efeito de algumas variáveis nos ensaios de Tensão Controlada e Deformação Controlada (MONISMITH *et al*, 1990).

<b>Variáveis</b>	<b>Tensão Controlada (TC)</b>	<b>Deformação Controlada (DC)</b>
Espessura da Camada de Concreto Asfáltico	Indicadas para camadas mais espessas e rígidas em relação ao seu suporte	Indicadas para camadas menos espessas e menos rígidas em relação ao seu suporte
Definição de ruptura; Número de Ciclos	Bem definida já que amostra rompe	Arbitrário, o ensaio é interrompido quando o nível de carga é reduzido a uma dada proporção do valor inicial, como por exemplo 50%
Dispersão dos Resultados	Menor Dispersão	Maior Dispersão
Número de Amostras Requerido	Menor	Maior
Simulação de influências à longo prazo	Influências à longo prazo como envelhecimento leva a um aumento na rigidez e presumidamente aumenta a vida de fadiga	Influências à longo prazo levando a um aumento na rigidez conduzirão a uma redução na vida de fadiga
Magnitude da Vida de Fadiga (N)	Geralmente menor vida	Geralmente maior vida
Efeito de variáveis da mistura	Mais sensível	Menos Sensível
Taxa de Dissipação de Energia	Mais Rápida	Mais Lenta
Taxa de Propagação de Fissura	Mais rápida do que ocorre in situ	Mais representativa das condições in situ
Efeitos Benéficos de Períodos de Repouso	Maiores Efeitos Benéficos	Menores Efeitos Benéficos

Os critérios de rupturas nos tipos de ensaio são diferentes, embora expressos por relações como a expressão (2):

$$N = k \left( \frac{1}{\sigma} \right)^n \quad \text{ou} \quad N = k \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^n \quad (2)$$

onde:

N = vida de fadiga expressa em número de solicitações da carga;

$\sigma, \varepsilon$  = tensão ( $\sigma$ ) ou deformação ( $\varepsilon$ ) de tração;

k, n = parâmetros de fadiga determinados experimentalmente.

No ensaio à tensão controlada, o critério de fadiga está associado à ruptura do corpo-de-prova. A tensão é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações variam até a ruptura do material, as deformações não são aferidas durante a execução do ensaio. Portanto, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga constante necessário à ruptura completa do corpo-de-prova.

No ensaio à deformação controlada, o critério de fadiga não está mais condicionado à ruptura completa do corpo-de-prova. Como neste tipo de ensaio existe a necessidade de a deformação ser mantida constante ao longo de todo o procedimento, é necessário que o carregamento aplicado varie, diminuindo de intensidade durante o ensaio. A diminuição do carregamento a um valor preestabelecido determina o critério de fadiga, conseqüentemente, o fim do ensaio. Estes valores preestabelecidos podem variar de trabalho para trabalho, mas valores de redução da carga inicial de 40% ou 50% são mais comumente adotados. Epps e Monismith (1969) definiram a vida de fadiga à deformação controlada como o número de repetições da carga capaz de reduzir o desempenho ou rigidez inicial do corpo-de-prova a um nível preestabelecido. Consideram que uma redução de módulo de rigidez ou de resiliência, da ordem de 50% define o fim do ensaio e a vida de fadiga da mistura.

Soliman<sup>3</sup> *apud* Pinto (1991) mostrou que, se o critério de fadiga for considerado como o número de repetições de carga necessário ao aparecimento da primeira trinca, os resultados dos ensaios à tensão controlada e à deformação controlada seriam agrupados numa única reta  $N = f(\varepsilon)$ .

Pinto (1991) resumiu os critérios de fadiga:

Tabela 2.2 – Critérios de Fadiga (PINTO,1991).

<b>Ensaio</b>	<b>Critério de Fadiga</b>	<b>Vida de Fadiga (N)</b>
TC	Ruptura Completa	Fim do ensaio
DC	Redução no Desempenho	Arbitrário Estágio de Ruptura
TC ou DC	Início de Trincas	Retas $N \times \varepsilon$ agrupadas

A avaliação da vida de fadiga pode, também, ser realizada por teorias de dano cumulativo. Entre estas teorias está a Lei de Miner, que permite avaliar a vida de fadiga dos metais baseados na acumulação de danos.

Esta teoria, proposta por Miner em 1945, foi concebida após pesquisas sobre o fenômeno da fadiga em metais de uso destinado à aviação (ligas de alumínio particularmente). Em revisão de algumas teorias gerais sobre dano cumulativo (*Cumulative Damage*), O'Neill<sup>4</sup> *apud* Gontijo (1980) concluiu que nenhuma das hipóteses consideradas mostrava evidente superioridade geral sobre a regra de adição linear de razões de ciclo.

<sup>3</sup> SOLIMAN, S. *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux*. Rapport de Recherché 58, LCPC, Paris, 1976.

<sup>4</sup> O'NEILL, M.J. *A review of some cumulative damage theories*. A.S.D. Aeronautic Research Laboratory, Structure and Materials. Rept. 326, June, 1970.

Essencialmente, esta regra, conhecida como “Lei de Miner”, é definida pela expressão (3):

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

Onde:

$n_i$  = número de repetições da tensão  $\sigma_i$  (ou deformação  $\varepsilon_i$ ) aplicadas ao corpo-de-prova;

$N_i$  = número de repetições da tensão  $\sigma_i$  (ou deformação  $\varepsilon_i$ ) que leva à ruptura.

A equação (3) mostra que, quando diversas séries de tensões (ou deformações) de valor constante, repetidas um número  $n$  de vezes, são aplicadas, verifica-se um desgaste progressivo da resistência à fadiga do material (acumulação de danos), a qual estaria completamente consumida quando se verificasse a relação  $\sum n_i / N_i = 1$ . Em outras palavras, embora uma tensão aplicada um número  $n$  de vezes possa ser insuficiente para provocar a ruptura do material (desde que o nível de tensão seja repetido um número de vezes  $n$  inferior ao número  $N$  de repetições que determinam a resistência do material à fadiga), será responsável por um certo consumo da vida de fadiga do material. A lei de Miner pode ser ilustrada através de representação gráfica, como apresentada na figura 2.4.

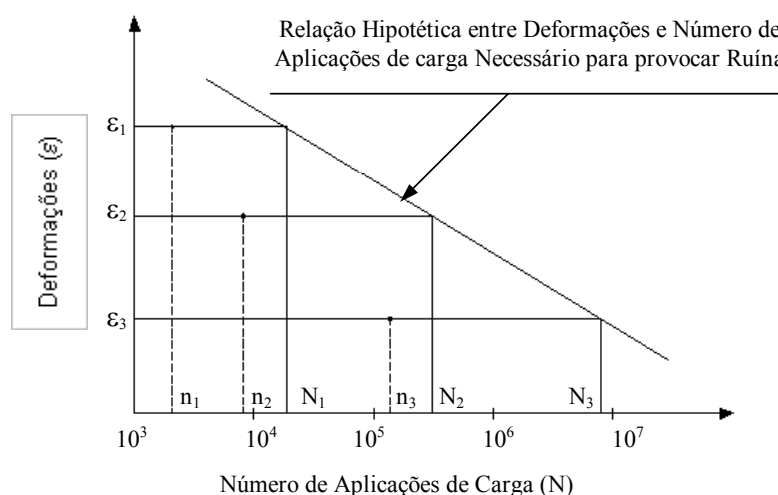


Figura 2.4 – Aplicação Gráfica da Lei de Miner (GONTIJO, 1980).

---

No caso de  $\Sigma n/N$  ser igual à unidade, o fendilhamento provavelmente se desenvolverá até o final da vida de projeto considerada e neste caso, o dimensionamento pode ser considerado adequado. Para o caso de  $\Sigma n/N$  ser superior à unidade, o fendilhamento se desenvolverá antes do final da duração de vida considerada, e neste caso, pode ser considerado ajustar o dimensionamento do pavimento de modo a reduzir as deformações nas fibras inferiores do revestimento asfáltico, e, conseqüentemente, evitar que o parâmetro  $\Sigma n/N$  exceda a unidade.

A aplicação dessa regra na previsão da vida de fadiga de misturas asfálticas sob condições de cargas compostas, na prática, de utilização bastante complexa dado o número de variáveis que podem influenciar o valor das deformações, foi considerado inicialmente por Monismith *et al*<sup>5</sup> *apud* Gontijo (1980). Foi comprovado ainda, por este trabalho, que sob este ponto de vista, o critério mais adequado consistia na análise das deformações, ao invés das tensões.

O critério de ruptura sem dúvida é o fator mais importante e mais polêmico no que concerne aos ensaios de fadiga. A forma de se adotar este critério varia muito. Segundo Benevides e Motta (2003), esta falta de padronização gera uma enorme dificuldade que impede comparações entre curvas de fadiga. Como já mencionado anteriormente, este critério de fadiga pode ser expresso em termos de deformações específicas, de tensões de tração e de diferença de tensões, sendo este último mais comum no Brasil, já que, em sua maioria, estas curvas provêm de ensaios de tensão controlada. Algumas destas expressões de estimativa de vida de fadiga podem ser encontradas em Pinto (1991), Pinto e Motta (1995) e Motta *et al* (2002). Na literatura internacional, são mais comuns as expressões de fadiga em termos de deformação específica, especialmente as que provêm de ensaios de deformação controlada e de ensaios a flexão.

---

<sup>5</sup> MONISMITH, C.L.; SECOR, K.E.; BLACKMER, E.W. *Asphalt mixture behavior in repeated flexure* – Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 30, USA, 1961.



Ainda a respeito do questionamento dos critérios de ruptura, Loureiro *et al* (2003) estudaram o dano progressivo de misturas asfálticas no ensaio de fadiga à compressão diametral, visando a obtenção de outro parâmetro além do número de ciclos de carregamento antes da ruptura nos ensaios à tensão controlada. Na pesquisa, o critério de ruptura no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada foi definido com base na obtenção do gráfico: deformação específica de tração, determinada a partir da razão deslocamento no diâmetro central pelo diâmetro original versus Número de ciclos de carga aplicados.

Para tanto, foram necessários o registro e cálculo da deformação específica de tração em cada ciclo de aplicação de carga. Loureiro *et al* (2003) concluíram que o parâmetro de deformação específica pode ser, também, um bom indicativo da vida de fadiga de misturas asfálticas. Para o CBUQ estudado, um limite de deformação da ordem de 5 vezes a deformação inicial foi encontrado através da avaliação do gráfico de número de ciclos versus deformação de tração. Os autores concluíram ainda que apenas a contagem de número de ciclos até a ruptura da amostra, método comumente praticado, não é um bom indicativo da vida de fadiga.

#### **2.4.1. FATORES DE INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS À FADIGA**

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas é influenciado por vários parâmetros. A resistência à fadiga é dependente de fatores ligados às características e tipos de corpos-de-prova, das condições do ensaio e dos fatores ambientais. Deacon (1965) separou estes parâmetros em três categorias:

- Condição de carregamento;
- Características do corpo-de-prova;
- Ambiente.

##### **2.4.1.1. CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO**

Os ensaios que melhor reproduzem as condições de carregamento induzidas pelo tráfego, para estimar a vida de fadiga de misturas asfálticas, são os ensaios de carregamento dinâmico. A grande maioria das pesquisas de fadiga realizadas no Brasil utiliza ensaios com carregamentos deste tipo, mas ensaios com carregamento estático também podem ser utilizados na estimativa de vida de fadiga de misturas asfálticas.

Pinto (1991) desenvolveu uma metodologia para realização de ensaios de fadiga à fluência estática (*creep*) e compressão diametral, e a partir das curvas típicas deste tipo de ensaio em concretos asfálticos, foram definidos modelos de fadiga e comparados com os obtidos por meio de ensaios dinâmicos, evidenciando que é possível prever o desempenho de uma mistura betuminosa através de carregamentos estáticos, muito mais comuns nos laboratórios de pavimentação. Ensaio de creep em misturas asfálticas mostram que existem quatro estágios distintos de comportamento mecânico (figura 2.5).

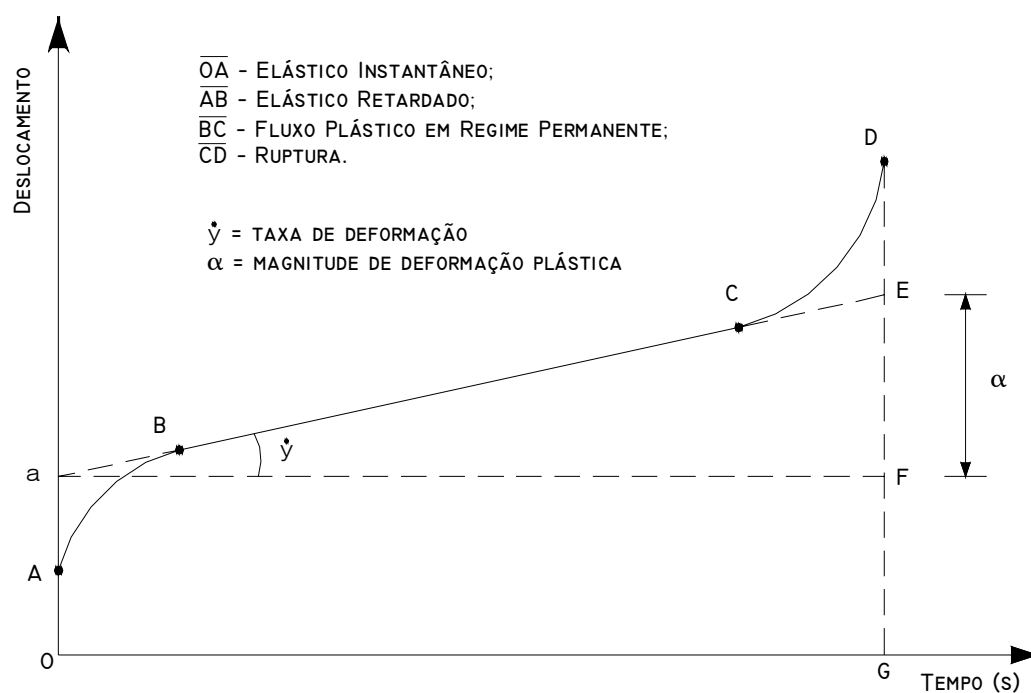


Figura 2.5 – Estágios de comportamento no ensaio de creep.

O tempo correspondente à ruptura completa dos corpos-de-prova, no ensaio de fluência estática (*creep*) foi determinado a partir do traçado de curvas

do tipo deslocamento x tempo, como na figura 2.5. Para a determinação da vida de fadiga, Pinto (1991) correlacionou os parâmetros do ensaio de creep com os estados de tensão do ensaio de compressão diametral e determinou uma equação de vida de fadiga, expressão (4), para o ensaio com carregamento estático:

$$N_f = \frac{B}{\Delta t} \left( \frac{1}{25 \Delta \sigma} \right)^b \quad (4)$$

Onde:

$N_f$  = Vida de fadiga determinada pelo ensaio de creep;

$\Delta \sigma$  = Diferença de Tensões (kgf/cm<sup>2</sup>);

B, b = parâmetros obtidos do ensaio de fluência estática (creep);

$\Delta t$  = 0,14s do ensaio de fadiga.

A figura 2.6 ilustra uma comparação entre os resultados de ensaio de fadiga em uma mistura asfáltica obtidas do ensaio de fluência (estático) e de fadiga (dinâmico). Ambos foram realizados por Pinto (1991).

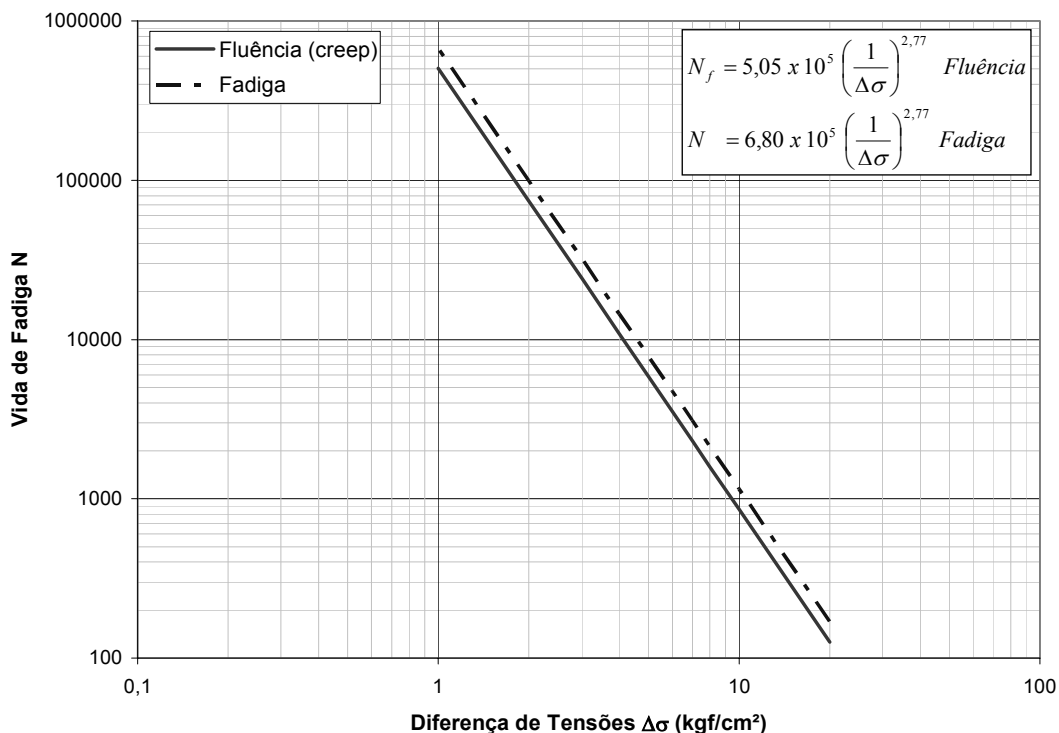


Figura 2.6 – Comparação entre ensaio creep e fadiga-dinâmico (PINTO, 1991).

A carga dinâmica pode ser induzida através de uma solicitação simples ou complexa, como observado nas figuras 2.7e 2.8 Na solicitação simples, os

parâmetros de carregamento como a forma, duração, freqüência, nível e intervalo entre as cargas são mantidos constantes durante o ensaio. Na solitação complexa, os parâmetros de carga variam ao longo do ensaio, podendo ser ensaios em blocos repetidos, ordenados ou em nível aleatório.

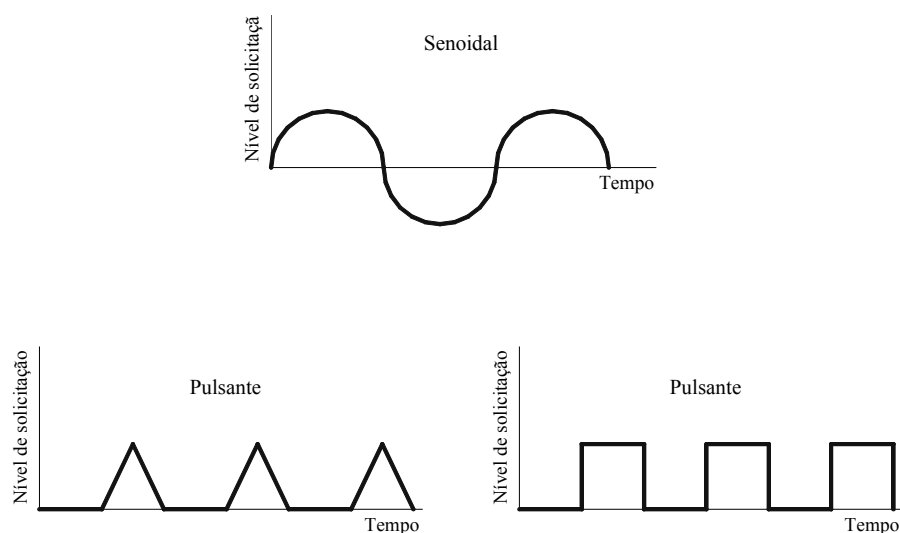


Figura 2.7– Condições de carregamento dinâmico - Solitação simples.

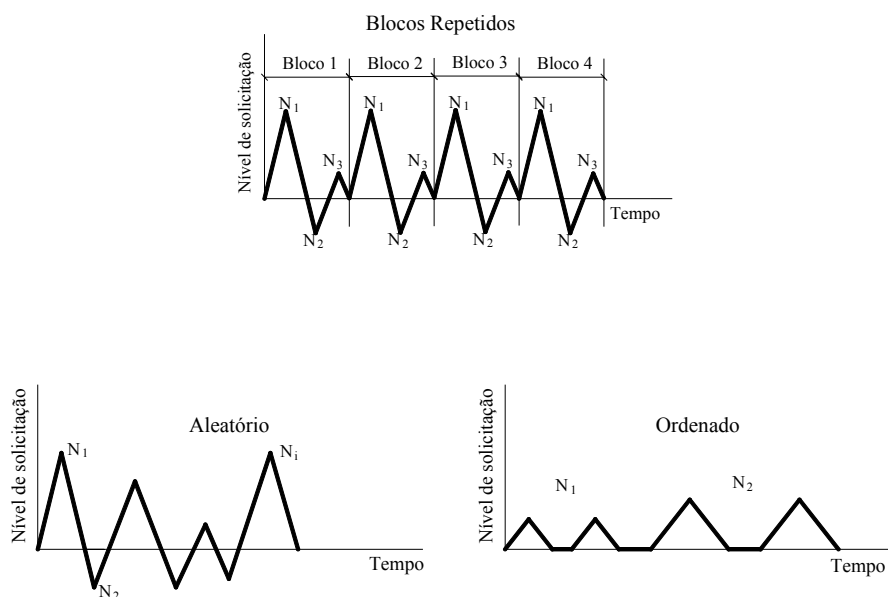


Figura 2.8– Condições de carregamentos dinâmicos – Solitação complexa.

Embora na prática corrente os pavimentos estejam submetidos a solitações complexas, os centros de pesquisa freqüentemente realizam ensaios de fadiga sob condições de solitação simples.

### 2.4.1.2. CARACTERÍSTICAS DO CORPO-DE-PROVA

Entre as características do corpo-de-prova que influenciam a vida de fadiga da mistura asfáltica destacam-se:

- Tipo e Teor do Ligante;
- Tipo e Distribuição Granulométrica do Agregado;
- Volume de Vazios da mistura.

A tabela 2.3 (desenvolvida por Monismith *et al*, 1990) mostra os efeitos de alguns fatores sobre a rigidez e o comportamento de fadiga de misturas asfálticas. Estes resultados se aplicam para misturas com graduação contínua.

Tabela 2.3 – Fatores que afetam a rigidez e o comportamento à fadiga de concretos asfálticos (MONISMITH *et al*, 1990).

Fator	Variação do Fator	Efeito de Variação do Fator		
		Na Rigidez	Na vida de fadiga em Tensão Controlada (TC)	Na vida de fadiga em Deformação Controlada (DC)
Penetração do Asfalto	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce
Teor de Asfalto	Aumenta	Aumenta <sup>1</sup>	Aumenta <sup>1</sup>	Aumenta <sup>2</sup>
Tipo de Agregado	Aumenta a rugosidade e angularidade	Aumenta	Aumenta	Decresce
Granulometria do Agregado	Aberta a densa	Aumenta	Aumenta	Decresce <sup>2</sup>
Índice de Vazios	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce <sup>2</sup>
Temperatura	Decresce	Aumenta <sup>3</sup>	Aumenta	Decresce

<sup>1</sup> Existe um teor ótimo para vida de fadiga máxima

<sup>2</sup> Poucos estudos existentes

<sup>3</sup> Aproximações limitam a temperaturas abaixo de congelamento

#### 2.4.1.2.1. TIPO E TEOR DO LIGANTE

---

O teor de ligante é certamente um fator de importância significativa no comportamento de misturas asfálticas à fadiga. A partir de ensaios realizados à tensão constante, vários pesquisadores constataram que aumentando-se ligeiramente o teor do ligante, aumenta-se consideravelmente a resistência à fadiga da mistura. Porém, são unânimes em afirmar que este aumento, acima de um determinado limite, provoca uma redução do módulo de rigidez da mistura, que é função de um teor ótimo do ligante, e, conseqüentemente, uma redução da resistência à fadiga: a máxima resistência à fadiga nos ensaios à tensão controlada tende a ocorrer quando a rigidez da mistura é máxima. Entre estes trabalhos pode-se destacar, em caráter pioneiro, Epps e Monismith (1969) e Pell<sup>6</sup> *apud* Gontijo (1980). Mais recentemente, Harvey e Tsai (1996), investigando a influência do teor de asfalto no comportamento à fadiga, corroboraram com a afirmação de que aumentando o teor do ligante obtêm-se misturas mais resistentes à fadiga. Kim, Khosla e Kim (1991) investigaram a influência de variáveis da mistura na vida de fadiga à luz do ensaio de compressão diametral, e reforçaram a afirmativa.

Nos ensaios à deformação controlada, Gontijo (1980) afirmou verificar-se o contrário, um aumento constante da duração de vida com o acréscimo do teor de ligante, parâmetro este responsável, quando superior à determinado limite, pela redução do módulo de rigidez da mistura. Para Monismith e Deacon (1969), o acréscimo do teor do ligante de misturas ensaiadas à deformação controlada provoca uma redução nos níveis das tensões que atuam na combinação ligante-fíler, sendo portanto responsável por um acréscimo da resistência à fadiga. Esta contradição se explica pelos diferentes modos de ruptura nos dois tipos de ensaio (TC e DC).

