JESNER SERENI ILDEFONSO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA
UTILIZAÇÃO DO COPOLÍMERO ETILENO ACETATO
DE VINILA (EVA) DESCARTADO PELA INDÚSTRIA
CALÇADISTA EM MISTURAS ASFÁLTICAS
(PROCESSO SECO)**

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 Civil: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Jr.

São Carlos
2007

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

127a	Ildefonso, Jesner Sereni Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco) / Jesner Sereni Ildefonso ; orientador José Leomar Fernandes Jr. -- São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1. Infra-estrutura de transporte. 2. Misturas asfálticas. 3. Etileno acetato de vinila. 4. Processo seco. 5. Ensaios mecânicos. Método Bailey. 7. Envelhecimento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JESNER SERENI ILDEFONSO**

Dissertação defendida e julgada em 07-02-2007 perante a Comissão Julgadora:

<u>APROVADO</u>
Prof. Associado JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)
<u>APROVADO</u>
Prof. Dr. GLAUCO TÚLIO PESSA FABBRI (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)
<u>APROVADO</u>
Prof. ^a . Dr. ^a . SANDRA ODA (Universidade Salvador/UNIFACS)

Prof. Associado EIJI KAWAMOTO Coordenador do Programa de Pós-Graduação em em Engenharia de Transportes

Prof. ^a . Titular MARIA DO CARMO CALIJURI Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Élcio e Iracy,
pelos ensinamentos, apoio e incentivo.*

*Pessoas entram em nossa vida por acaso, mas não é por acaso que elas
permanecem.
(Lílian Tonet)*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado forças para realizar este trabalho.

Ao professor Dr. José Leomar Fernandes Jr., pela orientação, apoio e colaboração ao longo da pesquisa.

Aos professores do Departamento de Transportes da USP de São Carlos pelos ensinamentos, em especial aos Drs. Glauco Túlio Pessa Fabbri e Alexandre Benetti Parreira.

Aos técnicos do laboratório e meus amigos, Antônio Carlos Gigante, Paulo VTNC Toyama e João D. Pereira Filho, pelo apoio, auxílio, companheirismo e amizade ao longo desses anos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira, Jairo Salim Pinheiro, Dib Gebara, Luzenira Brasileiro e Jair Camacho, pela recomendação e o incentivo para iniciar o mestrado.

Aos amigos, Fábio Zanchetta, Marcos Bottene Cunha, Jorge Escalante, Fábio Iwanaga, Vivian Bardini, Frederico Klein e Ana Paula Furlan que auxiliaram diretamente na pesquisa.

Aos colegas e amigos de departamento, pelos ótimos momentos passados no STT e em São Carlos, Zanca, Dú Caramuru, Giga, Japonês, Fábio, Markito, Wesley “Mineiro”, Mateus Araújo, André, Lute, João, Fred, Idalíria, Stella, Reginaldo, Diogo, Jorge, Bruneco, Karênina, Celane, Serginho, Camilla Carrara, Camila Modenese, Leandro, Samuca, Lobão, Dani Andolfato, Andréa Júlia, Andréa Castro, Gú, Bia, Rogério, Cida, Cira, Shirley, Lia, Ana Furlan, Ana Larocca, Gauchinha, Vivian Bardine, Vivian Mantovani, Deise, Léo Hotta, Adalberto, Daniel, Nei, Marcelinha, Marcão, Eduardo, Pablo, Josi, Lilian, Kakuda, Manoel Lucas, Giovane, Vivianne, Dinato, Caróides e Simone.

Aos funcionários Zé Toco, Heloísa, Beth, Magali, Zé Vicente, Alexandre e Paulinho pela colaboração, apoio e amizade.

Aos meus amigos de vida, Eduardo “Duzão” Moreira, Mauro “Careção” Gattamorta, Marcelo “Coroca” Gonsales, Ricardo “Bardal” Bardalati, Denise “Dê” Yamassake e Renata “Rê” Fiorini pelo apoio, incentivo, amizade e companheirismo.

À Daniela Andresa Mortari, por todo amor, carinho, alegria, respeito e paciência em todos os momentos.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

À pedreira Bandeirantes e à Ipiranga Asfaltos, pelos materiais concedidos para a realização da pesquisa.

Em últimos na ordem, mas não no coração:

Aos meus familiares, tia Sueli, tio Toninho, Diogo, Diana e tio Celso por sempre acreditarem em mim e me apoiarem incondicionalmente, pelo amor, carinho e incentivo.

À minha avó, e segunda mãe, Olívia, que eu amo de paixão, por tudo o que representa na minha vida; e meu avô Orlando (*in memoriam*).

Aos meus irmãos Dinho e Binho, meus amigos, companheiros e parceiros, por me trazerem alegrias todos os dias da minha vida, pelo amor e apoio.

Aos meus pais, Élcio Ildefonso e Iracy Sereni Ildefonso, minha inspiração, meu porto seguro, pessoas que admiro, respeito e amo, por tudo o que são e tudo o que fizeram para que eu chegasse até aqui, pelo amor, carinho e ensinamentos de vida.

RESUMO

ILDEFONSO, J.S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (processo seco)**. 2007. 331 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A presente dissertação teve por objetivo analisar o comportamento de misturas asfálticas modificadas, pelo processo seco, com o copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA), resíduo sólido descartado pela indústria calçadista. Em razão das características do EVA, acredita-se que ele possa melhorar as características mecânicas de misturas asfálticas e a resistência ao desgaste. A maioria dos pesquisadores tem direcionado seus esforços em estudos de misturas asfálticas modificadas pelo processo úmido, porém, devido à natureza do resíduo analisado neste trabalho, optou-se pelo processo seco, que demanda menos energia por não necessitar de moagem do material. A pesquisa compreendeu o estudo de amostras de misturas asfálticas não envelhecidas e com envelhecimento de duas e quatro horas em estufa, com moldagem de corpos-de-prova para realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estática, módulo de resiliência por compressão diametral, fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, vida de fadiga e desgaste por abrasão (ensaio Cantabro). Os resultados mostram que a utilização deste resíduo aumentou a resistência das misturas à fadiga e ao desgaste de forma significativa, porém as misturas tornaram-se mais susceptíveis à deformação permanente. O tempo de envelhecimento de curto prazo se mostrou importante, pois aumentou a resistência das misturas à fadiga e à deformação permanente.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Etileno acetato de vinila. Processo seco. Ensaio mecânicos. Método Bailey. Envelhecimento.

ABSTRACT

ILDEFONSO, J.S. **Analysis of the technical feasibility of the use of the ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) discarded for the footwear industry in asphalt mixtures (dry process)**. 2007. 331 p. Master thesis (Mastering) - Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 2007.

The main purpose of the present master thesis was to analyze the behavior of modified hot-mix asphalt, through the dry process, with the copolymer Ethylene Vinyl Acetate (EVA) discarded by the footwear industry. Since the EVA characteristics, it is believed that it can improve hot-mix asphalt mechanic characteristics and the wear and tear resistance. Most of the researchers have been addressing efforts in studies on modified hot-mix asphalt by the wet process, however, due to the nature of the solid residue analyzed in this work, the dry process will demand less energy for not needing of grinding. The research evolved the study of samples of asphalt mixtures not aged and with aging of two and four hours in oven, submitted to indirect tension test, resilient modulus, static and dynamic creep, fatigue life and loss due to abrasion (Cantabro test). The results show that the use of this residue increased the resistance of the mixtures to the fatigue and loss of mass due to abrasion, however the mixtures became more susceptible to the permanent deformation. The short-time aging was shown important, because it increased the resistance of the mixtures to the fatigue and the permanent deformation.

Keywords: Asphalt mixtures. Ethylene vinyl acetate. Dry process. Mechanical tests.

Bailey method. Aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Exemplos de deformação permanente encontrada nas trilhas de roda.....	50
Figura 2.2.	Gráficos típicos da deformação em função do tempo para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	58
Figura 2.3.	Curva típica de deformação pelo número de ciclos no ensaio de fluência por compressão uniaxial.....	60
Figura 2.4.	Curvas características do ensaio de vida de fadiga por tensão controlada.....	69
Figura 2.5.	Curvas características do ensaio de vida de fadiga por deformação controlada.....	69
Figura 2.6.	Eixo de coordenadas do programa ELSYM5.....	73
Figura 2.7.	Estrutura molecular do copolímero EVA.....	80
Figura 2.8.	Consumo mundial de materiais para solados.....	83
Figura 2.9.	Produção brasileira de calçados em milhões de pares.....	83
Figura 2.10.	Resíduos das placas de EVA gerados na confecção de palmilhas.....	84
Figura 3.1.	Granulometria dos agregados.....	96
Figura 3.2.	Secagem superficial do agregado graúdo.....	97
Figura 3.3.	Preparação da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.....	99
Figura 3.4.	Secagem da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.....	99
Figura 3.5.	Verificação da condição saturada seca superficialmente do agregado fino.....	100
Figura 3.6.	Retirada das bolhas de ar da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.....	101
Figura 3.7.	Curva de calibração do kitassato modificado.....	101
Figura 3.8.	Máquina de abrasão “Los Angeles”.....	104
Figura 3.9.	Esferas de aço.....	105

Figura 3.10. EVA cortado.....	106
Figura 3.11. Cilindro com agregado graúdo para determinação da massa específica solta.....	113
Figura 3.12. Cilindro com agregado fino para determinação da massa específica compactada.....	114
Figura 3.13. Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura.....	125
Figura 3.14. Molde utilizado na compactação Marshall.....	128
Figura 3.15. Panela utilizada para misturar os corpos-de-prova.....	128
Figura 3.16. Compactador Marshall.....	129
Figura 3.17. Soquete.....	129
Figura 3.18. Termômetro a laser.....	129
Figura 3.19. Verificação da massa ao ar e massa imersa dos corpos-de-prova.....	132
Figura 3.20. Kitassato modificado.....	140
Figura 3.21. Cilindro de vidro.....	140
Figura 3.22. Bocal.....	140
Figura 3.23. Dispositivo rosqueável.....	140
Figura 3.24. Montagem do cilindro de vidro no bocal.....	141
Figura 3.25. Montagem dos corpos-de-prova no suporte para o ensaio de RT.....	148
Figura 3.26. Fixação do suporte para o ensaio de RT.....	148
Figura 3.27. Anel de carga.....	148
Figura 3.28. Montagem dos corpos-de-prova no suporte para o ensaio de MR.....	151
Figura 3.29. Esquema de fixação do suporte na prensa.....	152
Figura 3.30. Deformações instantânea e total no ensaio de MR versus tempo (AASHTO TP31-94 <i>apud</i> SANTANNA-GRECO (2004)).....	153
Figura 3.31. Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de MR.....	154
Figura 3.32. Detalhe dos pulsos do ensaio de MR.....	154
Figura 3.33. Tela do programa utilizado para processamento dos dados de MR...	155

Figura 3.34.	Corpo-de-prova lixado para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	156
Figura 3.35.	Preparação do corpo-de-prova para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	156
Figura 3.36.	Conjunto para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	157
Figura 3.37.	Condicionamento do corpo-de-prova no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	158
Figura 3.38.	Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de fluência por compressão uniaxial estática.....	158
Figura 3.39.	Tela do programa utilizado para processamento dos dados de fluência por compressão uniaxial estática.....	159
Figura 3.40.	Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	160
Figura 3.41.	Tela do programa utilizado para processamento dos dados de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	161
Figura 3.42.	Prensa e suporte de fixação do LVDT para o ensaio de vida de fadiga.....	162
Figura 4.1.	Dosagem Marshall – Volume de vazios em função do teor de CAP..	173
Figura 4.2.	Dosagem Marshall – Densidade aparente da mistura em função do teor de CAP.....	174
Figura 4.3.	Dosagem Marshall – Vazios no agregado mineral em função do teor de CAP.....	174
Figura 4.4.	Dosagem Marshall – Relação betume-vazios em função do teor de CAP.....	175
Figura 4.5.	Dosagem Marshall – Fluência em função do teor de CAP.....	176
Figura 4.6.	Dosagem Marshall – Estabilidade em função do teor de CAP.....	176
Figura 4.7.	Ensaio exploratório – RT em função do teor de EVA.....	178
Figura 4.8.	Ensaio exploratório – MR em função do teor de EVA.....	178
Figura 4.9.	Ensaio exploratório – Relação MR/RT em função do teor de EVA.	179
Figura 4.10.	Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 0 hora de envelhecimento.....	181
Figura 4.11.	Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 2 horas de envelhecimento.....	181

Figura 4.12.	Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 4 horas de envelhecimento.....	181
Figura 4.13.	Programa experimental – Módulos de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	182
Figura 4.14.	Programa Experimental – Modelo de módulo de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 0,1%.....	183
Figura 4.15.	Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 0 hora de envelhecimento.....	184
Figura 4.16.	Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 2 horas de envelhecimento.....	185
Figura 4.17.	Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 4 horas de envelhecimento.....	185
Figura 4.18.	Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	186
Figura 4.19.	Programa Experimental – Modelo de resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 0,5%.....	187
Figura 4.20.	Programa experimental – Relação MR/RT do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	188
Figura 4.21.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	190
Figura 4.22.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	190
Figura 4.23.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	191
Figura 4.24.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	192
Figura 4.25.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	193
Figura 4.26.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	193

Figura 4.27. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	194
Figura 4.28. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	195
Figura 4.29. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	196
Figura 4.30. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	196
Figura 4.31. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	197
Figura 4.32. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	198
Figura 4.33. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	199
Figura 4.34. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	199
Figura 4.35. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	200
Figura 4.36. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	201
Figura 4.37. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	202
Figura 4.38. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	202
Figura 4.39. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	203

Figura 4.40.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	204
Figura 4.41.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	205
Figura 4.42.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	205
Figura 4.43.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	206
Figura 4.44.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	207
Figura 4.45.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0 hora de envelhecimento.....	208
Figura 4.46.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0 hora de envelhecimento.....	208
Figura 4.47.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2 horas de envelhecimento.....	209
Figura 4.48.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2 horas de envelhecimento.....	209
Figura 4.49.	Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 4 horas de envelhecimento.....	210
Figura 4.50.	Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 4 horas de envelhecimento.....	210
Figura 4.51.	Esquema do pavimento hipotético.....	212
Figura 4.52.	Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 1.....	214
Figura 4.53.	Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 2.....	215
Figura 4.54.	Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	217
Figura 4.55.	Programa experimental – Deformações recuperáveis medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	218

Figura 4.56.	Programa experimental – Deformações permanentes medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	218
Figura 4.57.	Programa experimental – Recuperações medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	219
Figura 4.58.	Programa experimental – Módulos de fluência medidos aos 3600 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática....	219
Figura 4.59.	Programa experimental – Módulos de fluência medidos aos 4500 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática....	220
Figura 4.60.	Programa experimental – Inclinações das curvas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	220
Figura 4.61.	Programa Experimental – Modelo de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.....	222
Figura 4.62.	Programa Experimental – Modelo de deformação recuperável do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%....	223
Figura 4.63.	Programa Experimental – Modelo de deformação recuperável do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%....	224
Figura 4.64.	Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência aos 3600 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%....	225
Figura 4.65.	Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência aos 4500 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%....	226
Figura 4.66.	Programa Experimental – Modelo de inclinação da curva no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.....	227
Figura 4.67.	Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	229
Figura 4.68.	Programa experimental – Módulos de fluência medidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	229
Figura 4.69.	Programa experimental – Inclinações das curvas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	230
Figura 4.70.	Programa Experimental – Modelo de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.....	232

Figura 4.71.	Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.....	233
Figura 4.72.	Programa Experimental – Modelo de inclinação da curva no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.....	234
Figura 4.73.	Desgaste por abrasão em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	235
Figura 4.74.	Programa Experimental – Modelo de desgaste por abrasão do ensaio Cantabro em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.....	236
Figura A.1.	Curva granulométrica determinada através do método Bailey.....	262
Figura B.1.	Curva viscosidade <i>versus</i> temperatura do ligante asfáltico.....	266

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Fatores que influem na deformação permanente em concretos asfálticos.....	51
Tabela 2.2 –	Zona de restrição e pontos de controle para DMN 9,5 mm.....	53
Tabela 2.3 –	Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência.....	61
Tabela 2.4 –	Critério do módulo de fluência para 1 hora de carregamento.....	62
Tabela 2.5 –	Vantagens e desvantagens dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica.....	63
Tabela 2.6 –	Histórico de previsão de deformação permanente através do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática do departamento de transportes da USP – São Carlos.....	64
Tabela 2.7 –	Histórico de previsão de deformação permanente através do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica do departamento de transportes da USP – São Carlos.....	64
Tabela 2.8 –	Influência de alguns fatores na vida de fadiga das misturas asfálticas.....	68
Tabela 2.9 –	Materiais disponíveis para a fabricação de calçados no decorrer das décadas.....	82
Tabela 2.10 –	Métodos de avaliação de envelhecimento acelerado em laboratório.....	88
Tabela 3.1 –	Resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70.....	94
Tabela 3.2 –	Granulometria dos agregados.....	96
Tabela 3.3 –	Especificações para o ensaio de Abrasão “Los Angeles”.....	104
Tabela 3.4 –	Resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles”.....	104
Tabela 3.5 –	Propriedades físico-químicas do EVA.....	106
Tabela 3.6 –	Intervalo recomendado para PAG, PGAF e PFAF.....	123
Tabela 3.7 –	Temperaturas de mistura e compactação.....	124
Tabela 3.8 –	VAM mínimo segundo o SUPERPAVE (COMINSKY <i>et al.</i> , 1998).....	136

Tabela 3.9 –	Fatores que influenciam nos VAM.....	136
Tabela 3.10 –	Fatores de graduação.....	137
Tabela 3.11 –	Valores mínimos de VAM de acordo com a norma DNIT 031-2004-ES.....	137
Tabela 3.12 –	Valores limite da RBV segundo a especificação SUPERPAVE.....	138
Tabela 4.1 –	Modelos estatísticos – Equações polinomiais.....	170
Tabela 4.2 –	Dosagem Marshall – Características volumétricas e mecânicas das amostras.....	172
Tabela 4.3 –	Absorção de ligante.....	173
Tabela 4.4 –	Resultados dos ensaios exploratórios.....	177
Tabela 4.5 –	Programa experimental – Módulos de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	180
Tabela 4.6 –	Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	184
Tabela 4.7 –	Análise da variância da resistência à tração, para significância de 0,5%.....	187
Tabela 4.8 –	Programa experimental – Relação MR/RT em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.....	188
Tabela 4.9 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	189
Tabela 4.10 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	191
Tabela 4.11 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	192
Tabela 4.12 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	194
Tabela 4.13 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	195
Tabela 4.14 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	197
Tabela 4.15 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	198
Tabela 4.16 –	Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	200

Tabela 4.17 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	201
Tabela 4.18 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	203
Tabela 4.19 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	204
Tabela 4.20 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	206
Tabela 4.21 – Estruturas hipotéticas para análise das tensões através do programa ELSYM5.....	212
Tabela 4.22 – Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 1.....	213
Tabela 4.23 – Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 2.....	214
Tabela 4.24 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.....	217
Tabela 4.25 – Análise da variância da deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 5%.....	222
Tabela 4.26 – Análise da variância da deformação recuperável medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 2,5%.....	223
Tabela 4.27 – Análise da variância da deformação permanente medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 1%.....	224
Tabela 4.28 – Análise da variância do módulo de fluência medido aos 3600 s no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 5%.....	225
Tabela 4.29 – Análise da variância do módulo de fluência medido aos 4500 s no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 1%.....	226
Tabela 4.30 – Análise da variância da inclinação da curva medida no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 2,5%.....	227
Tabela 4.31 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	228

Tabela 4.32 – Análise da variância da deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 5%.....	231
Tabela 4.33 – Análise da variância do módulo de fluência medido no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 2,5%.....	232
Tabela 4.34 – Análise da variância da inclinação da curva medida no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 2,5%.....	233
Tabela 4.35 – Desgaste médio por abrasão das misturas asfálticas em função do tempo de envelhecimento e do teor de EVA.....	235
Tabela 4.36 – Análise da variância dos resultados do ensaio de desgaste, para significância de 1%.....	236
Tabela A.1 – Granulometria dos agregados utilizados na pesquisa.....	256
Tabela A.2 – Massa específica compactada do pó de pedra.....	256
Tabela A.3 – Massa específica solta do pedrisco.....	257
Tabela A.4 – Massa específica compactada do pedrisco.....	257
Tabela A.5 – Massa específica solta do pedrisco.....	257
Tabela A.6 – Massa específica média da mistura.....	261
Tabela A.7 – Curva granulométrica determinada através do método Bailey.....	261
Tabela B.1 – Composição dos corpos-de-prova para a dosagem Marshall.....	265
Tabela B.2 – Dosagem Marshall.....	269
Tabela C.1 – Absorção de asfalto para as diferentes etapas de envelhecimento.....	273
Tabela D.1 – Dosagem Marshall – Diâmetro e altura dos corpos-de-prova.....	276
Tabela D.2 – Dosagem Marshall – Massas, volumes, densidades e volume de vazios dos corpos-de-prova.....	277
Tabela D.3 – Ensaios Exploratórios – Diâmetro e altura dos corpos-de-prova.....	278
Tabela D.4 – Ensaios exploratórios – Massas, volumes, densidades e volume de vazios dos corpos-de-prova.....	279
Tabela D.5 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 0% de EVA.....	280
Tabela D.6 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 1% de EVA.....	281

Tabela D.7 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 2% de EVA.....	282
Tabela D.8 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 3% de EVA.....	283
Tabela D.9 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 0% de EVA.....	284
Tabela D.10 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 1% de EVA.....	285
Tabela D.11 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 2% de EVA.....	286
Tabela D.12 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 3% de EVA.....	287
Tabela E.1 – Ensaios Exploratórios – Resultado dos ensaios.....	291
Tabela F.1 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	294
Tabela F.2 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	295
Tabela F.3 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	295
Tabela F.4 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	296
Tabela F.5 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	296
Tabela F.6 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	297
Tabela F.7 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	297
Tabela F.8 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	298
Tabela F.9 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	298
Tabela F.10 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	299
Tabela F.11 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	299

Tabela F.12 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	300
Tabela F.13 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	301
Tabela F.14 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	303
Tabela F.15 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	303
Tabela F.16 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	304
Tabela F.17 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	304
Tabela F.18 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	305
Tabela F.19 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	305
Tabela F.20 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	306
Tabela F.21 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	306
Tabela F.22 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.....	307
Tabela F.23 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.....	307
Tabela F.24 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.....	308
Tabela G.1 – Programa Experimental – Dados do ensaio de RT.....	311

Tabela H.1 –	Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	315
Tabela H.2 –	Programa experimental – Deformações recuperáveis medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	316
Tabela H.3 –	Programa experimental – Deformações permanente medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	317
Tabela H.4 –	Programa experimental – Recuperações medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	318
Tabela H.5 –	Programa experimental – Módulo de fluência em MPa medidos aos 3600 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	319
Tabela H.6 –	Programa experimental – Módulo de fluência em MPa medidos aos 4500 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	320
Tabela H.7 –	Programa experimental – Inclinação das curvas medidas no estágio secundário no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	321
Tabela I.1 –	Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	325
Tabela I.2 –	Programa experimental – Módulos de fluência, em MPa, medidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	326
Tabela I.3 –	Programa experimental – Inclinação das curvas medidas no estágio secundário no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	327
Tabela J.1 –	Programa experimental – Desgastes por abrasão medidos no ensaio Cantabro.....	331

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Porcentagem passada na peneira 0,30 mm e retida na peneira 0,075 mm
A	Massa da amostra seca; Porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na peneira 0,30 mm; Desgaste das misturas asfálticas por abrasão
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
A _{abs}	Porcentagem de asfalto absorvido por massa de agregado
Abicaçados	Associação Brasileira das Indústrias de Calçados
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abs _{af}	Absorção de água pelo agregado fino
Abs _{ag}	Absorção de água pelo agregado graúdo
AF _d	Contribuição do pó de pedra
AF _f	Quantidade corrigida de pó de pedra na mistura
AFi	Quantidade de pó de pedra na mistura
AG _{1f}	Quantidade corrigida de pedra 1 na mistura
AG _{2f}	Quantidade corrigida de pedrisco na mistura
AG _{d1}	Contribuição da pedra 1
AG _{d2}	Contribuição do pedrisco
AGi	Quantidade de agregado graúdo na mistura
AGi ₁	Quantidade de pedra 1 na mistura
AGi ₂	Quantidade de pedrisco na mistura
AG _p	Quantidade de agregados na mistura
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>

Assintecal	Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couros, Calçados e Artefatos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
atm	Atmosfera(s)
a_x	Número de níveis do fator x
BRP	Borracha Reciclada de Pneus
C	Massa da amostra submersa
CAF _t	Contribuição total dos agregados finos na mistura
CAG _t	Contribuição total dos agregados graúdos na mistura
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP _p	Quantidade de ligante na mistura
cm	Centímetro(s)
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
D	Diâmetro médio do corpo-de-prova; Massa do kitassato cheio de água obtida da curva de calibração
DAP	Densidade Aparente do corpo-de-prova
DAP _{SSS}	Densidade Aparente do corpo-de-prova na condição Saturado Seco Superficialmente
DC	Deformação Controlada
DMM	Densidade Máxima Medida da mistura
DMN	Diâmetro Máximo Nominal
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
DP	Desvio Padrão
DP _{CE}	Deformação Permanente medida no ensaio de “Creep” Estático
DR _{CE}	Deformação Recuperável medida no ensaio de “Creep” Estático
DT _{CD}	Deformação Recuperável medida no ensaio de “Creep” Dinâmico

DT _{CE}	Deformação Total medida no ensaio de “ <i>Creep</i> ” Estático
d _x	Distância entre os níveis do fator quantitativo x
E	Estabilidade; Massa da amostra + kitassato modificado completo com água; Tempo de envelhecimento da mistura
EE _{DP}	Estimativa de Erro do Desvio Padrão
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ELSYM5	<i>Elastic Layer System</i>
ES	Especificação de Serviço
ESALS	Número equivalente de operações do eixo padrão
EVA	Etileno Acetato de Vinila
f	Porcentagem passada na peneira 0,075 mm
F	Fluência; Carga de ruptura; Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova
F ₀	Valor de F para a variável analisada
FC	Fator de Controle
FCL	Fator Campo-Laboratório
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	Número de Fluência
FORTAN	<i>Formula Translator</i>
FT	Tempo de Fluência
g	Gramas(s); Porcentagem passada na peneira 9,52 mm e retida na peneira 4,76 mm
G	Porcentagem retida na peneira 9,52 mm
GL	Grau(s) de Liberdade
G _{sb1}	Massa específica da pedra 1
G _{sb2}	Massa específica do pedrisco
h	Hora(s)
H	Altura média do corpo-de-prova

IDOT	Departamento de Transportes de Illinois
I_{CD}	Inclinação da curva no estágio secundário de “ <i>creep</i> ” dinâmico
I_{CE}	Inclinação da curva no estágio secundário de “ <i>creep</i> ” estático
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
m	Metro(s); Módulo de riqueza em asfalto
M	Massa inicial do corpo-de-prova
M'	Massa final do corpo-de-prova
Ma	Massa do agregado
MA	Massa ao Ar do corpo-de-prova
MA _{SSS}	Massa ao Ar do corpo-de-prova na condição Seco Saturado Superficialmente
M _c	Massa do Cilindro
M _{CAP}	Massa total de asfalto
M _{CAP,abs}	Massa de asfalto absorvido
M _{cc}	Massa do cilindro com agregado
M _{cf}	Massa do cilindro com agregado fino
M _{cv}	Massa do cilindro vazio
ME	Metodologia de Ensaio
MEC	Massa Específica Compactada do agregado fino
MEE _f	Massa Específica Escolhida para o agregado fino
MEE _g	Massa Específica Escolhida para o agregado graúdo
MEM	Massa específica da mistura
MES	Massa Específica Solta
MES _d	Massa Específica Solta Desejada
MF ₃₆₀₀	Módulo de Fluência medido aos 3600 segundos no ensaio de “ <i>creep</i> ” estático

MF ₄₅₀₀	Módulo de Fluência medido aos 4500 segundos no ensaio de “ <i>creep</i> ” estático
MF _{CD}	Módulo de Fluência medido no ensaio de “ <i>creep</i> ” dinâmico
MI	Índice de Fluidez; Massa Imersa do corpo-de-prova
min	Minuto(s)
mm	Milímetro(s)
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência por compressão diametral
MR _{inst}	Módulo de Resiliência Instantâneo
MR _{total}	Módulo de Resiliência Total
Mtm	Massa total da mistura
n	Número de amostras analisadas
N	Número de ciclos do eixo padrão
NBR	Norma Brasileira
Nf	Vida de fadiga
Ns	Vida de serviço
PAG	Proporção dos agregados graúdos
PC	Polycarbonato
P _{ca}	Porcentagem de cimento asfáltico
PCP	Peneira de Controle Primário
PCP _p	Quantidade passada na peneira de controle primário
PCS	Peneira de Controle Secundário
PCS _p	Peneira de controle secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PCT _p	Peneira de controle terciário
PE	Polietileno
PET	Poli(Tereftalato de Etileno)
PFAF	Proporção fina dos agregados finos

PFG ₁	Quantidade de finos na pedra 1
PFG ₂	Quantidade de finos no pedrisco
PGAF	Proporção graúda dos agregados finos
PGF	Quantidade de graúdos no agregado fino
P _l (E)	Equação polinomial linear correspondente ao fator E
P _l (T)	Equação polinomial linear correspondente ao fator T
PM	Peneira Média
PMMA	Poli(Metilmetacrilato)
PM _p	Quantidade passada na peneira média
pol	Polegada(s)
PP	Polipropileno
P _q (E)	Equação polinomial quadrática correspondente ao fator E
P _q (T)	Equação polinomial quadrática correspondente ao fator T
PS	Poliestireno
psi	Libra(s) por polegada
PU	Poliuretano
PVC	Poli(Cloreto de Vinila)
QAF	Quantidade de pó de pedra retida na PCP
QAG ₁	Quantidade de pedra 1 passante na PCP
QAG ₂	Quantidade de pedrisco passante na PCP
QM	Quadrado Médio
R ²	Coeficiente de determinação
RASF	Resíduo Asfáltico de Petróleo
RBV	Relação Betume-Vazios
REVAP	Refinaria Henrique Lage
RLCT	<i>Repeated-Load Creep Test</i>
rpm	Rotações Por Minuto

RT	Resistência à Tração por compressão diametral estática
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
s	Segundo(s)
S	Massa da amostra na condição saturada seca superficialmente; Superfície específica do agregado
SBR	Borracha Estireno Butadieno
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SQ	Soma dos Quadrados
sSF	Segundos Saybolt-Furol
SSS	Saturado Superfície Seca
SST	<i>Superpave Shear Tester</i>
T	Temperatura; Teor de EVA na mistura
TC	Tensão Controlada
T_{ca}	Teor de cimento asfáltico em relação à massa do agregado mineral
T'_{ca}	Teor de cimento asfáltico corrigido
TFOT	<i>Thin Film Oven Test</i>
TPU	Poliuretano Termoplástico
USP	Universidade de São Paulo
VA	Acetato de Vinila
VAG	Vazios no Agregado Graúdo
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V_{ap}	Volume aparente do agregado
V_c	Volume do cilindro
V_{cap}	Volume de vazios preenchido pelo cimento asfáltico
$V_{CAP,abs}$	Volume de asfalto absorvido
VCP	Volume do Corpo-de-prova
V_{ef}	Volume efetivo do agregado
V_{tm}	Volume total da mistura

V_v	Volume de vazios
WTT	<i>Wheel Tracking Test</i>
Y	Variável dependente
x	Nível do fator quantitativo
$\bar{x}$	Média aritmética dos valores do fator quantitativo x
ZR	Zona de Restrição
α_0	Média aritmética das observações
α_{EI}	Termo linear do coeficiente correspondente ao fator E
α_{Eq}	Termo quadrático do coeficiente correspondente ao fator E
α_{TI}	Termo linear do coeficiente correspondente ao fator T
α_{TIEI}	Coeficiente correspondente à interação dos termos lineares dos fatores T e E
α_{TIEq}	Coeficiente correspondente à interação do termo linear do fator T e o termo quadrático do fator E
α_{Tq}	Termo quadrático do coeficiente correspondente ao fator T
α_{TqEI}	Coeficiente correspondente à interação do termo quadrático do fator T e o termo linear do fator E
α_{TqEq}	Coeficiente correspondente à interação dos termos quadráticos dos fatores T e E
Δ	Deslocamento
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões
δ_{am}	Densidade real do agregado mineral
ε	Deformação
ε_p	Deformação permanente
ε_{qu}	Deformação obtida no ensaio de compressão não-confinada
ε_r	Deformação resiliente
ε_{rt}	Deformação resiliente total
λ_l	Constante tabelada para o polinômio linear = 1
λ_q	Constante tabelada para o polinômio quadrático = 3

μ	Coeficiente de Poisson
π	$\pi = 3,141593$
ρ_{af}	Massa específica real do agregado fino
ρ_{ag}	Massa específica real do agregado graúdo
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água na temperatura do ensaio
ρ_{ap}	Massa específica aparente do agregado
$\rho_{ap,af}$	Massa específica aparente do agregado fino
ρ_{CAP}	Massa específica do ligante asfáltico
ρ_{ef}	Massa específica efetiva do agregado
σ	Tensão
σ_c	Tensão de compressão
σ_t	Tensão de tração; Resistência à tração
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	41
<hr/>	
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	44
1.3. OBJETIVOS.....	45
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	45
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47
<hr/>	
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	47
2.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	48
2.2.1. Agregados.....	52
2.2.2. Ligante.....	54
2.2.3. Mistura.....	55
2.2.4. Métodos de ensaios para avaliar deformação permanente.....	56
2.2.4.1. Fluência por compressão uniaxial.....	57
2.3. FADIGA.....	65
2.3.1. Programa ELSYM5.....	72
2.4. POLÍMEROS.....	74
2.4.1. Considerações iniciais.....	74
2.4.2. Classificações dos polímeros.....	75
2.4.2.1. Quanto à disposição dos meros.....	76
2.4.2.2. Quanto à fultibilidade.....	77
2.4.2.3. Quanto ao comportamento mecânico.....	77
2.4.2.4. Quanto à forma da cadeia.....	78
2.4.3. Reações de polimerização.....	79
2.4.3.1. Polímeros de adição.....	79
2.4.3.2. Polímeros de condensação.....	80

2.4.4. EVA e o setor calçadista.....	80
2.5. MÉTODO BAILEY DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	84
2.6. ENVELHECIMENTO.....	85

3. MATERIAIS E MÉTODOS	93
-------------------------------	-----------

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	93
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	94
3.2.1. Ligante Asfáltico.....	94
3.2.2. Agregados.....	95
3.2.2.1. Granulometria.....	95
3.2.2.2. Absorção e massa específica do agregado graúdo.....	96
3.2.2.3. Absorção e massa específica do agregado fino.....	97
3.2.2.4. Ensaio de abrasão “Los Angeles”	103
3.2.3. Etileno Acetato de Vinila (EVA).....	105
3.3. VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA PESQUISA.....	107
3.3.1. Variáveis independentes.....	108
3.3.1.1. Fatores.....	108
3.3.1.2. Níveis.....	109
3.3.2. Variáveis dependentes.....	110
3.4. ENSAIOS PRELIMINARES.....	110
3.4.1. Método Bailey de seleção granulométrica.....	111
3.4.2. Dosagem Marshall.....	124
3.4.2.1. Temperatura de mistura e compactação.....	124
3.4.2.2. Determinação do teor ótimo provável de ligante asfáltico.....	125
3.4.2.3. Compactação.....	127
3.4.2.4. Densidade aparente dos corpos-de-prova.....	131
3.4.2.5. Densidade máxima teórica da mistura.....	132
3.4.2.6. Volume de vazios.....	132
3.4.2.7. Vazios preenchidos com cimento asfáltico.....	134
3.4.2.8. Vazios do agregado mineral.....	134
3.4.2.9. Relação betume-vazios.....	137
3.4.3. Densidade máxima medida e absorção de misturas asfálticas.....	139

3.4.3.1. Preparação das amostras.....	139
3.4.3.2. Determinação da densidade máxima medida.....	139
3.4.3.3. Determinação da densidade efetiva do agregado.....	142
3.4.3.4. Determinação da absorção.....	144
3.5. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS....	146
3.5.1. Resistência à tração por compressão diametral estática.....	146
3.5.2. Módulo de resiliência por compressão diametral.....	149
3.5.3. Fluência por compressão uniaxial estática (“ <i>creep</i> ” estático).....	155
3.5.4. Fluência por compressão uniaxial dinâmica (“ <i>creep</i> ” dinâmico).....	159
3.5.5. Vida de fadiga.....	161
3.5.6. Desgaste por abrasão no ensaio Cantabro.....	164
3.6. RESUMO DA PROGRAMAÇÃO EXPERIMENTAL.....	165

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 167

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	167
4.2. MODELOS DE REGRESSÃO.....	168
4.3. DOSAGEM MARSHALL.....	171
4.4. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS.....	176
4.5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	179
4.5.1. Módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica.....	179
4.5.1.1. Análise da variância e modelo estatístico do módulo de resiliência.....	182
4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral estática.....	183
4.5.2.1. Análise da variância e modelo estatístico de resistência à tração.....	186
4.5.3. Relação MR/RT.....	187
4.5.4. Vida de Fadiga.....	189
4.5.5.1. Simulação de tensões utilizando o programa ELSYM5.....	211
4.5.5. Fluência por compressão uniaxial estática.....	216
4.5.5.1. Análise da variância no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.....	221
4.5.5. Fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	228

4.5.4.2. Análise da variância e modelos estatísticos para os parâmetros do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	231
4.5.6. Desgaste por abrasão (Cantabro).....	234
4.5.4.2. Análise da variância e modelo estatístico do desgaste por abrasão.....	236

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 237

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	237
5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	238
5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ESTÁTICA...	239
5.4. VIDA DE FADIGA.....	239
5.5. FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA.....	240
5.6. FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL DINÂMICA.....	241
5.7. DESGASTE POR ABRASÃO NO ENSAIO CANTABRO.....	242
5.8. CONCLUSÕES GERAIS.....	242
5.9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	243

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....245

APÊNDICE A. Método Bailey.....	255
A.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	256
A.2. MÉTODO BAILEY.....	257
A.2.1. Massas específicas escolhidas.....	257
A.2.2. Contribuição inicial dos agregados.....	258
A.2.3. Peneiras de controle.....	259
A.2.4. Contribuição final dos agregados.....	260
A.2.5. Curva granulométrica.....	261
A.2.6. Parâmetros de controle.....	262

APÊNDICE B. Dosagem Marshall.....	263
B.1. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	264
B.2. TEMPERATURAS DE ENSAIO.....	266
B.3. PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL.....	267
APÊNDICE C. Absorção de asfalto.....	271
APÊNDICE D. Características volumétricas dos corpos-de-prova.....	275
D.1. DOSAGEM MARSHALL.....	276
D.2. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS.....	278
D.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	280
APÊNDICE E. Ensaio exploratório.....	289
APÊNDICE F. Módulos de resiliência por compressão diametral.....	293
F.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	294
F.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	300
APÊNDICE G. Resistência à tração por compressão diametral estática.....	309
APÊNDICE H. Fluência por compressão uniaxial estática.....	313
APÊNDICE I. Fluência por compressão uniaxial dinâmica.....	323
APÊNDICE J. Desgaste por abrasão no ensaio Cantabro.....	329

O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto.