Além do teor de ligante, o tipo de asfalto utilizado nas misturas tem grande influência na vida de fadiga da mesma. De acordo com Kim, Khosla e Kim (1991), misturas com ligantes menos rígidos demonstraram maior resistência à fadiga.

---

<sup>6</sup> PELL, P.S. *Fatigue of asphalt pavement mixes*. Proc. 2<sup>nd</sup>. Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan, USA, 1967.

Os asfaltos modificados com polímeros têm mostrado bons resultados na pavimentação flexível. Esta nova tecnologia, apesar de relativamente pouco executada no Brasil, já é bastante utilizada em países industrializados como a França, país pioneiro no desenvolvimento desta tecnologia.

Pinto (1993) definiu os asfaltos modificados com polímeros como ligantes asfálticos de uso rodoviário, modificados pela adição de polímeros previamente à sua aplicação, onde o produto resultante é um sistema bifásico com uma fase contínua de asfalto ou uma fase contínua de polímero, a depender da formulação e fabricação do asfalto modificado. Para uma adição de até 3% de polímeros, obtém-se uma mistura com uma fase contínua de asfalto, com 3 a 5% de polímeros obtém-se uma mistura instável e acima de 7% de polímeros, uma mistura com uma fase contínua de polímeros.

Os asfaltos modificados com polímeros são melhorados, conforme sua utilização, em uma ou várias das características seguintes:

- Susceptibilidade térmica;
- Coesão;
- Elasticidade;
- Resistência à fadiga.

Além da melhoria dessas propriedades, estes asfaltos possuem maior resistência à ação da água e ao envelhecimento.

“Os polímeros são substâncias macromoleculares, que podem ser produzidas pela natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc.) ou podem ser obtidas artificialmente pela união seqüenciada de pequenas moléculas, chamadas monômeros.” (MARTINHO, 1993).

Segundo Martinho (1993), vários tipos de polímeros são utilizados nos processos de modificação dos asfaltos:

- 
- Copolímeros de Etileno – Acetato de Vinila (EVA);
  - Estireno – Butadieno – Estireno (SBS);
  - Borracha reciclada de pneus;
  - Látex;
  - Epóxi, etc.

Para Martinho (1993), os elastômeros sintéticos de melhor desempenho com os ligantes asfálticos são os copolímeros termoplásticos de butadieno e estireno (SBS). Othman, Figueroa e Aglan (1995) estudaram o efeito de ciclos térmicos de baixa temperatura no comportamento à fadiga de uma mistura com asfalto modificado com SBS e constataram as melhorias atribuídas a esta modificação. Afirmam ainda existir uma maior resistência à fadiga na propagação de trincas do asfalto modificado em relação ao não-modificado, e isto pode ser atribuído à flexibilidade da mistura induzida pelo modificador SBS.

Ainda no rol dos asfaltos modificados, merecem destaque os modificados com borracha reciclada de pneus moída (Crumb Rubber - CR). De acordo com Shih, Tia e Ruth<sup>7</sup> *apud* Leite *et al* (2000), as propriedades mecânicas de misturas com borracha moída devem aumentar a vida de serviço do pavimento em cerca de 2 ou 3 vezes quando comparado com misturas com ligantes não-modificados, como indicado em ensaios de creep dinâmico e fadiga.

Leite *et al* (2000) submeteram 3 misturas asfálticas modificadas (EVA, SBS e CR) e uma não modificada (CAP 20) à comparação, utilizando ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, creep estático e dinâmico. Os resultados indicaram melhoria das propriedades da mistura devido à adição da borracha. A menor relação “módulo de resiliência / resistência de tração” foi obtida na mistura com borracha, indicando mais flexibilidade desta mistura,

---

<sup>7</sup> SHIH, C.T., TIA, M., RUTH, B.E. *Evaluation of aging characteristics of modified asphalts*. Engineering properties of asphalt mixtures and the relation to performance, ASTM STP 1265, 1994.



---

devido a um aumento na resistência à tração e redução no módulo de resiliência.

A relação MR/RT é um importante parâmetro na comparação de misturas asfálticas. Relações da ordem de 3000 representam materiais que são flexíveis enquanto possuem uma boa resistência à tração. De acordo com Leite *et al* (2000), considerando uma mesma RT, menor relação MR/RT é uma vantagem porque permite o uso de camadas menos espessas para uma mesma vida de fadiga. Este fato compensa o maior custo dos asfaltos modificados, e pode também aumentar a resistência do pavimento.

#### **2.4.1.2.2. TIPO E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS**

O agregado mineral é o componente que aparece em maior quantidade na estrutura do concreto asfáltico, e suas características físicas e químicas afetam significativamente o desempenho do pavimento de concreto asfáltico em serviço. A relação entre as propriedades dos agregados e a performance do pavimento tem sido estudada por muitos pesquisadores. Dukatz<sup>8</sup> *apud* Kim *et al* (1992), baseando-se em pesquisas anteriores, concluiu que a deformação permanente das misturas asfálticas é afetada, principalmente, pela forma, graduação, durabilidade e dureza do agregado, e também que agregados com maior dureza e maior rigidez são mais resistentes à fadiga.

Kim *et al* (1992) afirmaram que o tipo do agregado tem efeito significativo na resistência à fadiga de misturas asfálticas, demonstrando a importância de uma interface de união entre asfalto e agregado de melhor qualidade, com textura superficial rugosa. Estas afirmações foram resultado de experimento utilizando ensaios de compressão diametral e creep estático.

Em contraposição, para alguns pesquisadores como Kirk (1967), a influência da granulometria e da textura dos agregados na resistência à fadiga de uma mistura, com o mesmo teor de asfalto, é negligenciável (visto não

---

<sup>8</sup> DUKATZ, E.L.Jr. *Aggregate properties related to pavement performance*. Proc. of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 58, 1989, pp. 492-502.

---

influenciarem diretamente a deformação de ruptura), uma vez que o início do processo de fendilhamento depende, sobretudo da deformação condicionada.

Apesar de tais divergências, é certo que agregados angulares e finos apresentando superfícies rugosas são sempre difíceis de compactar, o que pode conduzir à obtenção de menores módulos de rigidez. Tal fato é responsável, conseqüentemente, por uma vida de fadiga mais curta nos ensaios à tensão controlada (TC) e mais longa nos ensaios à deformação controlada (DC).

Ainda se tratando do agregado mineral, o fíler, material de enchimento do esqueleto mineral, assume importância significativa. O fíler provoca o aumento da compacidade da mistura (e redução do volume de vazios), responsável pelo acréscimo de rigidez da mistura. Nos ensaios à tensão controlada, este aumento da rigidez provoca um aumento da resistência à fadiga, e nos ensaios à deformação controlada provoca uma “aparente” redução desta resistência. Mantendo constante o teor de ligante, o aumento da percentagem de fíler acima de um determinado valor, é responsável por redução na vida de fadiga, evidenciando assim a existência de um teor de fíler que corresponde a uma resistência à fadiga máxima (GONTIJO, 1980).

“A importância dos teores de ligante e fíler, associada à interdependência destes dois parâmetros, permite concluir que o fator preponderante na resistência à fadiga de uma mistura asfáltica é a relação fíler-ligante. Segundo Chomton *et al*<sup>9</sup>, uma relação fíler-ligante de 1,1 a 1,5 confere ao concreto asfáltico um comportamento satisfatório à fadiga.” (GONTIJO, 1980).

#### **2.4.1.2.3. VOLUME DE VAZIOS**

---

<sup>9</sup> CHOMTON, G.; DOAN, T.H.; HARLIN, J.P.; KENNEL, M. *Fatigue des enrobés bitumineux*. Journées d'Information – Bitumes et Enrobés Bitumineux, LCPC, Paris, 1971.

---

O volume de vazios assume particular importância no comportamento das misturas asfálticas, independente do tipo de ensaio que seja realizado para determinação da vida de fadiga da mistura (TC ou DC).

A influência do volume de vazios da mistura à fadiga pode ser explicada pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem ou no ligante ou na combinação ligante-fíler da mistura. De acordo com Deacon (1965), o acréscimo de rigidez da mistura é proporcional ao acréscimo de densidade e decréscimo do volume de vazios, e que a redução deste índice, sendo responsável por uma redução nas tensões que atuam na combinação ligante-fíler, provoca um aumento na resistência à fadiga do material.

Para Epps e Monismith (1969) misturas com elevados volumes de vazios, em geral, apresentam menores resistências à fadiga, quando ensaiados à tensão controlada (TC). Afirmam também que a estrutura dos vazios da mistura (formas, dimensões, distribuição, etc.) é um fator relevante no que se diz respeito à resistência à fadiga. Para um mesmo volume, vazios maiores e em menor número são mais desfavoráveis do que vários pequenos vazios dispersos pela mistura. Por outro lado, vazios de forma alongada aumentariam as zonas de concentração de tensões na mistura.

Através de ensaios de compressão diametral à tensão controlada em corpos-de-prova cilíndricos, Kim *et al* (1991), afirmaram que aumentos de volumes de vazios encurtam a vida de fadiga da mistura e que a influência deste parâmetro na resistência à fadiga das misturas foi mais evidenciada em ensaios a 20°C do que a 0°C.

Em ensaios à deformação controlada, Soliman<sup>10</sup> *apud* Gontijo (1980) constatou que o concreto asfáltico mais resistente à fadiga é o menos compacto, por sua vez menos rígido, contrariamente aos resultados de ensaios a tensão controlada, onde misturas mais rígidas são mais resistentes à fadiga.

---

<sup>10</sup> SOLIMAN, S. *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux*. Rapport de Recherché 58, LCPC, Paris, 1976.

Harvey e Tsai (1996) concluíram, através de ensaios de deformação controlada, que baixos volumes de vazios contribuem para o aumento da vida de fadiga da mistura. Afirmam ainda que a rigidez inicial da mistura é significativamente afetada pelo volume de vazios. A rigidez inicial aumenta com menores volumes de vazios e menores teores de asfalto. Em seu experimento, Harvey e Tsai (1996), observaram que maior rigidez inicial e maiores resistências à fadiga ocorreram quando o volume de vazios foi reduzido, o que contraria a relação tradicionalmente assumida entre rigidez e resistência à fadiga em ensaios à deformação controlada.

### **2.4.1.3. FATORES AMBIENTAIS**

Entre os fatores ambientais que afetam a resistência à fadiga, recebe merecido destaque a temperatura, devido à grande susceptibilidade térmica das misturas asfálticas. Kim *et al* (1991) afirmam que esta susceptibilidade do asfalto tem influência significativa sobre a resistência à fadiga do material. A resistência à fadiga varia de acordo com a variação da rigidez da mistura a diferentes temperaturas.

Pinto (1991) realizou ensaios de fadiga sob 4 temperaturas (10°C, 25°C, 30°C e 35°C). Através de ensaios de compressão diametral à tensão controlada, concluiu que o efeito da temperatura tem alta influência no comportamento das misturas. Corpos-de-prova ensaiados a 35°C apresentaram vida de fadiga menor, sendo os ensaiados à 10°C, dentre todos ensaiados, os de maior duração de vida de fadiga. À medida que a temperatura é diminuída, a duração de vida de fadiga aumenta. Pinto (1991) definiu ainda um modelo de fadiga que leva em consideração a variável temperatura em um intervalo entre 10°C e 35°C.

Os parâmetros apresentados são os que exercem maior e mais pronunciada influência no comportamento das mistura asfálticas à fadiga. Generalizando, pode-se afirmar que o acréscimo dos parâmetros que tendem a

---

aumentar a rigidez do material resulta, nos ensaios à tensão controlada (TC), em uma maior vida de fadiga, mais longa, contrariamente ao que verifica-se nos ensaios à deformação controlada, onde menor rigidez significa maior duração à fadiga.

#### **2.4.2. ENSAIOS DE FADIGA**

Para estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas, dispõe-se de ensaios laboratoriais que procuram simular as condições de solicitação de uma rodovia e os que procuram uma aproximação fundamentada (GONTIJO<sup>11</sup> apud PINTO, 1991). Entenda-se por aproximação fundamentada um artifício utilizado para facilitar a reprodução do estado de tensões real que ocorre no pavimento através de estados de tensões induzidos, no corpo-de-prova, por carregamentos não necessariamente iguais aos aplicados aos pavimentos. Os corpos-de-prova e equipamentos são mais simples e de manuseio mais fácil.

No grupo dos ensaios que procuram simular as condições do tráfego, estão aqueles que são executados em placas ou vigas apoiadas em suporte que visam representar as camadas subjacentes ao revestimento. No outro grupo, dos ensaios laboratoriais que procuram uma aproximação fundamentada, estão os que são executados em corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos, submetidos a níveis de tensões ou deformações de modo a simular a condição de solicitação no campo. Note-se que ambos os tipos de ensaios podem ser realizados, tanto sob tensão controlada, quanto deformação controlada, dependendo da escolha do pesquisador e das possibilidades dos equipamentos laboratoriais.

Os métodos experimentais podem ser classificados em função do carregamento imposto, do seguinte modo:

---

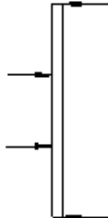
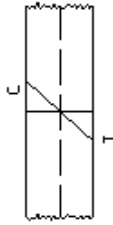
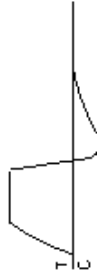
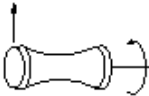
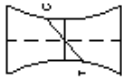

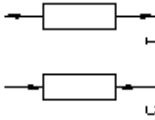
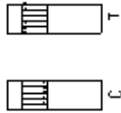
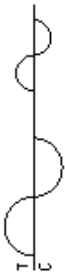
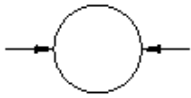
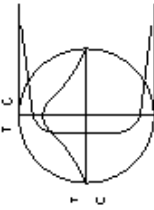
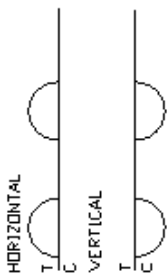
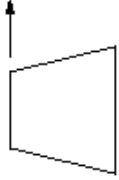
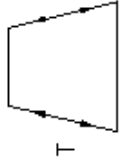

<sup>11</sup> GONTIJO, P.R.A. *Contribuição para o estudo de misturas betuminosas à fadiga por flexão dinâmica, sob a ação de cargas rolantes repetidas*. Tese para concurso de Especialista do LNEC. Lisboa, Portugal, 1979.

- Condição de Carregamento:
  - Estática;
  - Dinâmica.
  
- Tipo de Carregamento:
  - Compressão simples;
  - Compressão diametral (Tração indireta);
  - Tração;
  - Flexão simples ou em balanço;
  - Triaxial;
  - Rotativa.

A tabela 2.4 ilustra os principais tipos e as características básicas dos ensaios dinâmicos mais utilizados na determinação da vida de fadiga em laboratório nos últimos anos.

Os ensaios apresentados na tabela 2.4 são citados em Pinto (1991) como os mais usados, nos estudos de fadiga de misturas asfálticas, em pesquisas de laboratório no Brasil. Já no relatório A-003-A (MONISMITH *et al*, 1990), são analisados também, além dos citados na tabela 2.4 os ensaios Wheel-track, onde o tráfego é simulado pelo rolamento de uma roda, e os ensaios em pistas circulares experimentais. Este relatório, além de avaliar, discute ainda as vantagens e desvantagens dos diversos ensaios para a caracterização da fadiga em misturas asfálticas.

Tabela 2.4 - Características dos principais ensaios de fadiga (PINTO, 1991).

Ensaio	Carregamento	Distribuição das Tensões	Forma do Carregamento	Frequência do Carregamento (cps)	Estado de Tensões
FLEXÃO				1,67	Uniaxial
ROTAÇÃO				16,67	Uniaxial
TRAÇÃO DIRETA				0,833 - 25,0	Uniaxial
TRAÇÃO INDIRETA				1,0	Biaxial
FLEXÃO EM BALANÇO				0,05 - 50,0	Uniaxial

### 2.4.2.1. ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES

A maioria dos resultados de ensaios de fadiga tem sido obtida através de ensaios de flexão simples, nos quais tensões ou deformações são aplicadas repetidamente até o corpo-de-prova prismático romper ou apresentar comprometimento do ponto de vista estrutural. As cargas são aplicadas repetidamente no ponto central de um corpo-de-prova prismático (viga) simplesmente apoiado. Geralmente são aplicados carregamentos pulsantes, com aplicação de carga com duração de 0,1s e uma frequência de 100 repetições por minuto. Entre as vantagens deste tipo de ensaio, Fernandes Jr (1994) destacou o uso bem difundido e a possibilidade de utilização dos resultados diretamente no dimensionamento de pavimentos, além de permitirem as opções de ensaio sob tensão ou deformação controlada.

Diferentes tipos de equipamentos e ensaios de flexão têm sido desenvolvidos para o estudo das características dos materiais asfálticos à fadiga, e muitos destes ensaios não se limitam apenas aos materiais asfálticos. Monismith *et al.* (1990) citam:

1. Ensaios de flexão onde as cargas são aplicadas repetidamente ou senoidalmente no ponto central ou nos dois terços do corpo-de-prova prismático;
2. Vigas em balanço submetidas a carregamento senoidal de rotação;
3. Vigas em balanço trapezoidais submetidas a carregamentos ou deformações senoidais.

Estas configurações de ensaios são muito utilizadas em ensaios de fadiga; Harvey e Tsai (1996) utilizaram ensaios de flexão em 3 pontos em corpos-de-prova prismáticos com deformação controlada, arbitrando o fim do ensaio quando a rigidez atingisse 50% da rigidez inicial. Momm (1998) empregou ensaios de flexão em corpos-de-prova trapezoidais. Neste tipo de



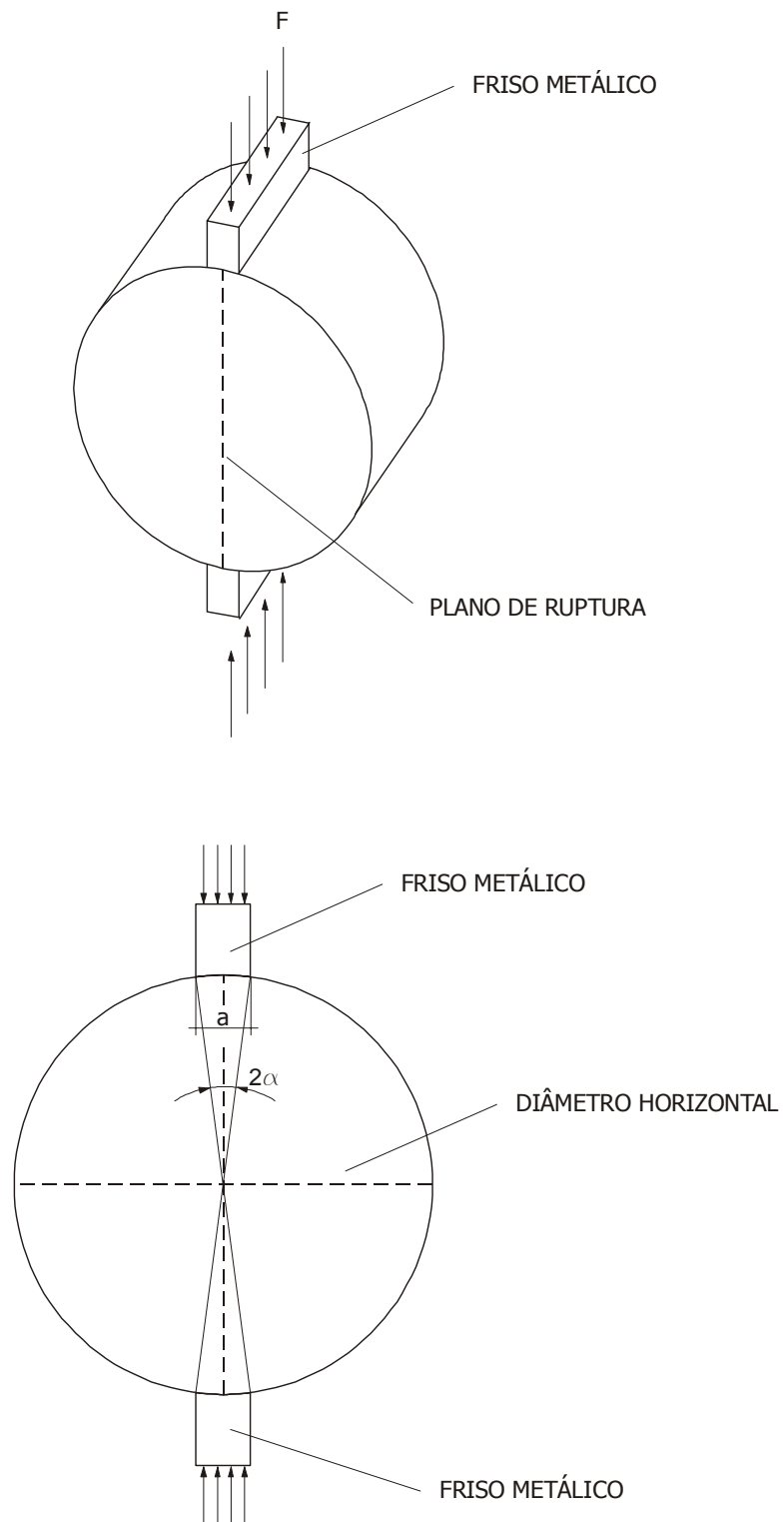
ensaio é facilmente controlada a deformação elástica aplicada, facilitando ensaios à deformação controlada.

Pinto (1991) utilizou em suas pesquisas, em caráter pioneiro no país, ensaios de fadiga à flexão alternada, à tensão controlada e à deformação controlada, de vigotas asfálticas fabricadas em laboratório. Comparou ainda resultados destes ensaios à flexão alternada com ensaios de compressão diametral e concluiu que à flexão alternada a vida de fadiga resultou maior que a resultante dos ensaios de compressão diametral.

Em comparações entre os resultados de diversos ensaios utilizados para avaliar a vida de fadiga, Monismith *et al* (1990) e Matthews *et al* (1993) elaboraram uma classificação com os diversos ensaios. Nestes trabalhos, foram considerados basicamente dois parâmetros, a facilidade de execução e a relação entre os resultados e a utilização em campo. O ensaio de flexão obteve o melhor resultado dentre os investigados em ambas pesquisas. O ensaio de compressão diametral obteve também um bom resultado em ambas as pesquisas.

#### **2.4.2.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL**

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas em um corpo-de-prova cilíndrico. São aplicadas cargas de compressão diametralmente ao corpo-de-prova. Na figura 2.9 é ilustrado um esquema do ensaio de compressão diametral, indicando os frisos de aplicação de carga, o plano de ruptura e a aplicação de carga.



a - Corda do friso (12,7mm)

F - Carga aplicada

Figura 2.9 – Ensaio de compressão diametral do C.P.

Através do ensaio de compressão diametral, pode-se calcular a resistência à tração estática, vida de fadiga e o módulo resiliente das misturas asfálticas. Carneiro<sup>12</sup> *apud* Benevides (2000), pioneiro deste ensaio, desenvolveu o chamado “ensaio brasileiro” para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland.

Segundo Medina (1988), provavelmente foi Schimdt, pesquisador da Chevron Research Company, da Califórnia, quem primeiro divulgou este ensaio na determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas, em 1972. Inicia-se, assim, para o “ensaio brasileiro”, trinta anos após sua criação, uma aplicação a misturas asfálticas.

Segundo Pinto (1991), Frocht em 1948, deduziu expressões para as tensões resultantes em um corpo-de-prova cilíndrico devido à carga concentrada de compressão aplicada. Na figura 2.10 são mostrados um esquema da aplicação de cargas e as tensões resultantes.

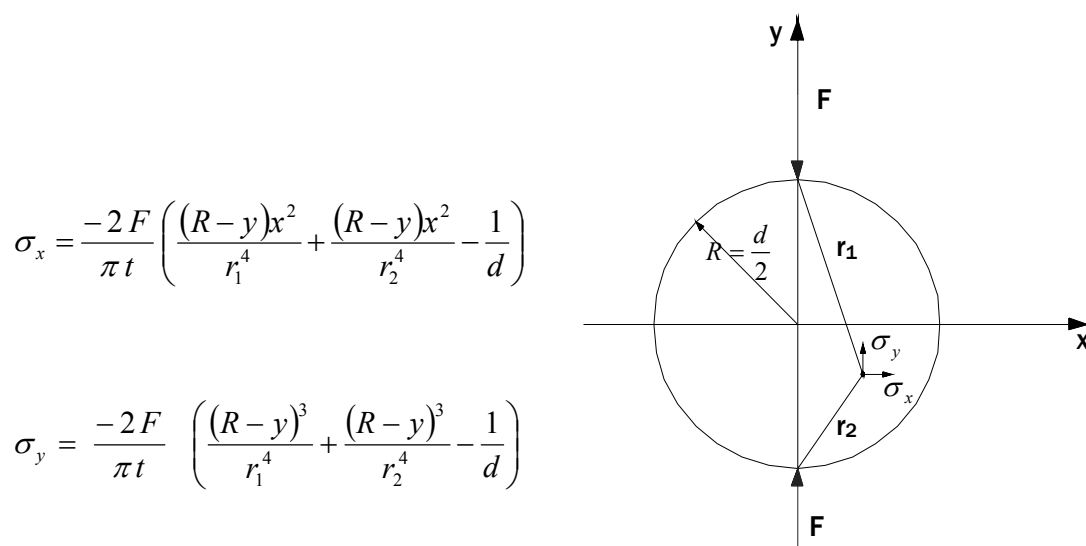


Figura 2.10 – Tensões em um ponto qualquer do corpo-de-prova no ensaio de compressão diametral (PINTO, 1991).