(Thomas Huxley)

1 **INTRODUÇÃO**

A malha rodoviária nacional segundo uma pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) de 2005, em seus diversos níveis (federal, estadual e municipal), é de aproximadamente 1,6 milhão de quilômetros, porém somente 180 mil quilômetros estão pavimentados, ou seja, pouco mais que 10% do total, valor irrisório perto dos verificados em países desenvolvidos, como por exemplo a Alemanha, onde aproximadamente 98% de suas rodovias são pavimentadas. Outro agravante é a condição atual da malha rodoviária, que tem mais de 70% de sua extensão classificada como deficiente, ruim ou péssima, com relação ao pavimento, sinalização e geometria. Já que as rodovias brasileiras respondem por 46,6% do volume total de cargas transportadas e 61,1% do total de toneladas-quilômetro e,

considerando a pesquisa da CNT e também que a maior parte dessas cargas transportadas se dá através de rodovias pavimentadas, fica evidenciado o déficit qualitativo e quantitativo.

A expansão da indústria automobilística, por volta da década de 50, juntamente com os baixos preços dos derivados de petróleo, fez com que a modalidade rodoviária de transporte de cargas fosse escolhida como o principal meio de transporte no Brasil, sendo quase exclusiva até a década de 70. A partir da década de 80, o investimento público em setores como o de transportes foi indiscriminadamente diminuído devido, principalmente, ao aumento do preço do petróleo e políticas de combate à inflação e de redução da dívida externa, resultando não só no adiamento de projetos, mas também na não manutenção e conservação das rodovias existentes, justificados através da necessidade de cortes no orçamento.

Para que um pavimento tenha um bom desempenho, ou seja, suporte as ações do tráfego e intempéries durante o seu período de vida de projeto, são necessários o conhecimento das características dos materiais que o compõe, a utilização de um bom método de dimensionamento e um trabalho de conservação e manutenção preventivo e corretivo ao longo do tempo. Por estudos laboratoriais pode-se conhecer o comportamento dos materiais e, então, criar modelos que os represente da melhor maneira possível, permitindo um dimensionamento mais preciso e, por conseguinte, uma redução nos custos.

Com o intuito de melhorar a camada de concreto asfáltico dos pavimentos, para prevenir ou postergar o aparecimento de defeitos, aumentando assim a vida útil do

pavimento, tem-se estudado não somente os materiais que comumente compõem uma mistura asfáltica (pedra, fíler mineral e ligante asfáltico), mas também modificadores, que podem ser materiais termoplásticos ou termorrígidos, borracha, elastômeros, entre outros.

A utilização de modificadores tem a finalidade de melhorar características do concreto asfáltico, como a suscetibilidade térmica, a coesão, a elasticidade e a resistência à fadiga e ao desgaste.

Os métodos de inserção desses modificadores nas misturas asfáltica são basicamente dois:

- i. Processo úmido: o modificador, na forma de partículas muito pequenas, é incorporado ao ligante;
- ii. Processo seco: o modificador é incorporado à mistura como parte dos agregados, portanto, em partículas de maior tamanho.

O processo seco demanda menos energia (menor custo), pois o modificador utilizado não necessita de moagem, porém as pesquisas têm sido direcionadas, em sua maioria, às misturas asfálticas modificadas pelo processo úmido, com destaque para os modificadores borracha reciclada de pneus (BRP), estireno butadieno estireno (SBS), borracha estireno butadieno (SBR) e etileno acetato de vinila (EVA).

1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Um dos maiores problemas da humanidade é o descarte do lixo. A cada dia, toneladas e mais toneladas são descartadas de forma inadequada, causando sérios problemas ao meio ambiente. O desenvolvimento sustentável deve ser tomado como meta para que um país possa crescer, evoluir e mesmo assim garantir uma vida adequada às gerações futuras. Com base no conceito de desenvolvimento sustentável e da utilização de técnicas de reuso e reciclagem, muito dos rejeitos, outrora considerados lixo, tornaram-se matéria-prima, o que fez com que a exploração dos recursos naturais e o montante de resíduos depositados no meio ambiente diminuíssem.

O EVA provindo de resíduos das placas expandidas utilizadas pela indústria calçadista na confecção de palmilhas é direcionado aos aterros sanitários e/ou lixões e, embora não seja um material tóxico, ele não apresenta características biodegradáveis e é descartado em grande quantidade, já que cerca de 15% a 20% das placas expandidas são desperdiçadas na forma de aparas.

Visto o potencial de pavimentação que o Brasil possui e devido ao destino inadequado dos rejeitos de EVA das placas expandidas, houve a motivação para o estudo de sua inserção, utilizando-se o processo seco, em misturas asfálticas com o intuito de dar um destino adequado aos rejeitos, bem como melhorar as características mecânicas das misturas.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar a influência da adição do copolímero EVA em misturas asfálticas, pelo processo seco, com relação às propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- estudar o efeito da porcentagem de resíduos a ser utilizada, em volume, em substituição ao agregado;
- quantificar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com EVA e comparar com misturas asfálticas “convencionais”;
- analisar a influência do tempo de envelhecimento de curto prazo (“tempo de digestão”);
- verificar se há vantagens resultantes da utilização do copolímero EVA em misturas asfálticas quanto à diminuição do passivo ambiental.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica acerca dos principais tipos de defeitos em estudo na pesquisa (deformação permanente e fadiga) e como os materiais que compõem uma mistura asfáltica os afetam. Também se encontram revisões acerca: dos métodos de ensaio propostos por outros pesquisadores; do programa ELSYM5; de polímeros; do EVA e

a indústria calçadista; do método Bailey de seleção granulométrica e; do envelhecimento.

O Capítulo 3 trata: da obtenção, preparação, classificação e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa (ligante asfáltico, agregados e resíduo), das variáveis envolvidas na pesquisa (fatores e níveis); dos ensaios para determinação dos teores de resíduo a serem incorporados nas misturas asfálticas; da composição da curva granulométrica através do método Bailey; da dosagem e compactação pelo método Marshall; dos ensaios realizados (resistência à tração por compressão diametral estática, módulo de resiliência por compressão diametral, fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, vida de fadiga e desgaste por abrasão) e; um resumo do programa experimental.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios, propostos modelos estatísticos calibrados com os parâmetros significantes do teste F e são feitos breves comentários acerca dos resultados.

No Capítulo 5 encontram-se as conclusões e constatações decorrentes das análises dos resultados e as sugestões para os trabalhos futuros.

*A maior parte do tempo de um escritor é passado na leitura, para depois escrever:
uma pessoa revira metade de uma biblioteca para fazer um só livro.*

(Samuel Jhonson)

2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo traz uma revisão acerca dos principais defeitos em pavimentos asfálticos, método de seleção granulométrica dos agregados, polímeros e envelhecimento de misturas asfálticas.

A função de um pavimento é proporcionar economia, segurança e conforto ao usuário da via, porém esses parâmetros ficam comprometidos à medida que surgem defeitos no pavimento, reduzindo o seu desempenho ou serventia.

Os principais defeitos nos pavimentos são as deformações permanentes encontradas nas trilhas de roda e as trincas por fadiga, cada um associado principalmente a uma etapa de vida do pavimento. As deformações permanentes geralmente aparecem nos primeiros anos de vida do pavimento, o qual está mais sujeito à consolidação e às deformações cisalhantes plásticas. Por outro lado, as trincas por fadiga aparecem normalmente quando o pavimento asfáltico está mais envelhecido e, após ser submetido às cargas cíclicas, já não oferece boa resposta. Apesar de muitos fatores influenciarem esses tipos de defeitos, as deformações permanentes estão mais relacionadas às propriedades dos agregados e da seleção granulométrica, enquanto que a fadiga está relacionada à flexibilidade das camadas do pavimento.

2.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O pavimento flexível apresenta uma deformação ao ser submetido a uma carga. Quando essa deformação é plástica, recebe o nome de *deformação permanente*. Esse tipo de defeito causa grande preocupação quando aparece de forma prematura e excessiva.

Diversos autores, entre eles Motta e Pinto (1994), relatam que a deformação permanente é um dos principais mecanismos que determinam a vida útil de um pavimento.

Coelho (1996) cita dois problemas com relação às deformações permanentes: (i) a configuração de um quadro de aquaplanagem, quando a camada superficial do

pavimento é impermeável e no canal formado pelas trilhas de roda há uma lâmina d'água; (ii) os veículos leves têm uma pior dirigibilidade nos casos de deformações permanentes excessivas, havendo, portanto, redução na segurança, além do comprometimento da estética ou até da estrutura do pavimento.

A deformação permanente ocorre por *consolidação* (ou densificação) e por *deformação cisalhante*. A consolidação é a compactação que ocorre no pavimento, pelo tráfego, após a sua construção, devido ao fato do teor de vazios da mistura asfáltica compactada ser maior que o de projeto, dessa forma, a ação de um tráfego canalizado faz com que haja uma densificação nas áreas das trilhas de roda, reduzindo o teor de vazios ao de projeto e completando, assim, a compactação (ROBERTS *et al.*, 1991).

De acordo com diversos autores, a deformação permanente pode se dar por movimentação plástica, por consolidação ou por deformação mecânica. A deformação permanente causada pela movimentação plástica apresenta uma depressão no centro da aplicação das cargas pelos veículos com elevações de ambos os lados e ocorre geralmente quando o volume de vazios é menor que 4% e/ou a temperatura ambiente é muito alta, fazendo com que o ligante atue como um lubrificante. A deformação permanente ocorrida por consolidação tem como característica as depressões nas trilhas de roda e, normalmente, ocorre quando o volume de vazios da mistura é maior que 8%, ocasionando a compactação da camada asfáltica pelo tráfego. Já a deformação permanente ocasionada por deformação mecânica apresenta o afundamento de outras camadas do pavimento além da capa asfáltica e aparece juntamente com trincas de tração na parte inferior

da capa asfáltica, geralmente em pavimentos com estrutura mal dimensionada para o tráfego ao qual deve suportar.

A Figura 2.1a mostra um exemplo de deformação permanente causada pela compactação pós-construção e a Figura 2.1b mostra um exemplo de deformação permanente causada pelo rompimento das camadas do pavimento. (adaptado de THIESSEN; SHALABY; KAVANAGH; 2000).

FONTE: Adaptado de Thiessen, Shalaby e Kavanagh, 2000.

Figura 2.1. Exemplos de deformação permanente encontrada nas trilhas de roda.

A Tabela 2.1, adaptada de Souza, Craus e Monismith (1991), mostra como a mudança de alguns fatores influi nas deformações permanentes.

Tabela 2.1 – Fatores que influem na deformação permanente em concretos asfálticos.

Objeto de estudo	Fator	Variação do fator	Efeito na resistência às deformações permanentes
Agregados	Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumento
	Granulometria	Aberta para contínua	Aumento
	Angularidade	Redondo para anguloso	Aumento
	Tamanho	Aumento do tamanho máximo	Aumento
Ligante	Rigidez ^(a)	Aumento	Aumento
Mistura	Quantidade de ligante	Aumento	Redução
	Volume de vazios ^(b)	Aumento	Redução
	Vazios dos agregados minerais	Aumento	Redução ^(c)
	Método de compactação	- ^(d)	- ^(d)
Condições de campo e de ensaio	Temperatura	Aumento	Redução
	Estado de tensão/deformação	Aumento da pressão de contato dos pneus	Redução
	Repetições do carregamento	Aumento	Redução
	Água	Seco para molhado	Redução ^(e)

(a) Refere-se à rigidez na temperatura em que a propensão às deformações permanentes está sendo determinada. A adição de produtos modificadores das características do ligante pode ser usada para aumentar a rigidez do material nas temperaturas críticas.

(b) Quando o volume de vazios for inferior a 3%, a propensão às deformações permanentes aumenta.

(c) Valores de VAM muito baixos (<10%) devem ser evitados.

(d) O método de compactação, tanto no campo quanto em laboratório, pode influenciar na estrutura do material e, portanto, na sua propensão às deformações permanentes.

(e) Se a mistura for sensível à água.

FONTE: Adaptado de Souza, Craus e Monismith, 1991

Souza, Craus e Monismith (1991) relataram que, embora a densificação das misturas asfálticas (mudança de volume) tenham algum efeito sobre as deformações permanentes, a principal causa para esse defeito são as repetitivas deformações cisalhantes causadas pelos carregamentos do tráfego. Os mesmos autores ainda citaram que entre os principais fatores que afetam as deformações permanentes estão a magnitude do carregamento aplicado pela pressão dos pneus, o volume de tráfego, o ambiente térmico e as variações das propriedades da mistura, como as características dos agregados (especificamente textura superficial, angularidade e graduação) e o teor e a rigidez do ligante.

2.2.1. Agregados

Muitos dos esforços realizados para solucionar o problema de deformação permanente estão focados no estudo dos agregados, visto que a experiência tem demonstrado que este é o fator mais relevante ao se tratar desse tipo de defeito. Estudos realizados por Button, Perdomo e Lytton (1990) mostram que as misturas asfálticas que contêm areia natural (arredondada) se deformam plasticamente mais rapidamente que misturas asfálticas que contêm partículas britadas (angulares), sob a ação de cargas estáticas ou dinâmicas. A deformação permanente pode ser minimizada utilizando-se agregados de maior *diâmetro máximo nominal* (DMN), de forma angular e textura rugosa (ROBERTS *et al.*, 1991).

Nas especificações SUPERPAVE há uma região da curva granulométrica conhecida como *zona de restrição* (ZR), que varia de acordo com DMN e serve de guia para assegurar que não seja usada muita areia natural na mistura, como também

assegura o valor mínimo de VAM requerido. Porém, há alguns tipos de agregados que podem ter sua graduação passando através da zona de restrição e, mesmo assim, apresentar um bom resultado, como citou Gouveia (2002): *“Agregados que não possuem excessiva quantidade de partículas arredondadas e que satisfaçam o VAM mínimo podem passar através da zona de restrição e, ainda assim, apresentar desempenho satisfatório”*. As especificações SUPERPAVE também prevêem alguns limites, denominados *pontos de controle*, dentro dos quais deve passar a curva granulométrica. A Tabela 2.2, extraída de Motta *et al.* (1996), mostra os valores de controle volumétrico indicados pelo SUPERPAVE para o DMN de 9,5 mm, que corresponde à composição granulométrica utilizada na pesquisa, para diferentes DMN deve-se utilizar outras tabelas.

Tabela 2.2 – Zona de restrição e pontos de controle para DMN 9,5 mm.

Peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada			
	Pontos de controle		Zona de restrição	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
12,5	100,0	100,0	-	-
9,5	100,0	100,0	-	-
4,75	-	90,0	-	-
2,36	32,0	67,0	47,2	47,2
1,18	-	-	31,6	37,6
0,60	-	-	23,5	27,5
0,30	-	-	18,7	18,7
0,15	-	-	-	-
0,075	2,0	10,0	-	-

FONTE: Motta *et al.*, 1996

Kandhal e Mallik (2001) realizaram um estudo sobre a zona de restrição na curva granulométrica introduzida pelo SUPERPAVE, utilizando um *“Asphalt Pavement Analyzer”* (APA), para agregados de origem calcária, cascalhos e granitos. Ao se estudar os agregados de origem calcária e os granitos, os autores verificaram que a

graduação que passou abaixo da zona de restrição geralmente apresentou maior quantidade de deformação permanente, a que passou através da zona de restrição apresentou as menores quantidades de deformação permanente, enquanto que a graduação que passou acima da zona de restrição apresentou uma quantidade intermediária de deformação permanente. Ao se utilizar cascalho, os autores verificaram que as graduações que passaram abaixo, acima e através da zona de restrição apresentaram deformação permanente menores, maiores e intermediárias, respectivamente.

Ao utilizar o “*Superpave Shear Tester*” (SST), os autores concluíram que, em termos de pico de deformação cisalhante, não havia diferenças significativas entre as graduações que passaram abaixo, através ou acima da zona de restrição, ao se utilizar granito. No caso do agregado de origem calcária, a curva granulométrica que passou abaixo teve o maior pico de deformação cisalhante (indicativo de potencial de deformação permanente). Já no caso do cascalho, o maior pico se deu na curva que passou acima e o menor valor foi encontrado na curva que passou através da zona de restrição. Os autores da pesquisa deixam a ressalva que o SST não aparenta ser tão sensível às diferentes graduações quanto o APA.

2.2.2. Ligante

Embora o ligante não seja o principal fator de importância com relação à deformação permanente, muitos autores, como Mahboub e Little (1988) *apud* Little, Button e

Youssef (1993)¹, citam que a utilização de ligante com maior rigidez minimiza o aparecimento de deformações permanentes. Santanna-Greco (2004) concluiu que misturas envelhecidas apresentam maiores valores de módulo de fluência e menores valores de deformação total, o que indica que um aumento na rigidez do ligante faz com que haja uma redução no potencial de deformação permanente.

2.2.3. Mistura

O uso excessivo de ligante diminui o volume de vazios da mistura, porém o volume diminuído é o mesmo que é preenchido pelo ligante e este atua como um lubrificante entre as partículas, o que reduz o atrito interno na mistura e, portanto, aumenta o potencial de deformação permanente.

Zhu, Liu e Fwa (2002) realizaram ensaios em laboratório para prever deformação permanente através do “*Wheel Tracking Test*” (WTT) e do “*Repeated-Load Creep Test*” (RLCT). Em ambos os equipamentos os testes foram realizados a 28°C, 40°C e 60°C. As misturas apresentaram maiores tendências à deformação permanente com o aumento da temperatura, como também resistiram menos à deformação permanente com o aumento de carga aplicada. Foram encontradas maiores deformações permanentes no ensaio utilizando o WTT nas menores velocidades, justificadas pelos autores que maiores períodos de carregamentos permitem o desenvolvimento de maior deformação viscosa. Também concluíram que as misturas que utilizaram agregados com superfície mais angular e textura superficial

¹ LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. (1993). *Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential*. Transportation Research Record, n.1417, p.49-57.

mais rugosa apresentaram maior resistência à deformação permanente, assim como as misturas que utilizaram ligante com ponto de amolecimento mais alto.

2.2.4. Métodos de ensaios para avaliar deformação permanente

Segundo Brown, Khandal e Zhang (2001), numerosos métodos de ensaio têm sido usados com o intuito de caracterizar as respostas dos materiais de um pavimento à deformação permanente, podendo ser classificados assim:

i. Ensaio fundamentais:

- Ensaio uniaxial e triaxial: não confinado (uniaxial) e confinado (triaxial);
- Ensaio de cisalhamento;
- Ensaio diametrais: corpos-de-prova cilíndricos (“*creep*”).

ii. Ensaio empíricos:

- Marshall;
- Hveem;
- Máquina de ensaios giratórios do “*Corps of Engineering*”;
- Indicador de pressão lateral.

iii. Ensaio simulativos:

- “*Asphalt Pavement Analyzer*” (nova geração do “*Georgia Loaded Wheel Tester*”);
- “*Hamburg Wheel-Tracking Device*”;
- “*French Rutting Tester*” (“*LCPC Wheel Tracker*”);

- “*Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device*”;
- “*Model Mobile Load Simulator*”;
- “*Dry Wheel Tracker*” (“*Wessex Engineering*”);
- “*Rotary Loaded Wheel Tester*” (“*Rutmeter*”).

Nessa pesquisa foram utilizados os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica e as características desses ensaios estão descritas a seguir.

2.2.4.1. Fluência por compressão uniaxial

O ensaio de fluência por compressão uniaxial, seja confinado ou não, tem sido usado por muitos órgãos para prever deformação permanente. Van de Loo (1976) descreveu o ensaio, explicando que o corpo-de-prova utilizado deve ter as faces paralelas, planas, lisas e bem lubrificadas, a fim de garantir uma tensão uniforme e evitar tensões cisalhantes. O corpo-de-prova deve ser colocado entre dois pratos metálicos, sendo um fixo e o outro móvel. Os deslocamentos são medidos através de dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) como sendo função do tempo. A temperatura durante o ensaio deve ser mantida constante. O autor afirmou que quando o resultado do ensaio é expresso com relação à deformação (medida da mudança na altura dividida pela altura original), independe a forma do corpo-de-prova e a taxa de variação da altura pelo diâmetro, mantidas as condições de faces paralelas, planas e bem lubrificadas.

Diversos sistemas de carregamento podem ser utilizados para medir a resposta da mistura aos carregamentos repetidos, porém o mais comum é o sistema pneumático

(SOUZA; CRAUS; MONISMITH; 1991). Esse sistema pode incluir também uma câmara de controle de temperatura.

A Figura 2.2 mostra os gráficos de tensão e deformação do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 2.2. Gráficos típicos da deformação em função do tempo para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Van de Loo (1974) recomenda que sejam usados baixos níveis de tensão nos ensaio de fluência, para que possam ser comparados os resultados do ensaio com as deformações causadas nas trilhas de roda, procurando-se manter o comportamento linear do material.

Segundo Witczak *et al.* (2002), em um ensaio de fluência por compressão uniaxial, uma relação total tempo-deformação para uma mistura é medida em laboratório sobre condições confinadas ou não confinadas, usando um ciclo de carregamento-descarregamento ou ciclos de incremento de carga e descarregamento. Dessa forma é possível obter informações suficientes para determinar o *componente*

elástico instantâneo (recuperável) e o *componente plástico* (irrecuperável), como também os *componentes viscoelásticos* e *viscoplásticos* (que são funções do tempo) de resposta do material.

A Figura 2.3 mostra as características de uma curva típica do ensaio de fluência por compressão uniaxial, seja carregamento estático ou dinâmico, quando levado até a ruptura. A conformidade total pode ser dividida em três zonas. A *zona primária* é a parte na qual as taxas de deformações decrescem com o tempo de carregamento, a *zona secundária* corresponde a parte na qual as deformações são constantes e na *zona terciária* a taxa de deformações cresce com o tempo de carregamento. À zona terciária correspondem as deformações plásticas do material e o ponto onde essas deformações começam chama-se *número de fluência* (FN) ou *tempo de fluência* (FT). O parâmetro de intercepto “a” representa a deformação permanente correspondente ao número de ciclos igual a 1 e o parâmetro “b” representa a taxa de mudança da deformação permanente como uma função da taxa de carregamento e ambos os parâmetros estão relacionados à zona secundária da conformidade da fluência por compressão uniaxial. Um modelo clássico, que representa matematicamente o comportamento dessa zona, é dado pela Equação 2.1. Fica claro que as constantes de regressão “a” e “b” ignoram a zona terciária de deformação do material.

Figura 2.3. Curva típica de deformação pelo número de ciclos no ensaio de fluência por compressão uniaxial.

$$\varepsilon = a \times N^b \quad (2.1)$$

em que,

- ε : log da deformação;
- a : parâmetro de intercepto para $N = 1$;
- N : número de ciclos;
- b : inclinação referente à zona secundária.

Little, Button, e Youssef (1993) propuseram o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática com a utilização do tempo de carregamento de uma hora a uma temperatura de 40°C. A análise dos resultados fica em função da deformação total aos 3600 segundos, da inclinação da curva de fluência no estágio da zona secundária e do módulo de fluência. Os autores apresentam as Tabelas 2.3 e 2.4

como critérios a serem seguidos, em função dos resultados do ensaio. A Tabela 2.3 foi criada a partir de dados gerados com ensaios utilizando 0,69 MPa de tensão.

Tabela 2.3 – Critério para controle da deformação através de valores obtidos no ensaio de fluência.

Deformação total em 1 hora de carregamento (%)	Inclinação da curva de fluência no estágio secundário ou estágio de deformação constante					
	< 0,17	< 0,20	< 0,25	< 0,30	< 0,35	< 0,40
< 0,25	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	IV ²	III
< 0,40	IV ²	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²
< 0,50	IV ²	IV ²	III ²	III ²	III ²	II
< 0,80	III ²	III ²	II	II	II	II
< 1,00	I	I	I	I	I	-
< 1,20	I	I	I	-	-	-

- I – Tráfego de baixa intensidade: $< 10^5$ operações do eixo padrão.
- II – Tráfego de moderada intensidade: $> 10^5$ e $< 5 \times 10^5$ op. do eixo padrão.
- III – Tráfego de alta intensidade: $> 5 \times 10^5$ e $< 10^6$ op. do eixo padrão.
- IV – Tráfego de muito alta intensidade: $> 10^6$ operações do eixo padrão.
- 1 – Deve também ter $\varepsilon_p < 0,8 \%$ para 1800 segundos de carregamento.
- 2 – Deve, se possível, seguir o seguinte critério: $\varepsilon_{rt} + \varepsilon_p < 0,5 \varepsilon_{qu}$, em que ε_p é a deformação permanente no final do carregamento, ε_{rt} é a deformação resiliente total obtido no ensaio de módulo resiliente uniaxial e ε_{qu} é a deformação obtida no ensaio de compressão não-confinada, conforme ASTM T 167.

Fonte: Adaptação de Little, Button e Youssef (1993).

Tabela 2.4 – Critério do módulo de fluência para 1 hora de carregamento.

Resistência à formação de trilhas de rodas	Nível de Intensidade de Tráfego	Módulo de fluência mínimo (MPa)		
		Tensão de ensaio (MPa)		
		0,207	0,345	0,483
Alta	IV	103,4	120,7	155,1
	III	48,3	69,0	96,5
	II	34,5	44,8	60,3
	I	20,7	27,6	41,4
Moderada	IV	51,7	69,0	96,5
	III	34,5	50,0	96,0
	II	24,1	41,4	51,7
	I	17,2	20,7	27,6

Fonte: Adaptação de Little, Button e Youssef (1993).

Mugayar (2004), após analisar os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática através da variância, concluiu que os valores de deformação final e total mostraram-se sensíveis às variações de tensão de ensaio e da distribuição granulométrica, porém não se mostraram sensíveis quanto à mudança no tipo de asfalto. Já o ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, foi capaz de detectar diferenças no comportamento de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes.

Brown, Kandhal e Zhang (2001), após longo estudo sobre os métodos de previsão de deformação permanente utilizando quatro amostras com desempenhos relativamente conhecidos, determinaram as vantagens e desvantagens dos métodos estático e dinâmico. A Tabela 2.5. apresenta as conclusões dos autores com relação aos ensaios uniaxiais estáticos e dinâmicos.

Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica.

Método de ensaio	Dimensões dos corpos-de-prova	Vantagens	Desvantagens
Compressão uniaxial estática	4 pol. de diâmetro x 2 pol. de altura	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de realização do ensaio; - Equipamento disponível na maioria dos laboratórios; - Corpo-de-prova facilmente moldado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Habilidade em prever deformação permanente questionável; - A temperatura de ensaio restrita e os níveis de carga não simulam as condições de campo; - Não simula os fenômenos dinâmicos de campo.
Compressão uniaxial dinâmica	4 pol. de diâmetro x 2 pol. de altura	<ul style="list-style-type: none"> - Simula melhor as condições de tráfego. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipamento mais complexo; - A temperatura de ensaio restrita e os níveis de carga não simulam as condições de campo.

FONTE: Adaptação de Brown, Kandhal e Zhang (2001).

Apesar das desvantagens apresentadas pelos autores, os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica foram utilizados nesta pesquisa pelo fato de serem os únicos métodos disponíveis no laboratório do Departamento de Transportes do campus de São Carlos da Universidade de São Paulo e pela facilidade na execução do ensaio. Outros pesquisadores do mesmo departamento realizaram ensaios semelhantes e suas características estão apresentadas na Tabela 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6 – Histórico de previsão de deformação permanente através do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática do departamento de transportes da USP – São Carlos.

Pesquisador	Tempo de carregam. (s)	Tempo de recuper. (s)	Tensão de carregam. (MPa)	Temp. de ensaio (°C)
Coelho (1996)	3600	900	0,4	40
Foretti (1999)	3600	900	0,4	40
Silveira (1999)	3600	900	0,4	40
Amaral (2000)	3600	900	0,1	40
Taira (2001)	3600	900	0,1; 0,4; 0,7	40
Faxina (2002)	3600	900	0,4; 0,7	40
Cunha (2004)	3600	900	0,1	40
Mugayar (2004)	3600	900	0,1; 0,4; 0,7	40
Santanna-Greco (2004)	3600	900	0,1	40

Tabela 2.7 – Histórico de previsão de deformação permanente através do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica do departamento de transportes da USP – São Carlos.

Pesquisador	Tempo de carregam. (s)	Tempo de recuper. (s)	Tensão de carregam. (MPa)	Nº de ciclos	Temp. de ensaio (°C)
Silveira (1999)	0,2	0,8	0,1	5000	40
Taira (2001)	0,2	1,8	0,1	5000	40
Mugayar (2004)	0,1	0,9	0,1; 0,4; 0,7	5000	40
Santanna-Greco (2004)	0,1	0,9	0,4	5000	40

2.3. FADIGA

De acordo com informações apresentadas por Fernandes Jr. (1994),

fadiga é o fenômeno estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material submetido a tensões ou deformações repetidas, inferiores à sua resistência última, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após um número suficiente de solicitações. O processo de fadiga modifica as propriedades do material a cada ciclo de carga, provocando, geralmente, uma redução na sua capacidade de suporte.

Trincas por fadiga nos concretos asfálticos é um dos mais importantes defeitos que afetam o desempenho de um pavimento flexível e, segundo Motta e Pinto (1994), é o principal defeito e o principal mecanismo que leva um pavimento à ruptura no Brasil. A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade que esta mistura apresenta de resistir aos esforços repetitivos de flexão (esforço cíclico) sem se romper.

Quando uma mistura asfáltica está sujeita a carregamentos (ou tensões) cíclicos, a resposta do material na tração e na compressão consiste de três componentes de deformação principais: elástica, viscoelástica e plástica. As trincas por fadiga ocorrem devido à componente de deformação plástica, ou seja, se a mistura fosse completamente elástica, não ocorreria fadiga (KHATTAK e BALADI, 2001). Segundo Roberts *et al.* (1991) esse problema se torna mais grave quando não há um sistema de drenagem adequado, pois permite que as camadas do pavimento sejam saturadas por água e percam resistência.

O Manual de Identificação de Defeitos (FHWA, 2003) classifica as trincas por fadiga em três níveis: baixo, moderado e alto. No nível baixo, na área de trincas, encontram-se poucas ou nenhuma delas se conectando, as trincas não precisam ser seladas e o bombeamento não é evidente. No nível moderado, a área de trincas interconectadas forma um padrão completo, as trincas podem ser seladas e o bombeamento ainda não é evidente. Já no nível alto, a área apresenta-se moderada ou severamente fragmentada por trincas interconectadas e alguns trechos não podem mais estar sujeitos às ações do tráfego, as trincas podem ser seladas e o bombeamento pode ser evidente. Si, Little e Lytton (2002) dividiram as trincas por fadiga em três estágios: início de microtrincas e crescimento, propagação de macrotrincas e ruptura final.

O local para o aparecimento das trincas por fadiga é na base da camada de concreto asfáltico e diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga, pois neste ponto o estado de tensões apresenta componentes de tração nas direções transversal e longitudinal e de compressão na direção vertical (WEN e KIM, 2002).

Diversos são os fatores que influenciam na vida de fadiga de um pavimento (número de solicitações que o pavimento resiste antes de se romper), entre eles se encontram as características do tráfego, do pavimento e condições climáticas. Como característica do pavimento, há a influência do ligante (viscosidade e teor utilizado com relação à massa total de agregados), do agregado (distribuição granulométrica, textura e forma), da mistura (com relação ao volume de vazios) e da espessura da camada.

Tangella *et al.* (1990) afirmaram que, para mistura de graduação densa, os dois primeiros fatores que influenciam na vida de fadiga são o teor de asfalto e o teor de vazios na mistura. O teor de asfalto deve ser o mais alto possível, porém ter como limite a estabilidade da mistura, e o teor de vazios deve ser de 4%. Segundo o autor, altas temperaturas diminuem a vida de fadiga no caso de pavimentos espessos, mas aumenta a vida de fadiga para pavimentos esbeltos.

Um aumento na viscosidade do ligante faz com que a rigidez da mistura aumente. Se o pavimento possuir uma camada de concreto asfáltico esbelta e alta rigidez ele se torna propenso às trincas por fadiga, porém se o pavimento for espesso e projetado para resistir a altos carregamentos, este deve ter uma rigidez elevada (SANTANNA-GRECO, 2004).

Segundo Kim, Y.R., Kim, N. e Khosla (1992), misturas contendo agregados com textura superficial rugosa são mais resistentes à fadiga, pois estes promovem uma melhor interface de união agregado-ligante. Kim, Little e Song (2003), através de um modelo de previsão mecânica de fadiga, utilizaram a teoria da viscosidade e concluíram que a fração fíler do agregado mineral aumenta a resistência às microtrincas devido a mais baixa taxa de evolução e mais alta acumulação de dano total. A Tabela 2.8 mostra como alguns fatores influenciam na vida de fadiga das misturas asfálticas.

Tabela 2.8 – Influência de alguns fatores na vida de fadiga das misturas asfálticas.

Fator	Variação	Efeito da variação		
		Rigidez	Vida de fadiga (TC) ^(a)	Vida de fadiga (DC) ^(b)
Viscosidade do ligante	Aumento	Aumento	Aumento	Diminuição
Teor de ligante	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Distribuição granulométrica do agregado	Aberta para contínua	Aumento	Aumento	Diminuição
Volume de vazios	Diminuição	Aumento	Aumento	Aumento

(a) Ensaio de tensão controlada.