<sup>12</sup> CARNEIRO, F.L. *Um novo método para a determinação da resistência à tração dos concretos*. Comunicação 5ª. Reunião ABNT. Public. Inst. Nac. Tecnol., Rio de Janeiro, 1943. (publicado no Bolletim RILEM nº13 – série antiga, p. 103-127, Paris, 1953).

No centro do corpo-de-prova, para o estado biaxial de tensões, as tensões de tração e compressão são dadas pelas expressões (5) e (6), respectivamente:

$$\sigma_x = \frac{2 F}{100 \pi t d} \quad (\text{Tração}) \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{-6 F}{100 \pi t d} \quad (\text{Compressão}) \quad (6)$$

Onde:  $\sigma_x$  = tensão de tração (MPa);

$\sigma_y$  = tensão de compressão (MPa);

F = carga aplicada (N);

t = espessura do corpo-de-prova (cm);

d = diâmetro do corpo-de-prova (cm).

O corpo-de-prova é submetido a um estado biaxial de tensões, sendo que seções verticais do corpo-de-prova ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração (BALBO, 2000).

Além do estado biaxial de tensões existente na compressão diametral, Monismith *et al* (1990) citam outras duas diferenças importantes entre os ensaio de flexão e de compressão diametral:

- Deformação permanente, usualmente proibida na flexão é permitida nos ensaios de compressão diametral, configurando até como parâmetro para encerramento do ensaio;
- Aplicação de tensões reversas (tração) é impraticável na compressão diametral.

O efeito provável destas diferenças é uma menor vida de fadiga na compressão diametral (MONISMITH *et al*, 1990).

As principais vantagens do ensaio de compressão diametral são (MONISMITH *et al*, 1990; BALBO, 2000 e PINTO, 1991):

- A execução do ensaio é simples;
- O equipamento pode ser utilizado para outros ensaios, como módulo de resiliência e resistência à tração;
- A ruptura é iniciada em uma região de tensões de tração relativamente uniformes;
- Existe um estado biaxial de tensões, que possivelmente representa melhor o estado de tensões do campo;
- Os ensaios podem ser realizados em corpos-de-prova confeccionados em laboratório ou extraídos do pavimento.

Como desvantagens deste ensaio pode-se destacar:

- Embora exista um estado de tensões biaxial no centro do corpo-de-prova, é impossível variar a proporção entre as componentes vertical e horizontal e, conseqüentemente, reproduzir o estado de tensões em locais críticos dentro de um pavimento;
- Este método subestima significativamente a vida de fadiga se a tensão de tração principal é usada como determinante de dano. Mesmo quando a diferença de tensões  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma = \sigma_t - \sigma_c$ ) é usada para prever a vida de fadiga, este método subestima a vida de fadiga, em relação a outros ensaios como flexão simples.

## CAPÍTULO 3

# MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os materiais que foram empregados na moldagem dos corpos-de-prova de concreto asfáltico, as características relevantes dos corpos-de-prova e o programa de ensaios realizado.

São apresentados os agregados e os ligantes asfálticos. Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com o método Marshall e posteriormente submetidos ao ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração ( $\sigma_T$ ). Foram determinados ainda o módulo de resiliência e, posteriormente, a vida de fadiga, através do ensaio de compressão diametral à tensão controlada, ou seja, o número de aplicações de carga necessário até a ruptura do material.

### 3.2. MATERIAIS

#### 3.2.1. AGREGADOS

Os agregados utilizados neste trabalho são britados, de natureza basáltica, provenientes da pedreira Bandeirantes, localizada no município de São Carlos-SP.

Os agregados foram, primeiramente, fracionados através de peneiramento manual. Este processo teve como objetivo a produção de curva granulométrica correspondente ao centro da faixa C do DNER (DNER – ES 313/97). A tabela 3.1 apresenta a faixa granulométrica C do DNER, utilizada para camadas de rolamento, e na figura 3.1 são apresentadas as curvas granulométricas correspondentes aos limites da faixa C e a distribuição adotadas no centro da faixa.

Tabela 3.1 – Faixa Granulométrica C do DNER (DNER – ES 313/97).

PENEIRAS		PORCENTAGEM PASSADA	
		FAIXA C	
ASTM	mm	Limites	Centro
3/4"	19,10	100	100
1/2"	12,70	85-100	92,5
3/8"	9,50	75-100	87,5
nº 4	4,80	50-85	67,5
nº 10	2,00	30-75	52,5
nº 40	0,42	15-40	27,5
nº 80	0,18	8-30	19,0
nº 200	0,074	5-10	7,5

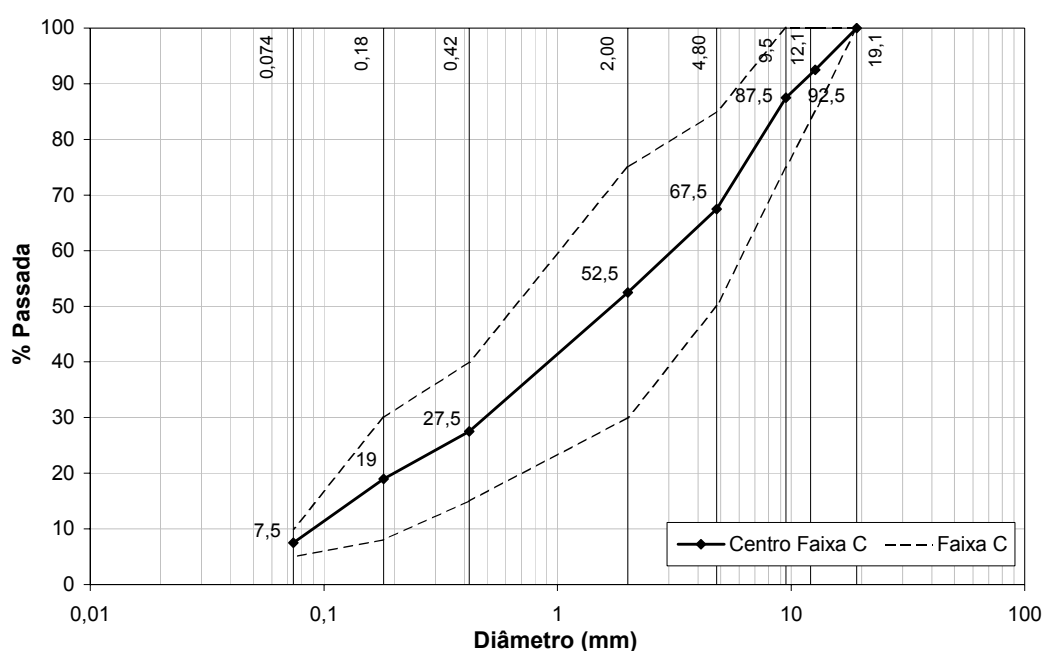


Figura 3.1 – Faixa C do DNER e a composição granulométrica utilizada.

### 3.2.2. LIGANTES ASFÁLTICOS

Foram utilizados, para efeito de comparação, três tipos de ligantes asfálticos fornecidos por uma mesma empresa, a Continental Asfaltos S/A. Os escolhidos foram o asfalto convencional (CAP 20), o asfalto convencional (CAP 20) modificado com 4,5% de polímero SBS (estireno butadieno estireno) e o asfalto convencional (CAP 20) modificado com 20% de BRP (borracha reciclada de pneu).

#### 3.2.2.1. ASFALTO CONVENCIONAL – CAP 20

Na tabela 3.2 são apresentadas as características físicas do asfalto convencional CAP 20.

Tabela 3.2 – Características físicas CAP 20.

ENSAIO	RESULTADO
Penetração, 25° C, 100 g, 5s	54 ( $10^{-1}$ mm)
Ponto de amolecimento	48°C
Índice de susceptibilidade térmica	-1,53
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	189 s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	30 s
Viscosidade absoluta a 60°C (poise)	2102 p
Solubilidade em tricloroetileno (% massa)	99,5%
Ductilidade a 25°C	96 cm
Ponto de fulgor	256 °C

#### 3.2.2.2. ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO SBS

Na tabela 3.3 são apresentadas as características físicas do asfalto modificado com 4,5% do polímero SBS.

Tabela 3.3 – Características físicas CAP 20 + SBS 4,5%.



ENSAIO	RESULTADO
Penetração, 25° C, 100 g, 5s	47 (10 <sup>-1</sup> mm)
Ponto de amolecimento	67,5°C
Índice de susceptibilidade térmica	2,26
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	402 s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	68 s
Viscosidade absoluta a 60°C (poise)	Não foi possível determinar
Ponto de fulgor	278°C

### 3.2.2.3. ASFALTO MODIFICADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEU

Na tabela 3.4 são apresentadas as características físicas do asfalto modificado com borracha reciclada de pneus a 20%.

Tabela 3.4 – Características físicas CAP 20 + BRP 20%.

ENSAIO	RESULTADO
Penetração, 25° C, 100 g, 5s	1 (10 <sup>-1</sup> mm)
Ponto de amolecimento	104°C
Índice de susceptibilidade térmica	0,58
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	-
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	840 s
Viscosidade Saybolt Furol a 185°C	98 s
Viscosidade absoluta a 60°C (poise)	Não foi possível determinar
Ponto de fulgor	241°C

Não foram fornecidas pela Continental Asfaltos informações mais detalhadas acerca da produção deste tipo de asfalto modificado, como por exemplo a granulometria da borracha utilizada .

### 3.3. EQUIPAMENTOS

Para a moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado um compactador Marshall mecânico. Para a determinação da resistência à tração foi utilizada prensa Versatest com capacidade para 15.000 kgf. Nos ensaios de módulo de resiliência e de determinação de vida de fadiga foi utilizado um equipamento pneumático de aplicação de carga dinâmica (figura 3.2). O carregamento é aplicado a cada 1s, com duração de 0,1s.

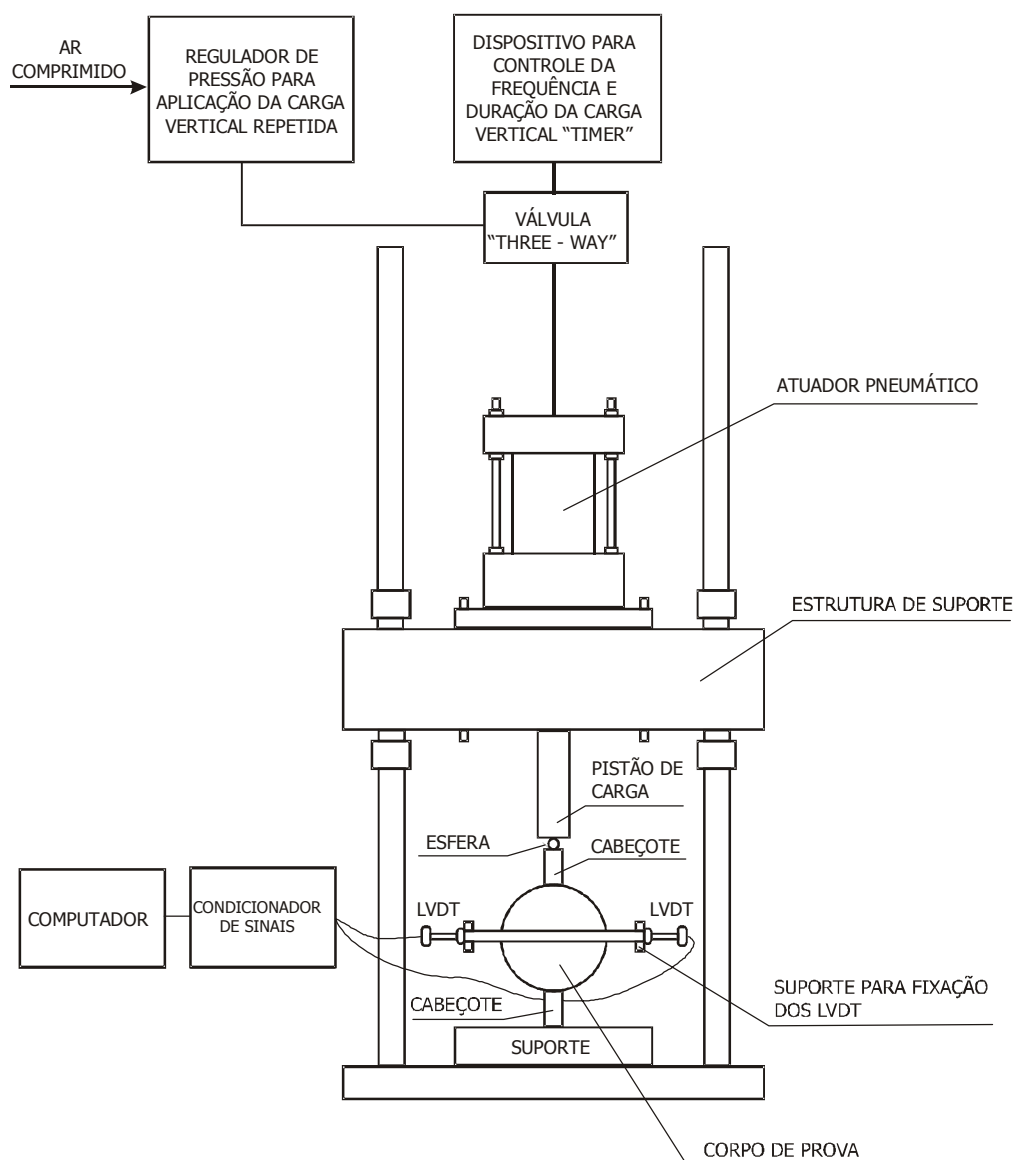


Figura 3.2 – Equipamento para ensaios de compressão diametral dinâmica – Módulo de Resiliência e Fadiga.

A aquisição de dados, tanto de carga como de deslocamentos horizontais, foi registrada por computador. Foram utilizados dois transdutores

para o registro dos deslocamentos horizontais, um, com maior precisão, foi utilizado para registrar os deslocamentos horizontais a cada aplicação de carga, o outro, com menor precisão, registrou apenas o deslocamento horizontal acumulado (“deformação do CP”). Para o registro dos carregamentos aplicados, foi utilizada uma célula de carga com capacidade para 2.000 kgf.

### 3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA E PLANO DE ENSAIOS

Foram moldados 108 corpos-de-prova (CP) de acordo com o método Marshall (NBR 12891). A tabela 3.5 apresenta a distribuição dos corpos-de-prova de acordo com o tipo de ligante asfáltico e o volume de vazios desejado e o plano de ensaios.

	CAP 20			CAP 20 + SBS 4,5%			CAP 20 + 20% BRP		
	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0
Volume de Vazios (%)	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0
Total de corpos-de-prova	12	12	12	12	12	12	12	12	12
CPs para MR e RT	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CPs para Fadiga	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabela 3.5 – Características, quantidade de corpos-de-prova e nº de CPs por ensaio.

Inicialmente, foi realizada uma dosagem Marshall com o asfalto modificado com 4,5% de SBS e faixa C (DNER). A partir desta dosagem, realizada em 5 teores diferentes de asfalto foram determinados os volumes de vazios para cada teor de asfalto. O Índice de vazios foi o parâmetro de controle na confecção dos corpos-de-prova. Os resultados foram extrapolados para os dois outros tipos de asfaltos; para o asfalto modificado com borracha reciclada de pneus os teores correspondentes aos índices de vazios esperados foram diferentes dos outros dois asfaltos, pois foram determinados através de tentativa e erro nas moldagens. A variação do volume de vazios dos corpos-de-prova foi analisada estatisticamente através da distribuição de Student, com nível de confiança igual a 95%.

As temperaturas de moldagem foram controladas a fim de obterem-se as viscosidades adequadas do cimento asfáltico em cada etapa do processo. Na fase de mistura, a viscosidade Saybolt-Furol do cimento asfáltico deve ser de  $85 \pm 10$  s. Já na compactação este valor deve ser de  $140 \pm 15$ s. Na tabela 3.6 são mostrados os intervalos das temperaturas dos materiais durante as moldagens.

Tabela 3.6 – Temperaturas dos componentes e das misturas asfálticas na moldagem.

<b>Temperaturas (°C)</b>	<b>CAP 20</b>	<b>CAP 20 + SBS 4,5%</b>	<b>CAP 20 + 20% BRP</b>
Agregado	165	180	180
CAP (mistura)	163	175	177
Compactação	148	168	170

Para cada condição de ensaio foram preparados 12 corpos-de-prova. Do total destes 12 corpos-de-prova, foram utilizados 2 para a determinação do módulo de resiliência (MR) e da resistência à tração (RT). A execução dos ensaios obedeceu às normas do DNER para os ensaios de compressão diametral, tanto para carregamento estático – RT (DNER-ME 138/94) quanto para carregamento dinâmico – MR (DNER-ME 133/94).

Em conjuntos de 10 corpos-de-prova com mesmas características para uma condição de ensaio (tipo de ligante e volume de vazios) os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão diametral sob 4 diferentes níveis de tensão, sendo que para cada nível de tensão foram feitas duas réplicas. Estes níveis de tensão por compressão diametral corresponderam a 40%, 30%, 20% e 10% da tensão de ruptura estática à tração, previamente determinada. Dois corpos-de-prova foram separados como reserva.

Os ensaios foram executados a 25°C, sob tensão controlada, ou seja, foi aplicada uma carga cíclica constante durante todo o período do ensaio. O término do ensaio foi determinado quando a deformação vertical do corpo-de-prova atingisse 4mm ou com a ruptura completa do corpo-de-prova, sendo

neste momento registrado o número de aplicações efetuadas. Durante a execução do ensaio, foram registrados valores de deslocamento horizontal do corpo-de-prova.

## 3.5. MÉTODOS

### 3.5.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração das misturas asfálticas foi determinada, conforme mencionado anteriormente, de acordo com o método de ensaio DNER-ME 138/94, que normatiza o ensaio e em linhas gerais tem o seguinte procedimento:

- Medir a altura (h) e o diâmetro (d) do corpo-de-prova com paquímetro;
- Colocar o corpo-de-prova na estufa ou refrigerá-lo, de acordo com a necessidade, por um período de 2 horas, de modo a se obter a temperatura especificada para o ensaio. Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados à 25°C e os corpos-de-prova mantidos em sala climatizada na mesma temperatura;
- Ajustar o corpo-de-prova na prensa e aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que se dê a ruptura;
- Com o valor da carga da ruptura (F), calcula-se a resistência à tração do corpo-de-prova com a expressão (7):

$$\sigma_R \text{ ou } RT = \frac{2F}{100.\pi.d.h} \quad (7)$$

onde:

$\sigma_R$  ou RT = Resistência à Tração (MPa);

F = Carga de Ruptura (N);

d = Diâmetro do corpo-de-prova (cm);

h = altura do corpo-de-prova (cm).

### 3.5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência das misturas asfálticas foi determinado, conforme também mencionado anteriormente, de acordo com o método de ensaio DNER-ME 133/94 e em linhas gerais, tem o seguinte procedimento:

- Posicionamento do corpo-de-prova na base da estrutura e fixação do transdutor tipo LVDT;
- Assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova;
- Executar a fase de condicionamento: aplicação de 200 ciclos do carregamento vertical (F) no corpo-de-prova, assegurando que a tensão de tração gerada no corpo-de-prova seja menor ou igual a 30% da resistência à tração estática (RT). A aplicação de carga deve ter frequência de 60 ciclos por minuto e duração de 0,1s. Após condicionamento aplicar 500 ciclos de carregamento e registrar os deslocamentos resilientes para 300, 400 e 500 aplicações;
- Com os valores destes deslocamentos resilientes são calculados os módulos de resiliência de acordo com a expressão (8) a seguir:

$$MR = \frac{F}{100.\Delta.h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência (MPa);

F = Carga vertical aplicada (N);

$\Delta$  = Deformação elástica para 300, 400 e 500 aplicações de carga (cm);

h = Altura do corpo-de-prova (cm);

$\mu$  = Coeficiente de Poison.

O módulo de resiliência será então a média aritmética destes 3 valores obtidos (DNER, 1994). O método recomenda ainda coeficiente de Poison igual a 0,30. Para o cálculo do módulo de resiliência das misturas nesta pesquisa, foi

utilizado programa computacional em LabView. Este programa calcula a média entre todos os deslocamentos registrados durante o ensaio, e não somente dos três recomendados pelo método de ensaio.

### 3.5.3. FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

O ensaio para determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas foi realizado à tensão controlada, aplicando-se cargas verticais repetidas de tal forma que as tensões geradas correspondessem aos valores de 10, 20, 30 e 40% da resistência à tração (RT). Como ainda não há método oficial normatizado no Brasil, o ensaio foi realizado com base na literatura nacional e na experiência de outros centros de pesquisa, como COOPE/UFRJ e UFRGS. O procedimento foi:

- Determinar o carregamento vertical de acordo com a RT e o nível de tensão de acordo com a expressão (9):

$$F = \frac{100 \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot (\%RT)}{2} \quad (9)$$

Onde:

F = Carga aplicada (N);

RT = Resistência à tração (MPa);

(%RT) = Nível de carga em relação à resistência à tração (MPa);

d = Diâmetro do corpo-de-prova (cm);

h = Altura do corpo-de-prova (cm).

- O corpo-de-prova é colocado em um suporte metálico que garante a centralização do corpo-de-prova. Este suporte é o mesmo utilizado no ensaio de módulo de resiliência;
- São colocados 2 transdutores LVDT, para aferição dos deslocamentos horizontais durante o ensaio;

- É estabelecido um limite de deformação vertical de 4 mm que determina o fim do ensaio, sendo a aplicação de carga interrompida automaticamente quando este limite é alcançado;
- Anota-se então o número de aplicações de carga necessário para o fim de ensaio;
- Calcula-se a diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e a deformação resiliente ( $\varepsilon_i$ ), segundo as expressões (10) e (11), respectivamente:

$$\Delta\sigma = \frac{8.F}{100.\pi.d.h} \quad (10)$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad (11)$$

Onde:

$\Delta\sigma$  = Diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

F = Carga aplicada (N);

d = Diâmetro do corpo-de-prova (cm);

h = Altura do corpo-de-prova (cm);

$\varepsilon_i$  = deformação resiliente;

RT = Resistência à tração (MPa);

MR = Módulo de resiliência (MPa).

- Em gráfico *dilog*, projetam-se curvas  $\Delta\sigma \times N$  (número de aplicações de carga na ruptura), e determina-se a curva de fadiga para o material, como a expressão (12) a seguir:

$$N = k1 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k2} \quad (12)$$

Onde:

N = Número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio;

$\Delta\sigma$  = Diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

k1 e k2 = parâmetros determinados no ensaio.



---

## CAPÍTULO 4

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

### 4.1. INTRODUÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. É apresentado o controle estatístico do volume de vazios dos corpos-de-prova, os resultados dos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e de fadiga à tensão controlada.

### 4.2. CONTROLE DO VOLUME DE VAZIOS

O volume de vazios é um importante parâmetro de controle das misturas asfálticas. A fim de tentar estabelecer a influência deste parâmetro na vida de fadiga, este parâmetro foi controlado para que resultassem corpos-de-prova com volumes de vazios de 3, 4 e 5%, aproximadamente. Este controle foi feito após as moldagens, já que este parâmetro não pode ser determinado antes deste processo. Para aceitação ou rejeição dos corpos-de-prova foi utilizada a estatística “t de student”( CARPINETTI, 2003) dada pela expressão (13):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_o}{S / \sqrt{n}} \quad (13)$$

Onde:

$\bar{x}$  = média amostral;

$\mu_0$  = média a ser testada;

S = desvio padrão;

n = número de corpos de prova.

O nível de confiança utilizado foi de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Para todos os grupos de corpos-de-prova o grau de liberdade foi 11, já que todas condições do experimento são compostas de 12 CPs. Com estes dados foi determinado o valor tabelado de t crítico igual a 1,796. Portanto, a média testada poderia representar a amostra se o valor de t de student determinado fosse menor que o valor de t crítico.

Para que todas as amostras se enquadrem dentro deste limite, alguns corpos-de-prova foram rejeitados. No total, para se obter 108 corpos-de-prova, foram moldados 148, sendo 40 rejeitados por estarem com valores de volume de vazios inaceitáveis segundo esse critério. As tabelas 4.1; 4.2 e 4.3 ilustram os valores obtidos no controle do volume de vazios para as misturas utilizadas. No anexo 1 estão as planilhas Marshall dos corpos-de-prova.

Tabela 4.1 – Características dos corpos-de-prova com CAP 20.