(b) Ensaio de deformação controlada.

FONTE: Adaptação de Tangella *et al.*, 1990.

O ensaio de fadiga tem o objetivo de verificar o número de solicitações que uma determinada carga leva para conduzir uma mistura asfáltica à ruptura. São três os critérios de ruptura comumente utilizados:

- Redução da rigidez inicial da mistura a um determinado valor (geralmente 50% do valor inicial);
- Surgimento da primeira fissura;
- Ruptura total do corpo-de-prova.

O ensaio pode ser realizado com *tensão controlada* (TC) ou *deformação controlada* (DC). No ensaio de tensão controlada, a tensão permanece constante ao longo do ensaio e a deformação aumenta no decorrer deste. Já no ensaio de deformação controlada ocorre o contrário, a deformação é mantida constante e a tensão varia ao longo do ensaio. No primeiro ensaio, o resultado é a *vida de fadiga* (Nf) da mistura asfáltica e no segundo ensaio o resultado é a *vida de serviço* (Ns) (PINTO, 1991).

Segundo Medina (1997), os revestimentos asfálticos espessos e/ou muito mais rígidos que a estrutura subjacente do pavimento controlam a magnitude das deformações, ao resistirem às cargas aplicadas, e estão sujeitos à tensão controlada. Os pavimentos mais esbeltos estão sujeitos à deformação controlada, pois há uma contribuição maior das subcamadas na absorção das tensões.

As Figuras 2.4 e 2.5, extraídas de Pinto (1991), apresentam as curvas características dos ensaios de tensão controlada e deformação controlada, respectivamente.

Figura 2.4. Curvas características do ensaio de vida de fadiga por tensão controlada.

Figura 2.5. Curvas características do ensaio de vida de fadiga por deformação controlada.

Segundo Santos (2005), no Brasil, a adoção do critério de tensão controlada, utilizando-se a *diferença de tensões* ($\Delta\sigma$), é o mais usual.

Balbo (2000) citou que o corpo-de-prova, em um ensaio de compressão diametral, está submetido a um estado biaxial de tensões. No plano paralelo à aplicação da carga, está solicitado à compressão, e no plano normal à aplicação da carga, está solicitado à tração. A diferença de tensões é dada pela diferença entre a tensão de tração e a tensão de compressão do corpo-de-prova, medidas no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tangella *et al.* (1990) apresentaram as vantagens e desvantagens em se utilizar o método de compressão diametral para a previsão de deformação permanente:

- Vantagens:

- i. Facilidade de ensaio;
- ii. O projeto da mistura e do pavimento adequado à fadiga é possível, em princípio, utilizando a resposta de fadiga medida pelo ensaio juntamente com a correlação de campo;
- iii. O equipamento pode ser usado em outros ensaios, como módulo de resiliência e resistência à tração;
- iv. As trincas se iniciam na região de relativa tensão de tração uniforme;
- v. O estado biaxial de tensões existente, possivelmente, representa melhor as condições de campo;
- vi. O ensaio pode ser realizado não somente em corpos-de-prova moldados em laboratório, mas também em corpos-de-prova extraídos em campo.

- Desvantagens:
 - i. Embora um estado de tensões biaxiais exista no centro do corpo-de-prova, é impossível variar a taxa das componentes vertical e horizontal e, daí, replicar o estado de tensões dos locais críticos em um pavimento *in-situ*;
 - ii. O método subestima significativamente a vida de fadiga se a tensão de tração principal for utilizada como o fator de determinação do dano. Mesmo quando a diferença de tensões é utilizada, o método ainda subestima a vida de fadiga relativamente a outros métodos de laboratório;
 - iii. Há possibilidade de ausência de tensão reversa e acúmulo de deformação permanente.

De acordo com Ghile (2006), o motivo pelo qual os ensaios laboratoriais prevêem que o rompimento da mistura asfáltica por fadiga ocorre antes do que realmente acontece, deve-se ao fato da vida de fadiga ser função da distribuição de tensões e das condições limites, as quais são diferentes para as condições de laboratório e de campo. Entretanto, o autor citou que o ensaio de vida de fadiga permite fazer comparações entre o desempenho de várias misturas diferentes.

Diversos autores recomendam a utilização de um *fator campo-laboratório* (FCL), visando corrigir a severidade e as condições extremas a que os corpos-de-prova estão sujeitos em laboratório. Medina e Motta (2005) recomendam o uso do FCL de 10^4 para o ensaio com tensão controlada e de 10^5 para o ensaio com deformação controlada.

2.3.1. Programa ELSYM5

O programa ELSYM5 (*Elastic Layered System*) foi desenvolvido na Universidade de Berkeley na Califórnia, Estados Unidos da América, em linguagem FORTRAN (*Formula Translator*) para computadores de grande porte na década de 1970 e adaptado a microcomputadores por Kopperman *et al.* em 1985 (FERREIRA, 2000).

O programa utiliza como modelo as diferenças finitas, fundamentada nas equações generalizadas por Burmister em 1943, possibilitando o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos de até cinco camadas consideradas homogêneas, isotrópicas, elásticas e sem o peso próprio (PEREIRA, 2002). As camadas são consideradas infinitas na horizontal e finitas na vertical, com exceção da última camada, que é considerada ou infinita na vertical ou sobreposta sobre placa rígida de espessura finita (BENEVIDES, 2000).

A estrutura pode ser submetida a um ou mais carregamentos uniformes (até um máximo de dez), que são distribuídos em uma área circular, permitindo avaliar o efeito de rodas duplas.

Todos os parâmetros de entrada do programa são constantes e divididos em três etapas:

- i. Referentes aos carregamentos: quantidade (1 a 10), valor (carga ou pressão) e coordenadas (x, y);
- ii. Referentes às camadas e materiais: quantidade (1 a 5), espessura, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade;
- iii. Referentes às respostas: coordenadas (x, y, z) dos pontos.

O referencial é o sistema cartesiano de coordenadas e está disposto como apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6. Eixo de coordenadas do programa ELSYM5.

Os dados de saída do programa são: os deslocamentos, as tensões normais, cisalhantes e principais e as deformações normais, cisalhantes e principais.

De posse das tensões calculadas pelo programa é possível determinar a vida de fadiga do revestimento asfáltico, analisando-se a diferença de tensões na fibra inferior do material e o seu respectivo modelo constitutivo, obtido em laboratório.

2.4. POLÍMEROS

2.4.1. Considerações iniciais

O termo *polímero* vem do grego e significa muitas partes (poli = muitas e mero = partes), porém é indefinido, no sentido de que o menor comprimento ou tamanho das moléculas não é especificado. Por outro lado, este termo é aceito como significando uma molécula muito maior, de tal modo que as suas propriedades se tornam evidentes (MANO, 1988).

Polímeros contêm milhares de milhões de átomos em uma molécula muito grande e são também conhecidos por macromoléculas (CHANDA e ROY, 1998).

Segundo Mano (1998), os polímeros são constituídos da união de moléculas de baixo peso molecular, denominadas *monômeros*, através de reações químicas. O peso molecular de um polímero é maior quanto maior for o grau de *polimerização* (reação química que forma o polímero), termo utilizado primeiramente por Berthelot, em 1866, quando da obtenção de um poliestireno gelatinoso. Os que possuem peso molecular elevado são chamados de *altos polímeros*, enquanto os de baixo peso molecular são conhecidos como *oligômeros* (poucas partes, do grego).

O primeiro relato de material polimérico que se tem notícia foi criado por Charles Goodyear, em 1830, que descobriu que ao se aquecer uma mistura de borracha natural (extraída de seringueira) com enxofre, as propriedades mecânicas dessa macromolécula eram modificadas, ou seja, um material que inicialmente era mole e

pegajoso a baixas temperaturas e rígido e áspero a temperaturas mais elevadas, se tornou seco e flexível em qualquer temperatura. Entretanto a estrutura química das moléculas era desconhecida. Em 1877, Friedrich A. Kekulé propôs a primeira hipótese da existência de macromoléculas, que foi reafirmada por Emil Fisher, em 1893, ao sugerir que a estrutura da celulose natural era formada por cadeias constituídas por unidades de celulose, enquanto que os polipeptídeos eram longas cadeias de poliaminoácidos unidas.

2.4.2. Classificações dos polímeros

Um polímero que possua apenas um tipo de mero em sua cadeia é um *homopolímero* e um polímero que possua mais de um tipo de mero em sua cadeia é chamado de *copolímero*. Os monômeros que dão origem aos copolímeros são chamados de *comonômeros*, que é uma classificação quanto ao número de meros diferentes presentes em sua estrutura química.

Homopolímeros são compostos da unidade repetidora de um monômero, que formam uma cadeia molecular com seqüência do tipo: A A A A A, a partir da homopolimerização. Já os copolímeros são compostos de duas ou mais unidades repetidoras diferentes, formando uma cadeia polimérica a partir da reação dessas unidades.

Os copolímeros podem ser classificados de diferentes maneiras, como a disposição dos meros, fusibilidade, comportamento mecânico ou forma da cadeia.

2.4.2.1. Quanto à disposição dos meros

i. Aleatórios

Neste caso os meros são dispostos de forma desordenada na cadeia:

ii. Alternados

Nesse tipo de copolímero os meros estão ordenados de forma alternada na cadeia:

iii. Em blocos

Esses copolímeros são formados por seqüências de meros iguais de comprimentos variados:

iv. Grafitizados ou enxertados

Nesse caso a cadeia principal é formada por um tipo de unidade repetida, enquanto outro mero forma a cadeia lateral (enxertada).

2.4.2.2. Quanto à fulsibilidade

i. Termoplásticos

Se fundem ao serem aquecidos e se solidificam ao serem resfriados, podendo, alguns, serem dissolvidos em vários solventes, possibilitando a reciclagem. Podem ser maleáveis, rígidos ou frágeis à temperatura ambiente. Exemplos: polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET), policarbonato (PC), poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) (PVC), poli(metilmetacrilato) (PMMA).

ii. Termorrígidos

Fazem ligações cruzadas ao serem aquecidos, tornando-se insolúveis e infusíveis. Pelo fato de se decomporem antes de se fundirem, fazem com que sua reciclagem seja complicada. Podem ser rígidos ou frágeis e são muito estáveis à temperatura ambiente. Exemplos: Baquelite e Poliéster.

2.4.2.3. Quanto ao comportamento mecânico

Em sua aplicação, estes termos envolvem a expressão resina. Resina é uma substância amorfa ou uma mistura, de peso molecular intermediário ou alto, insolúvel em água, mas solúvel em alguns solventes orgânicos, e que, à temperatura ordinária, é sólida ou um líquido muito viscoso, que amolece gradualmente por aquecimentos. Todas as resinas naturais são solúveis e fusíveis e todos os polímeros sintéticos que obedecem às condições acima apontadas são também chamados de resinas sintéticas (MANO, 1988).

i. Plásticos

Plásticos são materiais que contêm, como componente principal, um polímero orgânico sintético e se caracterizam porque, embora sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, em alguns estágios de seu processamento, tornam-se fluídos e possíveis de serem moldados, por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Esse ingrediente polimérico é chamado de resina sintética. Exemplos: polipropileno e poliestireno.

ii. Elastômeros ou borrachas

Borrachas ou elastômeros são materiais macromoleculares que exibem elasticidade em longa faixa, à temperatura ambiente. Por não serem fusíveis, são de difícil reciclagem. Exemplos: polibutadieno, borracha nítica.

iii. Fibras

Fibra é um corpo que tem uma elevada razão entre o comprimento e as dimensões laterais e é composto, principalmente, de macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente. Exemplos: poliésteres, poliamidas, poliacrilonitrila.

2.4.2.4.Quanto à forma da cadeia

i. Linear

A cadeia do polímero não possui ramificações.

ii. Ramificada

O copolímero apresenta pequenas cadeias laterais

iii. Reticulada

Os polímeros apresentam uma estrutura tridimensional e as cadeias estão unidas por ligações químicas (cruzadas).

2.4.3. Reações de polimerização

2.4.3.1. Polímeros de adição

De acordo com Chanda e Roy (1998), os polímeros de adição são produzidos em maior escala dentre os polímeros industriais. Seus mais importantes monômeros são etileno, propileno e butadieno. Eles são baseados nos produtos de baixo custo do petróleo ou gás natural e são produzidos pela quebra ou refino de óleo cru.

São conhecidos quatro processos de polimerização para os polímeros de adição: polimerização de corrente por radical-livre-iniciado, polimerização aniônica, polimerização catiônica e polimerização por coordenação.

Dentre os polímeros de adição se encontram os polímeros de vinila, que constituem um importante seguimento da indústria de plásticos. Um dos mais comuns polímeros de vinila é o poli-(acetato de vinila), este que, por sua vez, se divide em dois grupos principais de copolímeros para as indústrias de plásticos: o copolímero etileno acetato de vinila e o copolímero cloreto de vinila – acetato de vinila.

2.4.3.2. Polímeros de condensação

Polímeros de condensação são formados de monômeros bi- ou polifuncionais pela reação que envolve eliminação de algumas moléculas menores. Em um polímero de condensação, os heteroátomos (O, N, S, Si) estão presentes no esqueleto do polímero, diferentemente dos polímeros de adição, em que a cadeia principal consiste inteiramente de correntes C-C (CHANDA e ROY, 1998).

2.4.4. EVA e o setor calçadista

O *copolímero etileno acetato de vinila* – EVA (Figura 2.7) é um composto microporoso, formado por resina de poli-(etileno-co-vinil acetato), agente de expansão, agente reticulante, cargas ativadoras e auxiliares de processo, além de outros polímeros, como a borracha. Sua formação se dá pela polimerização do etileno com acetato de vinila, via radicais livres, em reatores de alta pressão e pode apresentar propriedades diferentes de acordo com a porcentagem de acetato de vinila utilizado na polimerização, podendo ser utilizado como termoplástico ou elastômero. A redução do teor de acetato de vinila aumenta o módulo de rigidez desses copolímeros e a temperatura de amolecimento.

Figura 2.7. Estrutura molecular do copolímero EVA.

O EVA apresenta, de modo geral, boa processabilidade, estabilidade térmica, boa resistência ao impacto, à fadiga, resiliência, tenacidade e flexibilidade e tem uma densidade variando de 0,922 a 0,945.

O setor calçadista trabalha com resinas de EVA que contêm de 2% a 28% de acetato de vinila (VA) e índices de fluidez (MI) na faixa de 0,3 a 150 g/10min. A combinação destes dois parâmetros determina as propriedades da resina formada e, portanto, o seu campo de aplicação. Aumentando-se o valor de VA, para um mesmo MI, conseguem-se maiores densidade, transparência e resistência ao ozônio e às baixas temperaturas. Por outro lado, mantendo-se o teor de VA constante e diminuindo o valor do MI, conseguem-se maiores resistências mecânicas, maior temperatura de amolecimento e ligeira elevação na dureza e densidade.

O EVA é uma substância orgânica e não oferece riscos à saúde humana em seu estado normal. Apesar de ser um material atóxico e ser classificado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não perigoso, o EVA não é biodegradável e não há reutilização dos resíduos provindos da indústria calçadista. O seu descarte deve ser feito de acordo com regulamentações federais, estaduais ou locais, que recomendam que sejam aterrados ou incinerados, neste último caso com o risco de liberação de gases tóxicos, como CO₂, CO, fumaça, hidrocarbonetos e possibilidade de traços de acroleína.

O copolímero EVA é amplamente utilizado pela indústria calçadista na confecção de saltos, solas e palmilhas. É o material mais leve e macio para a fabricação de solas,

além de possuir boa resistência ao desgaste. A Tabela 2.9 mostra os principais materiais e a data em que começaram a ser utilizados na confecção de calçados.

Tabela 2.9 – Materiais disponíveis para a fabricação de calçados no decorrer das décadas.

Material	Década							
	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Couro								
Borracha não vulcanizada								
Borracha vulcanizada								
PVC								
PU								
Borracha termoplástica								
Poliuretano termoplástico								
EVA								

FONTE: Assintecal (2000).

A Figura 2.8 representa, em peso, a participação mundial de cada material utilizado na produção de solados. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couros, Calçados e Artefatos (Assintecal) mostram que, só em 1999, a indústria brasileira produziu 499 milhões de pares de sapatos, sendo que 369 milhões desses pares foram para o mercado interno. Os dados de um estudo realizado em 2001, pela mesma entidade, mostram que o consumo de pares de sapato no Brasil foi de 2,3 por habitante por ano e, no mundo, de 6,5 por habitante, indicando o grande potencial da produção nacional. Uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (Abicalçados) mostra produção de calçados brasileiros nos últimos anos, como apresenta a Figura 2.9.

Fonte: Assintecal (1999).

Figura 2.8. Consumo mundial de materiais para solados.

Fontes: Abicalçados (2005),

*Revista Química e Derivados (2006).

Figura 2.9. Produção brasileira de calçados em milhões de pares.

Os resíduos das placas expandidas de EVA, objeto de estudo desta pesquisa, gerados pela indústria calçadista, são em forma de aparas devido à confecção de palmilhas, como mostra a Figura 2.10.

Figura 2.10. Resíduos das placas de EVA gerados na confecção de palmilhas.

2.5. MÉTODO BAILEY DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA

O método Bailey de seleção granulométrica de agregados foi desenvolvido por Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), e vem sendo utilizado desde a década de 80. Este método faz a seleção granulométrica dos agregados por volume, o que proporciona um forte esqueleto de agregado.

Por ser um método que define agregado graúdo e miúdo mais precisamente, de acordo com o diâmetro máximo nominal (DMN) do agregado, ele permite ajustes na quantidade de vazios da mistura, de modo a aumentar o intertravamento dos agregados e, portanto, a resistência à deformação permanente. Segundo Vavrik *et al.* (2002), o método Bailey, além de garantir a resistência à deformação

permanente, também garante a resistência ao desgaste através da utilização de um maior teor de ligante graças ao correto volume de vazios.

As misturas feitas pelo método Bailey apresentam valores maiores de vazios do agregado mineral e de relação betume-vazios do que os das misturas convencionais, o que é um indicativo de misturas menos propensas às deformações permanentes e potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga. Também apresentam melhores resultados nos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração (CUNHA, 2004).

2.6. ENVELHECIMENTO

O fenômeno de envelhecimento do asfalto é representado por seu enrijecimento, aumento de viscosidade e por se apresentar de forma mais quebradiça, portanto mais sujeito às trincas e a deterioração devido ao desgaste e à umidade (BELL; WIEDER; FELLIN; 1994).

Os ligantes asfálticos apresentam uma composição química que pode ser fracionada em compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos. O processo de envelhecimento se caracteriza, normalmente, pela diminuição do teor de aromáticos, que são transformados em resinas e estas, por sua vez, em parte se transformam em asfaltenos (partes insolúveis em n-heptano do asfalto), aumentando sua consistência (TONIAL, 2001).

O envelhecimento de misturas asfálticas ocorre em duas etapas. A primeira quando a mistura asfáltica é preparada, ou seja, durante a usinagem, transporte, espalhamento e compactação, que recebe o nome de *envelhecimento de curto prazo*. A segunda é conhecida como *envelhecimento de longo prazo* e acontece após a construção do pavimento, quando a mistura asfáltica fica sujeita às ações climáticas e do tráfego.

No processo de envelhecimento de curto prazo a mistura sofre mudanças reológicas bruscas, como aumento de viscosidade e diminuição de penetração, através da oxidação pelo ar quente e perda de componentes voláteis. Já no processo de envelhecimento de longo prazo, as mudanças continuam, porém a uma taxa menor e cada vez mais lenta, sendo mais perceptível entre os dois ou três primeiros anos. Podem-se citar, também, como causas de envelhecimento, a oxidação do asfalto pela luz (radiação ultravioleta especialmente), polimerização, tixotropia, sinerese e separação dos óleos constituintes (ROBERTS *et al.*, 1991).

Santanna-Greco (2004) simulou o envelhecimento de curto prazo, coletando a mistura asfáltica em dois momentos: logo após o processo de mistura e após 4 horas de envelhecimento da mistura em estufa com ventilação forçada a 135°C. A mistura envelhecida por 4 horas foi disposta em um recipiente de tal maneira que formasse uma camada de 25 mm a 50 mm e foi revolvida a cada 60 ± 5 minutos, para manter a uniformidade da mistura. A autora simulou o processo de envelhecimento de longo prazo de dois modos: em estufa, com ventilação forçada por 5 dias, a uma temperatura de 135°C; em exposição da mistura compactada por quatro meses ao ar livre, sendo que foram invertidos e girados 90° semanalmente. A

autora concluiu que ambos os envelhecimentos enrijeceram as misturas, refletindo em maiores módulos de resiliência e menor susceptibilidade à deformação permanente. Também verificou que as misturas apresentaram menores valores de recuperação elástica, ou seja, tornaram-se menos resistentes à fadiga. As misturas expostas ao tempo sofreram um envelhecimento mais acelerado que a simulação em estufa, o que concluiu ser em razão do fator radiação ultravioleta.

Magalhães (2004) estudou misturas com ligantes virgens e modificados com SBS, EVA e RASF (Resíduo Asfáltico de Petróleo), simulando envelhecimento de curto e de longo prazos e sem envelhecimento. As misturas sem envelhecimento foram compactadas logo após o processo de usinagem. O envelhecimento de curto prazo foi simulado mantendo-se a mistura em estufa por 2 horas, na temperatura de compactação. No envelhecimento de longo prazo, a mistura compactada foi mantida na estufa por 5 dias, a uma temperatura de 85°C. Em todos os casos o autor verificou um aumento no módulo de resiliência.

A Tabela 2.10 mostra um resumo de alguns processos de envelhecimento de misturas asfálticas utilizados ao longo dos anos e o método de avaliação dos resultados (BELL, 1989).

Tabela 2.10 – Métodos de avaliação de envelhecimento acelerado em laboratório.

Data	Investigador(es)	Método de envelhecimento	Método de avaliação
1903	Dow	18, 24 h, 163°C 30 min, 149°C	Mudança no peso, penetração de resíduo Recuperação do asfalto – mudança na penetração
1937	Nicholson	Ventilação forçada, 15 min, 229°C	Penetração, ductilidade
	Rasching e Doyle	Ventilação forçada, 15 min, 204°C	Mudança na penetração
	Hubbard e Gollomb	Envelhecimento de mistura de areia de Ottawa, variação de tempo e temperatura	Recuperação do asfalto – mudança na penetração
1939	Lang e Thomas	Mistura arenosa de Ottawa, envelhecimento em estufa, exposição ao tempo	Mudança nas propriedades da mistura, abrasão, resistência, etc.
1940	Shattuck	Envelhecimento da mistura em estufa, 30 min, 163°C	Recuperação do asfalto – penetração, ductilidade, ponto de amolecimento
	Lewis e Welborn	Ensaio de envelhecimento de filme de 1/8 pol, 5 h, 163°C – TFOT	Mudança no peso, penetração, ductilidade
1946	Lewis e Halstead	Ensaio de envelhecimento de filme de 1/8 pol, 5 h, 163°C – TFOT	Mudança no peso, penetração, ductilidade
1952	Pauls e Welborn	Envelhecimento em estufa de mistura de areia de Ottawa, 163°C - TFOT	Resistência à compressão, recuperação do asfalto, resíduo do TFOT
1955	Griffin, Miles e Penther	Ensaio de microfilme da Shell, filme de 5 micra, 2 h	Viscosidade antes e depois do envelhecimento – índice de envelhecimento
1957	Vallerga, Monismith e Granthem	Exposição aos raios ultravioletas e infravermelhos	Penetração, ponto de amolecimento, ductilidade
	Brown, Sparks e Smith	Resfriamento rápido de amostras de asfalto	Ensaio de tração

Tabela 2.10 – Continuação.

1958	Heithaus e Johnson	Pista de ensaio Envelhecimento em laboratório Ensaio de microfilme	Recuperação do asfalto Índice de envelhecimento de microfilme
1961	Traxler	TFOT e filme de 15 micra, 2 h, 107°C	Comparação da microviscosidade a 25°C
	Halstead e Zenewits	TFOT e filme de 15 micra, 2 h, 107°C	Comparação da microviscosidade a 25°C, taxa de 0,05 s ⁻¹
1963	Hveen, Zube e Skog	Ensaio modificado de microfilme da Shell, filme de 20 micra, 24 h, 99°C RTFOT e TFOT, 163°C, 50 min Ensaio de coesígrafo	Comparação da microviscosidade a 25°C antes e depois do envelhecimento Comparação das viscosidades do RTFOT, TFOT e recuperação do asfalto
1968	Lee	TFOT, 163°C POB, 65°C, 24 h, 48 h, 96 h e 240 h, 29 psig e 132 psig Misturas asfálticas e areia-asfalto	Microviscosidade a 25°C, limitando a viscosidade, tempo de endurecimento até 30 megapoise, índice de cisalhamento Conteúdo de asfaltenos
1969	Schimidt e Santucci	Ensaio de microfilme giratório, filme de 20 micra, 99°C	Microviscosidade do resíduo
1973	Lee	TFOT POB, 65°C, 20 atm Recuperação dos materiais envelhecidos em campo	Microviscosidade a 25°C Viscosidade por capilaridade a 62°C Microductilidade, Ensaio Fraass Conteúdo de asfaltenos e porcentagem de oxigênio Análise Rostler
1976	Benson	TFOT Atuação da luz Misturas expostas ao tempo	Microviscosidade a 25°C Penetração a 25°C
	Plancher, Green e Petersen	RTFOT, RMFO Oxidação de coluna Envelhecimento em estufa, 5 h, 150°C Misturas virgens e com cal	Microviscosidade a 25°C Determinação dos asfaltenos Análise química Módulo de resiliência

Tabela 2.10 – Continuação.

1977	Kumar e Goetz	Permeação de ar a 60°C em uma película de 0,5 mm de água por 1, 2, 4, 6 e 10 dias	Ensaio de fluência por compressão uniaxial estática a 21°C ± 2°C, condicionamento por repetição de carga, 5 psi, 5 min
			Uso da declividade e do intercepto da curva de fluência indicam oxidação progressiva Taxa de declividade ou intercepto a “x” dias pela declividade inicial = índice de durabilidade
1981	Kemp e Predoehl	Ensaio de ação da luz e do tempo. Ensaio de microfilme giratório. Envelhecimento de mistura de areia de Ottawa. Ensaio modificado de microfilme da Shell. Misturas expostas ao tempo em campo.	Penetração a 25°C Ductilidade a 25°C Módulo de resiliência Microviscosidade a 25°C Viscosidade por capilaridade a 60°C
	Santucci, Goodrich e Sundberg	Ensaio de durabilidade em forno inclinado, 113°C por 168 h e 115°C por 100 h	Viscosidade a 60°C e 135°C Penetração a 4°C e a 25°C Ductilidade a 25°C
1983	McHattie	RTFOT estendido, 100 h, 115°C	Penetração a 25°C Viscosidade cinemática a 135°C Módulo de resiliência Vida EAL (carga equivalente de eixo)
1985	Edler <i>et al.</i>	RTFOT, filme de 100 micra, estendido até 8 h. Oxidação por pressão por 96 h, 65°C, 300 psi. TFOT modificado, filme de 100 micra, 24 h	Viscosidade a 45°C pelo microviscosímetro de placa a uma taxa de cisalhamento de 0,05 s ⁻¹ Nível de oxidação – espectro infravermelho Constituintes de alto peso molecular
	Hugo e Kennedy	Envelhecimento da mistura em estufa, 100°C. Exposição da mistura aos raios ultravioletas, 54 h e 14 dias	Microviscosidade a 25°C Redução da mistura em forma de viga

Tabela 2.10 – Continuação.

1986	Kim <i>et al.</i>	Oxidação por pressão a 60°C, 100 psi, 0 a 5 dias. Recuperação de materiais envelhecidos em campo	Viscosidade por capilaridade a 60°C e a 135°C Ensaio Fraass e penetração Módulo de resiliência e fadiga Análises Corbett-Swarbrick
	Von Quintus <i>et al.</i>	Envelhecimento de curto prazo em estufa, 8 h, 16 h, 24 h e 36 h Envelhecimento de longo prazo por oxidação por pressão, 60°C, 100 psi Envelhecimento em estufa por 2 dias a 60°C e 5 dias a 107°C	Módulo de resiliência Deformação por tração indireta Fluência por compressão uniaxial
1988	Tia <i>et al.</i>	Envelhecimento por convecção em estufa, 60°C por 1, 7, 28 e 90 dias Envelhecimento em estufa com ventilação forçada, 60°C por 1, 7, 28 e 90 dias Envelhecimento por luz ultravioleta, 60°C por 1, 7, 28 e 90 dias Envelhecimento sob condições naturais por 1, 2 e 3 anos	Módulo de resiliência Resistência por tração indireta Recuperação das propriedades do asfalto como viscosidade a 60°C e penetração a 25°C Reômetro Schweyer a 15°C e 25°C Análise por espectro infravermelho Análises Corbett-Swarbrick
1989	Petersen	Ensaio de envelhecimento acelerado com filme delgado	Perda de massa por volatilização Conteúdo de acetona Viscosidade

Ninguém comete maior erro do que não fazer nada porque só pode fazer pouco.

(Edmund Burke)

3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em três partes. A primeira parte refere-se à preparação e caracterização dos materiais envolvidos (agregado, ligante asfáltico e resíduo). A segunda parte foi denominada de ensaios exploratórios e serviu para a determinação dos teores de resíduos que foram utilizados na pesquisa. Por fim, a última parte detalha os ensaios realizados. À descrição dos materiais e métodos de ensaio foi dada grande importância, pois somente desse modo pode-se reproduzir futuramente os ensaios realizados nesta pesquisa.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

A primeira parte laboratorial da pesquisa teve o intuito de obter, preparar, classificar e caracterizar os materiais utilizados. Os resultados servem não somente para esta pesquisa, mas também permitem a repetição dos experimentos apresentados nos itens a seguir.

3.2.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi o CAP 50/70 proveniente da refinaria Henrique Lage (REVAP). Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante foram fornecidos pela Ipiranga Asfaltos S/A e são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70.

Característica	Resultado
Penetração – 25°C, 5s, 100g (mm)	5,7
Ponto de amolecimento (°C)	48,6
Ponto de fulgor (°C)	252
Índice de susceptibilidade térmica	-1,25
Viscosidade absoluta a 60°C (Poise)	2065
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C (s)	162
Viscosidade Saybolt Furol a 150°C (s)	73,2
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C (s)	28
Ductilidade a 25°C (cm)	110
RTFOT – perda de massa (%)	0,105
RTFOT – relação de penetração	0,5

Fonte: Fornecido por Ipiranga Asfaltos S/A.

3.2.2. Agregados

Nesta pesquisa utilizou-se agregado de origem basáltica, proveniente da pedreira Bandeirantes, localizada na cidade de São Carlos/SP. Este material foi escolhido pelo fato de ser muito utilizado em obras de pavimentação no interior de São Paulo, pela facilidade de sua obtenção e por apresentar boas características em misturas asfálticas, segundo a bibliografia consultada.

3.2.2.1. Granulometria

As granulometrias dos agregados utilizados nessa pesquisa foram determinadas utilizando as peneiras recomendadas pelo SUPERPAVE (peneiras com malhas de abertura 0,075 mm, 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,18 mm, 2,36 mm, 4,75 mm, 9,5 mm, 12,5 mm e 19,1 mm). O peneiramento dos materiais foi feito totalmente de maneira manual, com a finalidade minimizar o erro por peneira e, portanto, produzir corpos-de-prova com características mais semelhantes possível. Os dados resultantes são apresentados na Tabela 3.2 e na Figura 3.1.

Tabela 3.2 – Granulometria dos agregados.

QUANTIDADE PASSADA ACUMULADA (%)			
Peneira (mm)	Pedra 1	Pedrisco	Pó de pedra
19,1	100,00	100,00	100,00
12,5	78,67	100,00	100,00
9,5	27,38	99,01	100,00
4,75	0,00	37,05	99,86
2,36	0,00	6,11	89,33
1,18	0,00	1,69	66,60
0,60	0,00	0,26	48,14
0,30	0,00	0,20	33,90
0,15	0,00	0,13	20,12
0,075	0,00	0,11	9,91

Figura 3.1. Granulometria dos agregados.

3.2.2.2. Absorção e massa específica do agregado graúdo

A determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo foi realizada de acordo com a norma DNER-ME 081/98 (DNER, 1998a). Os agregados graúdos utilizados em toda a pesquisa foram primeiramente lavados, para que

fossem retirados o pó e as impurezas, seco em estufa a 110°C por 4 horas, resfriado à temperatura ambiente e guardado em sacos plásticos para evitar umidade.

Uma amostra de cerca de 2000 gramas foi separada e colocada em imersão em água à temperatura ambiente, por 24 horas. O material foi retirado e colocado em um pano para que fosse seco superficialmente, para então ser verificada sua massa (Figura 3.2). Imediatamente após isso, a amostra foi colocada em uma cesta para a verificação da massa imersa. Em seguida, o material foi seco em estufa a 110°C, por um período de 4 horas, resfriado à temperatura ambiente por 2 horas e verificada sua massa seca.

Figura 3.2. Secagem superficial do agregado gráúdo.

A massa específica aparente do agregado gráúdo foi determinada a partir da Equação 3.1.

$$\rho_{ap.ag} = \frac{A}{S - C} \quad (3.1)$$

em que:

$\rho_{ap,ag}$: massa específica aparente do agregado graúdo (g/cm^3);

A : massa da amostra seca (g);

S : massa da amostra na condição saturada seca superficialmente (g);

C : massa da amostra submersa (g).

A Equação 3.2 fornece a massa específica real do agregado graúdo.

$$\rho_{ag} = \frac{A}{A - C} \quad (3.2)$$

em que:

ρ_{ag} : massa específica real do agregado graúdo (g/cm^3).

A absorção foi determinada através da Equação 3.3.

$$Abs_{ag} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (3.3)$$

em que:

Abs_{ag} : absorção de água pelo agregado graúdo (%).

3.2.2.3. Absorção e massa específica do agregado fino

O ensaio para a determinação da massa específica do agregado fino foi feito de acordo com a ASTM C 128 (ASTM, 1993). A amostra foi preparada lavando-se 1000 g de agregado fino (passado na peneira de malha 2,36 mm e retido na peneira

de malha 0,075 mm) na peneira de malha 0,075 mm. O material lavado ficou em repouso por 24 horas, submerso com 3,0 cm de água acima do nível superior do agregado (Figura 3.3).

Figura 3.3. Preparação da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.

Após o prazo de repouso, retirou-se o excesso de água com cuidado para que não houvesse perda de material e este foi colocado, em camada bem fina, dentro de uma bandeja. A seguir, iniciou-se processo de secagem com uma corrente de ar aquecido e revirando-se o agregado com uma espátula (Figura 3.4).

Figura 3.4. Secagem da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.

No momento em que foi observada mudança na cor do agregado, uma parte da amostra foi retirada e colocada dentro do cone metálico, em cima de uma placa de vidro lisa e plana, até a borda superior, e compactada com 25 golpes do soquete, com queda de 5 mm acima da superfície do agregado. Em seguida, retirou-se o cone metálico com cuidado para que não ocorressem movimentos horizontais e verificou-se a condição do agregado compactado. A condição saturada seca superficialmente se dá quando parte ou todo o cone desmorona. O procedimento de secagem foi feito até que esta condição fosse atingida (Figura 3.5).

Figura 3.5. Verificação da condição saturada seca superficialmente do agregado fino.

Atingida a condição saturada seca superficialmente do agregado, retirou-se aproximadamente 500 gramas do material, que foi colocado no kitassato modificado para verificação da massa do conjunto (amostra + recipiente). Feito isso, adicionou-se água (destilada e fervida por 1 hora) no kitassato até atingir um nível de água de, aproximadamente, 4 cm acima da superfície do agregado e então foi aplicado um

vácuo parcial por 20 minutos, com o intuito de retirar as bolhas de ar. Completou-se o kitassato com água e anotou-se a temperatura, para então se verificar a massa do conjunto (amostra + recipiente + água), como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6. Retirada das bolhas de ar da amostra para o ensaio de massa específica do agregado fino.