Vv alvo (%)	Corpos-de-prova			Teor asf. (%)	Vv Médio (%)	Desvio Padrão	Variância	t student	t crítico NC 95%
5,0	25C	26C	27C	4,6	5,076	0,2348	0,0551	1,1218	1,796
	28C	29C	30C						
	31C	32C	33C						
	34C	35C	36C						
4,0	1C	2C	3C	5,0	4,045	0,2336	0,0546	0,6664	1,796
	4C	5C	6C						
	7C	15C	16C						
	17C	18C	19C						
3,0	8C	9C	10C	5,5	2,982	0,1230	0,0151	-0,5097	1,796
	11C	12C	13C						
	14C	20C	21C						
	22C	23C	24C						

Tabela 4.2 – Características dos corpos-de-prova com CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

Vv alvo (%)	Corpos-de-prova			Teor asf. (%)	Vv Médio (%)	Desvio Padrão	Variância	t student	t crítico NC 95%
5,0	25P	26P	27P	4,7	5,168	0,3827	0,1464	1,5189	1,796
	28P	29P	30P						
	31P	32P	33P						
	34P	35P	36P						
4,0	1P	2P	3P	5,0	4,100	0,2387	0,0570	1,4475	1,796
	4P	5P	6P						
	7P	8P	9P						
	10P	11P	12P						
3,0	13P	14P	16P	5,5	2,983	0,2887	0,0834	-0,2015	1,796
	17P	18P	19P						
	20P	21P	22P						
	23P	2T	3T						

Tabela 4.3 – Características dos corpos-de-prova com CAP 20 modificado com 20% BRP.

Vv alvo (%)	Corpos-de-prova			Teor asf. (%)	Vv Médio (%)	Desvio Padrão	Variância	t student	t crítico NC 95%
5,0	5B	6B	7B	5,0	5,041	0,1670	0,0279	0,8539	1,796
	8B	9B	10B						
	11B	12B	13B						
	14B	15B	16B						
4,0	1B	2B	3B	5,5	4,022	0,1507	0,0227	0,5013	1,796
	4B	17B	18B						
	19B	20B	21B						
	22B	24B	25B						
3,0	23B	26B	27B	6,0	2,991	0,2867	0,0822	-0,1033	1,796
	28B	29B	30B						
	31B	32B	33B						
	34B	35B	36B						

No anexo A, são apresentadas as planilhas Marshall dos corpos-de-prova, com exceção dos valores de fluência e estabilidade que não foram realizados.

### 4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os valores de resistência à tração das misturas são apresentados nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. Foram utilizados 18 corpos-de-prova para a realização dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência. Para cada tipo de corpo-de-prova (tipo de asfalto e volume de vazios) foram selecionados

aleatoriamente 2 CPs para os ensaios. O mesmo par utilizado para a determinação do módulo de resiliência foi utilizado na determinação da resistência à tração. Ambos os ensaios foram realizados à 25°C. Os resultados estão separados de acordo com o asfalto utilizado na mistura.

Os valores de RT das misturas com CAP 20 são apresentados na tabela 4.4. A resistência à tração destas misturas apresentou uma tendência de decréscimo com o aumento do teor de asfalto, para cada aumento de 0,5% do teor de asfalto, a resistência à tração diminui aproximadamente 0,145 MPa.

Tabela 4.4 – Resistência à tração das misturas com CAP 20.

CP	Ta (%)	Vv (%)	RT (MPa)	RT Média(MPa)
30C	4,6	4,67	1,40	1,38
36C	4,6	5,18	1,37	
7C	5,0	4,27	1,30	1,27
18C	5,0	3,85	1,23	
10C	5,5	2,90	1,13	1,12
22C	5,5	2,66	1,12	

Os valores de RT das misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5% estão representados na tabela 4.5. A resistência à tração destas misturas apresentou uma tendência de aumentar com o aumento do teor de asfalto, comportamento contrário ao obtido para as misturas com CAP 20.

Segundo Taira *et al* (2003), um asfalto modificado com polímero deve apresentar maior resistência à tração, fato constatado pelos resultados desta pesquisa. Taira *et al* (2003) constataram ainda em seu trabalho que com aumento do teor de ligante modificado com polímero até 6,0%, a resistência à tração tende a aumentar e tende a decrescer com teores de asfalto maiores que 6,0%. Esta afirmação de Taira *et al* (2003) foi parcialmente constatada nesta pesquisa, uma vez que foram utilizados apenas teores de ligante menores que 6,0%, verificando-se apenas uma tendência de aumento dos valores de RT com o aumento dos teores de asfalto modificado com polímero.

Tabela 4.5 – Resistência à tração das misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

CP	Ta (%)	Vv (%)	RT (MPa)	RT Média(MPa)
25P	4,7	5,19	1,53	1,63
32P	4,7	4,77	1,73	
7P	5,0	4,12	1,68	1,74
8P	5,0	4,15	1,80	
18P	5,5	2,86	2,13	2,11
21P	5,5	2,99	2,08	

Na tabela 4.6 estão os valores de RT para as misturas com CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneus. Estes valores praticamente não sofreram influência do teor de asfalto; para os três teores a RT permaneceu em torno de 1,20 MPa.

Segundo Faxina (2002) e Pinheiro *et al* (2003), misturas com adição de borracha no ligante apresentam perda de resistência à tração de até 40% em relação a misturas com ligante sem borracha. Estas misturas com ligante modificado com borracha necessitam de maior teor de ligante para mesmos volumes de vazios, e este fato deve ser considerado na análise.

A resistência à tração das misturas com asfalto modificado com borracha reciclada de pneus desta pesquisa apresentou um comportamento diferente para mesmos teores de asfalto.

Para 5,0% de teor de asfalto, a RT das misturas com asfalto modificado com borracha de pneus apresentou uma perda aproximada de 7% em relação às misturas com CAP 20, já para teor de 5,5% de asfalto, as misturas com asfalto modificado com borracha apresentaram um ganho aproximado de 9%.

Tabela 4.6 – Resistência à tração das misturas com CAP 20 modificado com 20% BRP.

CP	Ta (%)	Vv (%)	RT (MPa)	RT Média(MPa)
16B	5,0	4,79	1,21	1,18
15B	5,0	5,16	1,15	
17B	5,5	3,76	1,21	1,22
25B	5,5	4,01	1,24	
30B	6,0	2,85	1,20	1,20
36B	6,0	3,38	1,20	

A figura 4.1 ilustra graficamente a variação das resistências à tração das misturas em relação ao teor de asfalto. E pode ser melhor observado o comportamento da resistência à tração de cada mistura. Enquanto a mistura com CAP 20 modificado com polímero SBS ganha capacidade estrutural (PINHEIRO *et al*, 2003) e a mistura com CAP 20 perde, permanece constante a resistência à tração com aumento do teor de ligante das misturas de CAP 20 modificado com borracha reciclada de pneus.

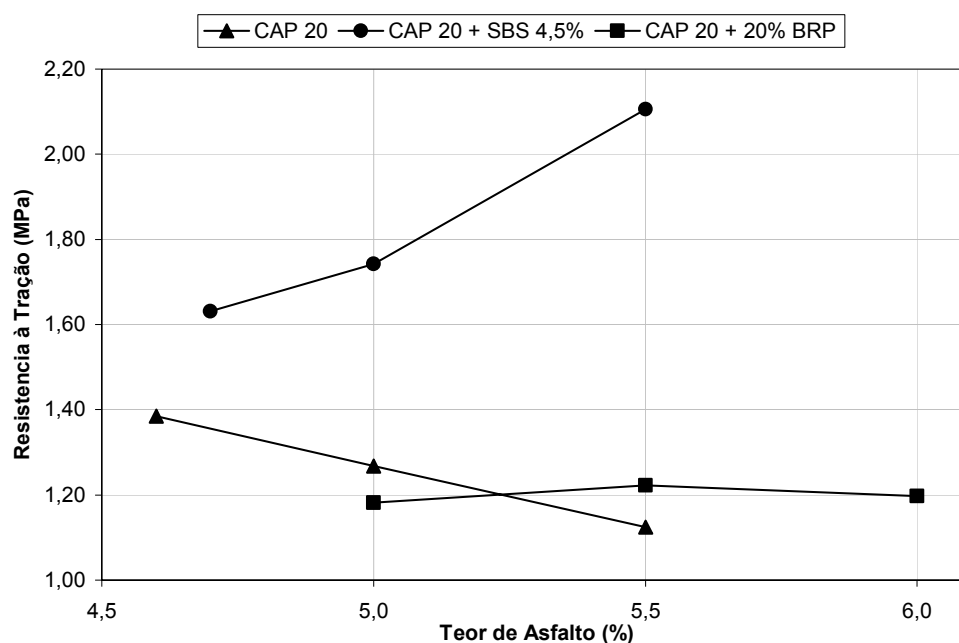


Figura 4.1 – Variação da RT das misturas em relação ao teor de ligante.

Na figura 4.2, pode ser observado o comportamento da resistência à tração das misturas em relação ao volume de vazios dos corpos-de-prova. O volume de vazios é um parâmetro que varia inversamente ao teor de asfalto, portanto, o comportamento da RT, quando analisado em relação a aumentos de volumes de vazios é contrário ao comportamento quando comparado com o aumento de teor de asfalto.

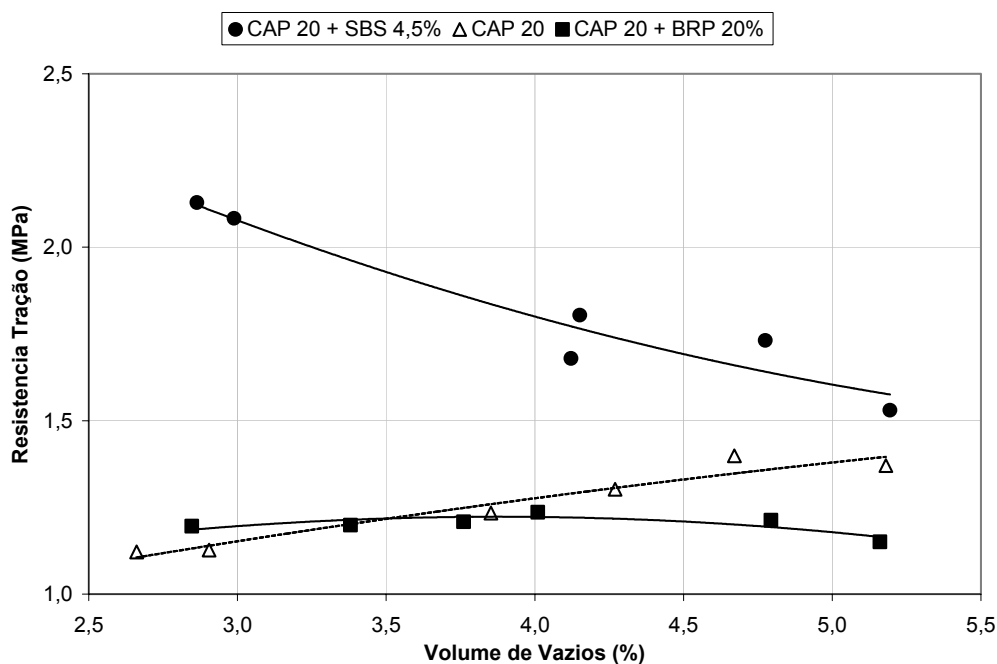


Figura 4.2 – Variação da RT das misturas em relação ao volume de vazios.

#### 4.4. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para a determinação do módulo de resiliência das misturas, foram utilizados os mesmos 18 corpos-de-prova utilizados na resistência à tração. Estes corpos-de-prova foram antes submetidos ao ensaio de módulo de resiliência, e posteriormente rompidos para a determinação da resistência à tração. Foi utilizada, para cada ensaio de módulo, a menor carga possível para uma boa leitura de deslocamentos. Nenhum valor de carga aplicada superou 25% da resistência à tração, fato esse verificado a *posteriori*.

Os valores de módulo de resiliência das misturas são apresentados nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, a seguir.

Tabela 4.7 – Módulo de Resiliência das misturas com CAP 20.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR (MPa)	MR Médio(MPa)
30C	4,6	4,67	3939	4171
36C	4,6	5,18	4403	
7C	5,0	4,27	3773	3395
18C	5,0	3,85	3016	
10C	5,5	2,90	3032	2889
22C	5,5	2,66	2746	

Taira *et al* (2003) afirmaram que, utilizando ligante modificado com polímero SBS, obtém-se ligantes mais rígidos, com módulos de resiliência maiores do que os de misturas com CAP 20. Os ensaios realizados nesta pesquisa mostraram o mesmo comportamento.

Esses autores afirmaram ainda que o módulo de resiliência não sofre influência do teor de ligante, mas este fato não foi comprovado nos resultados dos ensaios desta pesquisa, em que aumentos no teor de ligante resultaram em valores maiores de módulo para CAP 20 modificado com polímero e menores para CAP 20. Já para as misturas com ligante modificado com borracha reciclada de pneus, a variação do módulo foi pouco sensível a alterações no teor de asfalto.

Tabela 4.8 – Módulo de Resiliência das misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5 %.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR (MPa)	MR Médio(MPa)
25P	4,7	5,19	4798	4954
32P	4,7	4,77	5111	
7P	5,0	4,12	5135	5265
8P	5,0	4,15	5396	
18P	5,5	2,86	8577	7476
21P	5,5	2,99	6375	



A diminuição do MR verificada nas misturas com CAP 20 modificado com borracha em relação às outras misturas representa uma maior flexibilidade da mistura (menor rigidez), levando a menores tensões absorvidas pelo revestimento, que se torna mais deformável (PINHEIRO *et al*, 2003).

Tabela 4.9 – Módulo de Resiliência das misturas com CAP 20 modificado com 20% BRP.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR (MPa)	MR Médio(MPa)
16B	5,0	4,79	2766	2845
15B	5,0	5,16	2924	
17B	5,5	3,76	2107	2485
25B	5,5	4,01	2862	
30B	6,0	2,85	2918	3145
36B	6,0	3,38	3372	

O comportamento dos valores de módulo de resiliência podem ser melhor observados nas figuras 4.3 e 4.4, onde são representados os valores dos módulos em relação ao teor de ligante e em relação ao volume de vazios dos corpos-de-prova, respectivamente, para os três tipos de ligante.

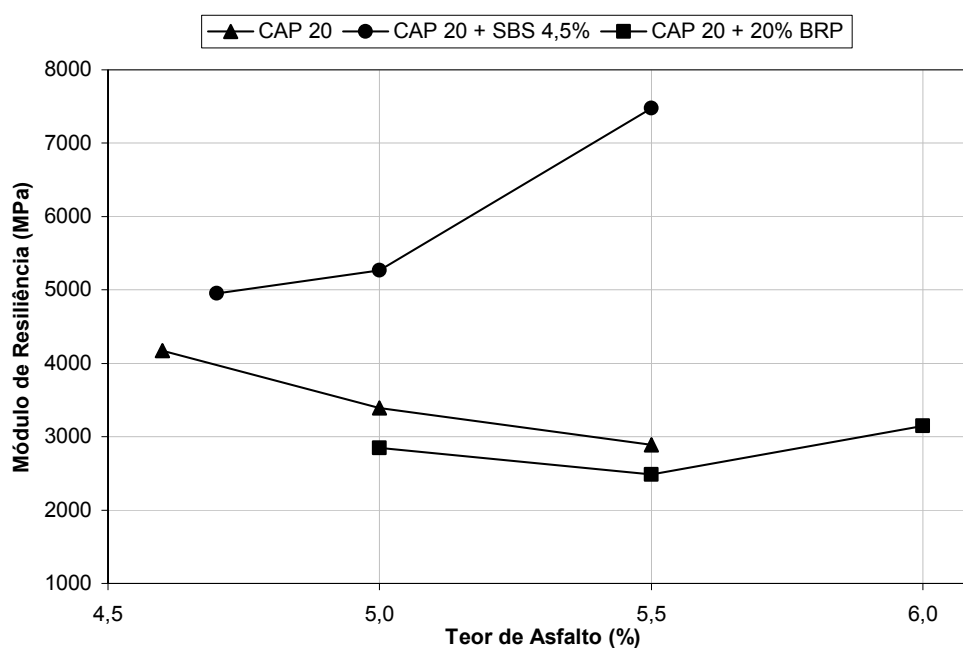


Figura 4.3 – Variação da MR das misturas em relação ao teor de ligante.

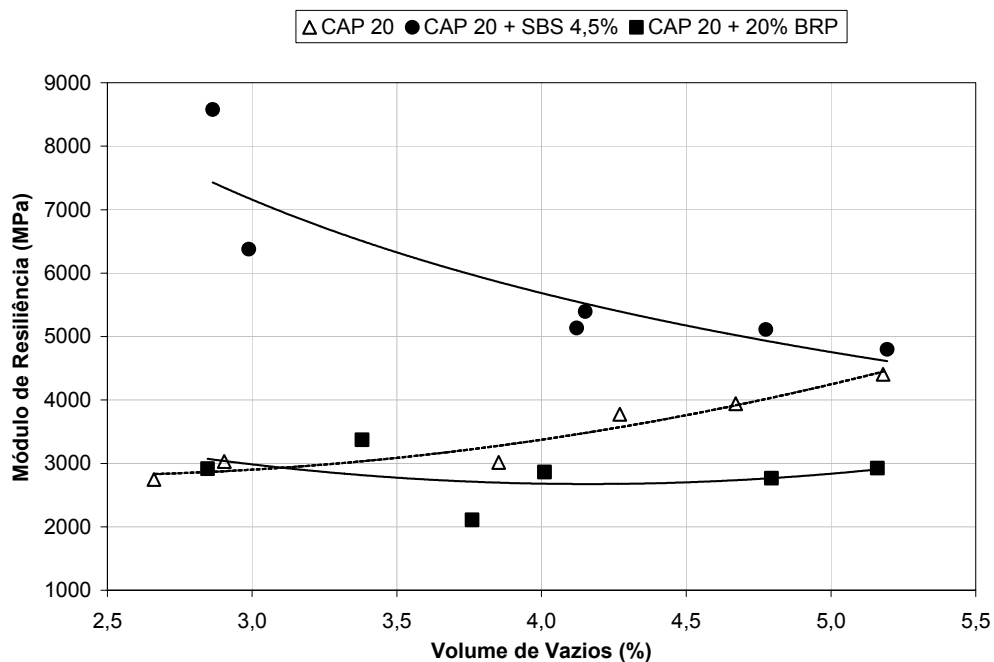


Figura 4.4 – Variação da MR das misturas em relação ao volume de vazios.

No geral, o comportamento do módulo de resiliência para os três tipos de ligante seguiu aproximadamente mesma tendência da resistência à tração, nas figuras 4.5 e 4.6 podem ser observadas estas semelhanças entre os comportamentos do MR e da RT, em relação ao teor de asfalto e volume de vazios dos corpos-de-prova, respectivamente.

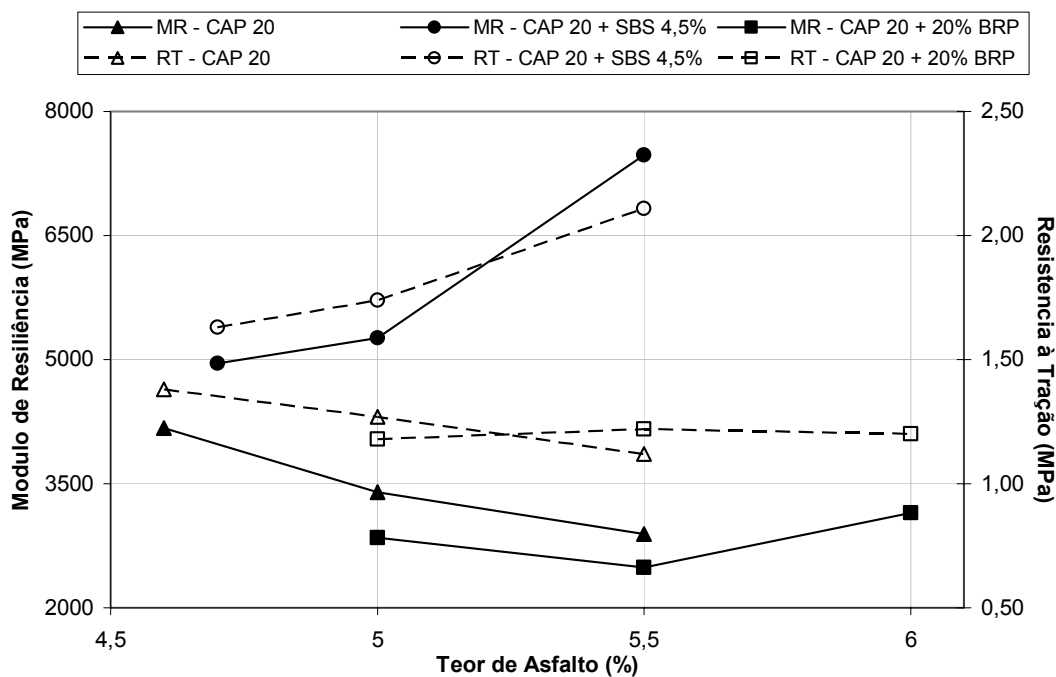


Figura 4.5 – Variação do MR e da RT das misturas em relação ao teor de asfalto.

Os módulos de resiliência das misturas com ligante modificado com polímero SBS apresentaram aumento e as misturas com CAP 20 apresentaram decréscimo com o aumento do teor de ligante, assim como os valores de resistência à tração. Para as misturas com CAP 20 modificado com borracha de pneus a influência do teor de ligante no comportamento do módulo de resiliência foi pouco expressiva, mas com uma variação de aproximadamente 26%, enquanto que para a resistência à tração, essa variação foi de aproximadamente 3,5%.

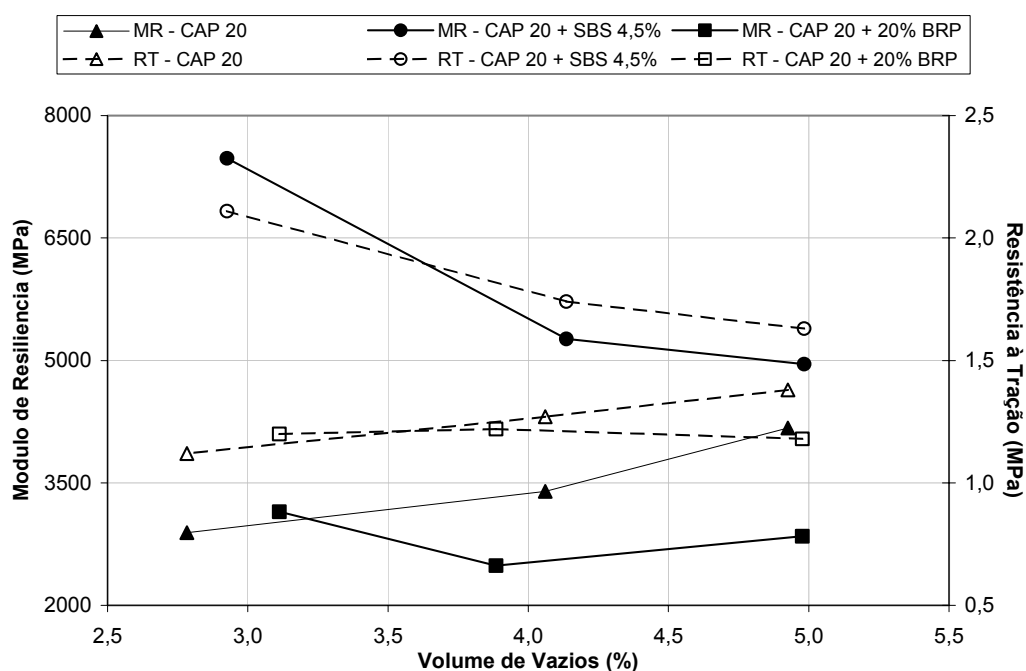


Figura 4.6 – Variação do MR e RT das misturas em relação ao volume de vazios.

#### 4.5. RELAÇÃO MR/RT

Muitos autores apresentam a relação MR/RT como um parâmetro de comparação entre as misturas no que diz respeito ao comportamento à fadiga. Pinheiro *et al* (2003) e Leite *et al* (2000) sugerem que misturas com relações MR/RT da ordem de 3000 apresentam um bom comportamento estrutural, ou seja, são flexíveis enquanto possuem boa resistência à tração. Portanto, para uma mesma RT, uma relação MR/RT menor é uma vantagem, porque permite o uso de camadas menos espessas para uma mesma vida de fadiga.

As tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam, respectivamente a relação MR/RT para as misturas com CAP 20, CAP 20 modificado com SBS 4,5% e CAP 20 modificado com 20% BRP.

As misturas com CAP 20 apresentaram relações MR/RT decrescendo de aproximadamente 3000 para o menor teor de asfalto até aproximadamente 2500 para o maior teor de asfalto. Segundo Leite *et al* (2000), valores próximos a 3000 caracterizam misturas com boa flexibilidade e resistência à tração.

Tabela 4.10 – Relação MR/RT das misturas com CAP 20.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR/RT	MR/RT Média
30C	4,6	4,67	2816	3014
36C	4,6	5,18	3213	
7C	5,0	4,27	2897	2671
18C	5,0	3,85	2445	
10C	5,5	2,90	2691	2570
22C	5,5	2,66	2449	

Entre as três misturas, a com CAP 20 modificado com SBS 4,5% foi a que apresentou relações MR/RT mais próximas a 3000. Todos os valores giraram em torno de 3000, com pouca variação, exceto pelo corpo-de-prova 18P, que apesar de ter apresentado uma RT próxima à sua réplica, apresentou um MR aproximadamente 35% maior, elevando a relação MR/RT para 4030.