Em seguida, o material foi retirado e levado em estufa a 100°C, até atingir a condição seca, e então anotada a massa da amostra. A massa do kitassato modificado, cheio de água, foi retirada de uma curva de calibração (Figura 3.7).

Figura 3.7. Curva de calibração do kitassato modificado.

A Equação 3.4 fornece a massa específica do agregado fino.

$$\rho_{ap,af} = \frac{A}{S + D - E} \times \rho_{\text{água}} \quad (3.4)$$

em que:

$\rho_{ap,af}$: massa específica aparente do agregado fino (g/cm³);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água na temperatura do ensaio (g/cm³);

A : massa da amostra seca (g);

D : massa do kitassato, cheio de água, obtida da curva de calibração (g);

E : massa da amostra + kitassato modificado completo com água (g);

S : massa da amostra na condição saturada seca superficialmente (g).

A massa específica real foi determinada através da Equação 3.5.

$$\rho_{af} = \frac{A}{A + D - E} \times \rho_{\text{água}} \quad (3.5)$$

em que:

ρ_{af} : massa específica real do agregado fino (g/cm³);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água na temperatura do ensaio (g/cm³);

A : massa da amostra seca (g);

D : massa do kitassato, cheio de água, obtida da curva de calibração (g);

E : massa da amostra + kitassato modificado completo com água (g).

O valor de absorção de água pelo agregado fino foi determinada pela Equação 3.6.

$$Abs_{af} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (3.6)$$

em que:

Abs_{af} : absorção de água pelo agregado fino (%);

S : massa da amostra na condição saturada seca superficialmente (g);

A : massa da amostra seca (g).

3.2.2.4. Ensaio de abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi realizado em conformidade com a metodologia de ensaio DNER-ME 035/98 (DNER, 1998b), com o intuito de verificar a perda de massa por desgaste do agregado. A Tabela 3.3 apresenta as especificações para as graduações A a G do DNER.

O material foi lavado e posteriormente seco em estufa a 105°C. A preparação das amostras se deu por peneiramento manual. O material foi pesado e colocado no tambor (Figura 3.8) junto com as esferas de aço (Figura 3.9) e submetido a 500 rotações a 33 rpm. A amostra ensaiada foi lavada na peneira de malha 1,68 mm e seca em estufa a 105°C por 6 horas. A Tabela 3.4 mostra a perda de massa em porcentagem.

Tabela 3.3 – Especificações para o ensaio de Abrasão “Los Angeles”.

Peneiras (mm)		Amostra Massa parcial (g)						
Pass.	Retido	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais (g)		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Rotações do tambor (nº)		500	500	500	500	1000	1000	1000
Esferas (nº)		12	11	8	6	12	12	12
Massa das esferas (g)		5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 20	2500 ± 15	5000 ± 25	5000 ± 25	5000 ± 25

Figura 3.8. Máquina de abrasão “Los Angeles”.

Figura 3.9. Esferas de aço.

Tabela 3.4 – Resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles”.

Desgaste (%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	24,31	23,99	24,25	24,17
Média (%)	24,18			
Desvio Padrão	0,14			

3.2.3. Etileno Acetato de Vinila (EVA)

O EVA utilizado na pesquisa é oriundo de resíduos da fabricação de palmilhas para calçados das indústrias da cidade de Jaú/SP. O material bruto apresenta-se na forma de aparas e foi fornecido colado a aparas de papelão, próprias das placas expandidas de EVA oferecidas comercialmente. As aparas foram colocadas em um tanque com água para a retirada do papelão, pois a cola é solúvel em água.

O material foi seco à temperatura ambiente e posteriormente cortado em forma de cubos (Figura 3.10), de tal forma que duas de suas arestas tivessem tamanhos aproximados e ficassem entre as peneiras 4,76 mm e 9,5 mm, sempre procurando

manter o tamanho no centro dessa faixa. A terceira aresta dependeu exclusivamente da espessura da placa de EVA, que é de aproximadamente 2 mm.

Figura 3.10. EVA cortado.

A Tabela 3.5 apresenta algumas características do EVA, extraídas da folha de segurança da empresa Polietilenos União S/A.

Tabela 3.5 – Propriedades físico-químicas do EVA.

Característica	Resultado
Estado físico	Sólido
Temperatura de amolecimento (°C)	50 – 90
Temperatura de auto-ignição (°C)	340
Densidade (g/cm ³)	0,922 – 0,945
Solubilidade	Insolúvel

A densidade dos resíduos das placas expandidas de EVA, adotada nesta pesquisa, foi de 0,927.

3.3. VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA PESQUISA

Diversos são os *fatores* envolvidos no comportamento de misturas asfálticas, portanto, para que se possa ter conhecimento e compreensão acerca desse comportamento, faz-se necessário o estudo de todas as variáveis envolvidas, em seus vários *níveis*. São considerados fatores todos os parâmetros que possam influenciar o resultado de um experimento, podendo cada um destes assumir diversos valores, os quais são conhecidos por níveis. Para que uma *variável independente* seja considerada um fator é necessário que ela possua mais de um nível.

Há diversos métodos de investigação para um experimento como, por exemplo, a *experimentação clássica* e a *experimentação fatorial*. Na primeira, cada fator é estudado separadamente, sendo que todos os outros fatores permanecem constantes. A conclusão do fenômeno resultante é feita mediante análise da variação de cada fator. A falha desse método é não considerar o possível efeito que possa haver da interação entre os fatores envolvidos, o que não ocorre na experimentação fatorial, pois além de cada fator ser estudado isoladamente, também se verifica a interação entre todos os fatores, ou seja, têm-se todas as possibilidades de combinações dos fatores de um experimento com um número muito menor de ensaios quando comparado à experimentação clássica.

A significância que cada fator – bem como da interação entre esses fatores – tem no experimento, ou o quanto o experimento se mostra sensível à mudança dos fatores, deve ser estimada através de análise estatística dos resultados obtidos.

Para caracterizar as misturas asfálticas modificadas com EVA foi escolhido o método de experimentação fatorial, pois este é mais completo e rápido que o método de experimentação clássico, dado o número de variáveis independentes e dependentes envolvidas.

3.3.1. Variáveis independentes

3.3.1.1. Fatores

Há diversos fatores envolvidos no processo de misturas asfálticas, como o teor e o tipo de ligante asfáltico, a granulometria do agregado, o tempo de envelhecimento, a energia de compactação, a granulometria e o teor de resíduo, entre outros. Porém, para que o experimento fosse exeqüível, fez-se necessário considerar apenas os fatores mais importantes e, portanto, a partir de estudos realizados em misturas asfálticas por outros pesquisadores, foram selecionados os fatores teor de resíduo e tempo de envelhecimento.

i. Teor de resíduo

Essa variável teve como objetivo verificar a quantidade de EVA a ser incorporada na mistura asfáltica.

ii. Tempo de envelhecimento de curto prazo (tempo de digestão)

A escolha desse fator teve como objetivo simular o envelhecimento que a mistura asfáltica sofre durante as fases de mistura e compactação.

3.3.1.2. Níveis

Os fatores indicados no item anterior foram estudados em quatro e três níveis, respectivamente. Os critérios de escolha estão descritos a seguir.

i. Teor de resíduo

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a possibilidade de se utilizar os resíduos de EVA gerados pela indústria calçadista em misturas asfálticas. Para decidir sobre o teor de resíduos utilizados foi necessário testar a sensibilidade das propriedades mecânicas e da resistência ao desgaste das misturas asfálticas com o aumento da quantidade de EVA.

ii. Tempo de envelhecimento de curto prazo

Para simular o processo de envelhecimento de curto prazo a mistura foi submetida ao condicionamento em estufa com circulação forçada de ar na temperatura de compactação (137°C) por zero, duas e quatro horas, sendo os dois últimos tempos de envelhecimento em conformidade com a AASHTO PP2 (AASHTO, 2001).

3.3.2. Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as afetadas por mudanças nas variáveis independentes. Nesta pesquisa, as variáveis dependentes são:

- Resistência à tração por compressão diametral estática;
- Módulo de resiliência por compressão diametral;
- Fluência por compressão uniaxial estática (“*creep*” estático);
- Fluência por compressão uniaxial dinâmica (“*creep*” dinâmico);
- Vida de fadiga;
- Desgaste por abrasão (ensaio Cantabro).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em corpos-de-prova moldados pelo método Marshall de acordo com a NBR 12891/93 (ABNT, 1993),

3.4. ENSAIOS PRELIMINARES

Esta pesquisa utilizou resíduos de EVA inseridos em misturas asfálticas através do processo seco e, como não foram encontrados estudos publicados acerca desse assunto, houve a necessidade de alguns ensaios para determinar os teores de resíduo a serem utilizados na pesquisa.

A determinação do teor ótimo de ligante foi dada pela dosagem Marshall, para um volume de vazios de 4%, tendo sido feita a análise da estabilidade (E), fluência (F), relação betume-vazios (RBV) e vazios do agregado mineral (VAM) para o teor ótimo. O teor de trabalho de ligante foi fixado, para todas as diferentes misturas estudadas, como sendo o teor ótimo determinado através da dosagem Marshall mais a absorção de ligante pelo agregado, ocorrida durante as duas primeiras horas de envelhecimento em estufa.

A idéia inicial era avaliar o comportamento de misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall, envelhecidas duas horas, através dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT) e a relação entre esses dois parâmetros (MR/RT), ao se incrementar o teor de EVA. Porém, o fator limitante ao teor de EVA máximo foi a desagregação da mistura ao não aceitar compactação quando da substituição de 10% do material retido na peneira 4,75 mm (pouco mais que 3% em relação à mistura total) por resíduos. Desse modo, o fator teor de resíduos teve os níveis de 0%, 1%, 2% e 3% em relação à mistura total.

3.4.1. Método Bailey de seleção granulométrica

Este item foi baseado nos estudos de Vavrik *et al.* (2002) e na dissertação de mestrado de Cunha (2004) e mostra como foram feitos os cálculos para a composição da curva granulométrica utilizada na pesquisa. Os dados completos encontram-se no Apêndice A.

O primeiro passo foi a determinação da *massa específica solta* (MES) dos agregados graúdos e da *massa específica compactada* (MEC) do agregado fino, de acordo com a norma AASHTO T-19/T 19M (AASHTO, 1997). A amostra de material foi obtida através de separação de 10 kg de cada agregado (pedra 1, pedrisco e pó de pedra) por quarteamento.

A massa específica solta representa a massa, relativa a um determinado volume, que os agregados apresentam, sem qualquer esforço de compactação. Inicialmente, mediu-se a massa do cilindro vazio (M_v) e, com a utilização de uma pequena pá, colocou-se os agregados no recipiente, em camadas, cuidadosamente para que não houvesse compactação. O excesso de material foi retirado manualmente até que a superfície livre dos agregados estivesse relativamente plana e no limite da boca do cilindro, como mostra a Figura 3.11. Verificou-se a massa do conjunto e, através da Equação 3.7, determinou-se a massa específica solta da pedra 1 e do pedrisco.

$$MES = \frac{M_{cc} - M_{cv}}{V_c} \quad (3.7)$$

em que:

MES : massa específica solta do agregado graúdo (kg/m^3);

M_{cc} : massa do cilindro com agregado (kg);

M_{cv} : massa do cilindro vazio (kg);

V_c : volume do cilindro (m^3).

Figura 3.11. Cilindro com agregado graúdo para determinação da massa específica solta.

A massa específica compactada do agregado fino foi determinada utilizando-se o mesmo cilindro, com o material sendo disposto em três camadas, cada uma delas recebendo 25 golpes de uma haste metálica caindo a 5 cm da superfície livre do agregado. O excesso de material foi rasado com auxílio de uma régua metálica, com o cuidado de não causar uma pós-compactação, até que ficasse no nível da boca do cilindro (Figura 3.12). A massa específica compactada foi determinada através da Equação 3.8.

$$MEC = \frac{M_{cf} - M_{cv}}{V_c} \quad (3.8)$$

em que:

MEC : massa específica compactada do agregado fino (kg/m^3);

M_{cf} : massa do cilindro com agregado fino (kg);

M_{cv} : massa do cilindro vazio (kg);

V_c : volume do cilindro (m^3).

Figura 3.12. Cilindro com agregado fino para determinação da massa específica compactada.

O passo seguinte foi a determinação da massa específica escolhida para o agregado fino (MEE_f) e a massa específica escolhida para o agregado graúdo (MEE_g). A MEE_f , neste caso, é igual à massa específica compactada do agregado fino, pois só foi utilizado um agregado fino na pesquisa. A MEE_g foi determinada através da MES de cada um dos dois agregados graúdos e está em função da porcentagem desejada da massa específica solta (MES_d). Esse fator, que varia de 95% a 105%, indica como a mistura trabalhará, pois a escolha do menor valor indica que a mistura trabalhará mais com as propriedades dos agregados finos e vice-versa. Nesta pesquisa, optou-se por trabalhar mais as propriedades dos agregados finos, assim foi escolhido o valor de 95%. A massa específica escolhida do agregado graúdo foi, então, dada pela Equação 3.9.

$$MEE_g = MES \times MES_d \quad (3.9)$$

em que:

MEE_g : massa específica escolhida de cada agregado graúdo (kg/m³);

MES : massa específica solta de cada agregado graúdo (kg/m³);

MES_d : massa específica solta desejada (%).

Em seguida determinou-se a *massa específica contribuinte* dos agregados graúdos, que foi de 10% para a pedra 1 e 90% para o pedrisco, através da Equação 3.10. Esta composição visou um melhor enquadramento dos valores das proporções dos agregados nos intervalos recomendados pelo método, explicado mais adiante (Tabela 3.6).

$$CAG_t = MEE_{g1} \times AG_{d1} + MEE_{g2} \times AG_{d2} \quad (3.10)$$

em que:

CAG_t : contribuição total dos agregados graúdos na mistura (kg/m³);

MEE_{g1} : massa específica escolhida da pedra 1 (kg/m³);

AG_{d1} : contribuição da pedra 1 (%);

MEE_{g2} : massa específica escolhida do pedrisco (kg/m³);

AG_{d2} : contribuição do pedrisco (%).

O próximo passo foi a determinação dos *vazios no agregado graúdo* (VAG) ou os vazios que são preenchidos pelos agregados finos, através da Equação 3.11.

$$VAG = \left(1 - \frac{MEE_{g1}}{G_{sb1}}\right) \times AG_{d1} + \left(1 - \frac{MEE_{g2}}{G_{sb2}}\right) \times AG_{d2} \quad (3.11)$$

em que:

VAG : vazios no agregado graúdo (%);

MEE_{g1} : massa específica escolhida da pedra 1 (kg/m³);

G_{sb1} : massa específica da pedra 1 (kg/m³);

AG_{d1} : contribuição da pedra 1 (%);

MEE_{g2} : massa específica escolhida do pedrisco (kg/m³);

G_{sb2} : massa específica do pedrisco (kg/m³);

AG_{d2} : contribuição do pedrisco (%).

A contribuição dos agregados finos é dada em função do VAG e foi determinada através da Equação 3.12.

$$CAF_t = MEE_f \times AF_d \times VAG \quad (3.12)$$

em que:

CAF_t : contribuição total dos agregados finos na mistura (kg/m^3);

MEE_f : massa específica escolhida do agregado fino (kg/m^3);

AF_d : contribuição do pó de pedra (%).

Neste caso, a contribuição do pó de pedra foi de 100%, pois foi utilizado somente um agregado fino.

A massa específica da mistura foi, então, dada pela soma da contribuição de cada uma das massas específicas dos agregados utilizados na pesquisa e está representada na Equação 3.13.

$$MEM = CAG_t + CAF_t \quad (3.13)$$

em que:

MEM : massa específica da mistura (kg/m^3);

CAG_t : contribuição total dos agregados graúdos na mistura (kg/m^3);

CAF_t : contribuição total dos agregados finos na mistura (kg/m^3).

Com a massa específica da mistura e a contribuição de cada agregado, calculou-se a estimativa inicial de cada agregado na mistura.

$$AGi_1 = \frac{CAG_1}{MEM} \quad (3.14)$$

$$AGi_2 = \frac{CAG_2}{MEM} \quad (3.15)$$

$$AGi = AGi_1 + AGi_2 \quad (3.16)$$

$$AFi = \frac{CAF_t}{MEM} \quad (3.17)$$

em que:

AGi_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

AGi_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

AGi : quantidade de agregado graúdo na mistura (%);

AFi : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

MEM : massa específica da mistura (kg/m^3);

CAG_t : contribuição da pedra 1 na mistura (kg/m^3);

CAG_2 : contribuição do pedrisco na mistura (kg/m^3);

CAF_t : contribuição do pó de pedra na mistura (kg/m^3).

O passo seguinte foi a divisão dos agregados graúdos dos finos, através da *peneira de controle primário* (PCP), dada pela multiplicação do *diâmetro máximo nominal* do agregado (DMN) pelo *fator de controle* (FC). O método também prevê a utilização da peneira média (PM), que é a peneira de abertura mais próxima da metade do DMN, para controlar melhor a compactação do agregado graúdo.

$$PCP = DMN \times FC \quad (3.18)$$

em que:

PCP : peneira de controle primário (mm);

DMN : diâmetro máximo nominal dos agregados (mm);

FC : fator de controle (0,22).

Para separar a fração graúda da fração fina do agregado fino, utilizou-se a *peneira de controle secundário* (PCS) e para o estudo da fração fina do agregado fino utilizou-se a *peneira de controle terciário* (PCT), determinadas através das Equações 3.19 e 3.20 respectivamente.

$$PCS = PCP \times FC \quad (3.19)$$

$$PCT = PCS \times FC \quad (3.20)$$

em que:

PCS : peneira de controle secundário (mm);

PCP : peneira de controle primário (mm);

FC : fator de controle (0,22);

PCT : peneira de controle terciário (mm).

O valor da PCP permitiu a quantificação de material passante na peneira 2,36 mm para a pedra 1 (QAG_1) e para o pedrisco (QAG_2) e o retido, no caso do pó de pedra (QAF). Com esses dados calculou-se a quantidade de finos no agregado graúdo (PFG) e a quantidade de grãos no agregado fino (PGF), através das Equações 3.21, 3.22 e 3.23 respectivamente.

$$PFG_1 = AG_1 \times QAG_1 \quad (3.21)$$

$$PFG_2 = AG_2 \times QAG_2 \quad (3.22)$$

$$PGF = AF \times QAF \quad (3.23)$$

em que:

PFG_1 : quantidade de finos na pedra 1 (%);

AG_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

QAG_1 : quantidade de pedra 1 passante na PCP (%)

PFG_2 : quantidade de finos no pedrisco (%);

AG_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

QAG_2 : quantidade de pedrisco passante na PCP (%);

PGF : quantidade de graúdos no agregado fino (%);

AF : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

QAF : quantidade de pó de pedra retida na PCP (%).

A partir desses resultados foram ajustadas as *porcentagens iniciais* da pedra 1 (AG_{1f}), do pedrisco (AG_{2f}) e do pó de pedra (AF_f) na mistura, através das Equações 3.24, 3.25 e 3.26 respectivamente.

$$AG_{1f} = AG_1 + PFG_1 - \left(\frac{AG_1 \times PGF_t}{AG} \right) \quad (3.24)$$

$$AG_{2f} = AG_2 + PFG_2 - \left(\frac{AG_2 \times PGF_2}{AG} \right) \quad (3.25)$$

$$AF_f = AF_i + PGF - \left(\frac{AF_i \times PGF}{AF_i} \right) \quad (3.26)$$

em que:

AG_{1f} : quantidade corrigida de pedra 1 na mistura (%);

AG_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

PFG_1 : quantidade de finos na pedra 1 (%);

AG : quantidade de agregado graúdo na mistura (%);

AG_{2f} : quantidade corrigida de pedrisco na mistura (%);

AG_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

PFG_2 : quantidade de finos no pedrisco (%);

AF_f : quantidade corrigida de pó de pedra na mistura (%);

AF_i : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

PGF : quantidade de grãos no agregado fino (%).

A partir das curvas granulométricas da pedra 1, do pedrisco e do pó de pedra foi calculada a curva granulométrica, somando-se a multiplicação de cada quantidade retida em cada peneira pela quantidade corrigida de cada material. Nesta pesquisa não foi utilizado fíler mineral, pois a quantidade de material passante na peneira 0,075 mm se enquadrava no intervalo recomendado pelo método.

O método recomenda que a *proporção dos agregados graúdos* (PAG), a *proporção graúda dos agregados finos* (PGAF) e a *proporção fina dos agregados finos* (PFAF) fiquem dentro de intervalos (Tabela 3.6), de acordo com o DMN, para que a mistura

apresente bons resultados. Esses parâmetros foram calculados através Equações 3.27 a 3.29.

Tabela 3.6 – Intervalo recomendado para PAG, PGAF e PFAF.

DMN (mm)	PAG	PGAF	PFAF
37,5	0,80 – 0,95	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50
25,0	0,70 – 0,85	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50
19,0	0,60 – 0,75	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50
12,5	0,50 – 0,65	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50
9,5	0,40 – 0,55	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50
4,75	0,30 – 0,45	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50

$$PAG = \frac{PM_p - PCP_p}{1 - PM_p} \quad (3.27)$$

$$PGAF = \frac{PCS_p}{PCP_p} \quad (3.28)$$

$$PFAF = \frac{PCT_p}{PCS_p} \quad (3.29)$$

em que:

PAG : proporção dos agregados graúdos (%);

PM_p : quantidade passada na peneira média (%);

PCP_p : quantidade passada na peneira de controle primário (%);

PGAF : proporção graúda dos agregados finos (%);

PCS_p : peneira de controle secundário (%);

$PFAF$: proporção fina dos agregados finos (%);

PCT_p : peneira de controle terciário.

3.4.2. Dosagem Marshall

3.4.2.1. Temperatura de mistura e compactação

A determinação das temperaturas de mistura (aquecimento do ligante asfáltico) e compactação deu-se através da curva viscosidade-temperatura, traçada a partir dos dados encontrados na Tabela 3.7.

3.7 – Temperaturas de mistura e compactação.

	Viscosidade Saybolt-Furol recomendada (sSF)	Temperatura adotada (°C)
Mistura	125 - 155	149
Compactação	75 - 95	137

A especificação de serviço DNER-ES 313/97 (DNER, 1997) estabelece que a mistura deva ser compactada a uma temperatura que apresente viscosidade entre 75 e 150 sSF, com preferência para viscosidade entre 85 e 95 sSF; no entanto, essa temperatura não pode ser inferior a 107°C nem superior a 177°C. Com relação à mistura, a especificação recomenda que sejam utilizados valores que apresentem viscosidade entre 140 ± 15 sSF. A NBR 12891/1993 (ABNT, 1993) estabelece a realização da compactação na temperatura que corresponde a viscosidade 85 ± 10 sSF. A Figura 3.13 mostra a viscosidade Saybolt-Furol em função da temperatura,

para o CAP 50/70 desse trabalho. No Apêndice B encontra-se o detalhamento dos cálculos realizados.

Figura 3.13. Viscosidade Saybolt-Furol versus temperatura.

3.4.2.2. Determinação do teor ótimo provável de ligante asfáltico

A partir da curva granulométrica definida pelo método de seleção granulométrica Bailey, foi calculada a superfície específica dos agregados, com a Equação 3.30, e o teor ótimo provável de ligante, com a Equação 3.31.

$$S = \frac{0,17 \times G + 0,33 \times g + 2,30 \times A + 12,00 \times a + 135,00 \times f}{100} \quad (3.30)$$

em que:

S : superfície específica do agregado (m^2/kg);

G : porcentagem retida na peneira 9,5 mm;

- g : porcentagem passada na peneira 9,5 mm e retida na peneira 4,76 mm;
- A : porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na peneira 0,30 mm;
- a : porcentagem passada na peneira 0,30 mm e retida na peneira 0,075 mm;
- f : porcentagem passada na peneira 0,075 mm.

$$T_{ca} = m\sqrt[5]{S} \quad (3.31)$$

em que:

- T_{ca} : teor de cimento asfáltico em relação à massa do agregado mineral (%);
- m : módulo de riqueza em asfalto, variável de 3,75 a 4,00 para pavimentos rodoviários (adota-se 3,75 quando se exige nas capas de rolamento máxima resistência à deformação por compressão e 4,00 para capas que necessitam ter maior flexibilidade).

Corrigiu-se o teor de cimento asfáltico em função da densidade real do agregado mineral, através da Equação 3.32.

$$T'_{ca} = \frac{2,65 \times T_{ca}}{\delta_{am}} \quad (3.32)$$

em que:

T'_{ca} : teor de cimento asfáltico corrigido (%);

δ_{am} : densidade real do agregado mineral.

Em relação à massa da mistura, a porcentagem de cimento asfáltico foi dada pela Equação 3.33.

$$P_{ca} = \frac{100 \times T'_{ca}}{100 + T'_{ca}} \quad (3.33)$$

em que:

P_{ca} : porcentagem de cimento asfáltico (%);

T'_{ca} : teor de cimento asfáltico corrigido (%).

Para a dosagem Marshall foram escolhidos dois teores abaixo e três teores acima do teor ótimo provável. Os cálculos e resultados detalhados obtidos encontram-se no Apêndice B.

3.4.2.3. Compactação

O primeiro passo foi colocar os moldes (Figura 3.14) na estufa, na temperatura de compactação, conservando, assim, a temperatura da mistura na compactação.

Figura 3.14. Molde utilizado na compactação Marshall.

Após isso o ligante foi aquecido em estufa à temperatura de 149°C por duas horas. Em seguida, os agregados referentes a 18 corpos-de-prova (três corpos-de-prova por teor de ligante), compostos previamente, foram colocados na estufa por 2 horas, à temperatura de 162°C.

Utilizou-se uma panela de aço (Figura 3.15) para misturar os agregados e o ligante, enquanto o molde era colocado no compactador (Figura 3.16). No caso das misturas modificadas, o resíduo foi colocado após uma pré-mistura do agregado com o ligante. Dentro do molde foram colocados papéis filtro na base e em cima da mistura, para evitar a perda de material. Seguindo-se a isso foram dados 75 golpes, com o soquete (Figura 3.17), por face do corpo-de-prova.

3.15. Panela utilizada para misturar os corpos-de-prova.

Figura 3.16. Compactador Marshall.

Figura 3.17. Soquete.

Durante a compactação foi verificada a temperatura da mistura com um termômetro a laser (Figura 3.18), com a finalidade de garantir que a mistura estava sendo compactada na temperatura correta.

Figura 3.18. Termômetro a laser.

Os corpos-de-prova ficaram descansando nos moldes por 6 horas antes de serem extraídos e 24 horas sobre uma superfície plana.

Verificou-se a *massa ao ar* (MA) e a *massa imersa* (MI) dos corpos-de-prova (Figura 3.19) para a determinação do seu volume (VCP) através da Equação 3.34. Considerou-se a massa específica da água como sendo 1 g/cm^3 , desse modo a densidade aparente de cada corpo-de-prova se iguala, em valor absoluto, à sua massa específica e 1 g de massa de água deslocada equivale a um volume de 1 cm^3 .

$$VCP = MA - MI \quad (3.34)$$

em que:

VCP : volume do corpo-de-prova (cm^3);

MA : massa ao ar do corpo-de-prova (g);

MI : massa imersa do corpo-de-prova (g).

Figura 3.19. Verificação da massa ao ar e massa imersa dos corpos-de-prova.

3.4.2.4. Densidade aparente dos corpos-de-prova

De posse das MA e das MI foram calculadas as *densidades aparentes* dos corpos-de-prova (DAP), com a Equação 3.35.

$$DAP = \frac{MA}{MA - MI} \quad (3.35)$$

em que:

DAP : densidade aparente do corpo-de-prova;

MA : massa ao ar do corpo-de-prova (g);

MI : massa imersa do corpo-de-prova (g).

A DAP pode, também, ser obtida considerando-se o corpo-de-prova na condição *saturado superfície seca* (SSS), deste modo, a equação 3.35 fica:

$$DAP_{SSS} = \frac{MA}{MA_{SSS} - MI} \quad (3.36)$$

em que:

DAP_{SSS} : densidade aparente do corpo-de-prova saturado e com a superfície seca;

MA_{SSS} : massa ao ar do corpo-de-prova saturado e com a superfície seca (g).

Nesta pesquisa optou-se por utilizar a DAP ao invés da DAP_{SSS} , que o procedimento recomendado pelo DNIT (DNER-ME 117/87).

3.4.2.5. Densidade máxima teórica da mistura

A *densidade máxima teórica* da mistura (DMT) foi calculada utilizando-se as massas específicas e as porcentagens na mistura de ligante e agregados.

$$DMT = \frac{1}{\left(\frac{CAP_p}{\rho_{CAP}} + \frac{AG_p}{\rho_{AG}} \right) \times \rho_{\text{água}}} \quad (3.37)$$

em que,

DMT : densidade máxima teórica da mistura;

CAP_p : quantidade de ligante na mistura (%);

ρ_{CAP} : massa específica do ligante (g/cm^3);

AG_p : quantidade de agregados na mistura (%);

ρ_{AG} : massa específica dos agregados (g/cm^3);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água (g/cm^3) = 1 (adotada).

3.4.2.6. Volume de vazios

Os espaços existentes entre as partículas de agregados cobertos por uma película de asfalto são conhecidos por *volume de vazios* (V_v), como mostra a Equação 3.37.

$$V_v = \left(1 - \frac{DAP}{DMT} \right) \times 100 \quad (3.38)$$

em que:

V_v : volume de vazios (%);

DAP : densidade aparente da mistura compactada;

DMT : densidade máxima teórica.

Segundo Gouveia (2002), a utilização tanto da densidade aparente quanto da densidade real dos agregados gera erros no cálculo do V_v das misturas asfálticas. O uso da densidade aparente implica em considerar que nenhuma quantidade de asfalto será absorvida pelos poros existentes no agregado, ou seja, o volume dos vazios preenchidos pelo asfalto está incluído como parte do volume da película do agregado, isso dá como resultado uma mistura com V_v menor do que ela realmente possui. Já a utilização da densidade real dos agregados leva em conta somente o volume da massa sólida do agregado, desse modo os poros permeáveis à água passam a fazer parte do V_v da mistura, resultando em um valor de V_v maior do que a mistura apresenta realmente. A autora cita que a utilização da densidade efetiva do agregado é que leva a resultados mais precisos, pois esta considera a absorção de asfalto pelos poros existentes nos agregados.

Diversos autores mostram que valores muito baixos de V_v podem ocasionar deformação permanente e exsudação, pois o ligante acaba trabalhando como uma espécie de lubrificante, enquanto que valores muito altos de V_v indicam propensão ao desgaste. A especificação SUPERPAVE recomenda a utilização de um V_v de 4%.

3.4.2.7. Vazios preenchidos com cimento asfáltico

O volume de vazios que foi preenchido pelo cimento asfáltico foi encontrado através da Equação 3.38.

$$V_{cap} = \frac{DAP \times CAP_p}{\rho_{CAP}} \times \rho_{água} \quad (3.39)$$

em que:

V_{cap} : volume de vazios preenchido pelo cimento asfáltico (%);

DAP : densidade aparente do corpo-de-prova;

CAP_p : quantidade de ligante na mistura (%);

ρ_{CAP} : massa específica do ligante (g/cm^3);

$\rho_{água}$: massa específica da água (g/cm^3) = 1 (adotada).

3.4.2.8. Vazios do agregado mineral

O conceito de *vazios do agregado mineral* (VAM) é fundamental no dimensionamento de pavimentos, pois define a porção da mistura, em porcentagem do volume, que não está preenchida com agregado. A definição SUPERPAVE para VAM é a quantidade de vazios na mistura compactada que é preenchida por ar ou ligante efetivo, ou seja, que não é absorvido.

$$VAM = 100 - \left(1 - \frac{DAP \times (1 - CAP_p)}{\rho_{AG}} \times \rho_{água} \right) \times 100 \quad (3.40)$$

ou

$$VAM = V_v + V_{ca} \quad (3.41)$$

em que:

VAM : vazios do agregado mineral (%);

DAP : densidade aparente da mistura;

CAP_p : quantidade de ligante na mistura (%)

ρ_{AG} : massa específica dos agregados (g/cm^3);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água (g/cm^3) = 1 (adotada);

V_v : Volume de vazios (%);

V_{ca} : volume de vazios preenchido pelo cimento asfáltico (%).

De acordo com o DMN da mistura, é recomendada uma porcentagem mínima de VAM para garantir que a mistura não esteja com uma quantidade deficiente de ligante, comprometendo a sua durabilidade (KHANDAL e CHAKRABORTY, 1996). A Tabela 3.8 mostra os valores mínimos de VAM segundo a especificação SUPERPAVE. De acordo com Cominsky *et al.* (1998), os vazios do agregado mineral de uma mistura estão relacionados não só com a curva granulométrica, mas também com o grau de compactação, a forma, a textura e a angularidade dos agregados.

Tabela 3.8 – VAM mínimo segundo o SUPERPAVE (COMINSKY *et al.*, 1998).

DMN (mm)	VAM mínimo (%)
9,5	15
12,5	14
19,0	13
25,0	12
37,5	11
50,0	10,5

A Tabela 3.9 mostra alguns fatores que influenciam nos VAM, segundo Chadbourn *et al.* (2000).

Tabela 3.9 – Fatores que influenciam nos VAM.

Fator	Tipo	Efeito nos VAM
Graduação do agregado	Densas	Diminuição
Forma do agregado	Arredondados	Diminuição
Textura do agregado	Lisos ou polidos	Diminuição
Absorção de asfalto	Diminuição	Aumento
Presença de pó	Diminuição	Aumento
Finos	Diminuição	Aumento
Temperatura de produção da mistura em usina	Mais elevada	Diminuição
Temperatura durante a pavimentação	Mais elevada	Diminuição
Tempo de transporte da mistura	Maior	Diminuição
Degradação do agregado	Maior	Diminuição

Fonte: Chadbourn *et al.* (2000).

Khandal, Foo e Mallick (1998) recomendam uma modificação nos valores mínimos de VAM das especificações SUPERPAVE, pois misturas com graduação mais grossa, que passam abaixo da zona de restrição, podem ter valores de VAM menores e ainda apresentarem bons resultados mecânicos e ao desgaste, basta garantir uma película mínima de asfalto de 8 μm . A Tabela 3.10 apresenta os valores que devem ser subtraídos dos indicados pela especificação SUPERPAVE, denominados *fatores de graduação* pelos autores.

Tabela 3.10 – Fatores de graduação.

DMN (mm)	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5
Fator de graduação	0,5	1,0	1,5	1,5	2,0

Fonte: Khandal, Foo e Mallick (1998).

O Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre (DNIT) recomenda, em sua Especificação de Serviço DNIT 031-2004 – ES (DNIT, 2004), alguns valores mínimos de VAM, apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Valores mínimos de VAM de acordo com a norma DNIT 031-2004 – ES.

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo dos Agregados		VAM mínimo
#	mm	%
1½"	38,1	13
1"	25,4	14
¾"	19,1	15
½"	12,7	16
⅜"	9,5	18

3.4.2.9. Relação betume-vazios

A *relação betume-vazios* (RBV) é definida como a porcentagem de VAM que contém asfalto, ou seja, a porcentagem de vazios que é preenchida por ligante e que representa o volume efetivo de ligante.

$$RBV = \frac{1 - V_{CAP}}{VAM} \quad (3.42)$$

em que:

RBV : Relação betume-vazios (%);

VAM : Vazios do agregado mineral (%);

V_{CAP} : Volume de asfalto (%).

É necessário que a RBV se enquadre numa faixa para garantir que a mistura asfáltica tenha boa durabilidade e que não esteja suscetível à deformação permanente, exsudação ou fadiga. Isso normalmente é conseguido controlando-se os vazios do agregado mineral e mantendo-se a mistura com 4% de Vv e, deste modo, assegurando uma correta espessura de película de asfalto envolvendo o agregado.

A Tabela 3.12 mostra os limites recomendados pela especificação SUPERPAVE, de acordo com o nível de tráfego e a espessura da camada de rolamento, para um projeto de pavimento de 20 anos.

Tabela 3.12 – Valores limite da RBV segundo a especificação SUPERPAVE.

ESALS ($\times 10^6$)	RBV (%)	
	Capa asfáltica ≤ 100 mm	Capa asfáltica > 100 mm e acostamento
$\leq 0,3$	70 – 80	75 – 85
$0,3 \leq 3$	65 – 78	70 – 83
> 3	65 – 75 ⁽¹⁾	70 – 80 ^{(2) (3)}

(1) Para mistura com DMN de 9,5 mm o limite superior é 76%.

(2) Para mistura com DMN de 9,5 mm o limite superior é 82%.

(3) Para mistura com DMN de 12,5 mm o limite superior é 81%.

O DNIT (DNIT, 2004) recomenda os limites da RBV no intervalo de 75% a 82% para a camada de rolamento e 65% a 72% para a camada de ligação (“*binder*”).

3.4.3. Densidade máxima medida e absorção de misturas asfálticas

3.4.3.1. Preparação das amostras

As amostras para a determinação das *densidades máximas medidas* (DMM) foram preparadas de acordo com a curva granulométrica e o teor de trabalho de asfalto. O procedimento de mistura da amostra foi semelhante ao de preparação dos corpos-de-prova Marshall, exceto pela ausência da compactação. Para que houvesse a absorção do asfalto pelo agregado foi necessário que cada amostra permanecesse durante 2 horas ou 4 horas em estufa ventilada na temperatura de compactação, em conformidade com a AASHTO PP2. Após ter sido retirada da estufa, a amostra foi resfriada manualmente com a utilização de uma espátula para evitar a formação grumos.

3.4.3.2. Determinação da densidade máxima medida

Após o resfriamento, verificou-se a massa seca da amostra, colocada dentro de um recipiente. Com a finalidade de garantir a precisão do ensaio, o recipiente utilizado neste ensaio foi um kitassato modificado, no qual foi feita uma rosca em sua boca e também foi fechado o seu dispositivo de nivelamento lateral (Figura 3.20).

Figura 3.20. Kitassato modificado.

Esse equipamento também é composto por um cilindro de vidro (Figura 3.21), um bocal (Figura 3.22) e um dispositivo rosqueável para prender o bocal (Figura 3.23), o qual contém um anel de borracha na parte interna para evitar que haja vazamento de água. A finalidade do cilindro de vidro foi proporcionar uma maior precisão ao se encher o kitassato com água.

Figura 3.21. Cilindro de vidro.

Figura 3.22. Bocal.

Figura 3.23. Dispositivo rosqueável.

Em seguida à determinação da massa seca, adicionou-se água fervida no kitassato até que a amostra ficasse 4 cm abaixo da superfície. A água foi fervida durante uma

hora, para que tivesse uma menor oxigenação, e esperou-se a temperatura estabilizar-se à temperatura ambiente.

Após isso, conectou-se o kitassato modificado à bomba de vácuo parcial, durante um período 15 a 20 minutos, ou até que não houvesse mais bolhas de ar se desprendendo da mistura.

Extraídas as bolhas, completou-se o kitassato com água fervida, com cuidado para não haver oxigenação da água e verificou-se a massa do conjunto. Tomou-se o cuidado de manter a parte inferior do cilindro de vidro no mesmo nível do bocal (Figura 3.24). Por fim, mediu-se a temperatura da água dentro do kitassato modificado, procurando-se manter o termômetro sempre na mesma altura.

Figura 3.24. Montagem do cilindro de vidro no bocal.

Com as massas secas do conjunto (kitassato modificado, água e amostra) e com a curva de calibração do kitassato modificado em função da temperatura da água (Figura 3.7), foi possível calcular a DMM de cada mistura asfáltica através da Equação 3.42.

$$DMM = \frac{A}{A + D - E} \quad (3.43)$$

em que,

DMM : densidade máxima medida da mistura;

A : massa da amostra seca (g);

D : massa do kitassato modificado preenchido com água em função da temperatura (curva de calibração) (g);

E : massa do conjunto (kitassato modificado, água, amostra) (g).

3.4.3.3. Determinação da massa específica efetiva do agregado

Tem-se, por definição, que a *massa específica efetiva do agregado* (ρ_{ef}) é correspondente à relação entre a massa do agregado (Ma) e o seu volume efetivo (V_{ef}):

$$\rho_{ef} = \frac{Ma}{V_{ef}} \quad (3.44)$$

Sabendo-se que a massa de agregado é igual a diferença entre massa total da mistura (M_{tm}) e a massa total de asfalto (M_b), que é a porcentagem de asfalto na mistura (P_b) multiplicada pela massa total da mistura, e que o volume efetivo de agregado é a diferença entre o volume total da mistura (V_{tm}) e o volume de ligante asfáltico (V_b), a Equação 3.43 pode ser expressa por:

$$\rho_{ef} = \frac{M_{tm} - (CAP_p \times M_{tm})}{V_{tm} - V_{CAP}} \quad (3.45)$$

Substituindo-se os volumes:

$$\rho_{ef} = \frac{M_{tm} - (CAP_p \times M_{tm})}{\frac{1}{\rho_{\text{água}}} \times \frac{M_{tm}}{DMM} - \frac{M_{CAP}}{\rho_{CAP}}} \quad (3.46)$$

Simplificando:

$$\rho_{ef} = \frac{1 - CAP_p}{\frac{1}{\rho_{\text{água}}} \times \frac{1}{DMM} - \frac{CAP_p}{\rho_{CAP}}} \quad (3.47)$$

em que:

Ma : massa do agregado (g);

M_{CAP} : massa total de asfalto (g);

M_{tm} : massa total da mistura (g);

V_{ef} : volume efetivo do agregado (cm³);

V_{CAP} : volume de asfalto (cm³);

V_{tm} : volume total da mistura (cm³);

ρ_{ef} : massa específica efetiva do agregado (g/cm³);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água =1 (adotada) (g/cm³);

ρ_{CAP} : massa específica do ligante asfáltico (g/cm³);

DMM : densidade máxima medida da mistura;

CAP_p : quantidade de asfalto na mistura (%).

3.4.3.4. Determinação da absorção

Por definição, tem-se que a absorção *de ligante pelo agregado* (A_{abs}) é dada pela relação entre a *massa de asfalto absorvida* ($M_{CAP,abs}$) pela *massa do agregado da mistura* (Ma).

$$A_{abs} = \frac{M_{CAP,abs}}{Ma} \times 100 \quad (3.48)$$

Sabendo-se que massa é a relação de multiplicação entre volume e a massa específica de um determinado material, tem-se:

$$A_{abs} = \frac{V_{CAP,abs} \times \rho_{CAP}}{Ma} \times 100 \quad (3.49)$$

Sendo o volume de asfalto absorvido a diferença entre o volume aparente do agregado (V_{ap}) e o volume efetivo do agregado (V_{ef}), a Equação 3.48 fica:

$$A_{abs} = \frac{(V_{ap} - V_{ef}) \times \rho_{CAP}}{Ma} \times 100 \quad (3.50)$$

Substituindo os volumes pela relação de massa por massa específica, tem-se a Equação 3.50.

$$A_{abs} = \frac{\left(\frac{Ma}{\rho_{ap}} - \frac{Ma}{\rho_{ef}} \right) \times \rho_{CAP}}{Ma} \times 100 \quad (3.51)$$

Simplificando:

$$A_{abs} = \left(\frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_{CAP} \right) \times 100 \quad (3.52)$$

em que:

A_{abs} : porcentagem de asfalto absorvido por massa de agregado (%);

$M_{CAP,abs}$: massa de asfalto absorvido (g);

Ma : massa de agregado (g);

$V_{CAP,abs}$: volume de asfalto absorvido (cm³);

V_{ap} : volume aparente do agregado (cm³);

V_{ef} : volume efetivo do agregado (cm³);

ρ_{CAP} : massa específica do asfalto (g/cm³);

ρ_{ef} : massa específica efetiva do agregado (g/cm³);

ρ_{ap} : massa específica aparente do agregado (g/cm³).

3.5. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.5.1. Resistência à tração por compressão diametral estática

O ensaio de resistência à tração foi realizado através de compressão diametral estática, em conformidade com a norma DNER-ME 138/94 (DNER, 1994a). Inicialmente foram anotadas as alturas dos corpos-de-prova, medidas nas quatro posições diametralmente opostas e também quatro leituras do diâmetro, sendo duas em uma face e duas em outra face dos corpos-de-prova, opostas 90° em cada face.

Os valores adotados foram as médias aritméticas das quatro medidas para alturas e os diâmetros.

Os corpos-de-prova ficaram em uma sala com temperatura controlada de 25°C por, no mínimo 24 horas, para que estabilizassem a temperatura para o ensaio. Cada corpo-de-prova foi colocado em um suporte (Figura 3.25) com friso de fixação de 12,5 mm, e levado à prensa. Em seguida, ajustaram-se os pratos até que o suporte ficasse preso (Figura 3.26). A carga foi aplicada progressivamente pela prensa, a uma velocidade constante de 0,8 mm/s, até que fosse verificada a ruptura do corpo-de-prova. O valor lido no anel de carga (Figura 3.27) foi multiplicado pela sua constante e, assim, determinado o valor da carga de ruptura de cada corpo-de-prova.

Figura 3.25. Montagem dos corpos-de-prova no suporte para o ensaio de RT.

Figura 3.26. Fixação do suporte para o ensaio de RT.

Figura 3.27. Anel de carga.

A Equação 3.52 forneceu o valor da resistência à tração de cada corpo-de-prova.

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.53)$$

em que:

σ_t : resistência à tração (kgf/cm²);

F : carga de ruptura (kgf);

D : diâmetro médio do corpo-de-prova (cm);

H : altura média do corpo-de-prova (cm).

3.5.2. Módulo de resiliência por compressão diametral

O módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica, e a deformação específica recuperável (ϵ_t), correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T). A norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994b) recomenda a Equação 3.53 para o cálculo de módulo de resiliência por compressão diametral.

$$MR = \left(\frac{F}{\Delta \times H} \right) \times (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (3.54)$$

em que:

MR : módulo de resiliência (kgf/cm²);

- F : carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (kgf);
- Δ : deformação (cm);
- H : altura do corpo-de-prova (cm);
- μ : coeficiente de Poisson (adimensional).

Todos os corpos-de-prova da pesquisa foram submetidos a este ensaio, com exceção dos moldados para a dosagem Marshall e os compostos para determinação da absorção, e ficaram em sala com temperatura controlada de 25°C por no mínimo 24 horas para a estabilização da temperatura.

Para a realização do ensaio, cada corpo-de-prova foi colocado em um suporte e, então, fixou-se o medidor de deslocamento do tipo LVDT, como mostra a Figura 3.28. O conjunto foi levado à prensa e fixado, tomando-se o cuidado de manter o LVDT centralizado com relação à altura do corpo-de-prova, com o intuito de medir o deslocamento médio, como mostra a Figura 3.29.

Figura 3.28. Montagem dos corpos-de-prova no suporte para o ensaio de MR.

Figura 3.29. Esquema de fixação do suporte na prensa.

Os carregamentos aplicados pela prensa foram controlados para que os deslocamentos de cada corpo-de-prova ficassem no intervalo de 0,0020 mm a 0,0030 mm em cada ciclo de carga, com 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de recuperação.

A Figura 3.30 mostra um exemplo das deformações instantânea e total ocorridas durante um ciclo de carregamento. O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral foi realizado com a aplicação de 100 ciclos de carregamento. As Figuras 3.31, 3.32 e 3.33 mostram as telas dos programas de aquisição desenvolvidos em LabView, detalhe dos pulsos e do processamento dos dados, respectivamente.

Figura 3.30. Deformações instantânea e total no ensaio de MR versus tempo
(AASHTO TP31-94² *apud* SANTANNA-GRECO (2004)).

² AASHTO TP31-94. *Standard test method for determining resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 1994.

Figura 3.31. Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de MR.

Figura 3.32. Detalhe dos pulsos do ensaio de MR.

Figura 3.33. Tela do programa utilizado para processamento dos dados de MR.

3.5.3. Fluência por compressão uniaxial estática (“creep” estático)

O ensaio consistiu na aplicação, axialmente, de uma carga estática de 0,4 MPa (4 kg/cm^2) num corpo-de-prova cilíndrico, o que segundo Little, Button e Youssef (1993) representa a tensão média no centro de uma camada asfáltica do pavimento em serviço. Foi realizado a 40°C , com 1 hora de aplicação de carga e 15 minutos de recuperação. As faces dos corpos-de-prova foram lixadas (Figura 3.34) para que ficassem mais planas quanto possível e a tensão aplicada pela prensa fosse homogênea em toda a superfície.

Figura 3.34. Corpo-de-prova lixado para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Os corpos-de-prova, colocados em sacos plásticos e lacrados, permaneceram em estufa a 40°C por 10 horas para que a temperatura em toda a sua massa ficasse homogênea na hora do ensaio. Antes do ensaio, as faces de cada corpo-de-prova foram lubrificadas (Figura 3.35), seguindo-se o seu posicionamento no interior do suporte para fixação do LVDT, tomando-se o cuidado de observar o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova. Estabilizou-se a temperatura da câmara a 40°C $\pm$ 1°C, antes de colocar os corpos-de-prova para o ensaio. A Figura 3.36 mostra o conjunto utilizado para realização do ensaio.

Figura 3.35. Preparação do corpo-de-prova para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 3.36. Conjunto para o ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Uma fase de pré-condicionamento, que é dada através da aplicação da carga de ensaio por 5 minutos, foi feita e seguiu-se um período de um descanso (recuperação) de 5 minutos (Figura 3.37). O tempo de ensaio foi de 60 minutos de carregamento, mais 15 minutos de recuperação. Através de programas desenvolvidos em Labview foram feitos a aquisição – leituras ao longo do tempo dos deslocamentos axiais e da carga – e o processamento dos dados (Figuras 3.38 e 3.39).

Figura 3.37. Condicionamento do corpo-de-prova no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 3.38. Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 3.39. Tela do programa utilizado para processamento dos dados de fluência por compressão uniaxial estática.

As respostas geradas pelo programa de cálculo são: a deformação total, a deformação recuperável, a deformação não recuperável, a recuperação, o módulo de rigidez à fluência aos 3600 segundos e aos 4500 segundos, a inclinação da curva no estágio secundário de deformação e a carga média aplicada.

3.5.4. Fluência por compressão uniaxial dinâmica (“creep” dinâmico)

O ensaio consistiu na aplicação repetitiva de um ciclo cargas de compressão de curta duração seguidas por um descanso em corpos-de-prova cilíndricos a uma temperatura de 40°C. As etapas de lixar faces dos corpos-de-prova e de estabilizar a

temperatura foram executadas como no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática (Figura 3.34). A tensão utilizada no ensaio foi de 0,4 MPa (4 kgf/cm²).

Cada ciclo teve duração de 1 segundo, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de recuperação. Antes da realização do ensaio houve uma fase de pré-condicionamento, onde foram aplicados 200 ciclos com a mesma carga e temperatura de ensaio.

Durante o ensaio foram aplicados 5000 ciclos e a aquisição e processamento dos dados foi semelhante ao ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. As Figuras 3.40 e 3.41 mostram as telas dos programas utilizados para aquisição e processamento dos dados, respectivamente.

Figura 3.40. Tela do programa utilizado para aquisição dos dados de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Figura 3.41. Tela do programa utilizado para processamento dos dados de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

3.5.5. Vida de fadiga

O ensaio consistiu na aplicação de carregamentos cíclicos, com duração de 0,1 segundo e com recuperação 0,9 segundo, intervalo escolhido para representar o tempo de aplicação de carga entre uma roda e outra, até a ruptura ou deslocamento de 6 mm do corpo-de-prova, que está sujeito a um estado bi-axial de tensões.

A carga a ser aplicada dependeu exclusivamente da resistência à tração da mistura de controle, determinada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática. O ensaio foi realizado com 10%, 20%, 30% e 40% da RT da mistura de controle. Optou-se por usar somente os valores de RT da mistura de controle para normalizar os valores de todas as misturas e assim permitir uma comparação da vida de fadiga das diferentes misturas utilizando-se a mesma carga de aplicação.

O ensaio foi realizado a 25°C e os corpos-de-prova ficaram acondicionados na temperatura de ensaio, por pelo menos 24 horas. O posicionamento do corpo-de-prova no suporte deu-se como no ensaio de RT (Figura 3.25). Uma barra metálica dobrada (Figura 3.42) foi utilizada para permitir a aquisição dos deslocamentos com o uso de um LVDT. Os dados foram captados e armazenados em um computador com o uso de um programa desenvolvido em LabView.

Figura 3.42. Prensa e suporte de fixação do LVDT para o ensaio de vida de fadiga.

As tensões encontradas no centro do corpo-de-prova são:

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (3.55)$$

$$\sigma_c = \frac{-6 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (3.56)$$

$$\Delta\sigma = \frac{8 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (3.57)$$

em que:

- σ_t : tensão de tração (MPa);
- σ_c : tensão de compressão (MPa);
- $\Delta\sigma$: diferença de tensões (MPa);
- F : carga aplicada (N);
- D : diâmetro médio do corpo-de-prova (cm);
- H : altura média do corpo-de-prova (cm).

A resposta do ensaio pôde ser expressa em função da diferença de tensões e da *deformação resiliente* (ε_r), que é função do módulo de resiliência e da tensão aplicada.

$$\varepsilon_r = \frac{\%RT}{MR} \quad (3.58)$$

em que:

- ε_r : deformação resiliente;
- $\%RT$: tensão aplicada referente a porcentagem da RT (MPa);
- MR : módulo de resiliência (MPa).

$$N_T = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (3.59)$$

$$N_D = k_3 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{k_2} \quad (3.60)$$

em que:

N_T : número de ciclos em função da diferença de tensões;

N_D : número de ciclos em função da deformação resiliente;

k_1, k_2, k_3 : constantes determinadas por regressão no ensaio de vida de fadiga.

3.5.6. Desgaste por abrasão no ensaio Cantabro

O ensaio foi realizado conforme a norma DNER-ME 383/99 (DNER, 1999), visando avaliar a coesão e a resistência à desintegração das misturas asfálticas. Os corpos-de-prova ficaram acondicionados à temperatura de 25°C por pelo menos 24 horas antes do ensaio e, então, foram pesados e colocados individualmente na máquina de abrasão “Los Angeles”, sem as cargas abrasivas. Foram realizadas 300 revoluções a 33 rpm, após as quais foram verificadas as massas dos corpos-de-prova. O desgaste das misturas asfálticas é dado pela seguinte equação:

$$A(\%) = \frac{M - M'}{M} \times 100 \quad (3.61)$$

em que:

A : desgaste das misturas asfálticas por abrasão (%);

M : massa inicial do corpo-de-prova (g);

M' : massa final do corpo-de-prova (g).

3.6. RESUMO DA PROGRAMAÇÃO EXPERIMENTAL

Com 4 teores de resíduo (0%, 1%, 2% e 3%) e 3 etapas de envelhecimento (0 h, 2 h e 4 h), têm-se $4 \times 3 = 12$ combinações possíveis, ou seja, para que o experimento completo fosse realizado foram necessárias 12 condições experimentais.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, fluência por compressão uniaxial estática e Cantabro foram realizados em 3 corpos-de-prova para cada condição experimental. Para os ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e Cantabro foram utilizados os mesmos corpos-de-prova, seguindo-se essa seqüência.

O ensaio de fadiga foi realizado com 8 corpos-de-prova para cada condição experimental, sendo que o ensaio foi feito em dois corpos-de-prova para cada tensão (10%, 20%, 30% e 40% da RT da mistura de controle).

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em todos os corpos-de-prova, já que não se trata de um ensaio destrutivo, com a finalidade de submeter todos os corpos-de-prova às mesmas condições.

Para os ensaios exploratórios foram utilizados 40 corpos-de-prova, sendo 18 para a dosagem Marshall, 6 para absorção (0 h, 2 h e 4 h) e 16 para os ensaios preliminares (MR e RT). Para a pesquisa foram compostos um total de 208 corpos-de-prova, sendo as características de cada um apresentadas no Apêndice D.

Se o conhecimento pode trazer problemas, não é através da ignorância que podemos solucioná-los.

(Isaac Asimov)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados da dosagem Marshall, que serviu para a determinação do teor ótimo (ou de projeto) de ligante asfáltico, dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral, resistência à tração por compressão diametral estática, vida de fadiga, fluência por compressão uniaxial estática, fluência por compressão uniaxial dinâmica e Cantabro. Seguindo-se à apresentação dos resultados foram feitos breves comentários acerca dos resultados dos ensaios e propostos modelos estatísticos gerados a partir do teste F de Snedecor para o módulo de resiliência, a resistência à tração e o desgaste. O ensaio

de vida de fadiga já proporciona modelos em função do nível de tensão para cada condição experimental.

4.2. MODELOS DE REGRESSÃO

Os modelos obtidos através de regressão múltipla dos resultados dos ensaios aparecem na forma polinomial em função dos dois fatores envolvidos na pesquisa (teor de EVA e tempo de envelhecimento) e apresenta a forma geral:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_{TI} \times P_I(T) + \alpha_{Tq} \times P_q(T) + \alpha_{EI} \times P_I(E) + \alpha_{Eq} \times P_q(E) + \alpha_{TIEI} \times P_I(E) \times P_I(T) + \alpha_{TqEI} \times P_q(T) \times P_I(E) + \alpha_{TIEq} \times P_I(T) \times P_q(E) + \alpha_{TqEq} \times P_q(T) \times P_q(E) \quad (4.1)$$

em que:

Y : variável dependente;

T, E : variável independente;

T : teor de EVA na mistura (%);

E : tempo de envelhecimento da mistura (h);

α_0 : média aritmética das observações;

α_{TI} : termo linear do coeficiente correspondente ao fator T;

α_{Tq} : termo quadrático do coeficiente correspondente ao fator T;

α_{EI} : termo linear do coeficiente correspondente ao fator E;

α_{Eq} : termo quadrático do coeficiente correspondente ao fator E;

α_{TIEl} : coeficiente correspondente à interação dos termos lineares dos fatores T e E;

α_{TqEl} : coeficiente correspondente à interação do termo quadrático do fator T e o termo linear do fator E;

α_{TIEq} : coeficiente correspondente à interação do termo linear do fator T e o termo quadrático do fator E;

α_{TqEq} : coeficiente correspondente à interação dos termos quadráticos dos fatores T e E;

$P_l(T)$: equação polinomial linear correspondente ao fator T;

$P_q(T)$: equação polinomial quadrática correspondente ao fator T;

$P_l(E)$: equação polinomial linear correspondente ao fator E;

$P_q(E)$: equação polinomial quadrática correspondente ao fator E.

As equações polinomiais lineares e quadráticas apresentadas na Equação 4.1 podem ser expressas, de forma geral, como as Equações 4.2 e 4.3.

$$P_l(x) = \lambda_l \times \left(\frac{x - \bar{x}}{d_x} \right) \quad (4.2)$$

$$P_q(x) = \lambda_q \times \left[\left(\frac{x - \bar{x}}{d_x} \right)^2 - \left(\frac{a_x^2 - 1}{12} \right) \right] \quad (4.3)$$

em que:

λ_l : constante tabelada para o polinômio linear = 1;

λ_q : constante tabelada para o polinômio quadrático = 3;

x : nível do fator quantitativo;

$\bar{x}$: média aritmética dos valores do fator quantitativo x ;

d_x : distância entre os níveis do fator quantitativo x ;

a_x : número de níveis do fator x .

As equações polinomiais são definidas através dos níveis de cada fator e podem ser representadas como na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Modelos estatísticos – Equações polinomiais.

Fator	Equação polinomial	Variável representativa	Condição
Teor de EVA	$P(T) =$	-1	1% de EVA
		0	2% de EVA
		1	3% de EVA
Tempo de envelhecimento	$P(E) =$	-1	0 hora
		0	2 horas
		1	4 horas

A construção de cada modelo foi feita a partir da análise da variância efetuada nos dados dos ensaios, considerando-se apenas os efeitos significativos, que foram determinados através do teste F de Snedecor. Trata-se de um teste que fornece a *soma dos quadrados* (SQ) dos fatores e suas interações, que por sua vez estão relacionadas com as variações dos níveis de cada fator e suas respectivas interações. Supondo-se que tratamentos (termos) são equivalentes, o *quadrado*

médio (QM) para os tratamentos é uma estimativa da variância, da mesma forma que o quadrado médio do resíduo (GOMES, 1973).

As tabelas do teste F (GOMES, 1973; LEABO, 1972) podem ser usadas para comparar as estimativas de cada parâmetro dentro de cada significância ou probabilidade. Por exemplo, para um nível de significância de 5%, o valor da resposta do modelo tem 5% de probabilidade de ter sido ao acaso. A qualidade com que cada modelo representa o comportamento do material pode ser dada em função do *coeficiente de determinação* (R^2), que é calculado de acordo com a Equação 4.4. Quanto mais próximo de 1 estiver o R^2 , mais próximo o modelo proposto está de representar a realidade. Os modelos incluem apenas os fatores e interações significantes, de acordo com o teste F. A significância com que cada modelo foi construído (0,1%, 1%, 2,5% e 5%) difere um do outro, pois foi utilizado para cada modelo a significância de menor valor e que apresentasse resposta mais próxima dos valores de ensaio, por exemplo, para modelos construídos com significância 0,1%, 1%, 2,5% e 5% e R^2 de 0,7, 0,75, 0,8, 0,8 e 0,8, respectivamente, utilizou-se o modelo que apresenta significância de 2,5%.

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{mod}}}{SQ_{\text{total}}} \quad (4.4)$$

4.3. DOSAGEM MARSHALL

O intuito de se realizar a dosagem Marshall foi obter o teor ótimo de ligante para compor os corpos-de-prova da pesquisa. Os parâmetros obtidos na dosagem, que

são a densidade aparente da mistura (Dap), os vazios do agregado mineral (VAM), a relação betume-vazios (RBV), a fluência (F) e a estabilidade (E) foram verificados para o teor de ligante que corresponde ao volume de vazios de 4%. A Tabela 4.2 mostra as médias dos parâmetros encontrados na dosagem Marshall, sendo os dados completos apresentados no Apêndice B.

Tabela 4.2 – Dosagem Marshall – Características volumétricas e mecânicas das amostras.

CAP (%)	Dap	Vv (%)	Vol. CAP (%)	VAM (%)	RBV (%)	F (mm)	E (N)	E/F (N/mm)
4,5	2,428	8,25	10,84	19,09	56,78	2,62	11636	4433
5,0	2,445	6,83	12,13	18,96	63,96	2,79	12604	4511
5,5	2,476	4,85	13,51	18,36	73,58	2,88	13861	4815
6,0	2,490	3,52	14,82	18,34	80,83	3,13	14403	4598
6,5	2,492	2,63	16,07	18,70	85,94	3,39	13139	3880
7,0	2,486	2,05	17,27	19,31	89,40	3,64	12074	3317

As Figuras 4.1 a 4.6 representam graficamente as médias correspondentes aos valores dos parâmetros da dosagem apresentados na Tabela 4.2. De acordo com os dados representados na Figura 4.1, o teor ótimo de ligante, para 4% de volume de vazios, se dá em aproximadamente 5,78% de ligante.

Figura 4.1. Dosagem Marshall – Volume de vazios em função do teor de CAP.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das médias da absorção de ligante pelo agregado em função do tempo de envelhecimento em estufa com ventilação forçada, para a mistura de controle no teor de projeto. Os cálculos estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.3 – Absorção de ligante.

Envelhecimento (h)	Absorção (%)
0	0,001
2	0,023
4	0,123

Nesta pesquisa foi adotado o teor de ligante calculado mais a absorção de 2 horas para todas as misturas, desse modo o teor de ligante utilizado nas misturas foi de 5,83%, porém o teor efetivo de ligante foi de 5,78%, portanto todos os parâmetros apresentados a seguir são baseados no teor efetivo de ligante. De acordo com a Figura 4.2, para 5,78% de ligante, tem-se uma densidade aparente da mistura de 2,486. A Figura 4.3 mostra um teor de vazios no agregado mineral de 18,3%, valor

maior que o mínimo recomendado pela especificação SUPERPAVE (COMINSKY *et al.*, 1998) e pelo DNIT (DNIT, 2004).

Figura 4.2. Dosagem Marshall – Densidade aparente da mistura em função do teor de CAP.

Figura 4.3. Dosagem Marshall – Vazios no agregado mineral em função do teor de CAP.

Analisando-se a Figura 4.4, encontra-se a relação betume-vazios, para o teor de ligante de projeto, de aproximadamente 78%, valor que se encontra no intervalo recomendado pelo DNIT (DNIT, 2004) para camada de rolamento. A Figura 4.5 indica uma fluência de 3,02 mm, sendo que o DNER (DNER, 1997) recomenda que a fluência da camada de rolamento se encontre no intervalo de 2,0 a 4,5 mm. Segundo a norma DNER-ES 313/97 a estabilidade mínima para misturas asfálticas compactadas, segundo o método Marshall, com 75 golpes, é de 350 kgf. Analisando-se a Figura 4.6, tem-se uma estabilidade de 14320 N ou 1432 kgf, valor muito acima do mínimo recomendado.

Figura 4.4. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios em função do teor de CAP.

Figura 4.5. Dosagem Marshall – Fluência em função do teor de CAP.

Figura 4.6. Dosagem Marshall – Estabilidade em função do teor de CAP.

4.4. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

A etapa inicial da pesquisa teve como objetivo determinar o teor de EVA que substituiria os agregados. A análise seria feita através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estática (RT), módulo de resiliência por compressão diametral (MR) e pela relação MR/RT, ao se substituir parte dos

agregados retidos na peneira 4,75 mm pelo EVA. A substituição foi feita até um máximo de 10% do material, com 4 intervalos espaçados em 2,5%. A porcentagem da massa de agregados (2,5%, 5%, 7,5% e 10%) foi convertida em volume utilizando-se a massa específica dos agregados e, usando a massa específica do resíduo, convertido novamente em massa, para determinar a quantidade de EVA a ser utilizada. Notou-se, entretanto, que a mistura começou a apresentar problema de desagregação quando da utilização de 10% de material substituído, por esse motivo optou-se por limitar a quantidade máxima de substituição em 3% de material com relação à massa total de agregados que corresponde a pouco menos que 10% da massa de agregados retidos na peneira 4,75 mm. Os níveis intermediários de teor de EVA foram igualmente espaçados com intervalo de 1% da massa total de agregados da mistura.

Os ensaios foram realizados com duas horas de envelhecimento, para simular o tempo de mistura, transporte e compactação em campo, e as médias dos resultados são apresentadas na Tabela 4.4 e nas Figuras 4.7 a 4.9.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios exploratórios.

Teor de EVA com relação à peneira 4,75 mm (%)	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
2,5	1,228	6033	4914
5,0	1,142	6686	5856
7,5	1,066	6585	6180
10,0	0,972	3013	3102

Figura 4.7. Ensaios exploratórios – RT em função do teor de EVA.

Figura 4.8. Ensaios exploratórios – MR em função do teor de EVA.

Figura 4.9. Ensaios exploratórios – Relação MR/RT em função do teor de EVA.

Ao se analisar as Figuras 4.7 e 4.8 notou-se que a resistência à tração e o módulo de resiliência das misturas caíram significativamente com a substituição de 10% do volume de agregados retidos na peneira de malha 4,75 mm por EVA. Entretanto a relação MR/RT (Figura 4.9) ficou mais próxima a 3000, o que, segundo grande parte da literatura consultada, é um indicativo de misturas proporcionalmente com melhores resistências à fadiga e às deformações permanentes.

4.5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.5.1. Módulo de resiliência por compressão diametral

Todos os corpos-de-prova da pesquisa, com exceção dos destinados à dosagem e à absorção, num total de 184, foram submetidos ao ensaio de módulo de resiliência.

Os dados apresentados na Tabela 4.5 referem-se às médias dos módulos de resiliência totais, após análise estatística (Apêndice F).

Tabela 4.5 – Programa experimental – Módulos de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

Teor de EVA (%)	Envelhecimento (h)	Módulo de Resiliência	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (%)
0	0	7363	2,80
	2	7534	2,68
	4	7493	3,58
1	0	5660	3,76
	2	6014	1,71
	4	8036	4,84
2	0	5057	2,98
	2	6831	1,79
	4	5990	2,56
3	0	3191	4,04
	2	4413	1,90
	4	4426	4,12

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram o comportamento do módulo de resiliência total das misturas com o incremento de EVA para 0, 2 e 4 horas, e as respectivas equações. A Figura 4.13 mostra as médias dos módulos de resiliência para 0, 2 e 4 horas, nos grupos com 0%, 1%, 2% e 3% de EVA.

Figura 4.10. Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.11. Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.12. Programa Experimental – Módulo de resiliência em função do teor de EVA para 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.13. Programa experimental – Módulos de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

Com exceção das misturas com 0% de EVA, que se mostraram praticamente estáveis com o envelhecimento, e das misturas com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento, os módulos de resiliência aumentaram.

4.5.1.1. Análise da variância e modelo estatístico do módulo de resiliência

Para a construção do modelo estatístico (Equação 4.5) do módulo de resiliência, com significância de 0,1% e R^2 de 0,987, utilizou-se a média aritmética após tratamento com o teste $t \pm$ desvio padrão, para homogeneizar as amostras para cada condição experimental. Como os valores obtidos foram homogeneizados, todos os

fatores foram significantes. A Figura 4.14 apresenta os gráficos gerados pela Equação 4.5.

$$MR = 5513 - 1238 \times P_l(T) - 223 \times P_q(T) + 757 \times P_l(E) - 120 \times P_q(E) - 285 \times P_l(T) \times P_l(E) - 240 \times P_l(T) \times P_q(E) + 145 \times P_q(T) \times P_l(E) + 158 \times P_q(T) \times P_q(E) \quad (4.5)$$

Figura 4.14. Programa Experimental – Modelo de módulo de resiliência em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 0,1%.

4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral estática

A Tabela 4.6 apresenta os resultados das médias dos ensaios de resistência à tração, realizado conforme a norma DNER-ME 138/94 (DNER, 1994a), as Figuras 4.15 a 4.17 representam graficamente os dados e fornecem as respectivas equações que regem as curvas e a Figura 4.18 um resumo com os dados do ensaio.

Tabela 4.6 – Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

Teor de EVA (%)	Envelhecimento (h)	Resistência à Tração	
		Média (MPa)	Desvio Padrão (%)
0	0	1,234	0,09
	2	1,259	0,51
	4	1,289	4,30
1	0	1,036	4,50
	2	1,211	1,44
	4	1,268	4,65
2	0	0,946	0,65
	2	1,102	2,09
	4	1,240	1,23
3	0	0,826	6,56
	2	1,050	2,18
	4	1,119	3,56

Figura 4.15. Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.16. Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.17. Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA para 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.18. Programa experimental – Resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

Todas as misturas apresentaram ganho na resistência à tração com o envelhecimento e diminuição com o incremento do teor de EVA.

4.5.2.1. Análise da variância e modelo estatístico de resistência à tração

A Tabela 4.7 mostra o modelo estatístico e o R^2 , obtidos com análise de variância. A Figura 4.19 mostra o gráfico gerado com o modelo estatístico desenvolvido com significância de 0,5%.

Tabela 4.7 – Análise da variância da resistência à tração, para significância de 0,5%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	0,5180	0,0199	1,089	15,20	3,36	Sim
T _l	1	0,1354	0,1354	-0,087	103,25	10,22	Sim
T _q	1	0,0007	0,0007	-0,004	0,55	10,22	Não
E _l	1	0,3354	0,3354	0,137	255,81	10,22	Sim
E _q	1	0,0142	0,0142	-0,016	10,81	10,22	Sim
T _l E _l	1	0,0029	0,0029	0,015	2,18	10,22	Não
T _l E _q	1	0,0004	0,0004	-0,003	0,28	10,22	Não
T _q E _l	1	0,0009	0,0009	-0,005	0,71	10,22	Não
T _q E _q	1	0,0046	0,0046	-0,007	3,53	10,22	Não
Resíduo	18	0,0236	0,0013	-	-	-	-
Modelo	$RT(MPa) = 1,089 - 0,087 \times P_l(T) + 0,137 \times P_l(E) - 0,016 \times P_q(E)$						$R^2 = 0,936$

Figura 4.19. Programa Experimental – Modelo de resistência à tração em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 0,5%.

4.5.3. Relação MR/RT

A Tabela 4.8 e a Figura 4.20 apresentam os resultados da relação MR/RT, para diferentes valores de EVA e tempo de envelhecimento.