Tabela 4.11 – Relação MR/RT das misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR/RT	MR/RT Média
25P	4,7	5,19	3136	3044
32P	4,7	4,77	2952	
7P	5,0	4,12	3057	3024
8P	5,0	4,15	2991	
18P	5,5	2,86	4030	3545
21P	5,5	2,99	3060	

As misturas com CAP modificado com 20% BRP apresentaram as menores relações MR/RT, demonstrando uma maior flexibilidade destas misturas. Comparando com as misturas com CAP 20, constata-se uma maior flexibilidade das misturas com CAP 20 modificado com 20% BRP, visto que os valores de RT das misturas são semelhantes, a redução da relação MR/RT destas misturas deve-se aos baixos valores de MR, caracterizando misturas com maior flexibilidade.

Tabela 4.12 – Relação MR/RT das misturas com CAP 20 modificado com 20% BRP.

CP	Ta (%)	Vv (%)	MR/RT	MR/RT Média
16B	5,0	4,79	2280	2411
15B	5,0	5,16	2542	
17B	5,5	3,76	1743	2029
25B	5,5	4,01	2315	
30B	6,0	2,85	2440	2626
36B	6,0	3,38	2813	

Nas figuras 4.7 e 4.8, as relações MR/RT estão ilustradas em relação ao teor de asfalto e em relação ao volume de vazios dos corpos-de-prova, respectivamente.

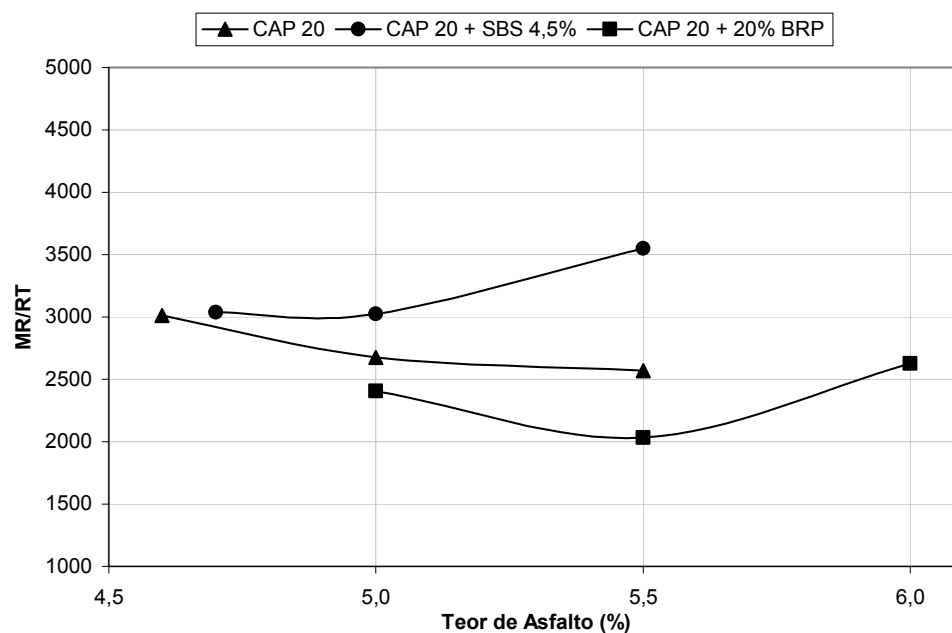


Figura 4.7 – Variação da relação MR/RT das misturas em relação ao teor de ligante.

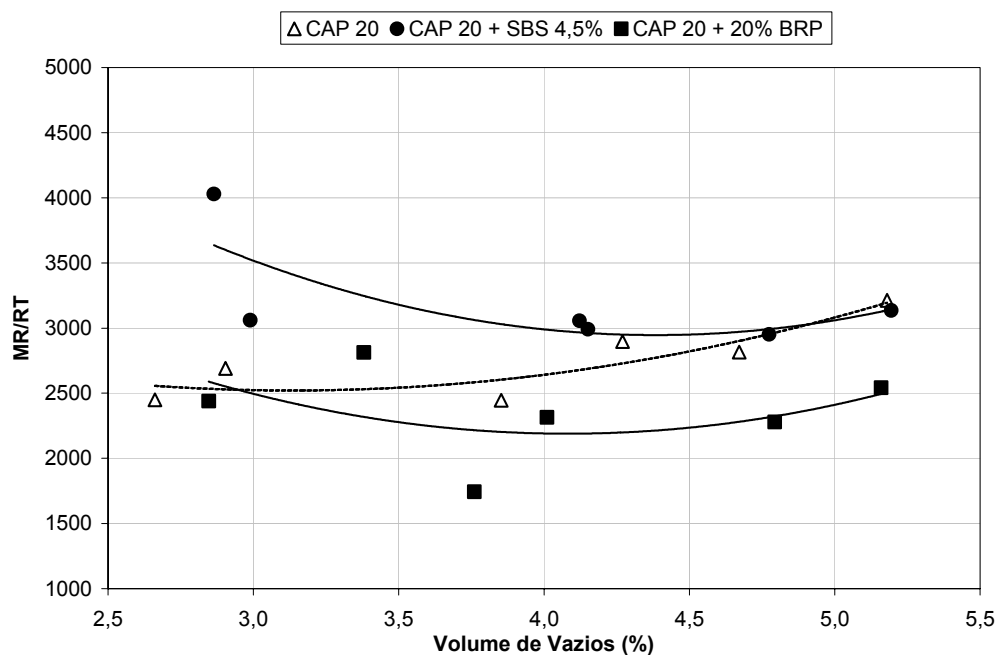


Figura 4.8 – Variação da relação MR/RT das misturas em relação ao volume de vazios.

## 4.6. FADIGA À TENSÃO CONTROLADA

Como já mencionado anteriormente, a vida de fadiga foi determinada através de ensaio de compressão diametral a tensão controlada e o critério de ruptura foi uma deformação vertical acumulada de 4mm do corpo-de-prova. A vida de fadiga é expressa em função da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) entre a tensão de tração e de compressão, e em função do parâmetro  $\varepsilon_i$  (deformação resiliente), calculado através da expressão (14):

$$N = k1 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k2} \quad \varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad (14)$$

Onde:

N = Número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio;

$\varepsilon_i$  = Deformação resiliente específica;

k1 e k2 = parâmetros determinados no ensaio;

% RT = porcentagem da RT utilizada no ensaio (MPa);

MR = módulo de resiliência (MPa).

As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos de fadiga para as misturas com CAP 20, para volumes de vazios de 3, 4 e 5%, respectivamente. São apresentados em cada tabela dois modelos de fadiga, um em função da diferença de tensões, e outro em função da deformação resiliente calculada.

Tabela 4.13 – Vida de fadiga CAP 20 e volume de vazios 3%.

CAP 20					
Vv = 3%		RT = 1,12 MPa		MR = 2889 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
8C	4262,7	39,17	1,76	1,524E-04	457
9C	4243,3	39,20	1,76	1,525E-04	523
11C	3177,6	29,14	1,31	1,134E-04	1228
12C	3197,0	29,29	1,32	1,140E-04	3454
13C	2112,0	19,33	0,87	7,523E-05	11948
14C	2160,4	19,72	0,89	7,671E-05	15189
23C	1051,3	9,69	0,44	3,770E-05	300686
24C	1051,3	9,60	0,43	3,734E-05	370094
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 7080 (1/\Delta\sigma)^{4,64}$		
			$N = 1,01 \times 10^{-15} (1/\epsilon_i)^{4,64}$		

Tabela 4.14 – Vida de fadiga CAP 20 e volume de vazios 4%.

CAP 20					
Vv = 4%		RT = 1,27 MPa		MR = 3395 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
1C	4844,0	39,44	2,00	1,475E-04	435
2C	4873,0	39,38	2,00	1,473E-04	708
3C	3720,2	29,81	1,51	1,115E-04	1027
4C	3652,3	29,55	1,50	1,106E-04	1693
5C	2460,7	19,93	1,01	7,457E-05	2791
6C	2422,0	19,66	1,00	7,353E-05	8371
15C	1220,7	9,98	0,51	3,732E-05	33064
16C	1222,6	9,88	0,50	3,695E-05	54248
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 4871 (1/\Delta\sigma)^{3,16}$		
			$N = 4,39 \times 10^{-10} (1/\epsilon_i)^{3,16}$		

Tabela 4.15 – Vida de fadiga CAP 20 e volume de vazios 5%.

CAP 20					
Vv = 5%		RT = 1,38 MPa		MR = 4171 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
25C	5386,5	39,67	2,20	1,317E-04	517
26C	5367,1	39,56	2,19	1,485E-04	593
27C	4068,9	29,93	1,66	1,123E-04	748
28C	4059,2	29,64	1,64	1,113E-04	1754
29C	2654,5	19,38	1,07	7,272E-05	10427
31C	2650,6	19,75	1,09	7,414E-05	6842
32C	1278,8	9,39	0,52	3,525E-05	78797
33C	1317,6	9,77	0,54	3,414E-05	77148
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 8717 (1/\Delta\sigma)^{3,59}$		
			$N = 8,88 \times 10^{-12} (1/\epsilon_i)^{3,59}$		

A figura 4.9 ilustra as três curvas de fadiga para as misturas com CAP 20. O coeficiente de determinação  $R^2$  corresponde à qualidade do “ajuste” do modelo em relação aos pontos, quanto mais próximo de 1, menor a dispersão dos pontos ensaiados em relação ao modelo. O modelo Vv 3% apresenta o melhor ajuste (0,9866), Os outros dois modelos apresentam também excelentes valores de  $R^2$ .

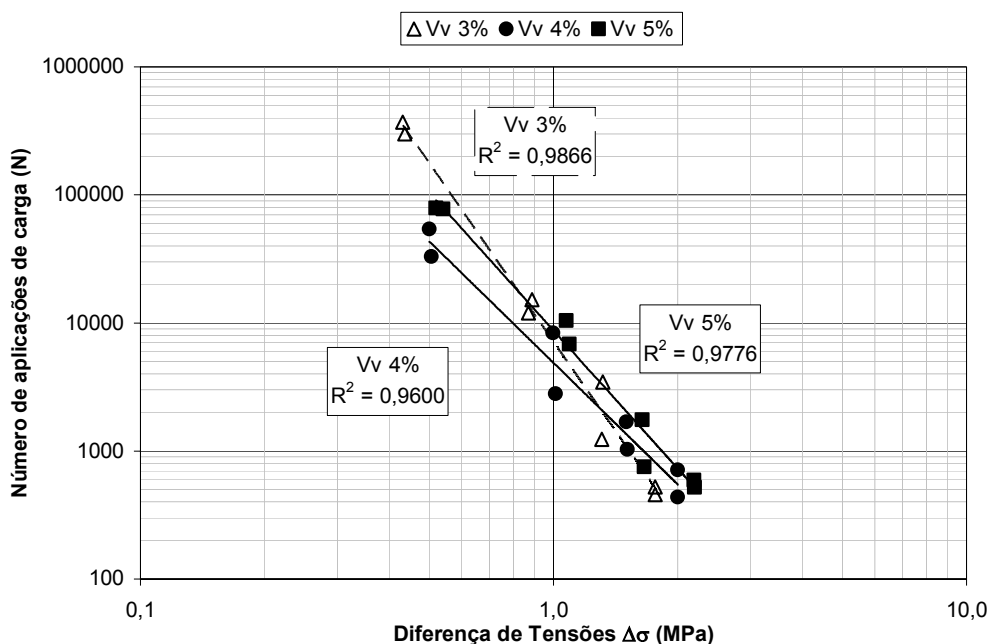


Figura 4.9 – Curvas de fadiga em função da diferença de tensões para CAP 20.



Em Pinto (1991), o coeficiente  $k_2$ , que indica a inclinação da curva, variou entre 2,32 e 2,88. Na literatura, outros autores apontam valores deste coeficiente entre 1,58 até 7,1 (MONISMITH *et al*, 1990). Para as misturas de CAP 20,  $k_2$  variou de 3,15 a 4,64.

Ainda observando-se a figura 4.9, verifica-se que a mistura com 3% de volume de vazios, segundo sua curva de fadiga, é mais resistente a fadiga a baixas tensões do que as outras duas, e a tensões mais elevadas, as outras duas misturas tem um melhor desempenho, apesar de terem comportamentos similares, a mistura com 4% de volume de vazios é mais resistente à fadiga. Estas comparações somente são válidas pressupondo-se mesmo módulo de resiliência para as misturas. Mais adiante neste capítulo o desempenho das misturas é comparado utilizando-se valores de tensões e deformações obtidos computacionalmente através do programa Elsym5.

A vida de fadiga pode também ser representada pela deformação resiliente, um parâmetro calculado que pondera a interferência do módulo de resiliência inicial da mistura. A figura 4.10 mostra esta representação. Para uma mesma deformação resiliente, por exemplo 0,0001, as misturas com 3% de volume de vazios apresentaram melhor desempenho à fadiga.

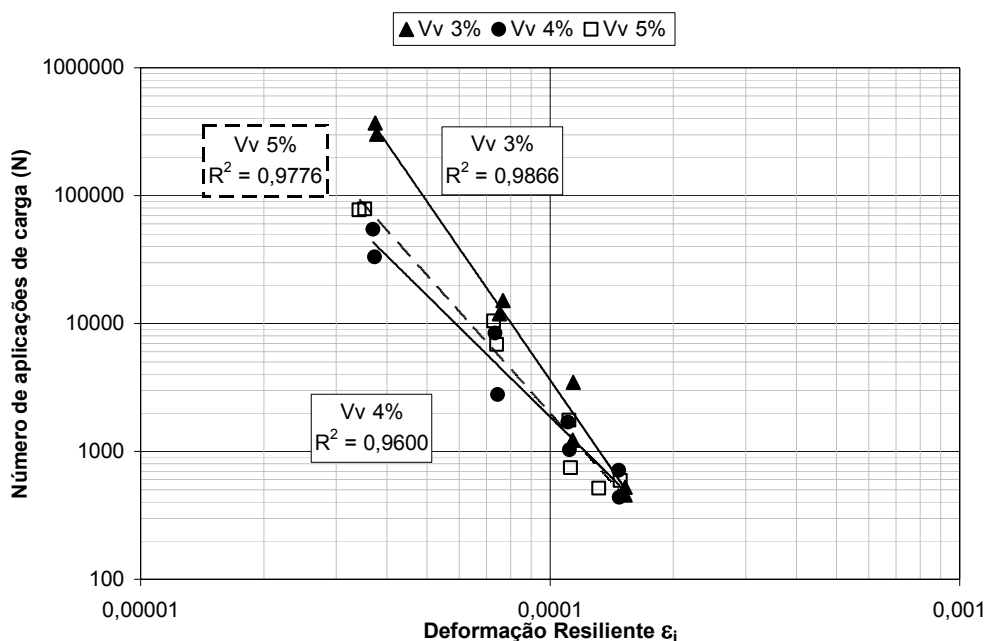


Figura 4.10 – Curvas de fadiga em função da deformação resiliente para CAP 20.

A curva de Vv igual 3%, que para uma mesma deformação resiliente apresenta o melhor desempenho, é também a com relação MR/RT mais próxima de 3000 (3014), valor apontado na literatura (LEITE *et al*, 2000 & PINHEIRO *et al*, 2003) como um parâmetro representativo de uma mistura com bom comportamento à fadiga. À medida que a relação MR/RT diminui, nota-se uma tendência à diminuição da resistência da mistura. A menor relação MR/RT foi de 2570 para Vv 5%, com comportamento bem similar à curva Vv 4%.

Se o módulo de resiliência for considerado separadamente, o melhor desempenho para uma mesma deformação, é creditado ao menor módulo (2889 MPa), da curva com Vv igual a 3%. A mistura menos flexível, ou seja, com maior módulo de resiliência (4171) é a mistura com Vv igual a 5%, e é também a que apresenta, juntamente com a curva Vv 4%, o pior desempenho para uma mesma deformação.

As tabelas 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga e os modelos obtidos para as misturas com CAP 20 modificado com 4,5% de polímero SBS, para volumes de vazios de 3, 4 e 5%, respectivamente. São apresentadas, ainda, em cada tabela, assim como nas anteriores, dois modelos de fadiga, em função da diferença de tensão, e outro em função da deformação resiliente calculada.

Tabela 4.16 – Vida de fadiga CAP 20 + SBS 4,5% e volume de vazios 3%.

CAP 20 + SBS 4,5%					
Vv = 3%		RT = 2,11 MPa		MR = 7476 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
13P	7825,2	37,87	3,19	1,067E-04	1985
14P	8166,9	39,56	3,33	1,114E-04	3283
16P	6080,3	29,50	2,48	8,309E-05	5053
17P	6103,4	29,71	2,50	8,371E-05	12016
19P	4214,1	20,33	1,71	5,727E-05	30459
20P	4088,3	19,91	1,68	5,608E-05	58302
22P	2053,8	9,89	0,83	2,785E-05	351110
23P	2034,5	9,93	0,84	2,798E-05	350994
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 2,10 \times 10^5 (1/\Delta\sigma)^{3,60}$		
			$N = 1,61 \times 10^{11} (1/\epsilon_i)^{3,60}$		

Tabela 4.17 – Vida de fadiga CAP 20 + SBS 4,5% e volume de vazios 4%.

<b>CAP 20 + SBS 4,5%</b>					
<b>Vv = 4%</b>		<b>RT = 1,74 MPa</b>		<b>MR = 5265 MPa</b>	
<b>CP</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>% RT</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
1P	6397,0	38,03	2,65	1,038E-04	987
2P	6878,4	39,98	2,79	1,091E-04	1963
3P	5172,1	30,19	2,10	8,237E-05	2231
4P	5123,0	30,01	2,09	8,187E-05	5433
5P	3591,3	20,98	1,46	5,724E-05	10167
6P	3487,6	20,07	1,40	5,477E-05	27478
9P	1786,1	10,49	0,73	2,863E-05	182764
10P	1734,1	10,08	0,70	2,749E-05	261254
<b>Modelos de Fadiga</b>			<b><math>N = 6,21 \times 10^4 (1/\Delta\sigma)^{3,82}</math></b>		
			<b><math>N = 9,26 \times 10^{-13} (1/\epsilon_i)^{3,82}</math></b>		

Tabela 4.18 – Vida de fadiga CAP 20 + SBS 4,5% e volume de vazios 5%.

<b>CAP 20 + SBS 4,5%</b>					
<b>Vv = 5%</b>		<b>RT = 1,63 MPa</b>		<b>MR = 4954 MPa</b>	
<b>CP</b>	<b>Carga (N)</b>	<b>% RT</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_i</math></b>	<b>N</b>
26P	6404,6	39,84	2,60	1,013E-04	707
27P	6394,0	39,75	2,59	1,011E-04	2057
28P	4933,2	30,79	2,01	7,830E-05	3928
29P	4824,6	29,83	1,95	7,587E-05	2961
30P	3307,6	20,76	1,35	5,279E-05	11751
31P	3216,4	20,20	1,32	5,137E-05	17305
33P	1598,5	9,89	0,65	2,516E-05	60306
34P	1588,8	9,85	0,64	2,505E-05	157570
<b>Modelos de Fadiga</b>			<b><math>N = 2,78 \times 10^4 (1/\Delta\sigma)^{3,13}</math></b>		
			<b><math>N = 4,49 \times 10^{-10} (1/\epsilon_i)^{3,13}</math></b>		

As misturas de CAP 20 modificado com polímero SBS foram as que apresentaram as curvas de fadiga com maiores dispersões entre os três tipos de asfalto. Pelo fato de terem apresentado maiores valores de número de aplicações para ruptura, apresentaram também maior dispersão entre réplica. Mas, mesmo assim, os coeficientes  $R^2$  foram muito bons, variando de 0,9442 para Vv 5% até 0,9633 para Vv 3% e a curva Vv 4% apresentando  $R^2$  igual a 0,9629. As curvas para estas misturas estão representadas na figura 4.11.

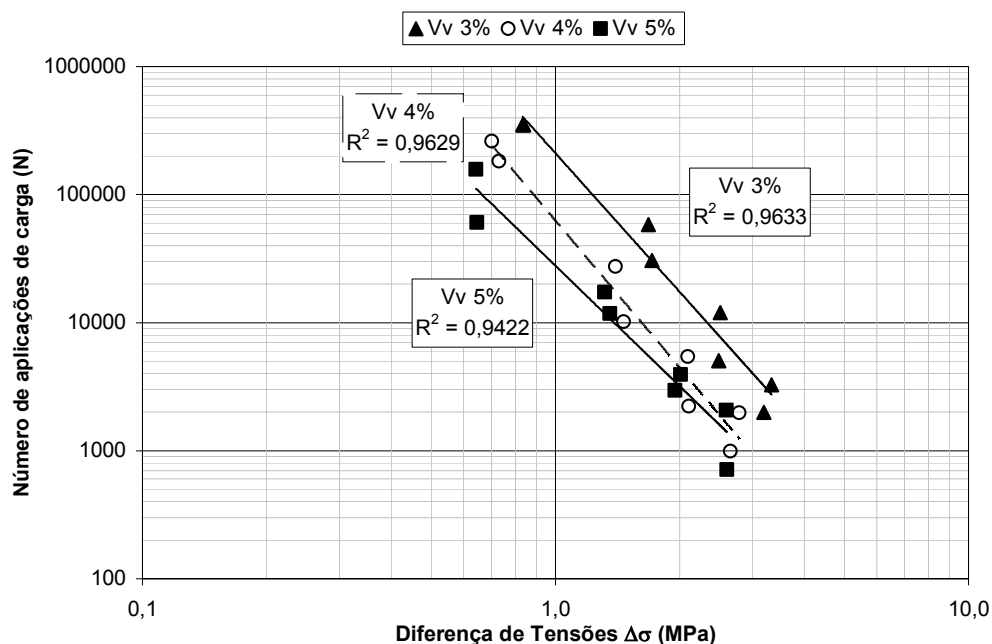


Figura 4.11 – Curvas de fadiga em função da diferença de tensões para CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

Observando-se a figura 4.11, nota-se que as curvas de fadiga para as misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5% apresentaram um certo paralelismo, com coeficientes  $k_2$  iguais a 3,60; 3,82 e 3,13 para volumes de vazios iguais a 3, 4 e 5% respectivamente. Considerando-se o mesmo módulo de resiliência para os três volumes de vazios, pode-se dizer que a mistura com 3% de volume de vazios é mais resistente à fadiga do que as outras.

A maior inclinação da curva com volume de vazios igual a 4% indica uma maior susceptibilidade desta mistura à variação de diferença de tensões, com pequenas alterações de diferença de tensões, ela ganha ou perde capacidade de aplicações de carga mais rapidamente do que as outras duas curvas.

São apresentadas na figura 4.12 as curvas de fadiga correspondentes às misturas com asfalto modificado com SBS 4,5% em relação à deformação específica resiliente calculada para os três volumes de vazios, 3, 4 e 5%.

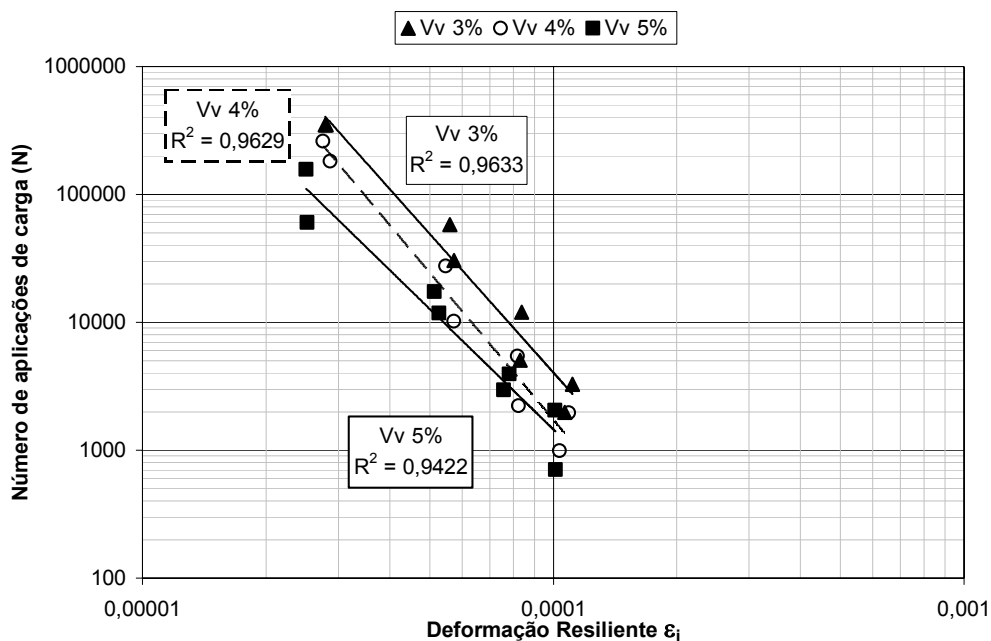


Figura 4.12 – Curvas de fadiga em função da deformação resiliente para CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

Novamente, analisando o comportamento das curvas juntamente com os valores das relações MR/RT, a mistura com maior valor de MR/RT (3% - 3545) aparece com melhor desempenho, contrariando a tendência obtida para o asfalto CAP 20, e esta mistura também é a mais rígida (menos deformável) dentre os três com este asfalto, com MR igual a 7476 MPa.

Entre as outras duas misturas (Vv 4% e Vv 5%), houve pouca variação das relações MR/RT e dos módulos de resiliência. De acordo com a tendência observada para o asfalto CAP 20, a curva Vv 4% apresentaria o pior desempenho, mas isto não acontece para o asfalto modificação com polímero SBS, onde a curva com Vv 5% aparece com um pior desempenho para uma mesma deformação. A diferença entre os valores de RT obtidos para estas três misturas pode explicar este comportamento. A mistura Vv 5% apresentou RT aproximadamente 7% menor do que a Vv 4%, que por sua vez apresentou RT aproximadamente 18% menor do que a Vv 3%.

As tabelas 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga para as misturas com CAP 20 modificado com 20% de borracha reciclada de pneus, para volumes de vazios de 3, 4 e 5%, respectivamente. São apresentados, ainda, em cada tabela, assim como nas anteriores, dois modelos de fadiga, um em função da diferença de tensão, e outro em função da deformação resiliente calculada.

Tabela 4.19 – Vida de fadiga CAP 20 + 20% BRP e volume de vazios 3%.

CAP 20 + 20% BRP					
Vv = 3%		RT = 1,20 MPa		MR = 3145 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
27B	4774,5	40,685	1,95	1,549E-04	479
28B	4628,4	39,191	1,88	1,492E-04	632
29B	3604,3	30,786	1,47	1,172E-04	1372
31B	3605,2	30,674	1,47	1,168E-04	1952
32B	2210,3	19,002	0,91	7,235E-05	12655
33B	2264,2	19,552	0,94	7,444E-05	12369
34B	1239,9	10,604	0,51	4,037E-05	87670
35B	1266,9	10,748	0,51	4,092E-05	93230
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 7448 (1/\Delta\sigma)^{3,89}$		
			$N = 8,41 \times 10^{-13} (1/\epsilon_i)^{3,89}$		

Tabela 4.20 – Vida de fadiga CAP 20 + 20% BRP e volume de vazios 4%.

CAP 20 + 20% BRP					
Vv = 4%		RT = 1,22 MPa		MR = 2485 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
19B	4900,8	40,80	2,00	2,041E-04	648
20B	4826,0	40,07	1,96	2,004E-04	703
18B	3692,9	30,70	1,50	1,536E-04	1016
21B	3836,8	32,06	1,57	1,603E-04	1913
22B	2426,0	20,04	0,98	1,002E-04	6105
24B	2479,9	20,94	1,02	1,048E-04	16118
1B	1206,6	10,02	0,49	5,013E-05	98588
2B	1214,0	10,13	0,50	5,066E-05	79231
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 7681 (1/\Delta\sigma)^{3,57}$		
			$N = 4,57 \times 10^{-11} (1/\epsilon_i)^{3,57}$		

Tabela 4.21 – Vida de fadiga CAP 20 + 20% BRP e volume de vazios 5%.

CAP 20 + 20% BRP					
Vv = 5%		RT = 1,18 MPa		MR = 2845 MPa	
CP	Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
9B	4779,8	41,01	1,94	1,675E-04	481
10B	4652,7	39,98	1,89	1,633E-04	638
11B	3562,0	30,64	1,45	1,252E-04	2372
12B	3568,5	30,45	1,44	1,244E-04	1368
13B	2372,1	20,42	0,97	8,342E-05	5021
14B	2318,2	19,93	0,94	8,143E-05	4850
5B	1157,4	10,00	0,47	4,084E-05	80378
6B	1174,6	10,07	0,48	4,114E-05	91566
<b>Modelos de Fadiga</b>			$N = 5525 (1/\Delta\sigma)^{3,54}$		
			$N = 2,33 \times 10^{-11} (1/\epsilon_i)^{3,54}$		

Com excelentes coeficientes de determinação  $R^2$ , as misturas com CAP 20 modificado com 20% de BRP foram as misturas que obtiveram menores dispersões nos modelos obtidos. As curvas das misturas com volumes de vazios de 3, 4 e 5% apresentaram  $R^2$  iguais a 0,9934; 0,9599 e 0,9842, respectivamente. Essas curvas em função da diferença de tensões, são apresentadas na figura 4.13.

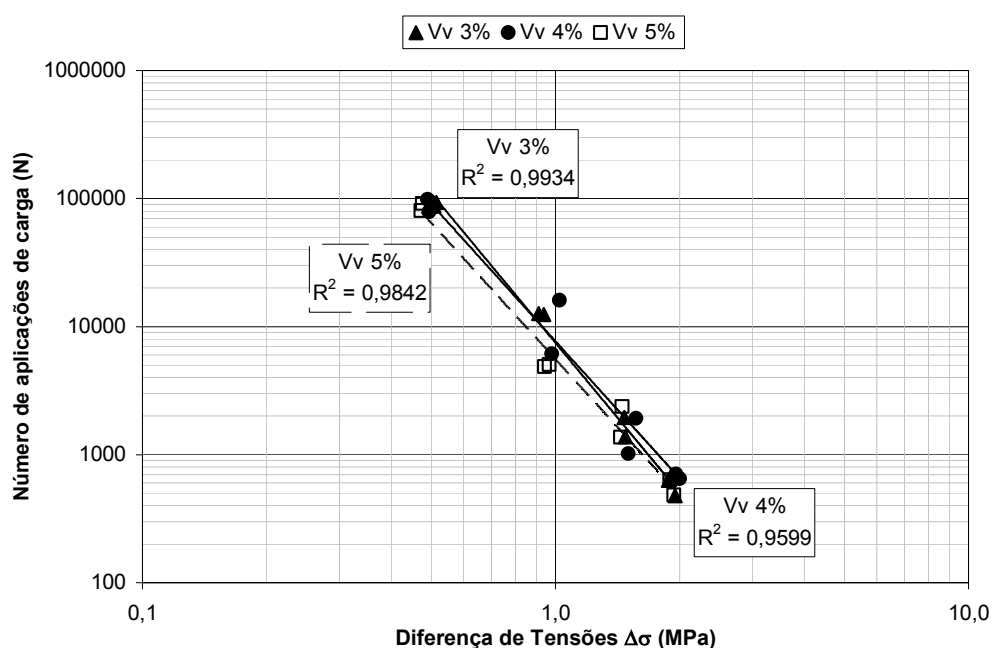


Figura 4.13 – Curvas de fadiga em função da diferença de tensões para CAP 20 modificado com 20% BRP.

Os coeficientes  $k_2$ , que indicam a inclinação das curvas, também apresentaram valores bem próximos, variando de 3,54 para Vv 5% até 3,89 para Vv 3%. A curva Vv 4% apresentou  $k_2$  igual a 3,57. Considerando mesmo módulo de resiliência, pode-se afirmar que a mistura com volume de vazios igual a 5% é menos resistente à fadiga, já as outras duas, apresentam comportamento bem parecido, com inclinações parecidas e cruzando perto da diferença de tensões com valor de 1 MPa.

Na figura 4.14 a vida de fadiga destas misturas é representada em relação à deformação específica resiliente. A mistura com volume de vazios igual a 4% apresentou, nesta situação, melhor comportamento à fadiga, esta mistura caracteriza-se como a mais flexível, com menor módulo de resiliência (2485 MPa) e menor relação MR/RT (2029). As outras duas misturas, mais rígidas, com módulos de resiliência de 3415 e 2845 MPa, e relações MR/RT de 2626 e 2411, quase caracterizam uma única curva, devido à pouca diferença entre estes valores.

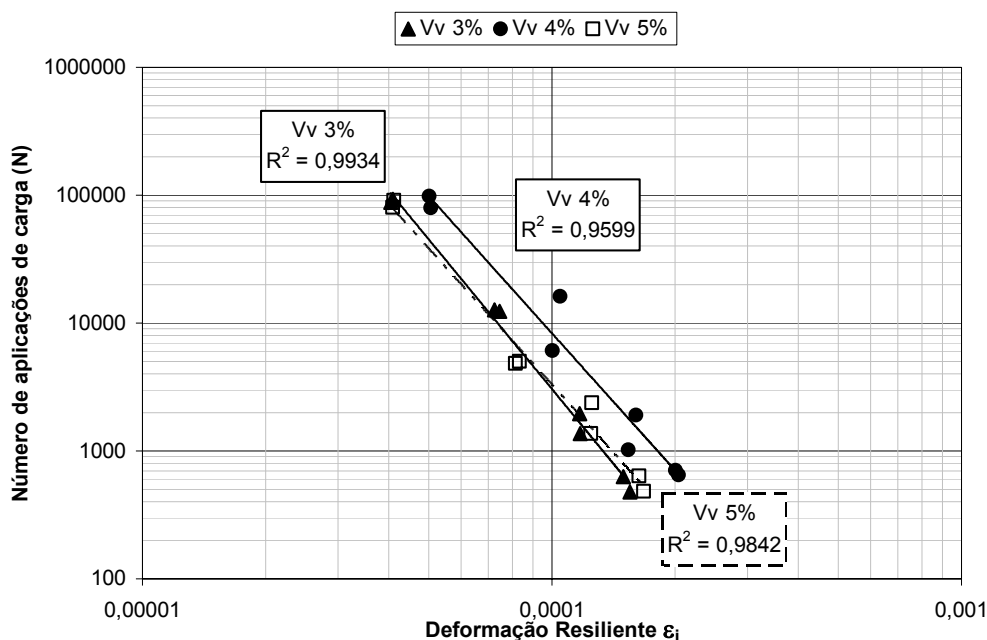


Figura 4.14 – Curvas de fadiga em função da deformação resiliente para CAP 20 modificado com 20% BRP.



A tabela 4.22 apresenta, resumidamente, os parâmetros resultantes dos ensaios de fadiga, onde os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $n_1$  representam os parâmetros de fadiga das expressões (15) e (16):

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (15)$$

$$N = n_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_2} \quad (16)$$

Tabela 4.22 – Características dos ensaios de fadiga para todas as misturas.

ASF	Vv (%)	R <sup>2</sup>	MR (MPa)	MR/RT	k1	k2	n1
CAP 20	3	0,9866	2889	3014	7080	4,64	1,01E-15
	4	0,9600	3395	2671	4871	3,16	4,39E-10
	5	0,9776	4171	2570	8717	3,59	8,88E-12
CAP 20 + SBS 4,5%	3	0,9633	7476	3545	210000	3,60	1,61E-11
	4	0,9629	5265	3024	62100	3,82	9,26E-13
	5	0,9422	4954	3044	27800	3,13	4,49E-10
CAP 20 + 20% BRP	3	0,9934	3145	2626	7448	3,89	8,41E-13
	4	0,9599	2485	2029	7681	3,57	4,57E-11
	5	0,9842	2845	2411	5525	3,54	2,33E-11

#### 4.7. ANÁLISE MECANÍSTICA DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE ASFALTO E VOLUME DE VAZIOS NA VIDA DE FADIGA

Para analisar a influência do tipo de asfalto e volume de vazios na vida de fadiga das misturas, é necessário certo cuidado. Como discutido anteriormente, estes parâmetros mostraram certa influência no comportamento mecânico (MR e RT) destas misturas. Para uma aplicação mais consciente dos modelos de fadiga é necessário que eles sejam comparados a partir de um mesmo referencial. Para esta comparação, foram estabelecidos, através do método do DNER, perfis de pavimentos contendo os três tipos de misturas asfálticas pertinentes ao estudo e subleitos com três diferentes índices de suporte Califórnia (5%, 10% e 20%). Composto a estrutura, foi adotada

mesma base granular para os três perfis, cuja espessura foi determinada para um tráfego de  $10^7$  solicitações de eixos padrão de 8,2t. As espessuras de cada camada do pavimento, calculadas segundo o método empírico de DNER, são apresentadas na figura 4.15. O coeficiente de Poisson foi arbitrado para as camadas, sendo  $\mu=0,35$  para a capa asfáltica e  $\mu=0,45$  para a base e subleito.

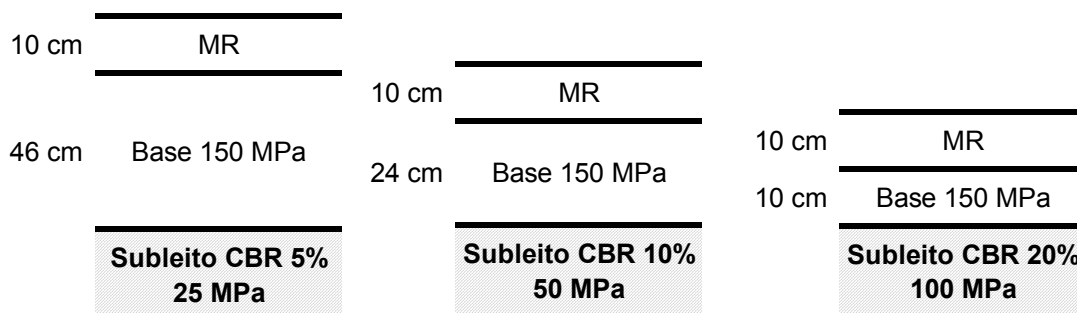


Figura 4.15 – Estruturas utilizadas nas simulações computacionais.

Através do programa Elsym5, foram determinadas as reações dos pavimentos em questão para uma solicitação de uma carga equivalente ao eixo padrão do DNER. A figura 4.16 apresenta as características e localização do carregamento e a localização do ponto de aferição das tensões e deformações, que neste estudo localizou-se nas fibras inferiores da camada asfáltica de revestimento. O ponto utilizado para aferição das tensões e deformações localiza-se no centro de duas cargas verticais de 2,05t, que estão afastadas de 28,80 cm e a uma profundidade de 10,0cm.

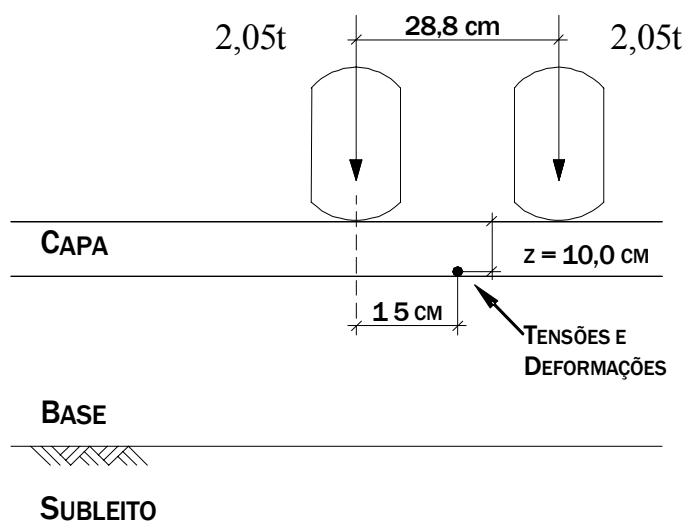


Figura 4.16 – Carregamento e ponto estudado na simulação.

Como os três perfis de pavimentos apresentaram mesmo comportamento, optou-se por discutir apenas o do subleito com CBR=10%. As tensões e deformações obtidas para este perfil estão apresentadas na tabela 4.23 a seguir. Os resultados completos, incluindo perfis com subleito de CBR 5% e 20% são apresentados no apêndice D.

Tabela 4.23 – Diferenças de tensões e deformações obtidas na simulação com subleito de CBR=10%.

CBR Subleito = 10%					
ASF	VV (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$
CAP 20	3	2889	1,12	1,30	3,56E-04
	4	3395	1,27	1,44	3,24E-04
	5	4171	1,38	1,57	2,98E-04
CAP 20 + SBS 4,5%	3	7476	2,11	2,04	2,18E-04
	4	5265	1,74	1,86	2,45E-04
	5	4954	1,63	1,66	2,81E-04
CAP 20 + 20% BRP	3	3145	1,20	1,29	3,58E-04
	4	2485	1,22	1,27	3,62E-04
	5	2845	1,18	1,26	3,65E-04

Para o pavimento com a estrutura previamente descrita, notou-se que as maiores diferenças de tensões ocorrem para as misturas com CAP 20 modificado com 4,5% de polímero SBS, seguidas pelas misturas com CAP 20. As misturas com CAP 20 modificado com 20% de BRP apresentaram as menores diferenças de tensões.

Na figura 4.17 são apresentadas as variações das diferenças de tensões ( $\Delta\sigma$ ) e das deformações em função do volume de vazios das misturas ensaiadas. Observando-se essa figura nota-se que as misturas com CAP 20 modificado com 4,5% SBS apresentam um decréscimo no valor de diferenças de tensões para um aumento no volume de vazios, enquanto que para as misturas com CAP 20 a tendência é exatamente oposta, ou seja, a diferença de

tensões aumenta para um aumento do volume de vazios. Já para as misturas com CAP 20 modificado com borracha reciclada de pneus parece não haver influência significativa do volume de vazios nos valores das diferenças de tensões.

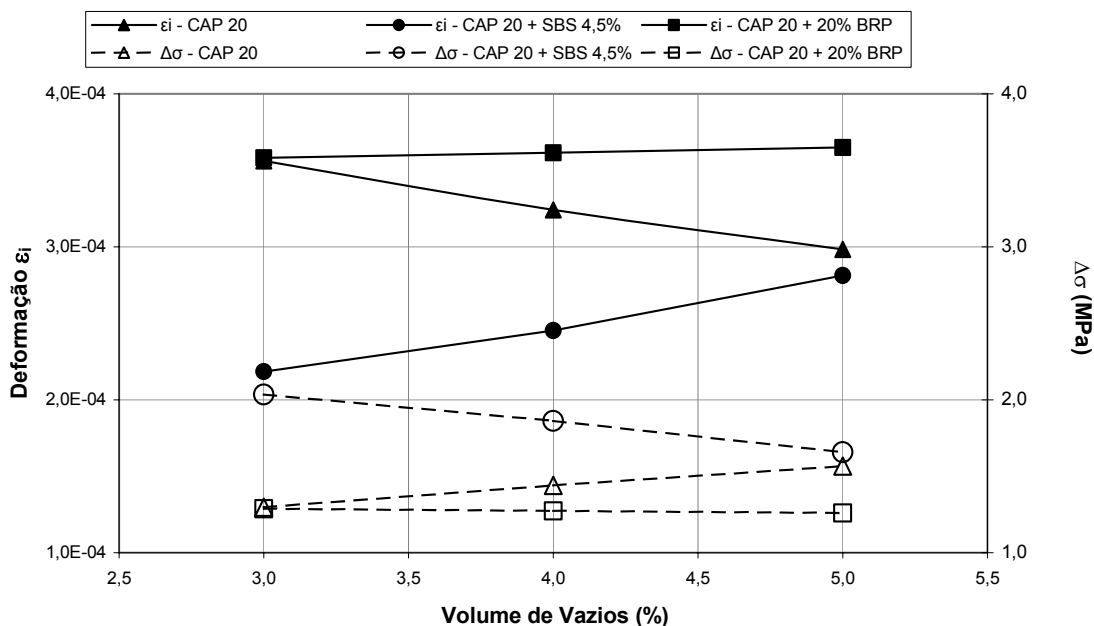


Figura 4.17 – Variação de  $\epsilon_i$  e  $\Delta\sigma$  em relação ao volume de vazios.

Ainda na figura 4.17 é ilustrada a variação da deformação específica  $\epsilon_i$  em relação ao volume de vazios para os três tipos de asfalto utilizados. As misturas com CAP 20 modificado com 4,5% SBS apresentaram variação crescente da deformação específica com o aumento do volume de vazios e, dentre os três tipos de misturas, foi a que apresentou menores valores de deformação. As misturas com CAP 20 apresentaram comportamento decrescente da deformação específica com o aumento do volume de vazios. As misturas com CAP modificado com 20% BRP mostraram-se pouco susceptíveis à variação do volume de vazios e apresentaram ainda os maiores valores de deformação.

O CAP 20 modificado com 20% BRP apresentou as maiores deformações específicas, fato esse que pode ser associado à menor rigidez da mistura. As misturas com este tipo de asfalto apresentaram os menores valores de módulo de resiliência. As misturas com CAP 20 modificado com 4,5% SBS apresentaram as menores deformações e os maiores valores de módulo de resiliência, caracterizando uma maior rigidez do material.

As relações entre o módulo de resiliência e as deformações específicas calculadas são ilustradas na figura 4.18. Quanto maior o módulo de resiliência, mais rígido o material e menores as deformações, como pode ser observado para a mistura de CAP 20 modificado com 4,5% SBS, que apresentou os maiores módulos de resiliência e as menores deformações do experimento.

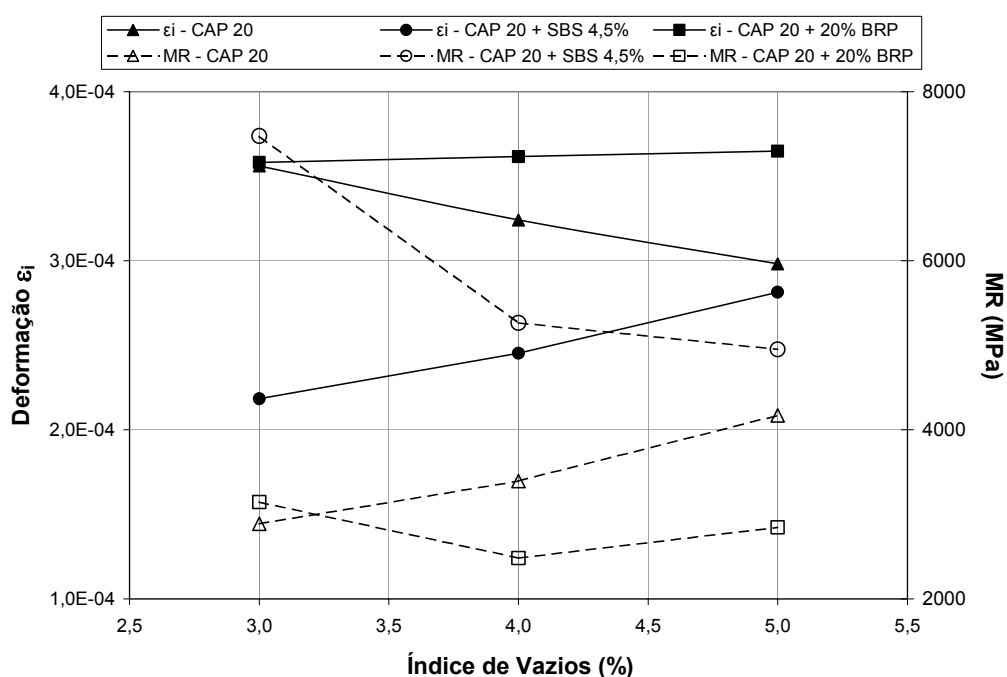


Figura 4.18 – Variação da deformação específica e do módulo de resiliência em relação ao volume de vazios.

Para uma análise de desempenho das misturas, são utilizados os dados de  $\Delta\sigma$  e  $\epsilon_i$  nas equações de fadiga para estimativa de vidas de fadiga, podendo-

se assim comparar diretamente o desempenho das misturas asfálticas à luz dos resultados de laboratório. A tabela 4.24 mostra os resultados de vida de fadiga para as misturas, calculadas com as equações obtidas para a diferença de tensões e para as equações obtidas para a deformação resiliente específica.

Tabela 4.24 – Vida de fadiga dos pavimentos calculada para a diferença de tensões e para a deformação resiliente específica.

CBR Subleito = 10%					
ASF	VV (%)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Vida de Fadiga, N ( $\Delta\sigma$ )	$\epsilon_i$	Vida de Fadiga, N ( $\epsilon_i$ )
CAP 20	3	1,30	2118	3,56E-04	10
	4	1,44	1535	3,24E-04	47
	5	1,57	1738	2,98E-04	40
CAP 20 + SBS 4,5%	3	2,04	16270	2,18E-04	243
	4	1,86	5778	2,45E-04	57
	5	1,66	5722	2,81E-04	58
CAP 20 + 20% BRP	3	1,29	2791	3,58E-04	21
	4	1,27	3236	3,62E-04	89
	5	1,26	2438	3,65E-04	34

A figura 4.19 ilustra os resultados de vida de fadiga, tanto para diferença de tensões quanto para deformação específica. Primeiramente, o mais notório nestes resultados é a diferença entre as vidas úteis calculadas. Os valores referentes às equações de diferença de tensão, além de muito maiores, mostram valores mais coerentes com o esperado do que os valores calculados pelas equações de deformação específica. Os valores calculados através das equações de diferença de tensões são da ordem de milhares de aplicações ( $10^3$ ); já os calculados através das equações de deformação resiliente específica são da ordem de dezenas de aplicações de carga.