Tabela 4.8 – Programa experimental – Relação MR/RT em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

Teor de EVA (%)	Envelhecimento (h)	Relação MR/RT
0	0	5968
	2	5986
	4	5812
1	0	5461
	2	4966
	4	6336
2	0	5344
	2	6197
	4	4832
3	0	3865
	2	4202
	4	3954

Figura 4.20. Programa experimental – Relação MR/RT do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

As misturas sem EVA mostraram-se menos sensíveis ao envelhecimento que as misturas com EVA, que, por sua vez, não apresentam um padrão de comportamento com o envelhecimento e o aumento do teor de EVA do resíduo.

4.5.4. Vida de Fadiga

O ensaio de vida de fadiga foi conduzido utilizando-se tensão controlada. Os valores de carga aplicados foram de 10%, 20%, 30% e 40% da RT da mistura de controle para cada tempo de envelhecimento (0, 2 e 4 horas). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.9 a 4.20. Os modelos de fadiga apresentados foram calibrados com o uso das curvas dos ensaios de fadiga (Figuras 4.21 a 4.44).

Tabela 4.9 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

RT considerada = 1,234 MPa					MR = 7363 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI041	1160	10,17	5,95	0,1220	9,89	0,4882	$1,66 \times 10^{-5}$	15761
JSI052	1160	10,16	5,93	0,1226	9,93	0,4903	$1,66 \times 10^{-5}$	13430
JSI046	2320	10,17	5,91	0,2457	19,91	0,9829	$3,34 \times 10^{-5}$	3220
JSI047	2320	10,16	5,89	0,2468	20,00	0,9872	$3,35 \times 10^{-5}$	2918
JSI048	3480	10,17	5,93	0,3674	29,77	1,4694	$4,99 \times 10^{-5}$	1210
JSI050	3480	10,17	5,92	0,3680	29,82	1,4719	$5,00 \times 10^{-5}$	835
JSI042	4640	10,16	5,86	0,4961	40,21	1,9846	$6,74 \times 10^{-5}$	455
JSI044	4640	10,19	5,93	0,4888	39,61	1,9554	$6,64 \times 10^{-5}$	475
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões	$N = 2626,6 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,4746}$		
					Função da deformação resiliente	$N = 1,54 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,4746}$

Figura 4.21. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.22. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Tabela 4.10 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

RT considerada = 1,234 MPa					MR = 5660 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI083	1160	10,17	5,95	0,1220	9,89	0,4882	$2,16 \times 10^{-5}$	22156
JSI089	1160	10,17	5,87	0,1237	10,02	0,4948	$2,19 \times 10^{-5}$	23939
JSI087	2320	10,18	5,84	0,2484	20,13	0,9937	$4,39 \times 10^{-5}$	3410
JSI095	2320	10,18	5,88	0,2467	20,00	0,9870	$4,36 \times 10^{-5}$	3169
JSI088	3480	10,18	5,82	0,3739	30,30	1,4957	$6,61 \times 10^{-5}$	1213
JSI092	3480	10,18	5,91	0,3682	29,84	1,4729	$6,51 \times 10^{-5}$	1067
JSI086	4640	10,17	5,83	0,4982	40,37	1,9928	$8,80 \times 10^{-5}$	485
JSI091	4640	10,17	5,83	0,4982	40,37	1,9928	$8,80 \times 10^{-5}$	481
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões		$N = 3261,7 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,7464}$	
					Função da deformação resiliente		$N = 3,57 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,7464}$

Figura 4.23. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.24. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Tabela 4.11 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

RT considerada = 1,234 MPa						MR = 5657 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_r	N
JSI126	1160	10,19	6,17	0,1175	9,52	0,4698	$2,32 \times 10^{-5}$	22287
JSI131	1160	10,15	5,98	0,1217	9,86	0,4867	$2,41 \times 10^{-5}$	25160
JSi125	2320	10,19	6,22	0,2330	18,88	0,9321	$4,61 \times 10^{-5}$	3380
JSI127	2320	10,16	6,05	0,2403	19,47	0,9611	$4,75 \times 10^{-5}$	2589
JSI129	3480	10,19	5,98	0,3636	29,46	1,4543	$7,19 \times 10^{-5}$	811
JSI132	3480	10,17	6,04	0,3607	29,23	1,4427	$7,13 \times 10^{-5}$	885
JSI130	4640	10,18	5,94	0,4885	39,59	1,9540	$9,66 \times 10^{-5}$	427
JSI137	4640	10,19	5,89	0,4922	39,88	1,9687	$9,73 \times 10^{-5}$	489
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 2760,7 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,8459}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 1,54 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,8459}$

Figura 4.25. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.26. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Tabela 4.12 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

RT considerada = 1,234 MPa					MR = 3191 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI174	1160	10,18	6,01	0,1207	9,78	0,4828	$3,78 \times 10^{-5}$	8709
JSI179	1160	10,16	6,08	0,1195	9,69	0,4782	$3,75 \times 10^{-5}$	10709
JSI171	2320	10,19	6,22	0,2330	18,88	0,9321	$7,30 \times 10^{-5}$	2145
JSI180	2320	10,19	6,26	0,2315	18,76	0,9261	$7,26 \times 10^{-5}$	1866
JSI173	3480	10,17	6,18	0,3525	28,57	1,4100	$1,10 \times 10^{-4}$	679
JSI176	3480	10,19	6,22	0,3495	28,33	1,3982	$1,10 \times 10^{-4}$	652
JSI169	4640	10,18	6,15	0,4718	38,23	1,8873	$1,48 \times 10^{-4}$	264
JSI172	4640	10,16	6,17	0,4712	38,19	1,8849	$1,48 \times 10^{-4}$	291
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões	$N = 1530,6 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,5810}$		
					Função da deformação resiliente	$N = 3,86 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,5810}$

Figura 4.27. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.28. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

Tabela 4.13 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,260 MPa						MR = 7534 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_r	N
JSI062	1200	10,17	5,98	0,1256	9,97	0,5025	$1,67 \times 10^{-5}$	18795
JSI065	1200	10,15	6,01	0,1252	9,94	0,5009	$1,66 \times 10^{-5}$	20478
JSI063	2410	10,17	5,97	0,2527	20,06	1,0108	$3,35 \times 10^{-5}$	4215
JSI064	2410	10,17	6,00	0,2514	19,96	1,0057	$3,34 \times 10^{-5}$	3594
JSI060	3610	10,19	5,99	0,3765	29,88	1,5061	$5,00 \times 10^{-5}$	1526
JSI066	3610	10,17	5,98	0,3779	29,99	1,5116	$5,02 \times 10^{-5}$	1640
JSI059	4810	10,18	5,97	0,5039	39,99	2,0154	$6,69 \times 10^{-5}$	717
JSI061	4810	10,16	5,99	0,5032	39,93	2,0126	$6,68 \times 10^{-5}$	736
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 3939,5 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,3486}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 1,19 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,3486}$

Figura 4.29. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.30. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Tabela 4.14 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,260 MPa					MR = 6014 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI100	1200	10,18	5,91	0,1270	10,08	0,5079	$2,11 \times 10^{-5}$	34115
JSI110	1200	10,18	5,93	0,1265	10,04	0,5062	$2,10 \times 10^{-5}$	29512
JSI098	2410	10,17	5,98	0,2523	20,02	1,0091	$4,19 \times 10^{-5}$	4808
JSI101	2410	10,17	5,93	0,2544	20,19	1,0176	$4,23 \times 10^{-5}$	4859
JSI097	3610	10,16	6,04	0,3745	29,72	1,4980	$6,23 \times 10^{-5}$	1432
JSI102	3610	10,18	5,92	0,3813	30,27	1,5254	$6,34 \times 10^{-5}$	1374
JSI103	4810	10,18	5,93	0,5073	40,26	2,0290	$8,43 \times 10^{-5}$	777
JSI105	4810	10,17	5,94	0,5069	40,23	2,0276	$8,43 \times 10^{-5}$	641
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões		$N = 4814,2 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,7800}$	
					Função da deformação resiliente		$N = 3,18 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,7800}$

Figura 4.31. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.32. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Tabela 4.15 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,260 MPa						MR = 6831 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_r	N
JSI145	1200	10,18	6,01	0,1249	10,12%	0,4995	$1,83 \times 10^{-5}$	34698
JSI152	1200	10,17	6,00	0,1252	10,15%	0,5008	$1,83 \times 10^{-5}$	32594
JSI140	2410	10,18	6,03	0,2499	20,25%	0,9998	$3,66 \times 10^{-5}$	3906
JSI141	2410	10,17	5,98	0,2523	20,44%	1,0091	$3,69 \times 10^{-5}$	4607
JSI146	3610	10,17	6,00	0,3766	30,52%	1,5065	$5,51 \times 10^{-5}$	1356
JSI147	3610	10,19	5,91	0,3816	30,93%	1,5265	$5,59 \times 10^{-5}$	1525
JSI143	4810	10,18	6,04	0,4980	40,36%	1,9921	$7,29 \times 10^{-5}$	671
JSI150	4810	10,18	5,97	0,5039	40,83%	2,0154	$7,38 \times 10^{-5}$	736
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 4654,5 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,7913}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 1,92 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,7913}$

Figura 4.33. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.34. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Tabela 4.16 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,260 MPa						MR = 4413 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI185	1200	10,16	6,13	0,1227	9,94	0,4906	$2,78 \times 10^{-5}$	23784
JSI194	1200	10,17	6,15	0,1221	9,90	0,4886	$2,77 \times 10^{-5}$	21575
JSI184	2410	10,18	6,08	0,2479	20,09	0,9915	$5,62 \times 10^{-5}$	3114
JSI190	2410	10,17	6,09	0,2477	20,07	0,9909	$5,61 \times 10^{-5}$	2861
JSI183	3610	10,19	6,05	0,3728	30,21	1,4911	$8,45 \times 10^{-5}$	1022
JSI189	3610	10,19	6,01	0,3753	30,41	1,5011	$8,50 \times 10^{-5}$	957
JSI181	4810	10,17	6,04	0,4985	40,40	1,9940	$1,13 \times 10^{-4}$	472
JSI186	4810	10,17	6,06	0,4969	40,26	1,9874	$1,13 \times 10^{-4}$	597
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 3130,8 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,7033}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 1,04 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,7033}$

Figura 4.35. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.36. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

Tabela 4.17 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,289 MPa					MR = 7493 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_r	N
JSI077	1250	10,17	5,99	0,1306	10,13%	0,5225	$1,74 \times 10^{-5}$	15568
JSI080	1250	10,18	5,99	0,1305	10,12%	0,5220	$1,74 \times 10^{-5}$	14134
JSI076	2490	10,17	5,94	0,2624	20,36%	1,0496	$3,50 \times 10^{-5}$	2900
JSI078	2490	10,16	5,96	0,2618	20,31%	1,0471	$3,49 \times 10^{-5}$	3370
JSI070	3740	10,17	5,97	0,3922	30,42%	1,5686	$5,23 \times 10^{-5}$	1073
JSI072	3740	10,17	5,96	0,3928	30,47%	1,5712	$5,24 \times 10^{-5}$	1137
JSI071	4980	10,19	6,01	0,5177	40,16%	2,0707	$6,91 \times 10^{-5}$	411
JSI079	4980	10,17	5,99	0,5204	40,37%	2,0817	$6,95 \times 10^{-5}$	650
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões			
					$N = 3221,1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,4216}$			
					Função da deformação resiliente			
					$N = 4,65 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,4216}$

Figura 4.37. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.38. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Tabela 4.18 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,289 MPa					MR = 8036 MPa			
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI114	1250	10,17	5,99	0,1306	0,1013	0,5225	$1,63 \times 10^{-5}$	39038
JSI118	1250	10,18	5,97	0,1309	0,1016	0,5238	$1,63 \times 10^{-5}$	37290
JSI113	2490	10,16	6,01	0,2596	0,2014	1,0384	$3,23 \times 10^{-5}$	4160
JSI116	2490	10,17	5,99	0,2602	0,2019	1,0409	$3,24 \times 10^{-5}$	4858
JSI119	3740	10,18	5,90	0,3964	0,3075	1,5857	$4,93 \times 10^{-5}$	1881
JSI124	3740	10,17	5,95	0,3935	0,3053	1,5739	$4,90 \times 10^{-5}$	1697
JSI111	4980	10,17	6,01	0,5187	0,4024	2,0748	$6,45 \times 10^{-5}$	609
JSI117	4980	10,19	5,95	0,5229	0,4057	2,0916	$6,51 \times 10^{-5}$	1029
Modelos de fadiga					Função da diferença de tensões	$N = 5907,1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,7713}$		
					Função da deformação resiliente	$N = 1,91 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,7713}$

Figura 4.39. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.40. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Tabela 4.19 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,289 MPa						MR = 5990 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_r	N
JSI160	1250	10,16	5,98	0,1310	0,1016	0,5239	$2,19 \times 10^{-5}$	36950
JSI166	1250	10,16	6,05	0,1295	0,1004	0,5178	$2,16 \times 10^{-5}$	35163
JSI153	2490	10,18	6,02	0,2587	0,2007	1,0347	$4,32 \times 10^{-5}$	4336
JSI155	2490	10,17	6,04	0,2581	0,2002	1,0322	$4,31 \times 10^{-5}$	4879
JSI156	3740	10,16	6,00	0,3906	0,3030	1,5623	$6,52 \times 10^{-5}$	1368
JSI162	3740	10,18	5,96	0,3924	0,3044	1,5697	$6,55 \times 10^{-5}$	1672
JSI158	4980	10,18	6,00	0,5191	0,4027	2,0762	$8,67 \times 10^{-5}$	624
JSI161	4980	10,18	5,95	0,5234	0,4061	2,0937	$8,74 \times 10^{-5}$	767
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 5422,4 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,8484}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 1,82 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,8484}$

Figura 4.41. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.42. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Tabela 4.20 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fadiga em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

RT considerada = 1,289 MPa						MR = 4246 MPa		
CP nº	Carga (N)	D (cm)	H (cm)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε_r	N
JSI197	1250	10,17	6,02	0,1300	0,1008	0,5199	$2,94^{-5}$	34560
JSI199	1250	10,17	6,07	0,1289	0,1000	0,5156	$2,91^{-5}$	32127
JSI195	2490	10,17	6,08	0,2564	0,1989	1,0255	$5,79^{-5}$	6197
JSI204	2490	10,16	6,08	0,2566	0,1991	1,0265	$5,80^{-5}$	6126
JSI198	3740	10,18	6,08	0,3847	0,2984	1,5387	$8,69^{-5}$	1708
JSI207	3740	10,16	6,07	0,3861	0,2995	1,5443	$8,72^{-5}$	1529
JSI201	4980	10,19	6,19	0,5026	0,3899	2,0105	$1,14^{-4}$	701
JSI208	4980	10,17	6,09	0,5119	0,3971	2,0475	$1,16^{-4}$	762
Modelos de fadiga						Função da diferença de tensões		
						$N = 5637,4 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,8104}$		
						Função da deformação resiliente		
						$N = 6,49 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{2,8104}$

Figura 4.43. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.44. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

As Figuras 4.45 a 4.47 mostram o comportamento das curvas como sendo o número de ciclos em função da diferença de tensões e as Figuras 4.48 a 4.50 mostram o comportamento das curvas como sendo o número de ciclos em função da deformação resiliente. Pode-se verificar que as curvas das misturas com adição de resíduo apresentam inclinações parecidas, diferentemente das curvas das misturas sem EVA, para um mesmo tempo de envelhecimento.

Figura 4.45. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.46. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 0 hora de envelhecimento.

Figura 4.47. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.48. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 2 horas de envelhecimento.

Figura 4.49. Programa experimental – Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova com 4 horas de envelhecimento.

Figura 4.50. Programa experimental – Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova com 4 horas de envelhecimento.

4.5.4.1. Simulação de tensões utilizando o programa ELSYM5

Para a análise da vida de fadiga de misturas asfálticas, não basta apenas analisar as curvas de diferenças de tensões obtidas por regressão em laboratório, deve-se levar em conta o módulo de resiliência de cada material, pois este está diretamente ligado às características visco-elásticas do material e, portanto, à sua resistência à fadiga.

Com o auxílio do programa ELSYM5 e a partir de duas estruturas de pavimentos hipotéticas, foram determinadas as diferenças de tensões na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Para a análise foram considerados dois carregamentos, com a finalidade de simular rodas duplas, separados por uma distância de 28,8 cm e com pressão de carregamento de $5,6 \text{ kgf/cm}^2$, aplicada em uma área de $10,8 \text{ cm}^2$. A Figura 4.51 mostra um desenho esquemático da estrutura hipotética do pavimento, em que os pontos A, B e C são os locais de análise de tensões e a origem do sistema (0,0,0) se dá sob o carregamento à esquerda. As características das camadas estão descritas na Tabela 4.21.

Figura 4.51. Esquema do pavimento hipotético.

O intuito de se analisar duas estruturas diferentes é verificar o comportamento à fadiga da mistura asfáltica quando de sua utilização em pavimentos esbeltos e mais flexíveis ou espessos e menos flexíveis.

Tabela 4.21 – Estruturas hipotéticas para análise das tensões através do programa ELSYM5.

Estrutura	Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de Poisson	Módulo de resiliência (kgf)
1	Capa	15	0,35	Variável
	Base	25	0,40	3000
	Sub-base	30	0,40	2000
	Subleito	Semi-infinito	0,45	500
2	Capa	10	0,35	Variável
	Base	15	0,40	2000
	Sub-base	20	0,40	1500
	Subleito	Semi-infinito	0,45	500

Para cada condição experimental foi feito uma simulação e as tensões geradas pelo programa foram utilizadas nos modelos de cada material (Equação 4.6) e, assim, determinado o número de ciclos correspondente. Nas Tabelas 4.22 e 4.23 encontram-se as tensões nos pontos mais críticos e o número de ciclos correspondente e as Figuras 4.52 e 4.53 representam graficamente esses valores.

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (4.6)$$

Na estrutura 1, o ponto com as diferenças de tensões mais críticas foi o ponto B, já na estrutura 2, as diferenças de tensões mais críticas se deu no ponto A.

Tabela 4.22 – Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 1.

Env. (h)	EVA (%)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Modelo		N
					k_1	k_2	
0	0	1,02700	-0,07941	1,10641	2626,6	2,4746	2045
	1	0,90230	-0,09810	1,00040	3261,7	2,7464	3258
	2	0,85040	-0,09597	0,94637	2760,7	2,8459	3230
	3	0,64880	-0,11850	0,76730	1530,6	2,5810	3032
2	0	1,03800	-0,07846	1,11646	3939,5	2,3486	3041
	1	0,93060	-0,08810	1,01870	4814,2	2,7800	4573
	2	0,99080	-0,08257	1,07337	4654,5	2,7913	3820
	3	0,78900	-0,10240	0,89140	3130,8	2,7033	4272
4	0	1,03500	-0,07868	1,11368	3221,1	2,4216	2482
	1	1,06900	-0,07582	1,14482	5907,1	2,7713	4061
	2	0,92870	-0,08828	1,01698	4901,7	2,8432	4673
	3	0,79030	-0,10230	0,89260	5637,4	2,8104	7758

Figura 4.52. Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 1.

Tabela 4.23 – Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 2.

Env. (h)	EVA (%)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Modelo k_1	k_2	N
0	0	1,89000	-0,10920	1,99920	2626,6	2,4746	473
	1	1,66500	-0,12440	1,78940	3261,7	2,7464	660
	2	1,57200	-0,13130	1,70330	2760,7	2,8459	606
	3	1,21400	-0,16220	1,37620	1530,6	2,5810	671
2	0	1,91000	-0,10790	2,01790	3939,5	2,3486	757
	1	1,71600	-0,12080	1,83680	4814,2	2,7800	888
	2	1,82400	-0,11340	1,93740	4654,5	2,7913	735
	3	1,46200	-0,14000	1,60200	3130,8	2,7033	876
4	0	1,90500	-0,10820	2,01320	3221,1	2,4216	592
	1	1,96700	-0,10440	2,07140	5907,1	2,7713	785
	2	1,71200	-0,12100	1,83300	4901,7	2,8432	875
	3	1,46400	-0,13980	1,60380	5637,4	2,8104	1495

Figura 4.53. Vida de fadiga para cada condição experimental de acordo com as tensões geradas pelo programa ELSYM5 para a estrutura 2.

No geral, as misturas envelhecidas apresentaram maior resistência à ruptura por fadiga que as misturas sem envelhecimento. A vida de fadiga das misturas modificadas com EVA nas duas estruturas de pavimento propostas foram maiores que a das misturas de controle, salvo a mistura de controle com 2 horas de envelhecimento, que apresentou valor intermediário.

A inclinação das curvas das misturas modificadas foram praticamente as mesmas, diferentemente das misturas de controle, para um mesmo tempo de envelhecimento. O comportamento das misturas nos dois pavimentos simulados foi semelhante, sendo que o segundo pavimento apresenta número de ciclos que varia entre 20% e 25% do número de ciclos do primeiro. Os gráficos de deformação resiliente mostram que as misturas modificadas apresentam melhores resultados que as misturas de controle, principalmente quando a deformação é menor.

4.5.5. Fluência por compressão uniaxial estática

O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi realizado com tensão média de aproximadamente 4 kgf/cm^2 , aplicada estaticamente no plano axial dos corpos-de-prova, com o intuito de analisar a susceptibilidade das misturas à deformação permanente. Foram verificados os dados referentes à deformação total, deformação recuperável, deformação permanente, recuperação, módulo de fluência aos 3600 segundos, que é a relação entre a tensão média aplicada e a deformação total, módulo de fluência aos 4500 segundos, que é a relação entre a tensão aplicada e a deformação não recuperável, e as inclinações das curvas no estágio secundário de deformação.

Os resultados médios dos ensaios são apresentados na Tabela 4.24, enquanto as Figuras 4.54 a 4.60 mostram graficamente os resultados obtidos nos ensaios em função do tempo de envelhecimento e do teor de EVA. Os dados completos são encontrados no Apêndice H.

Tabela 4.24 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática.

Env. (h)	EVA (%)	Def. total (%)	Def. recup. (%)	Def. perm. (%)	Recup. (%)	Módulo fluência 3600 s (MPa)	Módulo fluência 4500 s (MPa)	Inclin.
0	0	0,209	0,176	0,034	84,9	194	1975	0,0395
	1	0,489	0,421	0,069	85,8	86	657	0,0430
	2	0,801	0,706	0,095	88,2	49	536	0,0598
	3	1,171	1,029	0,142	86,7	35	303	0,0787
2	0	0,224	0,186	0,038	82,6	186	1156	0,0340
	1	0,448	0,381	0,067	84,6	103	690	0,0382
	2	0,765	0,671	0,095	87,4	60	484	0,0454
	3	1,052	0,903	0,149	86,1	41	281	0,0606
4	0	0,248	0,200	0,048	80,8	163	983	0,0338
	1	0,343	0,287	0,057	83,6	117	848	0,0368
	2	0,671	0,577	0,095	85,5	63	436	0,0424
	3	0,947	0,796	0,151	84,3	42	281	0,0535

Figura 4.54. Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.55. Programa experimental – Deformações recuperáveis medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.56. Programa experimental – Deformações permanentes medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.57. Programa experimental – Recuperações medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.58. Programa experimental – Módulos de fluência medidos aos 3600 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.59. Programa experimental – Módulos de fluência medidos aos 4500 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

Figura 4.60. Programa experimental – Inclinações das curvas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

As deformações totais, recuperáveis e permanentes aumentaram com o aumento do teor de resíduo nas misturas. Para as misturas modificadas, a deformação total e a deformação recuperável diminuíram com o envelhecimento, enquanto que para a mistura de controle aumentaram. A recuperação das misturas foi menor quanto maior o envelhecimento, para mesmos teores de EVA.

Os valores dos módulos de fluência medidos aos 3600 segundos decresceram com o incremento de resíduo, para mesmos tempos de envelhecimento. As misturas modificadas apresentaram módulo de fluência aos 3600 segundos maior conforme o envelhecimento, ao contrário das misturas de controle. Em todos os casos o módulo de fluência aos 3600 segundos foi menor conforme o incremento de EVA. Os módulos de fluência após a recuperação foram menores conforme o aumento no teor de EVA das misturas. As inclinações no trecho secundário da curva de fluência foram maiores quanto maiores os teores de EVA nas misturas e menores quanto maior o tempo de envelhecimento.

4.5.5.1. Análise da variância no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática

O teste F foi utilizado para verificar a influência de cada fator, bem como suas interações, nos resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática. As Tabelas 4.25 a 4.30 mostram os resultados para cada parâmetro do ensaio e os seus respectivos modelos estatísticos. As Figuras 4.61 a 4.66 apresentam esses modelos graficamente.

Tabela 4.25 – Análise da variância da deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 5%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F_0	$F_{\text{crítico}}$	Significativo?
Total	26	2,4422	0,0939	0,73930	3,02	2,13	Sim
T_l	1	1,7217	1,7217	0,30928	55,38	4,41	Sim
T_q	1	0,0006	0,0006	-0,00324	0,02	4,41	Não
E_l	1	0,1419	0,1419	-0,08878	4,56	4,41	Sim
E_q	1	0,0033	0,0033	-0,00780	0,11	4,41	Não
$T_l E_l$	1	0,0093	0,0093	-0,02788	0,30	4,41	Não
$T_l E_q$	1	0,0005	0,0005	0,00368	0,02	4,41	Não
$T_q E_l$	1	0,0052	0,0052	-0,01201	0,17	4,41	Não
$T_q E_q$	1	0,0001	0,0001	0,00095	0,00	4,41	Não
Resíduo	18	0,5596	0,0311	-	-	-	-
Modelo	$DT_{CE}(\%) = 0,73930 + 0,30928 \times P_l(T) - 0,08878 \times P_l(E)$						$R^2 = 0,7631$

Figura 4.61. Programa Experimental – Modelo de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.26 – Análise da variância da deformação recuperável medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 2,5%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F ₀	F _{crítico}	Significativo?
Total	26	1,8471	0,0710	0,63456	3,06	2,48	Sim
T _I	1	1,2522	1,2522	0,26375	54,01	5,98	Sim
T _q	1	0,0037	0,0037	-0,00831	0,16	5,98	Não
E _I	1	0,1484	0,1484	-0,09081	6,40	5,98	Sim
E _q	1	0,0025	0,0025	-0,00675	0,11	5,98	Não
T _I E _I	1	0,0162	0,0162	-0,03679	0,70	5,98	Não
T _I E _q	1	0,0005	0,0005	0,00371	0,02	5,98	Não
T _q E _I	1	0,0061	0,0061	-0,01299	0,26	5,98	Não
T _q E _q	1	0,0002	0,0002	0,00146	0,01	5,98	Não
Resíduo	18	0,4173	0,0232	-	-	-	-
Modelo	$DR_{CE}(\%) = 0,63456 + 0,26375 \times P_I(T) - 0,09081 \times P_I(E)$						$R^2 = 0,7583$

Figura 4.62. Programa Experimental – Modelo de deformação recuperável do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.27 – Análise da variância da deformação permanente medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 1%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F_0	$F_{\text{crítico}}$	Significativo?
Total	26	0,04051	0,00156	0,10196	3,26	2,97	Sim
T_I	1	0,03079	0,03079	0,04136	64,42	8,29	Sim
T_q	1	0,00073	0,00073	0,00368	1,53	8,29	Não
E_I	1	0,00000	0,00000	-0,00047	0,01	8,29	Sim
E_q	1	0,00003	0,00003	-0,00077	0,07	8,29	Não
$T_I E_I$	1	0,00032	0,00032	0,00517	0,67	8,29	Não
$T_I E_q$	1	0,00001	0,00001	0,00039	0,01	8,29	Não
$T_q E_I$	1	0,00000	0,00000	-0,00028	0,01	8,29	Não
$T_q E_q$	1	0,00001	0,00001	-0,00037	0,03	8,29	Não
Resíduo	18	0,00860	0,00048	-	-	-	-
Modelo	$DP_{CE}(\%) = 0,10196 + 0,04136 \times P_I(T)$						$R^2 = 0,7602$

Figura 4.63. Programa Experimental – Modelo de deformação recuperável do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.28 – Análise da variância do módulo de fluência medido aos 3600 s no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 5%.

Parâm.	GL	SQ	QM	Coefic.	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	23771,85	914,30	66,25	5,07	2,13	Sim
T _I	1	17612,88	17612,88	-31,28	97,59	4,41	Sim
T _q	1	1072,49	1072,49	4,46	5,94	4,41	Sim
E _I	1	1345,25	1345,25	8,65	7,45	4,41	Sim
E _q	1	37,86	37,86	-0,84	0,21	4,41	Não
T _I E _I	1	421,26	421,26	-5,92	2,33	4,41	Não
T _I E _q	1	0,03	0,03	-0,03	0,00	4,41	Não
T _q E _I	1	31,72	31,72	0,94	0,18	4,41	Não
T _q E _q	1	1,64	1,64	0,12	0,01	4,41	Não
Resíduo	18	3248,71	180,48	-	-	-	-
Modelo	$MF_{3600}(MPa) = 66,3 - 31,3 \times P_I(T) + 4,5 \times P_q(T) + 8,6 \times P_I(E)$						$R^2 = 0,843$

Figura 4.64. Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência aos 3600 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.29 – Análise da variância do módulo de fluência medido aos 4500 s no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 1%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F ₀	F _{crítico}	Significativo?
Total	26	1184671	45564	506,48	3,04	2,97	Sim
T _I	1	829165	829165	-214,63	55,34	8,29	Sim
T _q	1	5846	5846	10,40	0,39	8,29	Não
E _I	1	2351	2351	11,43	0,16	8,29	Não
E _q	1	734	734	3,69	0,05	8,29	Não
T _I E _I	1	34027	34027	-53,25	2,27	8,29	Não
T _I E _q	1	8767	8767	-15,61	0,59	8,29	Não
T _q E _I	1	33838	33838	30,66	2,26	8,29	Não
T _q E _q	1	257	257	1,54	0,02	8,29	Não
Resíduo	18	269687	14983	-	-	-	-
Modelo	$MF_{4500} (MPa) = 506,48 - 214,63 \times P_I (T)$					R ² = 0,6999

Figura 4.65. Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência aos 4500 s do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.30 – Análise da variância da inclinação da curva medida no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática, para significância de 2,5%.

Parâm.	GL	SQ	QM	Coefic.	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	0,005211	0,000200	0,05096	4,66	2,48	Sim
T _l	1	0,002802	0,002802	0,01248	65,09	5,98	Sim
T _q	1	0,000040	0,000040	0,00086	0,93	5,98	Não
E _l	1	0,001193	0,001193	-0,00814	27,72	5,98	Sim
E _q	1	0,000110	0,000110	0,00143	2,57	5,98	Não
T _l E _l	1	0,000268	0,000268	-0,00472	6,21	5,98	Sim
T _l E _q	1	0,000014	0,000014	0,00063	0,33	5,98	Não
T _q E _l	1	0,000003	0,000003	0,00028	0,06	5,98	Não
T _q E _q	1	0,000006	0,000006	-0,00023	0,14	5,98	Não
Resíduo	18	0,000775	0,000043	-	-	-	-
Modelo	$I_{CE} = 0,051 - 0,012 \times P_l(T) - 0,008 \times P_l(E) - 0,005 \times P_l(T) \times P_l(E)$						R² = 0,818

Figura 4.66. Programa Experimental – Modelo de inclinação da curva no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.

4.5.6. Fluência por compressão uniaxial dinâmica

O ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica também foi realizado com a aplicação de uma tensão de 4 kgf/cm^2 , em um total de 5000 pulsos com 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de recuperação. Foram verificados a deformação total, o módulo de fluência (relação entre tensão aplicada e deformação total) e a inclinação da curva entre os pulsos 100 e 5000. Na Tabela 4.31 encontram-se as médias aritméticas dos corpos-de-prova utilizados para cada condição experimental e nas Figuras 4.67 a 4.69 estão representadas as médias graficamente. Os resultados completos encontram-se no Apêndice I.

Tabela 4.31 – Programa experimental – Resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Env. (h)	EVA (%)	Def. total (%)	Módulo de fluência (MPa)	Inclinação
0	0	0,71883	59,72	0,3870434
	1	1,49417	27,34	0,4858157
	2	2,02583	20,61	0,4920284
	3	2,26650	17,97	0,5566220
2	0	1,13550	38,48	0,5073219
	1	1,21150	34,76	0,4592940
	2	1,76067	27,19	0,4656871
	3	2,12000	19,30	0,5191717
4	0	0,96567	45,85	0,5142071
	1	1,17617	35,45	0,4220246
	2	1,46967	31,52	0,4320727
	3	1,86300	25,15	0,5036688

Figura 4.67. Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Figura 4.68. Programa experimental – Módulos de fluência medidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

Figura 4.69. Programa experimental – Inclinações das curvas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

A deformação total das misturas aumentou com o aumento do teor de EVA, para os mesmos tempos de envelhecimento, com as misturas modificadas apresentando menor deformação total para maiores tempos de envelhecimento. Na condição 0 hora de envelhecimento e 3% de teor de EVA, romperam-se 2 dos três corpos-de-prova ensaiados, por deformação excessiva.

Os valores dos módulos de fluências das misturas foram menores quanto maior o teor de EVA nas misturas, para envelhecimentos semelhantes. A mistura de controle apresentou maior valor de módulo de fluência na condição 0 hora de envelhecimento, enquanto as misturas modificadas apresentaram maior valor com 4 horas de envelhecimento. As inclinações das curvas aumentaram conforme o aumento do tempo de envelhecimento para as misturas de controle e diminuíram

para as misturas modificadas. O envelhecimento aumentou a resistência à deformação total e o módulo de fluência e diminui a inclinação da curva, nas misturas modificadas.

4.5.6.1. Análise da variância e modelos estatísticos para os parâmetros do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica

Os resultados foram submetidos ao teste F para análise da variância, sendo os modelos apresentados nas Tabelas 4.32 a 4.34, bem como o coeficiente de regressão de cada modelo e a significância do teste F. Nas Figuras 4.70 a 4.72 são apresentadas as curvas geradas com os modelos estatísticos.

Tabela 4.32 – Análise da variância da deformação total medida no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 5%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	6,36533	0,24482	1,76731	2,85	2,13	Sim
T _I	1	4,16450	4,16450	0,48100	48,41	4,41	Sim
T _q	1	0,00314	0,00314	0,00763	0,04	4,41	Não
E _I	1	0,37903	0,37903	-0,14511	4,41	4,41	Sim
E _q	1	0,01454	0,01454	0,01641	0,17	4,41	Não
T _I E _I	1	0,07752	0,07752	0,08037	0,90	4,41	Não
T _I E _q	1	0,00753	0,00753	-0,01446	0,09	4,41	Não
T _q E _I	1	0,15913	0,15913	0,06649	1,85	4,41	Não
T _q E _q	1	0,01158	0,01158	0,01036	0,13	4,41	Não
Resíduo	18	1,54835	0,08602	-	-	-	-
Modelo	$DT_{CD}(\%) = 1,76731 + 0,48100 \times P_I(T) - 0,14511 \times P_I(E)$						$R^2 = 0,713$

Figura 4.70 – Programa Experimental – Modelo de deformação total do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 5%.

Tabela 4.33 – Análise da variância do módulo de fluência medido no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 2,5%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coeficiente	F_0	$F_{\text{crítico}}$	Signif.?
Total	26	1589,43	61,13	25,81	2,81	2,48	Sim
T_I	1	887,86	887,86	-7,02	40,77	5,98	Sim
T_q	1	5,35	5,35	-0,31	0,25	5,98	Não
E_I	1	203,18	203,18	3,36	9,33	5,98	Sim
E_q	1	12,16	12,16	-0,47	0,56	5,98	Não
$T_I E_I$	1	36,43	36,43	-1,74	1,67	5,98	Não
$T_I E_q$	1	12,77	12,77	0,60	0,59	5,98	Não
$T_q E_I$	1	39,41	39,41	-1,05	1,81	5,98	Não
$T_q E_q$	1	0,28	0,28	-0,05	0,01	5,98	Não
Resíduo	18	392,00	21,78	-	-	-	-
Modelo	$MF_{CD} = 25,81 - 7,02 \times P_I(T) - 3,36 \times P_I(E)$					$R^2 = 0,713$

Figura 4.71. Programa Experimental – Modelo de módulo de fluência do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.

Tabela 4.34 – Análise da variância da inclinação da curva medida no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, para significância de 2,5%.

Parâm.	GL	SQ	QM	Coef.	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	0,05692	0,00219	0,48140	2,84	2,48	Sim
T _l	1	0,02254	0,02254	0,03539	29,21	5,98	Sim
T _q	1	0,00508	0,00508	0,00970	6,59	5,98	Sim
E _l	1	0,01494	0,01494	-0,02881	19,36	5,98	Sim
E _q	1	0,00000	0,00000	0,00001	0,00	5,98	Não
T _l E _l	1	0,00009	0,00009	0,00271	0,11	5,98	Não
T _l E _q	1	0,00027	0,00027	0,00272	0,35	5,98	Não
T _q E _l	1	0,00001	0,00001	-0,00037	0,01	5,98	Não
T _q E _q	1	0,00009	0,00009	0,00093	0,12	5,98	Não
Resíduo	18	0,01389	0,00077	-	-	-	-
Modelo	$I_{CD} = 0,4814 + 0,0354 \times P_l(T) + 0,0097 \times P_q(T) - 0,0228 \times P_l(E)$						$R^2 = 0,748$

Figura 4.72. Programa Experimental – Modelo de inclinação da curva no estágio secundário do ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.

4.5.7. Desgaste por abrasão (Cantabro)

O ensaio Cantabro foi realizado em três corpos-de-prova por condição experimental e os resultados médios encontram-se na Tabela 4.35 e na Figura 4.73. Os resultados completos encontram-se no Apêndice J. Embora a norma recomende que o resultado seja expresso sem casas decimais, optou-se por utilizar uma casa decimal para ressaltar a diferença nos resultados.

Tabela 4.35 – Desgaste médio por abrasão das misturas asfálticas em função do tempo de envelhecimento e do teor de EVA.

Envelhecimento (h)	Teor de EVA (%)	Desgaste médio (%)
0	0	4,2
	1	3,1
	2	2,1
	3	1,4
2	0	4,3
	1	3,3
	2	2,4
	3	1,9
4	0	4,4
	1	3,8
	2	2,7
	3	2,4

Figura 4.73. Desgaste por abrasão em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento.

O desgaste por abrasão diminuiu com o incremento de resíduo nas misturas e aumentou com o envelhecimento, para todas as condições experimentais.

4.5.7.1. Análise da variância e modelo estatístico do desgaste por abrasão

A Tabela 4.36 apresenta a análise de variância realizada com os resultados do ensaio Cantabro e o modelo estatístico proposto, para significância de 1% do teste F. A Figura 4.74 apresenta o modelo proposto.

Tabela 4.36 – Análise da variância dos resultados do ensaio de desgaste, para significância de 1%.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Coef.	F ₀	F _{crítico}	Signif.?
Total	26	14,61	0,56	2,55	6,22	2,96	Sim
T _I	1	9,89	9,89	-0,74	109,45	8,29	Sim
T _q	1	0,34	0,34	0,08	3,76	8,29	Não
E _I	1	2,55	2,55	0,38	28,27	8,29	Sim
E _q	1	0,03	0,03	0,02	0,34	8,29	Não
T _I E _I	1	0,09	0,09	0,09	1,02	8,29	Não
T _I E _q	1	0,04	0,04	-0,03	0,44	8,29	Não
T _q E _I	1	0,05	0,05	0,04	0,51	8,29	Não
T _q E _q	1	0,00	0,00	0,00	0,00	8,29	Não
Resíduo	18	1,63	0,09	-	-	-	-
Modelo	$A(\%) = 2,55 - 0,74 \times P_I(T) - 0,38 \times P_I(E)$					$R^2 = 0,851$

Figura 4.74. Programa Experimental – Modelo de desgaste por abrasão do ensaio Cantabro em função do teor de EVA e do tempo de envelhecimento, para significância de 2,5%.

O rio atinge os seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.

(Lao-Tsé)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho teve por intuito verificar a possibilidade de inserção de etileno acetato de vinila (EVA), proveniente de resíduos de placas expandidas utilizadas pela indústria calçadista na confecção de palmilhas, em misturas asfálticas, através do processo seco.

Os fatores selecionados para a pesquisa foram o teor de resíduo incorporado (0%, 1%, 2% e 3%) e o tempo de envelhecimento de curto prazo (0, 2 e 4 horas). O primeiro fator foi escolhido com a finalidade de se determinar a maior quantidade de EVA passível de substituir os agregados, tentando, assim, minimizar o impacto ambiental gerado por esse resíduo e melhorar as características mecânicas e de

resistência ao desgaste das misturas asfálticas. O segundo fator foi escolhido visando determinar melhoras no comportamento de misturas asfálticas com resíduos de placas expandidas de EVA em função do tempo de digestão.

A escolha de 2 fatores, um com 3 níveis e outro com 4 níveis, levou a um total de 12 condições experimentais. Para cada condição experimental foram realizados ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral, ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática, fluência por compressão uniaxial estática, fluência por compressão uniaxial dinâmica, desgaste e vida de fadiga. Além desses corpos-de-prova, foram moldados mais 18 para a determinação do teor ótimo de ligante através da dosagem Marshall, 6 corpos-de-prova para determinação da absorção de ligante pelo agregado e 16 corpos-de-prova para os ensaios preliminares (RT e MR), totalizando 208 corpos-de-prova para a realização da pesquisa.

5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em cada um dos 14 corpos-de-prova de cada condição experimental, totalizando 168 ensaios. O desvio padrão dos resultados dos ensaios não foi significativo. Com exceção das misturas com 1% de EVA e envelhecidas 4 horas, as misturas modificadas apresentaram valores mais baixos do que as misturas de controle, para mesmos tempos de envelhecimento.

Dentre as misturas modificadas, excetuando-se a mistura com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento, as misturas apresentaram maiores módulos com o aumento do

tempo de envelhecimento, conforme esperado. As misturas de controle mostraram-se praticamente não susceptíveis ao envelhecimento, tanto para 2 horas como para 4 horas.

Com relação aos resultados gerados pelo modelo estatístico, a análise de variância mostrou que tanto o teor de EVA quanto o tempo de envelhecimento e a interação entre eles foram significativos.

5.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ESTÁTICA

Foram moldados 3 corpos-de-prova para este ensaio, em cada condição experimental, totalizando 36 corpos-de-prova. O desvio padrão dos resultados foi relativamente baixo, indicando boa repetibilidade. As misturas apresentaram menores resistências conforme o aumento do teor de resíduo incorporado e a queda foi menos perceptível para maiores tempos de envelhecimento, demonstrando que a resistência das misturas modificadas é mais susceptível ao envelhecimento do que as misturas de controle. A análise da variância confirmou que o teor de resíduo e o tempo de envelhecimento afetam significativamente a resistência à tração das misturas.

5.4. VIDA DE FADIGA

Foram moldados 96 corpos-de-prova, divididos em 8 corpos-de-prova semelhantes para cada condição experimental. Os 8 corpos-de-prova foram escolhidos

aleatoriamente para serem ensaiados, em pares, com 10%, 20%, 30% e 40% da resistência à tração das misturas de controle com o mesmo tempo de envelhecimento.

Analisando-se o coeficiente de regressão dos modelos gerados por cada condição experimental, pode-se concluir que os ensaios apresentaram desvio padrão muito baixo. As curvas das misturas de controle são menos inclinadas que as curvas das misturas modificadas, indicando menores resistências para maiores deformações.

As tensões geradas pelo programa ELSYM5 e aplicadas nos modelos calibrados a partir dos ensaios mostraram que as misturas modificadas tiveram uma vida de fadiga muito maior que as misturas de controle, tanto em pavimento mais esbelto e flexível, quanto em pavimento mais espesso e rígido, com exceção da mistura com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento, simulada na estrutura de pavimento mais esbelta.

5.5. FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL ESTÁTICA

Foram moldados 3 corpos-de-prova por condição experimental, totalizando 36 corpos-de-prova, que também foram utilizados para os ensaios de fluência por compressão uniaxial dinâmica e desgaste por abrasão. As misturas de controle são resistentes a tráfegos de muito alta intensidade ($N > 10^6$). As misturas com 1% de EVA e as misturas com 2% de EVA envelhecidas 2 e 4 horas são resistentes a tráfegos de alta intensidade ($5 \times 10^5 \leq N \leq 10^6$). As misturas com 2% de EVA sem

envelhecimento e as misturas com 3% de EVA são resistentes a tráfegos de baixa intensidade ($N < 10^5$).

As misturas modificadas apresentaram deformações totais, recuperáveis e permanentes muito acima das misturas de controle, indicando que com o aumento do teor de EVA as misturas se tornam mais susceptíveis à deformação permanente. As misturas de controle sofreram maiores deformações totais e permanentes com maiores tempo de envelhecimento, enquanto que as misturas modificadas apresentaram menores valores de deformação total com o envelhecimento, porém as deformações permanentes não apresentaram mudança significativa com o envelhecimento de curto prazo. A recuperação das misturas foi menor para maiores tempos de envelhecimento, indicando o enrijecimento das mesmas.

Enquanto os valores do módulo de fluência para as misturas de controle diminuíram, para as misturas modificadas aumentaram, com o aumento do tempo de envelhecimento. Quanto maior o tempo de envelhecimento, menores foram as inclinações no trecho secundário das curvas de fluência, indicando menores deformações ao longo do tempo com o aumento do envelhecimento da mistura.

As análises de variância realizadas com cada parâmetro do ensaio mostraram que as deformações permanentes e o módulo de fluência após recuperação foram sensíveis apenas ao teor de EVA. As deformações totais, recuperáveis e o módulo de fluência mostraram-se sensíveis às variações no teor de EVA e ao tempo de envelhecimento e as inclinações da curva mostraram-se sensíveis ao teor de EVA, ao tempo de envelhecimento e à interação entre eles.

5.6. FLUÊNCIA POR COMPRESSÃO UNIAXIAL DINÂMICA

As deformações totais diminuíram com o aumento do tempo de envelhecimento, mas aumentaram com o aumento do teor de EVA. O módulo de fluência das misturas modificadas aumentou, enquanto que as respectivas inclinações diminuíram com o envelhecimento, ou seja, indicando que as misturas modificadas são menos susceptíveis às deformações permanentes com o envelhecimento. Em contrapartida, os módulos de fluência diminuíram e as inclinações aumentaram com o aumento do teor de EVA. De acordo com a análise da variância, todos os parâmetros do ensaio mostraram-se sensíveis ao teor de EVA e ao tempo de envelhecimento.

5.7. DESGASTE POR ABRASÃO NO ENSAIO CANTABRO

Todas as misturas apresentaram maiores desgastes com maiores tempos de envelhecimento e menores desgastes com maiores teores de EVA. A análise da variância mostrou que as misturas são sensíveis tanto ao teor de EVA quanto ao tempo de envelhecimento.

5.8. CONCLUSÕES GERAIS

Como resposta aos objetivos propostos concluiu-se que:

- As misturas mostraram-se sensíveis ao teor de EVA incorporado e, segundo os resultados deste trabalho, o teor não pode exceder 3% do volume de

agregados, seja pela desagregação da mistura quando da compactação, seja pelo alto valor de deformação permanente;

- As misturas modificadas apresentam maior resistência à fadiga e ao desgaste, porém menor resistência à deformação permanente;
- O tempo de envelhecimento de curto prazo mostrou-se importante, melhorando as características mecânicas das misturas modificadas e, embora tenha aumentado o desgaste das misturas, não foi um aumento significativo;
- A utilização do resíduo das placas expandidas de EVA em misturas asfálticas contribui para a diminuição do passivo ambiental gerado pela fabricação de palmilhas, pois grande parte deste resíduo pode ser utilizado como parte do agregado da capa asfáltica.

Conclui-se, por fim, que a utilização do resíduo oriundo das placas expandidas de EVA em misturas asfálticas é viável, porém fica a ressalva que melhorias devem ser feitas com relação à susceptibilidade das misturas modificadas à deformação permanente.

5.9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As pesquisas sobre incorporação de resíduos sólidos em misturas asfálticas, através do processo seco, têm um longo caminho a percorrer. No caso deste trabalho, que estudou resíduos de placas expandidas de EVA, descartados pela indústria

calçadista, sugere-se o estudo de outras granulometrias de resíduo, os efeitos da absorção de ligante por parte do resíduo e as conseqüências do envelhecimento de longo prazo.

Sugere-se, também, que sejam estudadas a adesão do ligante ao resíduo e a possível interação entre eles, ou seja, se o resíduo passa a trabalhar, em parte, pelo processo úmido. Finalmente, sugerem-se os ensaios de sensibilidade das misturas modificadas à umidade e o ensaio de “trilha de rodas” (simulador de tráfego LCPC), pois os ensaios de fluência por compressão uniaxial apresentam resultados muito dispersos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (1997). ***Unit weight and voids in aggregate***. Edição publicada sob a designação AASHTO T-19/T 19M. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1997.

AASHTO (2001). ***Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA)***. Edição publicada sob a designação PP2-00. American Association of State Highway and Transportation Officials. 3p., 2001.

ABICALÇADOS (2005). ***Associação Brasileira das Indústrias de Calçados***. Site da internet: www.abicalcados.com.br.

ABNT (1993). ***Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall***. NBR 12891/93. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT (2004). ***Resíduos Sólidos***. NBR 10004/04. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.

AMARAL, S.C. (2000). ***Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 147p. São Carlos, 2000.

ASSINTECAL (1999). ***Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couros, Calçados e Artefatos***. Site da internet: www.assintecal.org.br.

ASTM (1993). Edição publicada sob a designação ASTM C 128-93. ***Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate***. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1993.

BALBO, J.T. (2000). ***Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga***. In: 32ª Reunião de Pavimentação, ABPv. Brasília, 2000.

BELL, C.A. (1989). ***Summary report on aging of asphalt-aggregate systems***. Strategic Highway Research Program (SHRP) – SR-OSU-A-003A-89-02. Oregon State University. Corvallis, 1989. 121p.

BELL, C.A.; WIEDER, A.J.; FELLIN, M.J. (1994). ***Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: field validation***. Publicação SHRP-A-390 do Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., 1994. 204p.

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 estado do Ceará***. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 192p. Rio de Janeiro, 2000.

BROWN, E.R.; KANDHAL, P.S.; ZHANG, J. (2001). ***Performance testing for hot mix asphalt***. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. 79p. Auburn, 2001.

BUTTON, J.W.; PERDOMO, D.; LYTTON, R.L. (1990). ***Influence of aggregate on rutting of asphalt concrete pavements***. Transportation Research Record, n. 1259, p.141-152.

CHADBOURNE, B.A.; SKOK JR., E.L.; NEWCOMB, D.E.; CROW, B.L.; SPINDLER, S. (2000). ***The effects of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements. Final report***. University of Minnesota. 131p. Minneapolis, 2000.

CHANDA, M.; ROY, S.K. (1998). ***Plastic Technology Handbook***. 3ª ed., 1195p. Marcel Dekker. New York, 1998.

COELHO, V. (1996). ***Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação***. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 281p. São Carlos, 2004.

COMINSKY, R.J.; KILLINGSWORTH, B.M; ANDERSON, R.M.; ANDERSON, D.A.; CROCKFORD, W.W. (1998). ***Quality control and acceptance of SUPERPAVE – designed hot mix asphalt***. National Cooperative Highway Research Program, report 409, p. 1-26.

CUNHA, M.B. (2004). ***Avaliação do Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 105p. São Carlos, 2004.

DNER (1987). Método de ensaio DNER-ME 117/87. ***Misturas betuminosas – Determinação da densidade aparente***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1987.

DNER (1994a). Método de ensaio DNER-ME 138/94. ***Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER (1994b). Método de ensaio DNER-ME 133/94. ***Misturas betuminosas – Determinação do módulo de resiliência***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER (1997). Especificação de serviço DNER-ES 313/97. ***Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma rodoviária***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997.

DNER (1998a). Especificação de serviço DNER-ME 081/98. ***Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado miúdo***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER (1998b). Especificação de serviço DNER-ME 035/98. ***Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER (1999). Método de ensaio DNER-ME 383/99. ***Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT (2004). Especificação de serviço DNIT 031/2004-ES. ***Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico***. 13p. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2004.

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, Universidade de São Paulo. 274p. São Carlos, 2002.

FERNANDES JR., J.L. (1994). ***Investigação dos defeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos***. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994.

FERREIRA, J.G.H.M. (2002). ***Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ***. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 263p. Rio de Janeiro, 2002.

FORETTI, A.C. (1999). ***Estudo de misturas preparadas com asfalto convencional e asfalto modificado com polímeros***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 81p. São Carlos, 1999.

FWHA (2003). ***Distress identification manual for the long-term pavement performance program***. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation 4^o Edition Revised. 154 p. McLean, 2003.

GHILE, D.B. (2006). ***Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures***. Dissertação (Mestrado). Delft University of Technology. 115p. Delft, The Netherlands, 2006.

GOMES, F.P. (1973). ***Estatística experimental***. 5^a Edição. Editora Nobel. 430p. São Paulo, 1973.

GOUVEIA, L.T. (2002). ***Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação superpave***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 165p. São Carlos, 2002.

KANDHAL, P.S.; CHAKRABORTY, S. (1996). ***Effect of asphalt film thickness on short- and long-term aging of asphalt paving mixtures***. Transportation Research Record, n. 1535, p.83-90.

KANDHAL, P.S.; FOO, K.Y.; MALLICK, R.B. (2001). ***Critical review of voids in mineral aggregate requirements in SUPERPAVE***. Transportation Research Record, n. 1609, p.21-27.

KANDHAL, P.S.; MALLICK, R.B. (2001). ***Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures***. Transportation Research Record, n. 1767, p.146-151.

KHATTAK, M.J. e BALADI, G.Y. (2001). ***Fatigue and permanent deformation models for polymer-modified asphalt mixtures***. Transportation Research Record, n. 1767, p.135-145.

KIM, Y.R.; KIM, N.; KHOSLA, N.P. (1992). ***Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete***. In: MEININGER, R.C. (ed.) ***Effects of aggregate and mineral fillers on asphalt***

mixture performance. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, 1992.

KIM, Y.R.; LITTLE, D.N.; SONG, I. (2003). **Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics – Mechanistic evaluation.** Transportation Research Record, n.1832, p.1-8.

LEABO, D.A. (1972). **Basic Statistics.** 4º Edição. Richard D. Irwin, Inc. 668p. Georgetown, Ontario, 1972.

LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. (1993). **Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential.** Transportation Research Record, n.1417, p.49-57.

MAGALÃES, S.T. (2004). **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho.** Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 201p. Rio de Janeiro, 2004.

MAHBOUB, K. e LITTLE, D.N. (1988). **Improved asphalt concrete design procedure.** Research Report 474-1F, Texas Transportatios Institute, 1998.

MANO, E.B. (1998). **Introdução a polímeros.** Ed. Edgard Blücher Ltd. 111p. São Paulo, 1988.

MEDINA, J. (1997). **Mecânica dos pavimentos.** 1ª ed. Rio de Janeiro, UFRJ.

MEDINA, J.; MOTTA, L.MG. (2005). **Mecânica dos pavimentos.** 2ª ed. 574p. Rio de Janeiro, UFRJ, 2005.

MOTTA, L.M.G; PINTO, S. (1994). **O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas.** 12º Encontro de Asfalto, p.152-178.

MOTTA, L.M.G; LEITE, F.L.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. (1996). **Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1996.

MUGAYAR, A.N. (2004). **Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 118p. São Carlos, 2004.

PEREIRA, A.S. (2002). **Utilização de geotêxtil em reforço de pavimentos aplicado em um trecho experimental**. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 198p. Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, S. (1991). **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. (1991). **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 1ª ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.

SANTANNA-GRECO, J.A (2004). **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 340p. São Carlos, 2004.

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, Universidade de São Paulo. 123p. São Carlos, 2005.

SI, Z. LITTLE, D.N.; LYTTON, R.L. (2002). ***Evaluation of fatigue healing effect of asphalt concrete by pseudostiffness***. Transportation Research Record, n.1789, p.73-79.

SILVEIRA, M.A. (1999). ***Efeito da adição de polímero em areia-asfalto a frio***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 103p. São Carlos, 1999.

SOUZA, J.B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C.L. (1991). ***Summary report on permanent deformation in asphalt concrete***. Publicação SHRP-A/IR-91-104 do Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., 1991. 120p. 1991.

TAIRA, C. (2001). ***Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)***. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 153p. São Carlos, 2001.

TANGELLA S.C.S.R.; CRAUS, J.; DEACON, J.A.; MONISMITH, C.L. (1990). ***Summary report on fatigue response on asphalt mixture***. TM-UCB-A-003A-89-3, Strategic Highway Research Program (SHRP) - Project A-003-A. Institute of Transportation Studies. University of California. Berkeley, California, 1990.

THIESSEN, M.; SHALABY, A.; KAVANAGH, L. (2000). ***Strength testing of in-service asphalt pavements in Manitoba and correlations to rutting***. Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association. p.205. Manitoba, 2000.

TONIAL, I.A. (2001). ***Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos***. Dissertação (mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 151p. Rio de Janeiro, 2001.

VAN DE LOO, P.J. (1974). ***Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability***. The Association of Asphalt Paving Technologists, v. 43, p. 253-284.

VAN DE LOO, P.J. (1976). ***A Practical approach to the prediction of rutting in asphalt pavements: the Shell Method***. Transportation Research Record, n.616, p.15-21.

VAVRIK, W.R.; HUBER, G.A.; PINE, W.J.; CARPENTER, SH.; BAYLEY, R. (2002). ***Bailey method for gradation selection in HMA mixture design***. Transportation Research Record, Circular n° E-C044. 2002.

WEN, H. e KIM, Y.R. (2002). ***Simple performance test for fatigue cracking and validation with westrak mixtures***. Transportation Research Record, n.1789, p.66-72.

WITCZAC, M.W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; VON QUINTUS, H. (2002). ***Simple performance test for Superpave mix design***. Transportation Research Board (TRB) - National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), report 465. 114 p. Washington, D.C. 2002.

ZHU, L.Y.; LIU, Y.; FWA, T.F. (2002). ***Rutting potential evaluation of asphalt mixtures by repeated-load creep test***. Transportation Research Record, 2002

APÊNDICE A

Método Bailey

A.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A Tabela A.1 apresenta a porcentagem retida acumulada de cada agregado utilizado na pesquisa nas peneiras recomendadas pelo SUPERPAVE. As Tabelas A.2, A.3, A.4 e A.5 mostram respectivamente os resultados dos ensaios de massa específica compactada do pó de pedra, massa específica solta e compactada do pedrisco e massa específica solta da pedra 1, como também os valores adotados para cada agregado.

Tabela A.1 – Granulometria dos agregados utilizados na pesquisa.

Peneiras (mm)	Pedra 1	Pedrisco	Pó de pedra
19,1	0,00	0,00	0,00
12,5	21,33	0,00	0,00
9,5	72,62	0,99	0,00
4,75	100,00	62,95	0,14
2,36	-	93,89	10,67
1,18	-	98,31	33,40
0,60	-	99,74	51,86
0,30	-	99,80	66,10
0,15	-	99,87	79,88
0,075	-	99,89	90,09
Fundo	-	100,00	100,00

Tabela A.2 – Massa específica compactada do pó de pedra.

Amostra	Mc_f (kg)	Mc_i (kg)	V_c (m³)	MEC (kg/m³)	
				Unitária	Média
1	8,975	3,230	0,003	1915	1914
2	8,965	3,230	0,003	1912	
3	8,980	3,230	0,003	1917	

Tabela A.3 – Massa específica solta do pedrisco.

Amostra	Mcc (kg)	Mcv (kg)	Vc (m ³)	MES (kg/m ³)	
				Unitária	Média
1	7,330	3,230	0,003	1367	1380
2	7,390	3,230	0,003	1387	
3	7,390	3,230	0,003	1387	

Tabela A.4 – Massa específica compactada do pedrisco.

Amostra	Mc _f (kg)	Mc _i (kg)	Vc (m ³)	MEC (kg/m ³)	
				Unitária	Média
1	7,685	3,230	0,003	1485	1492
2	7,720	3,230	0,003	1497	
3	7,710	3,230	0,003	1493	

Tabela A.5. Massa específica solta do pedrisco.

Amostra	Mcc (kg)	Mcv (kg)	Vc (m ³)	MEC	
				Unitária	Média
1	7,130	3,230	0,003	1300	1306
2	7,140	3,230	0,003	1303	
3	7,150	3,230	0,003	1307	
4*	7,250	3,230	0,003	1340	
5	7,125	3,230	0,003	1298	
6	7,160	3,230	0,003	1310	
7	7,180	3,230	0,003	1317	
8	7,185	3,230	0,003	1318	
9	7,125	3,230	0,003	1298	

* Fora do desvio padrão.

A.2. MÉTODO BAILEY

A.2.1. Massas específicas escolhidas

$$MEE_{pedra1} = MES_{pedra1} \times MES_{d,pedra1} = 1306 \times 0,95$$

$$MEE_{pedra1} = 1241 \frac{kg}{m^3}$$

$$MEE_{pedrisco} = MES_{pedrisco} \times MES_{d,pedrisco} = 1380 \times 0,95$$

$$MEE_{pedrisco} = 1311 \frac{kg}{m^3}$$

A.2.2. Contribuição inicial dos agregados

$$CAG = MEE_{pedra1} \times AG_{dpedra} + MEE_{pedrisco} \times AG_{d,pedrisco} = 1241 \times 0,1 + 1311 \times 0,9$$

$$CAG = 1304 \frac{kg}{m^3}$$

$$VAG = 100 \times \left[\left(1 - \frac{MEE_{pedra1}}{\rho_{pedra1}} \right) \times AG_{pedra1} + \left(1 - \frac{MEE_{pedrisco}}{\rho_{pedrisco}} \right) \times AG_{pedrisco} \right]$$

$$VAG = 100 \times \left[\left(1 - \frac{1241}{2865} \right) \times 0,1 + \left(1 - \frac{1311}{2835} \right) \times 0,9 \right]$$

$$VAG = 54\%$$

$$CAF = MEE_{pó} \times AF_{pó} \times VAG = 1914 \times 1 \times 0,54$$

$$CAF = 1035 \frac{kg}{m^3}$$

$$MEM = CAG + CAF = 1304 + 1035$$

$$MEM = 2339 \frac{kg}{m^3}$$

$$AGi_{pedra1} = \frac{CAG_{pedra1}}{MEM} \times 100 = \frac{124,1}{2339} \times 100$$

$$AGi_{pedra1} = 5,3\%$$

$$AGi_{pedrisco} = \frac{CAG_{pedrisco}}{MEM} \times 100 = \frac{1179,9}{2339} \times 100$$

$$AGi_{pedrisco} = 50,5\%$$

$$AFi_{pó} = \frac{CAF_{pó}}{MEM} \times 100 = \frac{1035}{2339} \times 100$$

$$AFi_{pó} = 44,2\%$$

A.2.3. Peneiras de controle

$$PM \approx \frac{DMN}{2} = \frac{12,5}{2} = 6,25$$

$$PM = 4,76mm$$

$$PCP \approx DMN \times FC = 12,5 \times 0,22 = 2,75$$

$$PCP = 2,38mm$$

$$PCS \approx PCP \times FC = 2,36 \times 0,22 = 0,52$$

$$PCS = 0,59mm$$

$$PCT \approx PCS \times FC = 0,60 \times 0,22 = 0,132$$

$$PCT = 0,149mm$$

A.2.4. Contribuição final dos agregados

$$PFG_{pedra1} = AGi_{pedra1} \times QAG_{pedra1} = 5,3 \times 0$$

$$PFG_{pedra1} = 0\%$$

$$PFG_{pedrisco} = AGi_{pedrisco} \times QAG_{pedrisco} = 50,5\% \times 6,11$$

$$PFG_{pedrisco} = 3,1\%$$

$$PGF = AFi_{pó} \times QAF_{pó} = 44,2\% \times \left(\frac{100 - 89,3}{100} \right)$$

$$PGF = 4,7\%$$

$$AGf_{pedra1} = AGi_{pedra1} + PFG_{pedra1} - \left(\frac{AGi_{pedra1} \times PGF}{AG} \right) = 5,3 + 0 - \left(\frac{5,3 \times 4,7}{55,8} \right)$$

$$AGf_{pedra1} = 4,86\%$$

$$AGf_{pedrisco} = AGi_{pedrisco} + PFG_{pedrisco} - \left(\frac{AGi_{pedrisco} \times PGF}{AG} \right) = 50,5 + 3,1 - \left(\frac{50,5 \times 4,7}{55,8} \right)$$

$$AGf_{pedrisco} = 49,26\%$$

$$AFf_{pó} = AFi_{pó} + PGF - \left(\frac{AFi_{pó} \times PGF}{AF} \right) = 44,2 + 4,7 - \left(\frac{44,2 \times 3,1}{44,2} \right)$$

$$AFf_{pó} = 45,88\%$$

Tabela A.6 – Massa específica média da mistura.

Massas Específicas	%	Real (g/cm ³)		Aparente (g/cm ³)	
		Individual	Composição	Individual	Composição
Pedra 1	4,86	2,865	2,866	2,746	2,775
Pedrisco	49,26	2,839		2,730	
Pó	45,88	2,895		2,826	

A.2.5. Curva granulométrica

A curva granulométrica demonstrada na Tabela B.7 e na Figura B.1, foi composta utilizando-se as porcentagens de cada agregado apresentadas no item B.2.4

Tabela A.7 – Curva granulométrica determinada através do método Bailey.

Peneiras (mm)	Quantidade Passada Acumulada (%)	Quantidade Retida (%)
19,1	100,00	0,00
12,5	98,96	1,04
9,5	95,98	2,98
4,75	64,07	31,92
2,36	44,00	20,07
1,18	31,39	12,61
0,60	22,22	9,17
0,30	15,65	6,56
0,15	9,30	6,35
0,075	4,60	4,70
Fundo	0,00	4,60

Figura A.1. Curva granulométrica determinada através do método Bailey.

A.2.6. Parâmetros de controle

$$PAG = \frac{PM - PCP}{1 - PM} = \frac{64,07\% - 44,00\%}{1 - 64,07\%}$$

$$PAG = 0,56$$

$$PGAF = \frac{PCS}{PCP} = \frac{22,22}{44,00}$$

$$PGAF = 0,50$$

$$PFAF = \frac{PCT}{PCS} = \frac{9,30}{22,22}$$

$$PFAF = 0,42$$

APÊNDICE B

Dosagem Marshall

B.1. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

A partir da curva granulométrica determinada através do método Bailey, definiu-se a superfície específica da composição dos agregados, seguida pela porcentagem provável de ligante na mistura.

$$S = \frac{0,17 \times G + 0,33 \times g + 2,30 \times A + 12,00 \times a + 135,00 \times f}{100}$$

$$S = \frac{0,17 \times 2,98 + 0,33 \times 31,92 + 2,30 \times (48,41) + 12,00 \times (11,05) + 135,00 \times 4,60}{100}$$

$$S = 8,757 \, m^2/kg$$

$$T_{ca} = m \times \sqrt[5]{S} = 3,75 \times \sqrt[5]{8,757} = 5,79\%$$

$$T_{ca} = 5,79\%$$

$$T'_{ca} = \frac{2,65 \times T_{ca}}{\delta_{am}} = \frac{2,65 \times 5,79}{2,866}$$

$$T'_{ca} = 5,35\%$$

$$P_{ca} = \frac{100 \times T'_{ca}}{100 + T'_{ca}} = \frac{100 \times 5,35\%}{100 + 5,35\%}$$

$$P_{ca} = 5,47\%$$

As respostas fornecidas pelas equações, no exemplo, foram calculadas com mais casas decimais do que apresentado, por esse motivo há discrepância entre os valores apresentados nas equações e as respostas obtidas.

De posse do teor provável de ligante, definiram-se os demais teores para a dosagem Marshall com intervalo de 0,5%. Os dados para a composição dos corpos-de-prova com massa de 1200g encontram-se na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Composição dos corpos-de-prova para a dosagem Marshall.

Teor de Ligante (%)	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%	Peneira (mm)
Quantidade de Ligante (g)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00	
Quantidade de Agregado Retido em Cada Peneira (g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,1
	11,87	11,81	11,75	11,69	11,62	11,56	12,5
	34,15	33,98	33,80	33,62	33,44	33,26	9,5
	365,76	363,84	361,93	360,01	358,10	356,18	4,75
	230,02	228,82	227,61	226,41	225,21	224,00	2,36
	144,50	143,74	142,99	142,23	141,48	140,72	1,18
	105,08	104,53	103,98	103,43	102,88	102,33	0,60
	75,23	74,84	74,44	74,05	73,65	73,26	0,30
	72,83	72,45	72,07	71,68	71,30	70,92	0,15
	53,87	53,58	53,30	53,02	52,74	52,46	0,075
	52,69	52,41	52,14	51,86	51,58	51,31	Fundo
Total (g)	1146,00	1140,00	1134,00	1128,00	1122,00	1116,00	

B.2. TEMPERATURAS DE ENSAIO

Com os dados das viscosidades Saybolt-Furol do ligante nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, traçou-se a curva $\log_{10}$ viscosidade *versus* temperatura, como mostra a Figura B.1.

Figura B.1. Curva viscosidade *versus* temperatura do ligante asfáltico.

As temperaturas de mistura do CAP, de compactação e de aquecimento dos agregados foram calculadas como se segue.

$$T_{compactação} = T_{125} + \left(\frac{T_{155} - T_{125}}{2} \right) = 139,85 + \left(\frac{134,61 - 139,85}{2} \right)$$

$$T_{compactação} = 137^{\circ}C$$

$$T_{cap} = T_{75} + \left(\frac{T_{95} - T_{75}}{2} \right) = 152,32 + \left(\frac{146,55 - 152,32}{2} \right)$$

$$T_{cap} = 149^{\circ}C$$

$$T_{agregado} = T_{cap} + 13 = 149 + 13$$

$$T_{agregado} = 162^{\circ}C$$

B.3. PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL

A compactação dos corpos-de-prova deu-se pela aplicação de 75 golpes com o soquete Marshall em cada face e após serem desmoldados, calcularam-se os parâmetros Marshall como mostram as equações a seguir.

$$VCP_{JSI1} = MA - MI = 1167,8 - 685,7$$

$$VCP_{JSI1} = 482,1cm^3$$

$$DAP = \frac{MA}{MA - MI} = \frac{1167,8}{1167,8 - 685,7}$$

$$DAP = 2,422$$

$$DMT = \frac{1}{\frac{CAP_p}{\rho_{CAP}} + \frac{AG_p}{\rho_{AG}}} = \frac{1}{\frac{0,045}{1,008} + \frac{0,955}{2,866}}$$

$$DMT = 2,646$$

$$V_v = \left(1 - \frac{DAP}{DMT}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{2,422}{2,646}\right)$$

$$\boxed{V_v = 8,47\%}$$

$$V_{cap} = \frac{DAP \times CAP_p}{\rho_{CAP}} \times \rho_{água} = \frac{2,422 \times 0,045}{1,008} \times 1 = 10,81\%$$

$$\boxed{V_{cap} = 10,81\%}$$

$$VAM = V_v + V_{ca} = 8,47 + 10,81$$

$$\boxed{VAM = 19,28\%}$$

$$RBV = \frac{V_{CAP}}{VAM} = \frac{0,1081}{0,1928}$$

$$\boxed{RBV = 56,08\%}$$

Os demais corpos-de-prova da dosagem foram calculados analogamente ao JSI001 e os resultados encontram-se na Tabela B.2, que também apresenta as médias dos valores de cada parâmetro da dosagem.

Tabela B.2 – Dosagem Marshall.