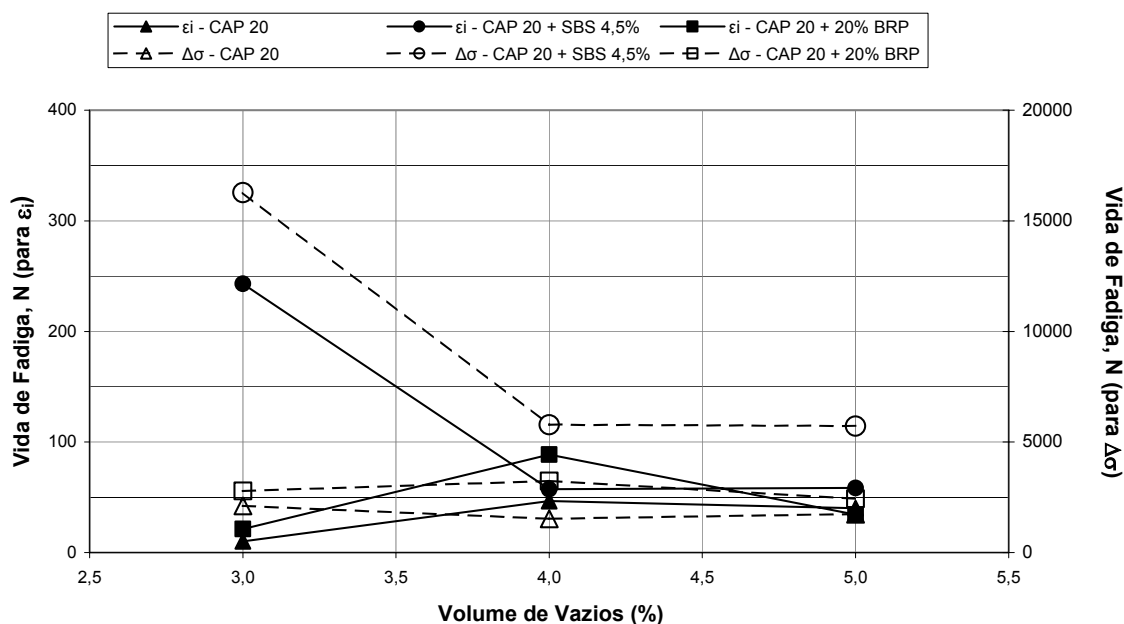


Figura 4.19 – Vida de fadiga das misturas calculada pela deformação resiliente específica e pela diferença de tensões versus o volume de vazios.

Sob o foco do desempenho em relação à diferença de tensões, as misturas com CAP 20 apresentaram pequena variação da vida útil em relação ao volume de vazios.

Para o CAP 20 modificado com polímero SBS, houve um acentuado decréscimo da vida útil entre 3% e 4% de volume de vazios, e pouca mudança entre os volume de vazios de 4% e 5%. Já para as misturas com CAP 20 modificado com borracha reciclada de pneus parece existir um valor ótimo de volume de vazios, próximo de 4%.

## **CAPÍTULO 5**

# **CONCLUSÕES**

---

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho, baseadas nas discussões acerca dos resultados de laboratório apresentadas em capítulo anterior. São apresentadas ainda algumas recomendações para pesquisas futuras visando o mesmo objetivo deste trabalho.

### **5.1. CONCLUSÕES**

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a influência de alguns parâmetros (o tipo de asfalto e o volume de vazios da mistura) na vida de fadiga à luz do ensaio de compressão diametral. Visto os resultados apresentados conclui-se:

- A resistência à tração (RT) das misturas com CAP 20 modificado com polímero SBS mostraram-se bem superiores às outras duas, que apresentaram pouca diferença entre si. Para as misturas com CAP 20 modificado com SBS, a resistência à tração apresentou expressivo decréscimo com o aumento do volume de vazios; para as misturas com CAP 20 houve pequeno aumento e para as misturas com CAP 20 modificado com borracha a resistência praticamente não apresentou variação.
  
- O módulo de resiliência (MR) apresentou comportamento praticamente igual à resistência à tração. As misturas com CAP 20 modificado com BRP apresentaram, de maneira geral, os menores módulos de resiliência dentre as estudadas, e mostraram-se pouco sensíveis à variações do volume de vazios.



---

As com CAP 20 modificado com SBS apresentaram os maiores módulos de resiliência, decrescentes com o volume de vazios. Já as misturas com CAP 20 apresentaram aumento nos valores de módulo com o aumento do volume de vazios.

- Na literatura (PINHEIRO *et al*, 2003 e LEITE *et al*, 2000), a relação MR/RT é apresentada como um parâmetro a ser utilizado na previsão de desempenho à fadiga de uma mistura. É sugerido que misturas com valores perto de 3000 apresentam melhores desempenhos à fadiga. Nesta pesquisa praticamente todas as misturas apresentaram valores próximos a 3000, sendo que as misturas com CAP20 modificado com SBS apresentaram os maiores valores e as misturas com CAP20 modificado com borracha apresentaram os menores valores, mas ainda assim com pouca variação em relação ao valor referência de 3000. Para o menor valor de MR/RT de cada mistura obteve-se o melhor desempenho para fadiga à tensão controlada.

- Quanto à fadiga, primeiramente conclui-se que as equações provenientes do cálculo das deformações específicas não foram adequadas para a avaliação do desempenho das misturas. O parâmetro deformação específica, além de ser calculado, depende diretamente do módulo de resiliência, e o fato da má representatividade destas equações pode ser atribuído ao fato de não ter sido aferido o módulo de resiliência para todas as amostras ensaiadas à fadiga; apenas 2 amostras de cada grupo foram ensaiadas para o módulo e o resultado extrapolado para o grupo.

- Quanto às vidas de fadiga calculadas através da diferença de tensões, nota-se uma superioridade das misturas com CAP 20 modificado com SBS 4,5%, que apresenta vida de fadiga com ganhos de até 668% em relação às misturas com CAP 20, e de até 483% em relação às misturas com CAP 20 modificado com BRP 20%. Estes ganhos das misturas modificadas com polímero SBS ocorreram para volume de vazios de 3%, para os outros dois volumes de vazios, o ganho foi menor. As misturas com CAP 20 modificado com BRP 20% apresentaram desempenho à fadiga até 110% maior ao apresentado pelas

misturas com CAP 20, que se mostraram, dentre as três alternativas estudadas, a pior do ponto de vista de desempenho à luz de ensaios de fadiga.

- O comportamento à fadiga dos três tipos de misturas variaram de forma diferente em relação ao volume de vazios. As misturas com CAP 20 modificado com BRP 20% mostraram uma tendência a um valor de pico para fadiga em torno de 4%. E tanto para o CAP 20 modificado com SBS 4,5%, quanto para o CAP 20, o valor máximo da vida de fadiga aparece nas amostras com volumes de vazios próximos a 3%.

Deve-se ressaltar que o propósito desse trabalho foi comparar o desempenho de misturas asfálticas à luz de resultados de ensaios de laboratório e que, por conseguinte, os modelos apresentados não devem ser utilizados para a previsão da vida de fadiga de misturas em serviço, devido à falta de fatores de ajuste laboratório/campo.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Antes de executar os ensaios de vida de fadiga à tensão controlada, deve-se medir os módulos de resiliência, melhorando a qualidade das curvas de fadiga em relação à deformação resiliente;

- Nesta pesquisa, o parâmetro que determinou a ruptura do corpo-de-prova no ensaio de fadiga foi a deformação acumulada vertical do corpo-de-prova. Geralmente adotado pelos centros de pesquisa por facilitar a execução dos ensaios, este critério de ruptura merece um maior cuidado, já que nesta pesquisa observou-se que para uma mesma deformação vertical, houve corpos-de-prova que não apresentavam rupturas visíveis e outros na eminência de partir ao meio. Sugere-se então que se compare para diferentes asfaltos este critério de ruptura;

- Outra sugestão para verificação da ruptura, fato primordial nos ensaios de fadiga, é o acompanhamento do surgimento de trincas no corpo-de-prova de tempos em tempos. Com isso é esperada uma homogeneidade da determinação do fim do ensaio.

- Na determinação da fadiga, o critério de ruptura assume papel de suma importância, merecendo maiores cuidados e atenção. O acompanhamento das deformações horizontais e verticais a cada aplicação de carga fornece uma curva de deformação acumulada que poderia uniformizar a ruptura dos corpos-de-prova determinando o critério de ruptura em relação à variação das deformações e não somente em relação a um dado valor .

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). *Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall – NBR 12891*. Rio de Janeiro, ABNT.
- BALBO, J.T. (2000). *Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga*. In: 32ª. Reunião de Pavimentação, Anais, ABPv. Brasília.
- BENEVIDES, S.A.S. (2000). *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do Ceará*. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- BENEVIDES, S.A.S. & MOTTA, L.M.G. (2003). *Dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando diferentes modelos de fadiga e de resiliência de solos*. In: XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. pp. 132-143.
- CARPINETTI, L.C.R. (2003). *Planejamento e análise de experimentos*. Apostila Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DEACON, J.S. (1965). *Fatigue of asphalt concrete*. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley USA.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de Ensaio DNER-ME 133/94. Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*. Rio de Janeiro, 5p.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). *Método de Ensaio DNER-ME 138/94. Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por compressão Diametral*. Rio de Janeiro, 4p.

- 
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (2000). *Especificação de serviço DNER-ES 313/97. Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma Rodoviária*. Rio de Janeiro, DNER.
- EPPS, J.A. & MONISMITH, C.L. (1969). *Influence of mixtures on the flexural fatigue properties of asphalt concrete*. Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, vol.38, USA.
- FAXINA, A.L. (2002). *Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- FERNANDES JR, J.L. (1994). *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- FERNANDES JR, J.L., ODA, S. & ZERBINI, L.F. (2001). *Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos*. Apostila - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GONTIJO, P.R.A. (1980). *A fadiga de misturas betuminosas – Condição essencial no dimensionamento racional de pavimentos flexíveis*. In: XV Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Anais vol.15, p.1-55. Belo Horizonte – MG.
- HARVEY, J.T. & TSAI, B.W. (1996). *Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness*. Transportation Research Record 1543. Washington D.C., USA. pp 38-45.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1955). *The WASHO Road Test – Part 2: Test data, analyses, findings*. Special Report 22, USA.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1962). *The AASHO Road Test – Report 5: Pavement Research*. Special Report 61E, USA.
- HVEEM, F.N. (1955). *Pavements deflection and fatigue failures – Design and testing of flexible pavements*. Highway Research Board, Bolletim 114, USA.
- KIM, Y.R., KHOSLA, N.P. & KIM, N. (1991). *Effect of temperature and mixture variables on fatigue life predicted by diametral fatigue testing*. Transportation Research Record 1317. Washington D.C., USA. pp 128-138.
- KIM, Y.R., KIM, N. & KHOSLA, N.P. (1992). *Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete*. Effects

- of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- KIRK, J.M. (1967). *Results of fatigue tests on different types of bituminous*. Proc. 2<sup>nd</sup>. Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan, USA.
- LEITE, L.F.M., MOTTA, L.M.G., BERNUCCI, L.B. & SOARES, J.B. (2000). *Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory*. In: Asphalt Rubber – The Pavement Material of the 21<sup>st</sup> Century – Proceedings. Vilamoura, Portugal. pp. 309-318.
- LOUREIRO, T.G., SOARES, J.B. & MOTTA, L.M.G. (2003). *Estudo sobre o dano progressivo em misturas asfálticas no ensaio de fadiga à compressão diametral*. In: XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. pp. 18-29.
- MARTINHO, F.G. (1993). *Misturas asfálticas com polímeros na pavimentação urbana*. In: 4<sup>a</sup>. Reunião de Pavimentação Urbana. ABPv, Maceió. pp. 338-367.
- MATTHEWS, J.M., MONISMITH, C.L. & CRAUS, J. (1993). *Investigation of laboratory fatigue testing procedures for asphalt aggregate mixtures*. Journal of Transportation Engineering, vol. 119, N° 4. ASCE, USA.
- MEDINA, J. (1988). *Notas históricas acerca da mecânica dos pavimentos*. In: 23<sup>a</sup>. Reunião de Pavimentação, Anais, ABPv. Florianópolis. pp. 330-345.
- MEDINA, J. (1991). *Evolução da mecânica dos pavimentos no Brasil*. In: 25<sup>o</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. São Paulo.
- MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro, Editora UFRJ.
- MOMM, L. (1998). *Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico*. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MONISMITH, C.L. & DEACON, J.A. (1969). *Fatigue of asphalt paving mixture*. Proc. of the American Society of Civil Engineers, Transportation Engineering Journal, Vol. 95, N° Te 2, USA.
- MONISMITH, C.L., DEACON, J.A., CRAUS, J. & TANGELLA, S.C.S.R. (1990). *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures*. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, USA.

- 
- MOTTA, L.M.G. (1991). *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- MOTTA, L.M.G., MEDINA, J. & SOUSA, A.M. (2002). *Caracterização de módulos de resiliência e de fadiga de misturas brasileiras*. In: 16º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, IBP, Rio de Janeiro.
- OTHMAN, A., FIGUEROA, L. & AGLAN, H. (1995). *Fatigue behavior of Styrene-Butadiene-Styrene modified asphaltic mixtures exposed to low-temperature cyclic aging*. Transportation Research Record 1492. Washington D.C., USA. pp 129-134.
- PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. & LEITE, L.F.M. (2003). *Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidas pelos processos úmido e seco*. In: XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. pp. 116 - 129.
- PINTO, J.A.V. (1993). *O que são asfaltos modificados com polímeros?* In: 4ª. Reunião de Pavimentação Urbana. ABPv, Maceió. pp. 278-288.
- PINTO, S. (1991). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- PINTO, S. & MOTTA, L.M.G. (1995). *Catálogo de curvas de fadiga*. Boletim técnico nº 16, Associação Brasileira de Pavimentação, ABPV. Rio de Janeiro.
- PORTER, O.J. (1942). *Foundations for flexible pavements*. Proc. Highway Research Board, vol.22. Washington, USA.
- PREUSSLER, E.S., PINTO, S. & MEDINA, J. (1981). *Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação do dimensionamento de reforço de pavimentos*. In: 16ª. Reunião de Pavimentação, Anais, ABPV. Recife. Vol. 2, pp. 67-122.
- REIS, R.M.M. (1995). *Asfalto modificado com polímeros, tecnologia de ponta para prolongar a vida dos pavimentos asfálticos*. In: 6ª. Reunião de Pavimentação Urbana. ABPV, Santos. pp. 219-232.
- SANTOS, C.R.G, FURLAN, A.P, GIGANTE, A.C. & FABBRI, G.T.P. (2004). *Avaliação da influência do tipo de asfalto e volume de vazios na vida de*

*fadiga de algumas misturas asfálticas*. In: XIII Panamerican Conference of Traffic & Transportation Engineering. Albany, New York, USA.

TAIRA, C, FURLAN, A.P. & FABBRI, G.T.P. (2003). *Efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas*. In: XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. pp. 178-187.

YODER, E.J. & WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of pavement design*. Second Edition. Wiley-Interscience Publication. New York, USA.



## APÊNDICE A

# DOSAGEM TESTE

---

- Nesta seção são apresentados os resultados da dosagem teste realizada com asfalto modificado com polímero SBS 4,5%.
- Não foram realizados os ensaios de fluência e estabilidade, visto que o objetivo da realização desta dosagem parcial foi determinar os teores de asfalto para obtenção dos volumes de vazios de 3, 4 e 5%.
- Para os outros dois tipos de ligante asfáltico, os teores utilizados nas moldagens foram determinados por esta dosagem parcial, e as adequações necessárias por tentativa e erro.

Tabela A.1 – Dosagem Parcial com Asfalto CAP 20 modificado com SBS 4,5%.

CP	T <sub>Asf</sub> (%)	M <sub>gr</sub> (g)	M <sub>líquida</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>asf</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM
1	4,5	1240,0	749,1	490,9	2,526	2,656	4,91	11,1	16,0
2	4,5	1240,2	740,8	499,4	2,483	2,656	6,51	10,9	17,4
3	5,0	1251,6	755,8	495,8	2,524	2,634	4,17	12,3	16,5
4	5,0	1242,2	751,2	491,0	2,530	2,634	3,96	12,4	16,3
5	5,5	1247,6	755,6	492,0	2,536	2,613	2,94	13,6	16,6
6	5,5	1248,6	757,2	491,4	2,541	2,613	2,75	13,6	16,4
7	6,0	1252,6	758,8	493,8	2,537	2,591	2,11	14,9	17,0
8	6,0	1251,0	757,2	493,8	2,533	2,591	2,24	14,8	17,1
9	6,5	1254,7	756,2	498,5	2,517	2,570	2,08	16,0	18,1
10	6,5	1251,7	754,6	497,1	2,518	2,570	2,04	16,0	18,0
	4,5	1240,1	745,0	495,2	2,505	2,656	5,7	11,0	16,7
	5,0	1246,9	753,5	493,4	2,527	2,634	4,1	12,3	16,4
Média	5,5	1248,1	756,4	491,7	2,538	2,613	2,8	13,6	16,5
	6,0	1251,8	758,0	493,8	2,535	2,591	2,2	14,9	17,0
	6,5	1253,2	755,4	497,8	2,517	2,570	2,1	16,0	18,0

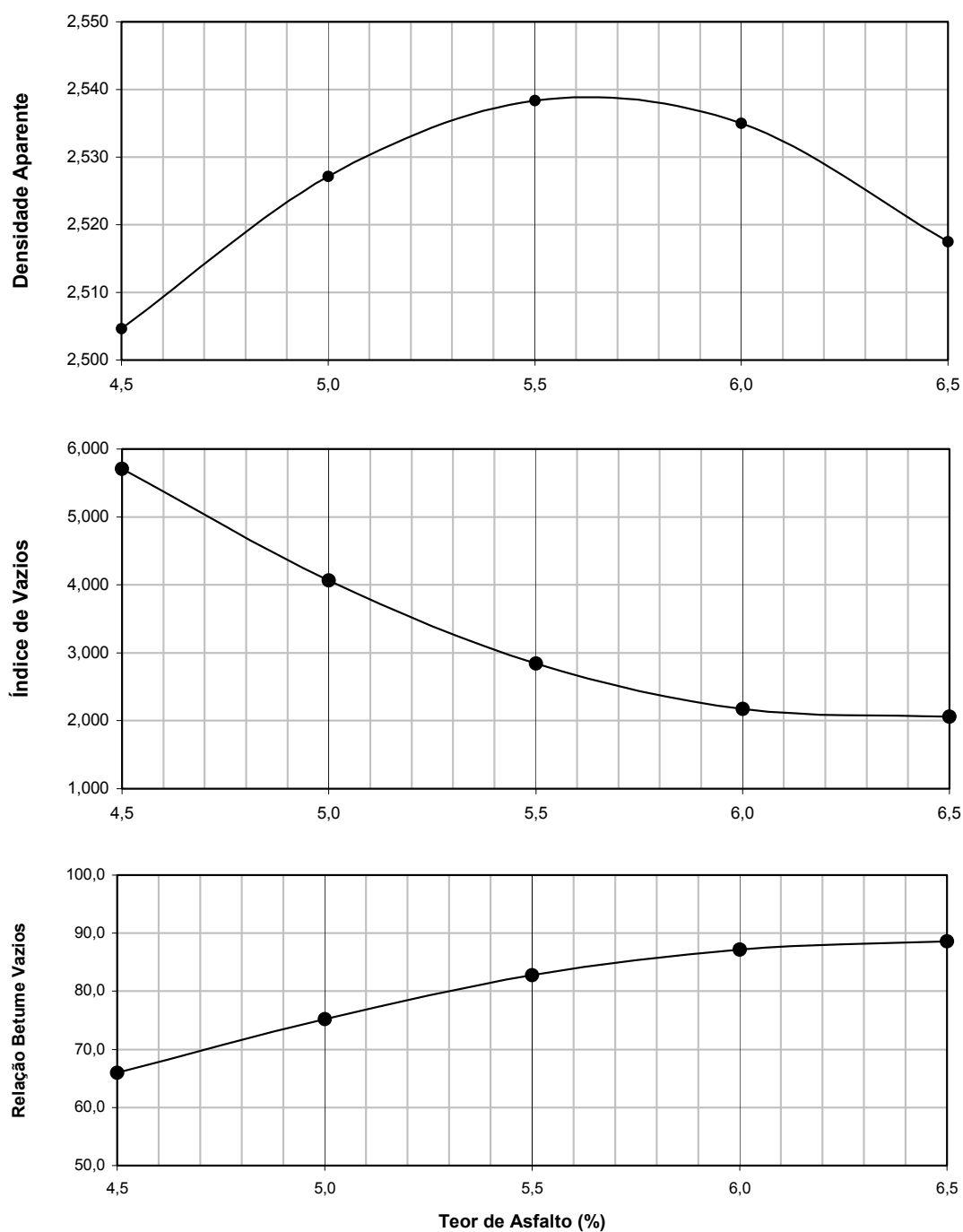


Figura A.1 – Densidade aparente, volume de vazios e relação betume vazios em função do teor de asfalto.

→ Para o asfalto modificado com 4,5% de polímero SBS, os teores de asfalto utilizados nas moldagens para obtenção de corpos-de-prova com volumes de vazios de 3, 4 e 5% foram de 5,5; 5 e 4,7%, respectivamente.

---

## APÊNDICE B

# PLANILHAS MOLDAGEM

---

- Estão apresentadas neste apêndice as tabelas referentes às características dos corpos-de-prova moldados através do Método Marshall.
- As características apresentadas foram determinadas segundo a norma: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall – NBR 12891 (ABNT, 1993).
- Não foram determinadas a estabilidade e a fluência, pois os corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios de fadiga, módulo de resiliência e resistência à tração.
- Os valores de densidade utilizados foram:
  - Densidade do agregado = 2,872 g/cm<sup>3</sup>;
  - Densidade do ligante = 1,024 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela B.1 - Características corpos-de-prova com CAP 20, faixa C e volume de vazios médio 3%.

CP	T <sub>Asf</sub> (%)	M <sub>ar</sub> (g)	M <sub>líquida</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Ww (%)	V <sub>Asf</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
8c	5,5	1249,0	757,0	492,0	2,539	2,613	2,834	13,64	16,47	82,79
9c	5,5	1248,2	756,3	491,9	2,538	2,613	2,877	13,63	16,51	82,57
10c	5,5	1251,4	758,1	493,3	2,537	2,613	2,904	13,63	16,53	82,43
11c	5,5	1251,7	757,1	494,6	2,531	2,613	3,136	13,59	16,73	81,25
12c	5,5	1249,8	756,9	492,9	2,536	2,613	2,950	13,62	16,57	82,20
13c	5,5	1250,5	757,2	493,3	2,535	2,613	2,974	13,62	16,59	82,07
14c	5,5	1250,6	758,2	492,4	2,540	2,613	2,789	13,64	16,43	83,03
20c	5,5	1249,8	756,7	493,1	2,535	2,613	2,989	13,61	16,60	82,00
21c	5,5	1239,4	749,6	489,8	2,530	2,613	3,148	13,59	16,74	81,19
22c	5,5	1249,7	755,8	493,9	2,530	2,613	3,154	13,59	16,74	81,16
23c	5,5	1246,9	755,1	491,8	2,535	2,613	2,958	13,62	16,58	82,15
24c	5,5	1250,8	756,9	493,9	2,532	2,613	3,069	13,60	16,67	81,59
Média	5,5	1249,0	756,2	492,7	2,535	2,613	2,982	13,61	16,60	82,04

Tabela B.2 - Características corpos-de-prova com CAP 20, faixa C e volume de vazios médio 4%.

CP	T <sub>Asf</sub> (%)	M <sub>ar</sub> (g)	M <sub>limessa</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	V <sub>Asf</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
1C	5,0	1245,7	754,6	491,1	2,537	2,634	3,710	12,39	16,10	76,95
2C	5,0	1240,9	749,3	491,6	2,524	2,634	4,179	12,33	16,50	74,68
3C	5,0	1244,6	750,2	494,4	2,517	2,634	4,438	12,29	16,73	73,47
4C	5,0	1244,5	751,5	493,0	2,524	2,634	4,174	12,33	16,50	74,70
5C	5,0	1249,3	756,8	492,5	2,537	2,634	3,707	12,39	16,09	76,97
6C	5,0	1239,8	748,9	490,9	2,526	2,634	4,128	12,33	16,46	74,92
7C	5,0	1242,5	749,8	492,7	2,522	2,634	4,270	12,31	16,58	74,25
15C	5,0	1238,1	748,4	489,7	2,528	2,634	4,024	12,35	16,37	75,42
16C	5,0	1245,7	751,9	493,8	2,523	2,634	4,237	12,32	16,55	74,41
17C	5,0	1244,2	752,2	492,0	2,529	2,634	4,002	12,35	16,35	75,52
18C	5,0	1246,4	754,3	492,1	2,533	2,634	3,852	12,37	16,22	76,25
19C	5,0	1243,8	752,9	490,9	2,534	2,634	3,818	12,37	16,19	76,42
Média	5,0	1243,8	751,7	492,1	2,528	2,634	4,045	12,34	16,39	75,33

Tabela B.3 - Características corpos-de-prova com CAP 20, faixa C e volume de vazios médio 5%.

CP	T <sub>Asf</sub> (%)	M <sub>ar</sub> (g)	M <sub>limessa</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (%)	V <sub>Asf</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
25C	4,5	1249,1	753,5	495,6	2,520	2,656	5,116	11,08	16,19	68,40
26C	4,5	1241,3	747,5	493,8	2,514	2,656	5,365	11,05	16,41	67,31
27C	4,5	1245,0	751,6	493,4	2,523	2,656	5,006	11,09	16,09	68,90
28C	4,5	1250,1	753,1	497,0	2,515	2,656	5,308	11,05	16,36	67,56
29C	4,6	1239,2	748,4	490,8	2,525	2,652	4,789	11,34	16,13	70,31
30C	4,6	1242,0	750,7	491,3	2,528	2,652	4,671	11,36	16,03	70,86
31C	4,6	1239,3	746,1	493,2	2,513	2,652	5,245	11,29	16,53	68,28
32C	4,6	1238,9	744,9	494,0	2,508	2,652	5,429	11,27	16,69	67,48
33C	4,6	1233,5	743,3	490,2	2,516	2,652	5,111	11,30	16,41	68,86
34C	4,6	1237,3	746,3	491,0	2,520	2,652	4,974	11,32	16,29	69,47
35C	4,6	1248,9	752,9	496,0	2,518	2,652	5,050	11,31	16,36	69,14
36C	4,6	1232,1	743,8	488,3	2,523	2,652	4,850	11,33	16,18	70,03
Média	4,6	1241,4	748,5	492,9	2,519	2,653	5,076	11,23	16,31	68,88

Tabela B.4 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + SBS 4,5%, faixa C e volume de vazios médio 3%.

CP	$I_{Asf}$ (%)	$M_{Ar}$ (g)	$M_{limesa}$ (g)	$V_{CP}$ (cm <sup>3</sup> )	$D_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_T$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	$V_{Asf}$ (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
13P	5,5	1255,3	759,3	486,0	2,531	2,613	3,132	13,59	16,73	81,27
14P	5,5	1252,5	758,0	484,5	2,533	2,613	3,055	13,60	16,66	81,66
16P	5,5	1255,7	761,5	484,2	2,541	2,613	2,748	13,65	16,40	83,24
17P	5,5	1251,8	759,2	482,6	2,541	2,613	2,735	13,65	16,38	83,31
18P	5,5	1254,2	760,0	484,2	2,538	2,613	2,864	13,63	16,50	82,64
19P	5,5	1257,1	761,6	485,5	2,537	2,613	2,895	13,63	16,52	82,48
20P	5,5	1254,6	760,7	483,9	2,540	2,613	2,774	13,64	16,42	83,10
21P	5,5	1256,9	761,0	485,9	2,535	2,613	2,989	13,61	16,60	82,00
22P	5,5	1251,0	757,9	483,1	2,537	2,613	2,896	13,63	16,52	82,47
23P	5,5	1253,0	760,6	488,3	2,514	2,613	3,762	13,50	17,27	78,21
2T	5,5	1248,7	757,2	481,5	2,541	2,613	2,759	13,65	16,40	83,18
3T	5,5	1249,5	755,5	484,0	2,529	2,613	3,189	13,59	16,77	80,99
Média	5,5	1253,4	759,4	484,5	2,535	2,613	2,983	13,61	16,60	82,05



Tabela B.5 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + SBS 4,5%, faixa C e volume de vazios médio 4%.

CP	$I_{Asf}$ (%)	$M_{ar}$ (g)	$M_{limessa}$ (g)	$V_{CP}$ (cm <sup>3</sup> )	$D_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_T$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	$V_{Asf}$ (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
1P	5,0	1242,3	750,6	491,7	2,527	2,634	4,090	12,34	16,43	75,10
2P	5,0	1252,0	757,0	495,0	2,529	2,634	3,986	12,35	16,34	75,60
3P	5,0	1241,3	748,8	492,5	2,520	2,634	4,323	12,31	16,63	74,00
4P	5,0	1250,7	757,1	493,6	2,534	2,634	3,814	12,37	16,19	76,44
5P	5,0	1247,7	755,0	492,7	2,532	2,634	3,869	12,37	16,23	76,17
6P	5,0	1250,8	757,0	493,8	2,533	2,634	3,845	12,37	16,21	76,29
7P	5,0	1247,2	752,3	494,9	2,520	2,634	4,335	12,31	16,64	73,95
8P	5,0	1254,9	758,3	498,6	2,517	2,634	4,458	12,29	16,75	73,38
9P	5,0	1253,6	758,9	494,7	2,534	2,634	3,805	12,37	16,18	76,48
10P	5,0	1255,1	757,4	497,7	2,522	2,634	4,270	12,31	16,58	74,25
11P	5,0	1256,6	757,9	498,7	2,520	2,634	4,348	12,30	16,65	73,89
12P	5,0	1252,9	757,2	495,7	2,528	2,634	4,053	12,34	16,39	75,28
Média	5,0	1250,4	755,5	495,0	2,526	2,634	4,100	12,34	16,44	75,07

Tabela B.6 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + SBS 4,5%, faixa C e volume de vazios médio 5%.

CP	$I_{Aef}$ (%)	$M_{ar}$ (g)	$M_{\text{meisa}}$ (g)	$V_{CP}$ (cm <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_T$ (g/cm <sup>3</sup> )	VV (%)	$V_{Aef}$ (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
25P	4,7	1237,4	744,4	493,0	2,510	2,647	5,194	11,52	16,71	68,93
26P	4,7	1247,4	748,4	499,0	2,500	2,647	5,577	11,47	17,05	67,29
27P	4,7	1248,5	751,3	497,2	2,511	2,647	5,151	11,53	16,68	69,11
28P	4,7	1246,7	752,1	494,6	2,521	2,647	4,790	11,57	16,36	70,72
29P	4,7	1243,8	748,2	495,6	2,510	2,647	5,203	11,52	16,72	68,88
30P	4,7	1247,2	751,7	495,5	2,517	2,647	4,925	11,55	16,48	70,11
31P	4,7	1248,9	755,0	493,9	2,529	2,647	4,487	11,61	16,09	72,12
32P	4,7	1252,2	755,5	496,7	2,521	2,647	4,775	11,57	16,35	70,79
33P	4,7	1248,2	750,9	497,3	2,510	2,647	5,193	11,52	16,71	68,93
34P	4,7	1248,2	747,8	500,4	2,494	2,647	5,781	11,45	17,23	66,45
35P	4,7	1247,2	749,8	497,4	2,507	2,647	5,288	11,51	16,80	68,52
36P	4,7	1248,2	748,5	499,7	2,498	2,647	5,649	11,46	17,11	66,99
Média	4,7	1247,0	750,3	496,7	2,511	2,647	5,168	11,52	16,69	69,07

Tabela B.7 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + 20% BRP, faixa C e volume de vazios médio 3%.

CP	$I_{Asf}$ (%)	$M_{Ar}$ (g)	$M_{limessa}$ (g)	$V_{CP}$ (cm <sup>3</sup> )	$D_{sp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_T$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	$V_{Asf}$ (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
23B	6,0	1250,9	752,3	498,6	2,509	2,591	3,187	14,70	17,89	82,18
26B	6,0	1252,3	753,4	498,9	2,510	2,591	3,136	14,71	17,84	82,42
27B	6,0	1237,9	746,5	491,4	2,519	2,591	2,789	14,76	17,55	84,11
28B	6,0	1247,3	749,3	498,0	2,505	2,591	3,349	14,68	18,02	81,42
29B	6,0	1245,2	750,2	495,0	2,516	2,591	2,927	14,74	17,67	83,43
30B	6,0	1243,0	749,3	493,7	2,518	2,591	2,843	14,75	17,60	83,84
31B	6,0	1243,4	748,2	495,2	2,511	2,591	3,106	14,71	17,82	82,57
32B	6,0	1241,5	749,6	491,9	2,524	2,591	2,605	14,79	17,39	85,02
33B	6,0	1236,3	746,1	489,2	2,525	2,591	2,567	14,80	17,35	85,27
34B	6,0	1243,1	749,9	493,2	2,520	2,591	2,737	14,77	17,51	84,37
35B	6,0	1245,6	748,6	497,0	2,506	2,591	3,286	14,68	17,97	81,71
36B	6,0	1242,2	746,1	496,1	2,504	2,591	3,375	14,67	18,05	81,30
Média	6,0	1244,0	749,1	494,9	2,514	2,591	2,991	14,73	17,72	83,14

Tabela B.8 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + 20% BRP, faixa C e volume de vazios médio 4%.

CP	T <sub>Ast</sub> (%)	M <sub>ar</sub> (g)	M <sub>imersa</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wv(%)	V <sub>Ast</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
1B	5,5	1242,3	747,5	494,8	2,511	2,613	3,903	13,49	17,39	77,56
2B	5,5	1246,5	748,8	497,7	2,505	2,613	4,139	13,45	17,59	76,47
3B	5,5	1245,3	748,7	496,6	2,508	2,613	4,020	13,47	17,49	77,02
4B	5,5	1250,0	751,2	498,8	2,506	2,613	4,082	13,46	17,54	76,73
17B	5,5	1245,9	750,4	495,5	2,514	2,613	3,760	13,51	17,27	78,22
18B	5,5	1238,1	744,9	493,2	2,510	2,613	3,917	13,48	17,40	77,49
19B	5,5	1244,8	747,9	496,9	2,505	2,613	4,116	13,46	17,57	76,58
20B	5,5	1243,3	746,6	496,7	2,503	2,613	4,193	13,44	17,64	76,23
21B	5,5	1248,6	751,3	497,3	2,511	2,613	3,901	13,49	17,39	77,56
22B	5,5	1249,2	749,6	499,6	2,500	2,613	4,297	13,43	17,73	75,76
24B	5,5	1243,3	748,0	495,3	2,510	2,613	3,922	13,48	17,40	77,46
25B	5,5	1243,4	747,6	495,8	2,508	2,613	4,011	13,47	17,48	77,05
Média	5,5	1245,1	748,5	496,5	2,508	2,613	4,022	13,47	17,49	77,01

Tabela B.9 - Características corpos-de-prova com CAP 20 + 20% BRP, faixa C e volume de vazios médio 5%.

CP	T <sub>Asf</sub> (%)	M <sub>ar</sub> (g)	M <sub>imersa</sub> (g)	V <sub>CP</sub> (cm <sup>3</sup> )	D <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>T</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wv(%)	V <sub>Asf</sub> (cm <sup>3</sup> )	VAM	RBV
5B	5,0	1235,2	741,8	493,4	2,503	2,634	4,967	12,22	17,19	71,11
6B	5,0	1236,2	741,6	494,6	2,499	2,634	5,121	12,20	17,33	70,44
7B	5,0	1238,4	741,7	496,7	2,493	2,634	5,354	12,17	17,53	69,45
8B	5,0	1238,5	742,6	495,9	2,497	2,634	5,194	12,19	17,39	70,13
9B	5,0	1231,0	740,1	490,9	2,508	2,634	4,808	12,24	17,05	71,80
10B	5,0	1234,2	741,0	493,2	2,502	2,634	5,006	12,22	17,22	70,94
11B	5,0	1241,6	745,6	496,0	2,503	2,634	4,976	12,22	17,20	71,07
12B	5,0	1247,2	747,8	499,4	2,497	2,634	5,197	12,19	17,39	70,12
13B	5,0	1234,4	741,5	492,9	2,504	2,634	4,932	12,23	17,16	71,26
14B	5,0	1237,2	742,9	494,3	2,503	2,634	4,987	12,22	17,21	71,02
15B	5,0	1238,7	742,9	495,8	2,498	2,634	5,159	12,20	17,36	70,28
16B	5,0	1237,2	743,9	493,3	2,508	2,634	4,794	12,25	17,04	71,87
Média	5,0	1237,5	742,8	494,7	2,501	2,634	5,041	12,21	17,26	70,79

**APÊNDICE C****TABELAS ENSAIOS DE FADIGA**

---

- Nesta seção são apresentadas as planilhas com os dados referentes aos ensaios de fadiga à compressão diametral para todas as amostras, separadas de acordo com o tipo de asfalto utilizado, asfalto convencional, asfalto convencional modificado com polímero SBS e asfalto modificado com borracha reciclada de pneus.

Tabela C.1 - Ensaios de Fadiga com corpos-de-prova de CAP 20.

CP	W (%)	W medio	D (cm)	h (cm)	MR (MPa)	RT (MPa)	Nivel	% RT (MPa)	$\sigma_r$	Carga (N)	Carregamento Carga (N)	% RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
8C	2,83		10,160	6,066			40	0,45	4337,0	4262,7	39,31	1,76	1,524E-04	457	
9C	2,75		10,159	6,034			40	0,45	4313,7	4243,3	39,36	1,76	1,525E-04	523	
11C	2,78		10,161	6,078			30	0,34	3259,5	3177,6	29,25	1,31	1,134E-04	1228	
12C	2,61	2,86	10,160	6,065	2889	1,12	30	0,34	3263,0	3197,0	29,39	1,32	1,140E-04	3454	
13C	2,97		10,160	6,089			20	0,22	2176,7	2112,0	19,40	0,87	7,523E-05	11948	
14C	2,79		10,160	6,108			20	0,22	2183,5	2160,4	19,79	0,89	7,671E-05	15189	
23C	2,66		10,160	6,048			10	0,11	1081,0	1051,3	9,72	0,44	3,770E-05	300686	
24C	3,07		10,160	6,106			10	0,11	1091,4	1051,3	9,63	0,43	3,734E-05	370094	
1C	3,71		10,159	6,070			40	0,51	4920,7	4844,0	39,38	2,00	1,475E-04	435	
2C	4,18		10,160	6,115			40	0,51	4957,6	4873,0	39,32	2,00	1,473E-04	708	
3C	4,44		10,161	6,167			30	0,38	3750,2	3720,2	29,76	1,51	1,115E-04	1027	
4C	4,17	4,04	10,160	6,107	3395	1,27	30	0,38	3713,4	3652,3	29,51	1,50	1,106E-04	1693	
5C	3,71		10,157	6,102			20	0,25	2472,8	2460,7	19,90	1,01	7,457E-05	2791	
6C	4,13		10,160	6,089			20	0,25	2468,3	2422,0	19,62	1,00	7,353E-05	8371	
15C	4,02		10,161	6,046			10	0,13	1225,5	1220,7	9,96	0,51	3,732E-05	33064	
16C	4,24		10,159	6,117			10	0,13	1239,7	1222,6	9,86	0,50	3,695E-05	54248	
25C	5,12		10,158	6,146			40	0,55	5413,3	5386,5	39,80	2,20	1,317E-04	517	
26C	5,37		10,160	6,139			40	0,55	5408,2	5367,1	39,70	2,19	1,485E-04	593	
27C	5,66		10,160	6,152			30	0,41	4064,7	4068,9	30,03	1,66	1,123E-04	748	
28C	5,31	5,20	10,159	6,198	4171	1,38	30	0,41	4094,7	4059,2	29,74	1,64	1,113E-04	1754	
29C	4,79		10,160	6,200			20	0,28	2731,0	2654,5	19,44	1,07	7,272E-05	10427	
31C	5,24		10,161	6,072			20	0,28	2674,8	2650,6	19,82	1,09	7,414E-05	6842	
32C	5,43		10,160	6,162			10	0,14	1357,1	1278,8	9,42	0,52	3,525E-05	78797	
33C	5,11		10,162	6,103			10	0,14	1344,4	1317,6	9,80	0,54	3,414E-05	77148	

Tabela C.2 - Ensaio de Fadiga com corpos-de-prova de CAP 20 + SBS 4,5%.

CP	W (%)	W medio	D (cm)	h (cm)	MR (MPa)	RT (Mpa)	% RT (MPa)		Carregamento Ensaio		$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N	
							Nivel	$G_r$	Carga (N)	Carga (N)				% RT
13P	3,13		10,161	6,147			40	0,84	8281,1	7825,2	37,80	3,19	1,067E-04	1985
14P	3,05		10,160	6,143			40	0,84	8274,4	8166,9	39,48	3,33	1,114E-04	3283
16P	2,75		10,160	6,133			30	0,63	6195,7	6080,3	29,44	2,48	8,309E-05	5053
17P	2,74	2,88	10,162	6,110	7476	2,11	30	0,63	6173,7	6103,4	29,66	2,50	8,371E-05	12016
19P	2,90		10,158	6,169			20	0,42	4153,9	4214,1	20,29	1,71	5,727E-05	30459
20P	2,77		10,160	6,110			20	0,42	4115,0	4088,3	19,87	1,68	5,608E-05	58302
22P	2,90		10,160	6,180			10	0,21	2081,1	2053,8	9,87	0,83	2,786E-05	351110
23P	2,80		10,159	6,095			10	0,21	2052,2	2034,5	9,91	0,84	2,798E-05	350994
1P	3,83		10,159	6,051			40	0,70	6720,6	6397,0	31,40	2,65	1,038E-04	987
2P	4,36		10,160	6,188			40	0,70	6873,4	6878,4	33,01	2,79	1,091E-04	1963
3P	4,32		10,157	6,164			30	0,52	5133,6	5172,1	24,93	2,10	8,237E-05	2231
4P	3,81	4,06	10,160	6,141	5265	1,74	30	0,52	5115,9	5123,0	24,77	2,09	8,187E-05	5433
5P	4,30		10,160	6,157			20	0,35	3419,5	3691,3	17,32	1,46	5,724E-05	10167
6P	4,36		10,159	6,250			20	0,35	3470,8	3487,6	16,57	1,40	5,477E-05	27478
9P	3,68		10,161	6,123			10	0,17	1700,5	1786,1	8,66	0,73	2,863E-05	182764
10P	3,79		10,161	6,190			10	0,17	1719,1	1734,1	8,32	0,70	2,749E-05	261254
26P	5,28		10,160	6,176			40	0,65	6426,4	6404,6	30,80	2,60	1,013E-04	707
27P	5,15		10,160	6,179			40	0,65	6429,5	6394,0	30,73	2,59	1,011E-04	2057
28P	4,79		10,158	6,157			30	0,49	4804,0	4933,2	23,80	2,01	7,830E-05	3928
29P	5,20	5,08	10,159	6,214	4954	1,63	30	0,49	4849,0	4824,6	23,06	1,95	7,587E-05	2961
30P	4,93		10,160	6,122			20	0,33	3185,1	3307,6	16,04	1,35	5,279E-05	11751
31P	4,82		10,160	6,118			20	0,33	3183,0	3216,4	15,61	1,32	5,137E-05	17305
33P	5,19		10,159	6,208			10	0,16	1614,8	1598,5	7,65	0,65	2,516E-05	60306
34P	5,24		10,156	6,200			10	0,16	1612,2	1588,8	7,61	0,64	2,505E-05	157570



Tabela C.3 - Ensaios de Fadiga com corpos-de-prova de CAP 20 + 20% BRP.

CP	Wv (%)	Wv medio	D (cm)	h (cm)	MR (MPa)	RT (Mpa)	Nivel	% RT (MPa)	$\sigma_r$	Carga (N)	Carga (N)	Carregamento Ensaio % RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_i$	N
27B	2,79		10,160	6,141			40	0,48	4704,3	4774,5	40,60	1,95	1,549E-04	479	
28B	3,35		10,160	6,180			40	0,48	4734,2	4628,4	39,11	1,88	1,492E-04	632	
29B	2,93		10,161	6,126			30	0,36	3519,9	3604,3	30,72	1,47	1,172E-04	1372	
31B	3,11	2,92	10,159	6,151	3145	1,20	30	0,36	3533,6	3605,2	30,61	1,47	1,168E-04	1952	
32B	2,61		10,160	6,087			20	0,24	2331,5	2210,3	18,96	0,91	7,235E-05	12655	
33B	2,56		10,160	6,060			20	0,24	2321,1	2264,2	19,51	0,94	7,444E-05	12369	
34B	2,74		10,160	6,119			10	0,12	1171,9	1239,9	10,58	0,51	4,037E-05	87670	
35B	3,29		10,160	6,168			10	0,12	1181,2	1266,9	10,73	0,51	4,092E-05	93230	
19B	4,12		10,161	6,155			40	0,49	4794,1	4900,8	41,57	2,00	2,041E-04	648	
20B	4,19		10,160	6,172			40	0,49	4806,8	4826,0	40,83	1,96	2,004E-04	703	
18B	3,92		10,160	6,165			30	0,37	3601,0	3692,9	31,28	1,50	1,536E-04	1016	
21B	3,90	4,05	10,160	6,134	2485	1,22	30	0,37	3582,9	3636,8	32,66	1,57	1,603E-04	1913	
22B	4,30		10,160	6,204			20	0,24	2415,9	2426,0	20,42	0,98	1,002E-04	6105	
24B	3,92		10,158	6,070			20	0,24	2363,2	2479,9	21,34	1,02	1,048E-04	16118	
1B	3,90		10,160	6,171			10	0,12	1201,5	1206,6	10,21	0,49	5,013E-05	98588	
2B	4,14		10,159	6,144			10	0,12	1196,1	1214,0	10,32	0,50	5,066E-05	79231	
9B	4,81		10,160	6,179			40	0,47	4654,5	4779,8	40,39	1,94	1,675E-04	481	
10B	5,01		10,160	6,170			40	0,47	4647,7	4652,7	39,38	1,89	1,633E-04	638	
11B	4,98		10,158	6,165			30	0,35	3482,3	3562,0	30,18	1,45	1,252E-04	2372	
12B	5,20	5,00	10,161	6,212	2845	1,18	30	0,35	3509,9	3568,5	29,99	1,44	1,244E-04	1368	
13B	4,93		10,160	6,158			20	0,24	2319,3	2372,1	20,11	0,97	8,342E-05	5021	
14B	4,99		10,161	6,165			20	0,24	2322,2	2318,2	19,63	0,94	8,143E-05	4850	
5B	4,97		10,160	6,138			10	0,12	1155,9	1157,4	9,85	0,47	4,084E-05	80378	
6B	5,12		10,160	6,184			10	0,12	1164,6	1174,6	9,92	0,48	4,114E-05	91566	

**APÊNDICE D**

**TABELA DE SIMULAÇÕES**

---

- Neste apêndice é mostrada a tabela com as respostas dos pavimentos e o desempenho de cada mistura, obtidas nas simulações com o programa Elsym5 para estruturas com subleito de CBR = 5% e CBR = 20%.

Tabela D.1 - Simulações de respostas para pavimentos com subleito CBR 5%, 10% e 20%.

SUBLEITO	ASF	V <sub>v</sub> (%)	MR (MPa)	RT (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\epsilon_j$	k1	n1	k2	N $\Delta\sigma$	N $\epsilon_j$
CAP 20	3	2889	1,12	1,205	3,34E-04	7080	1,01E-15	4,64	2,980	14	
	4	3395	1,27	1,341	3,04E-04	4871	4,39E-10	3,16	1,927	2,379	57
	5	4171	1,38	1,462	2,80E-04	8717	8,88E-12	3,59	2,229	50	
CAP 20 + SBS 4,5%	3	7476	2,11	1,917	2,07E-04	210000	1,61E-11	3,6	20,173	294	
	4	5265	1,74	1,748	2,32E-04	62100	9,26E-13	3,82	7,355	11,536	71
	5	4954	1,63	1,548	2,65E-04	27800	4,49E-10	3,13	7,080	71	
CAP 20 + 20% BRP	3	3145	1,2	1,196	3,36E-04	7448	8,41E-13	3,89	3,712	27	
	4	2485	1,22	1,183	3,39E-04	7681	4,57E-11	3,57	4,216	3,699	112
	5	2845	1,18	1,17	3,42E-04	5525	2,33E-11	3,54	3,169	43	
CAP 20	3	2889	1,12	1,297	3,56E-04	7080	1,01E-15	4,64	2,118	10	
	4	3395	1,27	1,441	3,24E-04	4871	4,39E-10	3,16	1,535	1,797	47
	5	4171	1,38	1,567	2,98E-04	8717	8,88E-12	3,59	1,738	40	
CAP 20 + SBS 4,5%	3	7476	2,11	2,035	2,18E-04	210000	1,61E-11	3,6	16,270	243	
	4	5265	1,74	1,862	2,45E-04	62100	9,26E-13	3,82	5,778	9,257	57
	5	4954	1,63	1,657	2,81E-04	27800	4,49E-10	3,13	5,722	58	
CAP 20 + 20% BRP	3	3145	1,2	1,287	3,58E-04	7448	8,41E-13	3,89	2,791	21	
	4	2485	1,22	1,274	3,62E-04	7681	4,57E-11	3,57	3,236	2,822	89
	5	2845	1,18	1,26	3,65E-04	5525	2,33E-11	3,54	2,438	34	
CAP 20	3	2889	1,12	1,276	3,52E-04	7080	1,01E-15	4,64	2,285	11	
	4	3395	1,27	1,405	3,18E-04	4871	4,39E-10	3,16	1,663	1,964	50
	5	4171	1,38	1,519	2,91E-04	8717	8,88E-12	3,59	1,943	44	
CAP 20 + SBS 4,5%	3	7476	2,11	1,929	2,09E-04	210000	1,61E-11	3,6	19,725	286	
	4	5265	1,74	1,779	2,36E-04	62100	9,26E-13	3,82	6,877	11,013	66
	5	4954	1,63	1,596	2,73E-04	27800	4,49E-10	3,13	6,435	64	
CAP 20 + 20% BRP	3	3145	1,2	1,268	3,54E-04	7448	8,41E-13	3,89	2,957	22	
	4	2485	1,22	1,255	3,58E-04	7681	4,57E-11	3,57	3,414	2,979	92
	5	2845	1,18	1,242	3,61E-04	5525	2,33E-11	3,54	2,565	36	