CP	CAP	Agreg.	Massa ar (g)	Massa imersa (g)	Massa SSS (g)	Vol. CP (cm ³)	Dens. Ap.	DTM	V _v (%)	CAP	VAM	RBV
JSI001	4,50%	95,50%	1167,8	685,7	1175,1	482,1	2,422	2,646	8,47%	10,81%	19,28%	56,08%
JSI002	4,50%	95,50%	1169,9	689,7	1177,0	480,2	2,436	2,646	7,94%	10,88%	18,82%	57,80%
JSI003	4,50%	95,50%	1167,2	686,0	1174,8	481,2	2,426	2,646	8,34%	10,83%	19,17%	56,48%
média	4,50%	95,50%	1168,3	687,1	1175,6	481,2	2,428	2,646	8,25%	10,84%	19,09%	56,78%
JSI004	5,00%	95,00%	1167,4	685,4	1170,9	482,0	2,422	2,624	7,70%	12,01%	19,72%	60,93%
JSI005	5,00%	95,00%	1159,5	687,2	1162,8	472,3	2,455	2,624	6,44%	12,18%	18,62%	65,39%
JSI006	5,00%	95,00%	1165,6	691,3	1169,3	474,3	2,458	2,624	6,35%	12,19%	18,54%	65,75%
média	5,00%	95,00%	1164,2	688,0	1167,7	476,2	2,445	2,624	6,83%	12,13%	18,96%	63,96%
JSI007	5,50%	94,50%	1160,6	690,7	1162,3	469,9	2,470	2,602	5,08%	13,48%	18,56%	72,61%
JSI008	5,50%	94,50%	1157,8	691,7	1158,7	466,1	2,484	2,602	4,54%	13,55%	18,09%	74,91%
JSI009	5,50%	94,50%	1157,5	689,6	1159,0	467,9	2,474	2,602	4,93%	13,50%	18,43%	73,24%
média	5,50%	94,50%	1158,6	690,7	1160,0	468,0	2,476	2,602	4,85%	13,51%	18,36%	73,58%
JSI010	6,00%	94,00%	1156,8	694,0	1157,4	462,8	2,500	2,581	3,14%	14,88%	18,02%	82,58%
JSI011	6,00%	94,00%	1151,9	689,7	1153,0	462,2	2,492	2,581	3,42%	14,83%	18,26%	81,25%
JSI012	6,00%	94,00%	1152,9	687,6	1154,9	465,3	2,478	2,581	3,98%	14,75%	18,73%	78,73%
média	6,00%	94,00%	1153,9	690,4	1155,1	463,4	2,490	2,581	3,52%	14,82%	18,34%	80,83%
JSI013	6,50%	93,50%	1159,4	693,9	1160,2	465,5	2,491	2,559	2,68%	16,06%	18,74%	85,69%
JSI014	6,50%	93,50%	1152,0	690,2	1152,5	461,8	2,495	2,559	2,53%	16,09%	18,62%	86,41%
JSI015	6,50%	93,50%	1154,0	690,7	1154,9	463,3	2,491	2,559	2,68%	16,06%	18,74%	85,72%
média	6,50%	93,50%	1155,1	691,6	1155,9	463,5	2,492	2,559	2,63%	16,07%	18,70%	85,94%
JSI016	7,00%	93,00%	1156,8	692,1	1158,1	464,7	2,489	2,538	1,93%	17,29%	19,22%	89,94%
JSI017	7,00%	93,00%	1155,5	690,8	1156,7	464,7	2,487	2,538	2,04%	17,27%	19,31%	89,42%
JSI018	7,00%	93,00%	1157,3	691,3	1158,6	466,0	2,483	2,538	2,17%	17,25%	19,41%	88,85%
média	7,00%	93,00%	1156,5	691,4	1157,8	465,1	2,486	2,538	2,05%	17,27%	19,31%	89,40%

APÊNDICE C

Absorção de Asfalto

A densidade máxima medida da mistura foi determinada para a mistura dosada com o teor ótimo de ligante através da equação:

$$DMM_{JSI19} = \frac{A}{A + D - E} = \frac{1172,2}{1172,2 + 3601,9 - 4308,9}$$

$$DMM_{JSI19} = 2,520$$

$$\rho_{ef} = \frac{1 - CAP_p}{\frac{1}{DMM} - \frac{CAP_p}{\rho_{cap}}} = \frac{1 - 0,0578}{\frac{1}{2,520} - \frac{0,0578}{1,008}}$$

$$\rho_{ef} = 2,7751 \frac{g}{cm^3}$$

$$Abs = \left(\frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_{cap} \right) \times 100 = \left(\frac{2,7751 - 2,775}{2,7751 \times 2,775} \times 1,008 \right) \times 100 = 0,001\%$$

$$Abs = 0,001\%$$

Os valores apresentados nas expressões anteriores estão omitindo muitas casas decimais, por esse motivo há diferença no resultado do cálculo apresentado com os dados usados nas equações.

Os demais corpos-de-prova foram calculados analogamente ao JSI019 e os resultados se encontram na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Absorção de asfalto para as diferentes etapas de envelhecimento.

CP nº	Env. (h)	Massa amostra (g)	Massa amostra + kitassato cheio (g)	Temp. (°C)	Massa kitassato calibração (g)	DMM	ρ_{ef} do agregado (g/cm ³)	Abs. (%)	Abs. média (%)
JSI019	0	1172,2	4308,9	24,3	3601,9	2,520	2,775	0,001	0,001
JSI020		1168,9	4306,9	24,3	3601,9	2,520	2,775	0,000	
JSI021	2	1172,0	4308,7	24,9	3601,6	2,521	2,777	0,021	0,023
JSI022		1165,0	4304,7	24,4	3601,8	2,521	2,777	0,024	
JSI023	4	1171,4	4309,8	24,4	3601,8	2,528	2,785	0,137	0,123
JSI024		1171,9	4309,9	24,3	3601,9	2,526	2,783	0,109	

APÊNDICE D

Características Volumétricas dos Corpos- de-prova

D.1. DOSAGEM MARSHALL

Tabela D.1 – Dosagem Marshall – Diâmetro e altura dos corpos-de-prova.

CP nº	CAP (%)	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI001	4,5	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	60,8	61,0	60,9	61,0	60,9
JSI002		101,7	101,7	101,8	101,8	101,8	60,8	60,9	61,1	60,6	60,9
JSI003		101,9	101,9	101,9	101,9	101,9	60,7	60,7	60,9	60,6	60,7
JSI004	5,0	101,9	102,2	102,0	102,1	102,1	60,2	60,2	59,9	60,6	60,2
JSI005		101,7	101,8	101,9	101,8	101,8	59,6	59,1	59,3	59,6	59,4
JSI006		101,7	101,6	101,6	101,7	101,7	60,0	59,7	59,6	59,7	59,8
JSI007	5,5	101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	58,8	58,9	59,1	59,2	59,0
JSI008		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	58,5	58,9	59,1	58,4	58,7
JSI009		101,6	101,7	101,7	101,7	101,7	59,0	59,1	58,9	59,0	59,0
JSI010	6,0	101,7	101,7	101,8	101,6	101,7	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
JSI011		101,5	101,6	101,7	101,6	101,6	57,9	58,1	58,3	58,1	58,1
JSI012		101,6	101,8	101,7	101,6	101,7	58,5	58,8	58,6	58,5	58,6
JSI013	6,5	101,7	101,8	101,9	101,7	101,8	58,6	58,1	58,4	58,4	58,4
JSI014		101,5	101,6	101,8	101,6	101,6	58,8	58,3	58,9	58,1	58,5
JSI015		101,4	101,5	101,8	101,8	101,6	58,6	58,6	58,5	58,5	58,6
JSI016	7,0	101,5	101,5	101,8	101,8	101,7	58,3	58,1	58,3	58,3	58,3
JSI017		101,6	101,6	101,8	101,5	101,6	58,5	58,1	58,2	58,3	58,3
JSI018		101,7	101,9	101,9	102,0	101,9	58,2	58,5	58,3	58,4	58,4

Tabela D.2 – Dosagem Marshall – Massas, volumes, densidades e volume de vazios dos corpos-de-prova.

CP nº	CAP (%)	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	DTM	Dap	Vv (%)
JSI001	4,5	1167,8	685,7	494,9	2,646	2,422	8,47
JSI002		1169,9	689,7	494,8		2,436	7,94
JSI003		1167,2	686,0	495,2		2,426	8,34
JSI004	5,0	1167,4	685,4	492,6	2,624	2,422	7,70
JSI005		1159,5	687,2	483,5		2,455	6,44
JSI006		1165,6	691,3	484,9		2,458	6,35
JSI007	5,5	1160,6	690,7	479,5	2,602	2,470	5,08
JSI008		1157,8	691,7	477,3		2,484	4,54
JSI009		1157,5	689,6	479,0		2,474	4,93
JSI010	6,0	1156,8	694,0	472,0	2,581	2,500	3,14
JSI011		1151,9	689,7	471,0		2,492	3,42
JSI012		1152,9	687,6	475,8		2,478	3,98
JSI013	6,5	1159,4	693,9	474,9	2,559	2,491	2,68
JSI014		1152,0	690,2	474,7		2,495	2,53
JSI015		1154,0	690,7	474,9		2,491	2,68
JSI016	7,0	1156,8	692,1	472,7	2,538	2,489	1,93
JSI017		1155,5	690,8	472,7		2,487	2,04
JSI018		1157,3	691,3	475,6		2,483	2,17

D.2. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

Tabela D.3 – Ensaios Exploratórios – Diâmetro e altura dos corpos-de-prova.

CP nº	EVA (%) #4,76	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI025	2,5	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	59,6	60,1	59,9	59,6	59,8
JSI026		101,5	101,6	101,6	101,6	101,6	60,5	60,7	60,7	60,6	60,6
JSI027		101,9	101,7	101,8	101,8	101,8	60,3	60,5	60,4	60,5	60,4
JSI028		101,8	101,8	101,8	101,8	101,8	59,6	60,0	60,0	59,7	59,8
JSI029	5,0	101,6	101,8	101,7	101,8	101,7	60,8	60,8	60,9	60,9	60,9
JSI030		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	60,7	60,6	60,7	60,7	60,7
JSI031		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	61,3	61,0	61,0	61,0	61,1
JSI032		101,5	101,7	101,7	101,7	101,7	60,5	61,0	60,9	60,6	60,8
JSI033	7,5	101,6	101,7	101,6	101,7	101,7	61,2	61,5	61,5	61,6	61,5
JSI034		101,7	101,6	101,8	101,7	101,7	60,8	60,7	60,6	60,7	60,7
JSI035		101,8	101,9	101,8	101,7	101,8	60,7	60,4	60,6	60,2	60,5
JSI036		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	60,6	60,4	60,2	60,5	60,4
JSI037	10,0	101,6	101,8	101,9	101,8	101,8	62,0	62,0	62,1	61,6	61,9
JSI038		101,8	101,7	101,6	101,7	101,7	62,3	62,1	62,5	62,4	62,3
JSI039		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	62,5	62,2	62,3	62,3	62,3
JSI040		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	63,1	63,2	62,6	63,6	63,1

Tabela D.4 – Ensaios exploratórios – Massas, volumes, densidades e volume de vazios dos corpos-de-prova.

CP nº	EVA (%) #4,76mm	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	DTM	Dap	Vv (%)
JSI025	2,5	1161,0	684,8	485,8	2,551	2,438	4,38%
JSI026		1171,7	694,9	491,3		2,457	3,62%
JSI027		1175,5	698,0	491,8		2,462	3,45%
JSI028		1164,4	687,2	486,9		2,440	4,30%
JSI029	5,0	1156,1	675,4	494,5	2,512	2,405	4,24%
JSI030		1157,8	676,5	493,1		2,406	4,22%
JSI031		1151,0	671,7	496,4		2,401	4,38%
JSI032		1157,4	676,3	493,0		2,406	4,21%
JSI033	7,5	1158,7	676,2	498,7	2,475	2,401	4,38%
JSI034		1158,6	679,2	493,1		2,417	3,77%
JSI035		1158,3	676,8	492,2		2,406	4,22%
JSI036		1158,4	677,5	491,3		2,409	4,09%
JSI037	10,0	1145,0	655,5	503,8	2,439	2,339	4,07%
JSI038		1149,6	656,8	506,3		2,333	4,33%
JSI039		1149,4	657,6	506,5		2,337	4,15%
JSI040		1150,4	658,9	512,8		2,341	4,01%

D.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela D.5 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 0% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI041	0	101,5	101,7	101,7	101,7	101,7	59,6	59,4	59,6	59,5	59,5
JSI042		101,5	101,6	101,7	101,6	101,6	58,7	58,5	58,7	58,5	58,6
JSI043		101,6	101,6	101,5	101,6	101,6	58,8	58,6	59,1	58,6	58,8
JSI044		101,8	101,8	101,9	101,9	101,9	59,5	59,5	59,1	59,2	59,3
JSI045		102,3	101,7	102,6	101,7	102,1	59,2	58,7	58,9	58,6	58,9
JSI046		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	59,5	59,0	58,9	59,1	59,1
JSI047		101,5	101,6	101,5	101,7	101,6	58,6	59,1	59,1	58,9	58,9
JSI048		101,5	101,8	101,7	101,6	101,7	59,5	59,2	59,0	59,4	59,3
JSI049		101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	59,1	59,1	59,2	59,2	59,2
JSI050		101,7	101,8	101,8	101,6	101,7	59,4	59,0	58,9	59,3	59,2
JSI051		101,8	101,9	101,9	101,8	101,9	57,0	57,3	57,1	57,2	57,2
JSI052		101,5	101,5	101,7	101,7	101,6	59,5	59,7	59,1	58,9	59,3
JSI053		101,6	101,7	101,6	101,7	101,7	59,7	59,4	59,6	59,5	59,6
JSI054		101,6	101,7	101,7	101,6	101,7	58,9	59,0	59,0	58,9	59,0
JSI055	2	101,6	101,8	101,7	101,8	101,7	60,2	60,2	60,2	60,2	60,2
JSI056		101,6	101,7	101,7	101,8	101,7	60,0	59,7	59,6	60,0	59,8
JSI057		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	59,4	59,2	59,4	59,2	59,3
JSI058		101,5	101,5	101,5	101,7	101,6	60,3	60,5	60,3	60,5	60,4
JSI059		101,7	101,8	101,8	101,9	101,8	59,5	59,9	59,6	59,8	59,7
JSI060		101,9	102,0	102,0	101,8	101,9	59,7	60,1	60,0	59,9	59,9
JSI061		101,6	101,6	101,5	101,5	101,6	59,8	59,9	59,9	60,0	59,9
JSI062		101,6	101,7	101,8	101,6	101,7	59,8	59,8	59,8	59,8	59,8
JSI063		101,6	101,7	101,7	101,6	101,7	59,6	60,0	59,5	59,8	59,7
JSI064		101,6	101,7	101,7	101,7	101,7	59,7	60,1	60,0	60,1	60,0
JSI065		101,3	101,5	101,5	101,5	101,5	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1
JSI066		101,6	101,8	101,7	101,8	101,7	60,0	59,6	59,8	59,6	59,8
JSI067		101,7	101,7	101,7	101,6	101,7	59,8	59,9	59,8	59,7	59,8
JSI068		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	60,1	60,2	60,2	60,1	60,2
JSI069	4	101,7	101,7	101,6	101,7	101,7	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1
JSI070		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	59,6	59,8	59,6	59,7	59,7
JSI071		101,8	101,9	101,9	101,9	101,9	60,2	60,0	60,1	60,1	60,1
JSI072		101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	59,8	59,4	59,5	59,6	59,6
JSI073		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	60,8	60,8	60,8	60,7	60,8
JSI074		101,6	101,7	101,7	101,6	101,7	60,1	60,1	60,1	60,1	60,1
JSI075		101,5	101,6	101,6	101,6	101,6	60,6	60,7	60,2	60,2	60,4
JSI076		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	59,5	59,2	59,6	59,3	59,4
JSI077		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	60,0	60,0	59,6	60,0	59,9
JSI078		101,5	101,7	101,7	101,5	101,6	59,5	59,8	59,7	59,4	59,6
JSI079		101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	60,0	59,8	59,8	60,1	59,9
JSI080		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	59,7	60,0	60,0	59,7	59,9
JSI081		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	60,1	59,9	60,0	60,1	60,0
JSI082		101,6	101,7	101,6	101,7	101,7	60,4	60,3	60,5	60,2	60,4

Tabela D.6 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 1% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI083	0	101,6	101,6	101,9	101,8	101,7	59,5	59,3	59,5	59,6	59,5
JSI084		101,5	101,6	101,8	101,8	101,7	59,5	59,6	59,7	59,5	59,6
JSI085		101,6	101,6	101,7	101,8	101,7	59,4	59,2	59,2	58,8	59,2
JSI086		101,8	101,7	101,7	101,7	101,7	58,4	58,5	58,1	58,1	58,3
JSI087		101,6	101,8	101,8	101,8	101,8	58,7	58,2	58,4	58,1	58,4
JSI088		101,7	101,7	101,8	101,8	101,8	58,3	58,0	58,1	58,2	58,2
JSI089		101,7	101,5	101,7	101,8	101,7	58,9	58,8	58,7	58,3	58,7
JSI090		101,6	101,7	101,9	101,9	101,8	58,6	58,5	58,5	58,3	58,5
JSI091		101,9	101,6	101,7	101,7	101,7	58,7	58,1	58,0	58,5	58,3
JSI092		101,7	101,7	101,9	101,9	101,8	59,3	59,5	58,7	58,7	59,1
JSI093		101,6	101,7	101,6	101,7	101,7	59,4	59,2	59,3	59,2	59,3
JSI094		101,8	101,8	101,7	101,7	101,8	59,2	59,1	59,1	59,3	59,2
JSI095	2	101,7	101,8	101,8	101,8	101,8	58,9	59,1	58,5	58,7	58,8
JSI096		101,8	102,0	101,9	102,1	102,0	59,4	59,6	58,8	58,9	59,2
JSI097		101,7	101,6	101,6	101,6	101,6	60,5	60,3	60,6	60,3	60,4
JSI098		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	59,8	59,7	60,0	59,6	59,8
JSI099		101,8	101,9	101,9	101,8	101,9	60,7	60,5	60,5	60,6	60,6
JSI100		101,7	101,9	101,8	101,8	101,8	59,1	59,1	59,2	58,9	59,1
JSI101		101,6	101,7	101,7	101,8	101,7	59,2	59,4	59,4	59,3	59,3
JSI102		101,7	101,8	101,8	101,8	101,8	59,2	59,4	59,3	59,0	59,2
JSI103		101,7	101,7	101,8	101,8	101,8	59,6	59,4	59,0	59,0	59,3
JSI104		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	59,3	58,9	59,4	59,4	59,3
JSI105		101,7	101,6	101,7	101,7	101,7	59,2	59,7	59,1	59,4	59,4
JSI106		101,7	101,7	101,6	101,8	101,7	59,0	59,1	59,1	59,1	59,1
JSI107	4	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	59,4	59,5	59,4	59,5	59,5
JSI108		101,6	101,6	101,7	101,7	101,7	59,6	59,6	59,5	59,7	59,6
JSI109		101,6	101,6	101,8	101,8	101,7	58,6	58,5	58,5	59,2	58,7
JSI110		101,7	101,7	101,9	101,9	101,8	59,3	59,0	59,7	59,2	59,3
JSI111		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	60,3	59,9	60,2	60,1	60,1
JSI112		101,7	101,8	101,8	101,9	101,8	60,3	60,2	60,2	60,2	60,2
JSI113		101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	60,2	60,0	60,0	60,2	60,1
JSI114		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	60,0	59,8	59,7	60,0	59,9
JSI115		101,6	101,7	101,8	101,8	101,7	60,2	59,8	59,9	59,5	59,9
JSI116		101,6	101,8	101,7	101,8	101,7	60,0	59,8	59,9	59,9	59,9
JSI117		101,8	101,9	101,9	101,9	101,9	59,6	59,3	59,7	59,4	59,5
JSI118		101,6	101,8	101,9	101,7	101,8	59,9	59,5	59,8	59,6	59,7
JSI119		101,8	101,8	101,8	101,8	101,8	59,3	58,9	59,0	58,8	59,0
JSI120		101,7	101,8	101,8	101,8	101,8	59,4	59,6	59,2	59,5	59,4
JSI121		101,8	101,7	101,8	101,9	101,8	59,8	59,7	59,6	59,7	59,7
JSI122		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	59,4	59,6	59,5	59,5	59,5
JSI123		101,8	101,9	101,9	101,8	101,9	59,3	59,5	59,2	59,3	59,3
JSI124		101,8	101,7	101,7	101,7	101,7	59,5	59,6	59,5	59,2	59,5

Tabela D.7 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 2% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI125	0	101,8	101,9	101,9	102,0	101,9	60,7	60,2	60,2	59,7	60,2
JSI126		101,8	101,9	101,8	101,9	101,9	60,9	60,4	60,8	60,6	60,7
JSI127		101,4	101,6	101,7	101,7	101,6	61,1	59,8	60,8	60,1	60,5
JSI128		101,6	101,6	101,6	101,8	101,7	60,6	59,7	60,2	60,8	60,3
JSI129		101,9	101,8	102,0	102,0	101,9	59,2	60,0	60,0	59,9	59,8
JSI130		101,8	101,7	101,9	101,9	101,8	59,6	59,3	59,3	59,3	59,4
JSI131		101,5	101,5	101,5	101,6	101,5	59,9	59,9	59,6	59,9	59,8
JSI132		101,8	101,6	101,7	101,7	101,7	60,7	59,9	59,6	61,5	60,4
JSI133		101,8	101,8	101,8	101,9	101,8	59,6	59,7	59,8	59,8	59,7
JSI134		101,9	101,9	101,9	102,0	101,9	59,5	59,1	59,4	59,0	59,3
JSI135		101,8	101,8	101,9	101,7	101,8	60,1	60,0	60,3	60,1	60,1
JSI136		101,9	101,8	101,7	101,9	101,8	59,9	60,2	59,8	59,9	60,0
JSI137		101,8	101,8	101,9	101,9	101,9	59,1	58,5	59,2	58,8	58,9
JSI138		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	59,3	58,6	58,9	58,8	58,9
JSI139	2	101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	59,5	59,4	59,1	59,4	59,4
JSI140		101,9	101,7	101,8	101,9	101,8	60,7	60,0	60,5	60,0	60,3
JSI141		101,7	101,6	101,6	101,8	101,7	60,0	59,6	60,0	59,5	59,8
JSI142		101,6	101,6	101,7	101,6	101,6	60,2	59,7	59,9	60,1	60,0
JSI143		101,8	101,8	101,8	101,7	101,8	60,2	60,6	60,7	60,1	60,4
JSI144		101,9	101,8	101,8	101,9	101,9	60,5	59,7	60,2	60,3	60,2
JSI145		101,8	101,7	101,7	101,9	101,8	59,7	60,3	60,2	60,2	60,1
JSI146		101,7	101,6	101,7	101,7	101,7	60,2	60,0	59,8	59,8	60,0
JSI147		101,9	101,8	102,0	101,9	101,9	58,8	59,2	59,2	59,3	59,1
JSI148		101,7	101,7	101,6	101,7	101,7	60,1	60,0	59,8	59,9	60,0
JSI149		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	59,9	59,9	60,0	59,8	59,9
JSI150		101,7	101,7	101,8	101,8	101,8	59,7	59,4	60,0	59,7	59,7
JSI151		101,8	101,8	101,8	101,8	101,8	61,2	60,1	60,5	60,5	60,6
JSI152		101,6	101,8	101,8	101,7	101,7	60,1	60,3	59,7	59,9	60,0
JSI153	4	101,7	101,8	101,7	101,9	101,8	59,7	60,5	60,1	60,3	60,2
JSI154		101,6	101,6	101,7	101,5	101,6	60,7	60,6	60,7	60,5	60,6
JSI155		101,7	101,8	101,7	101,7	101,7	60,3	60,6	60,5	60,1	60,4
JSI156		101,5	101,6	101,6	101,5	101,6	60,0	60,0	59,8	60,1	60,0
JSI157		102,0	102,1	102,0	102,0	102,0	60,1	60,2	60,2	60,1	60,2
JSI158		101,8	101,7	101,7	101,8	101,8	59,9	60,0	60,1	59,8	60,0
JSI159		101,9	101,8	101,9	101,8	101,9	59,7	59,6	59,3	59,6	59,6
JSI160		101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	59,8	59,5	60,0	60,0	59,8
JSI161		101,8	101,8	101,8	101,7	101,8	59,5	59,5	59,4	59,4	59,5
JSI162		101,7	101,8	101,7	101,8	101,8	59,7	59,4	59,4	59,9	59,6
JSI163		101,6	101,7	101,7	101,8	101,7	60,4	59,6	59,9	60,1	60,0
JSI164		101,5	101,6	101,6	101,6	101,6	59,9	59,8	60,0	59,8	59,9
JSI165		101,6	101,5	101,6	101,5	101,6	59,9	60,2	60,5	60,0	60,2
JSI166		101,6	101,5	101,7	101,6	101,6	60,5	60,4	60,6	60,5	60,5

Tabela D.8 – Programa Experimental – Diâmetro e altura dos CPs com 3% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Diâmetro (mm)					Altura (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D _{médio}	H1	H2	H3	H4	H _{média}
JSI167	0	101,8	101,8	101,8	101,7	101,8	60,4	60,6	60,9	60,6	60,6
JSI168		101,6	101,6	101,7	101,8	101,7	62,5	63,2	62,8	63,3	63,0
JSI169		101,6	101,7	101,9	101,8	101,8	62,1	61,3	61,9	60,6	61,5
JSI170		101,8	101,9	101,8	101,9	101,9	63,4	62,6	62,6	62,7	62,8
JSI171		101,8	101,8	101,9	102,0	101,9	62,1	62,4	62,7	61,6	62,2
JSI172		101,5	101,6	101,7	101,7	101,6	61,4	61,7	61,5	62,2	61,7
JSI173		101,8	101,6	101,7	101,6	101,7	61,8	62,0	62,1	61,2	61,8
JSI174		101,8	101,8	101,8	101,9	101,8	59,4	60,1	60,5	60,2	60,1
JSI175		101,7	101,5	101,7	101,8	101,7	60,9	60,9	60,8	60,9	60,9
JSI176		102,0	101,8	101,9	101,8	101,9	62,1	62,2	62,5	61,8	62,2
JSI177		101,8	101,8	101,7	101,8	101,8	61,9	62,0	62,1	62,1	62,0
JSI178		101,9	101,7	101,8	101,9	101,8	62,1	61,8	61,9	62,1	62,0
JSI179		101,5	101,6	101,8	101,6	101,6	61,1	60,3	60,2	61,6	60,8
JSI180		101,8	101,8	101,9	102,1	101,9	62,8	63,1	63,1	61,5	62,6
JSI181	2	101,8	101,6	101,7	101,6	101,7	60,6	60,0	60,4	60,4	60,4
JSI182		101,7	101,8	101,8	101,8	101,8	60,9	60,1	60,1	60,1	60,3
JSI183		102,0	101,9	101,8	101,8	101,9	60,4	61,0	60,5	60,2	60,5
JSI184		101,7	101,7	101,9	101,8	101,8	61,0	60,9	60,6	60,5	60,8
JSI185		101,5	101,6	101,7	101,7	101,6	60,5	61,0	61,7	61,8	61,3
JSI186		101,7	101,6	101,8	101,6	101,7	60,1	61,3	60,3	60,6	60,6
JSI187		101,6	101,7	101,8	101,8	101,7	59,7	59,7	59,8	60,0	59,8
JSI188		102,0	102,0	102,0	101,9	102,0	60,6	60,8	60,6	60,4	60,6
JSI189		101,8	102,0	101,9	101,9	101,9	60,3	60,0	60,1	59,9	60,1
JSI190		101,5	101,7	101,7	101,8	101,7	60,9	60,9	61,0	60,9	60,9
JSI191		101,6	101,7	101,7	101,6	101,7	60,8	60,7	60,5	60,8	60,7
JSI192		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	60,5	60,3	60,4	60,7	60,5
JSI193		101,8	101,6	101,8	101,6	101,7	60,7	60,5	61,0	60,1	60,6
JSI194		101,8	101,5	101,7	101,6	101,7	61,3	61,7	61,4	61,6	61,5
JSI195	4	101,8	101,8	101,6	101,6	101,7	60,9	60,7	60,9	60,6	60,8
JSI196		101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	60,8	60,9	60,3	60,9	60,7
JSI197		101,7	101,7	101,5	101,7	101,7	60,1	60,3	60,0	60,2	60,2
JSI198		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	60,8	60,5	60,8	60,9	60,8
JSI199		101,7	101,7	101,8	101,7	101,7	60,8	60,7	60,5	60,7	60,7
JSI200		101,7	101,8	101,8	101,7	101,8	60,2	60,8	61,1	61,0	60,8
JSI201		102,0	101,9	101,8	101,7	101,9	61,8	62,0	61,8	61,8	61,9
JSI202		101,6	101,6	101,7	101,6	101,6	63,0	63,1	63,1	63,3	63,1
JSI203		101,8	101,8	101,9	101,8	101,8	60,4	60,8	60,8	61,0	60,8
JSI204		101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	60,7	60,8	61,0	60,8	60,8
JSI205		101,8	101,8	101,7	101,7	101,8	60,5	60,6	60,5	60,7	60,6
JSI206		101,7	101,8	101,7	101,8	101,8	60,7	60,6	60,6	60,8	60,7
JSI207		101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	60,7	60,7	60,6	60,8	60,7
JSI208		101,7	101,6	101,7	101,8	101,7	60,9	60,8	60,9	61,0	60,9

Tabela D.9 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 0% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	Dap	Vv (%)
JSI041	0	1165,2	695,5	469,7	2,481	4,19
JSI042		1160,1	696,1	464,0	2,500	3,43
JSI043		1164,4	698,7	465,7	2,500	3,43
JSI044		1164,4	695,5	468,9	2,483	4,09
JSI045		1162,0	696,5	465,5	2,496	3,59
JSI046		1162,3	694,8	467,5	2,486	3,97
JSI047		1164,3	699,3	465,0	2,504	3,29
JSI048		1161,3	693,9	467,4	2,485	4,04
JSI049		1152,6	688,3	464,3	2,482	4,12
JSI050		1161,2	692,4	468,8	2,477	4,33
JSI051		1144,1	685,8	458,3	2,496	3,58
JSI052		1164,1	698,2	465,9	2,499	3,50
JSI053		1165,3	695,3	470,0	2,479	4,24
JSI054		1163,5	698,3	465,2	2,501	3,40
JSI055	2	1165,2	696,5	468,7	2,486	3,98
JSI056		1163,1	692,3	470,8	2,470	4,58
JSI057		1162,7	693,2	469,5	2,476	4,35
JSI058		1164,8	695,4	469,4	2,481	4,16
JSI059		1166,4	696,1	470,3	2,480	4,21
JSI060		1181,3	704,2	477,1	2,476	4,37
JSI061		1170,3	698,0	472,3	2,478	4,30
JSI062		1167,3	697,7	469,6	2,486	3,99
JSI063		1163,3	694,1	469,2	2,479	4,24
JSI064		1163,5	695,2	468,3	2,485	4,04
JSI065		1167,5	697,2	470,3	2,482	4,12
JSI066		1161,1	692,9	468,2	2,480	4,22
JSI067		1168,1	695,2	472,9	2,470	4,60
JSI068		1163,3	693,2	470,1	2,475	4,42
JSI069	4	1167,9	689,0	478,9	2,439	5,81
JSI070		1168,5	691,4	477,1	2,449	5,40
JSI071		1168,5	687,9	480,6	2,431	6,09
JSI072		1166,9	689,9	477,0	2,446	5,51
JSI073		1171,9	688,3	483,6	2,423	6,40
JSI074		1168,6	689,8	478,8	2,441	5,73
JSI075		1163,6	684,1	479,5	2,427	6,27
JSI076		1171,5	697,4	474,1	2,471	4,56
JSI077		1166,0	689,9	476,1	2,449	5,41
JSI078		1161,6	686,1	475,5	2,443	5,65
JSI079		1171,0	691,9	479,1	2,444	5,60
JSI080		1165,8	688,5	477,3	2,442	5,66
JSI081		1170,8	689,4	481,4	2,432	6,06
JSI082		1168,3	688,9	479,4	2,437	5,87

Tabela D.10 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 1% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	Dap	Vv (%)
JSI083	0	1159,7	682,3	477,4	2,429	4,44
JSI084		1160,7	685,9	474,8	2,445	3,83
JSI085		1153,9	681,7	472,2	2,444	3,87
JSI086		1146,1	679,7	466,4	2,457	3,33
JSI087		1147,6	680,1	467,5	2,455	3,43
JSI088		1145,6	680,0	465,6	2,460	3,21
JSI089		1150,4	682,4	468,0	2,458	3,30
JSI090		1152,1	681,4	470,7	2,448	3,71
JSI091		1150,1	685,7	464,4	2,477	2,57
JSI092		1147,9	676,3	471,6	2,434	4,25
JSI093		1158,7	681,2	477,5	2,427	4,54
JSI094		1156,4	682,4	474,0	2,440	4,02
JSI095		1149,0	677,4	471,6	2,436	4,15
JSI096		1156,1	682,4	473,7	2,441	3,99
JSI097	2	1160,8	680,1	480,7	2,415	5,00
JSI098		1161,7	684,3	477,4	2,433	4,27
JSI099		1158,9	679,3	479,6	2,416	4,94
JSI100		1159,2	687,1	472,1	2,455	3,41
JSI101		1157,9	684,0	473,9	2,443	3,88
JSI102		1159,3	686,4	472,9	2,451	3,56
JSI103		1156,9	685,2	471,7	2,453	3,52
JSI104		1155,9	681,5	474,4	2,437	4,15
JSI105		1160,7	687,7	473,0	2,454	3,46
JSI106		1160,1	687,5	472,6	2,455	3,43
JSI107		1157,9	684,3	473,6	2,445	3,82
JSI108		1158,6	681,4	477,2	2,428	4,49
JSI109		1158,2	684,9	473,3	2,447	3,73
JSI110		1168,2	691,5	476,7	2,451	3,59
JSI111	4	1165,5	686,3	479,2	2,432	4,32
JSI112		1160,2	678,9	481,3	2,411	5,17
JSI113		1157,9	680,1	477,8	2,423	4,66
JSI114		1159,4	681,2	478,2	2,425	4,62
JSI115		1165,5	689,2	476,3	2,447	3,74
JSI116		1162,2	685,0	477,2	2,435	4,19
JSI117		1162,2	687,7	474,5	2,449	3,64
JSI118		1157,5	681,7	475,8	2,433	4,30
JSI119		1162,4	690,9	471,5	2,465	3,02
JSI120		1161,9	686,0	475,9	2,441	3,95
JSI121		1162,8	687,6	475,2	2,447	3,74
JSI122		1164,7	688,5	476,2	2,446	3,78
JSI123		1163,8	689,3	474,5	2,453	3,51
JSI124		1170,4	691,0	479,4	2,441	3,96

Tabela D.11 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 2% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	Dap	Vv (%)
JSI125	0	1142,3	667,2	475,1	2,404	3,69
JSI126		1152,6	675,1	477,5	2,414	3,31
JSI127		1151,5	672,4	479,1	2,403	3,73
JSI128		1145,5	669,0	476,5	2,404	3,71
JSI129		1143,8	668,0	475,8	2,404	3,71
JSI130		1144,4	668,5	475,9	2,405	3,68
JSI131		1141,7	667,6	474,1	2,408	3,54
JSI132		1146,7	664,8	481,9	2,380	4,69
JSI133		1140,9	664,5	476,4	2,395	4,07
JSI134		1144,0	666,9	477,1	2,398	3,95
JSI135		1145,6	667,9	477,7	2,398	3,94
JSI136		1143,2	665,3	477,9	2,392	4,18
JSI137		1142,7	668,8	473,9	2,411	3,42
JSI138		1140,0	667,9	472,1	2,415	3,28
JSI139	2	1150,1	670,7	479,4	2,399	3,90
JSI140		1157,8	675,6	482,2	2,401	3,82
JSI141		1152,0	672,2	479,8	2,401	3,83
JSI142		1159,9	676,6	483,3	2,400	3,87
JSI143		1152,1	671,2	480,9	2,396	4,04
JSI144		1151,4	670,5	480,9	2,394	4,10
JSI145		1148,3	669,7	478,6	2,399	3,89
JSI146		1158,2	675,9	482,3	2,401	3,81
JSI147		1155,2	673,9	481,3	2,400	3,86
JSI148		1151,6	671,5	480,1	2,399	3,92
JSI149		1152,4	670,2	482,2	2,390	4,27
JSI150		1146,8	669,7	477,1	2,404	3,72
JSI151		1147,6	667,5	480,1	2,390	4,25
JSI152		1152,7	672,9	479,8	2,402	3,77
JSI153	4	1152,3	670,9	481,4	2,394	4,12
JSI154		1150,9	669,1	481,8	2,389	4,32
JSI155		1151,9	670,2	481,7	2,391	4,21
JSI156		1155,9	673,4	482,5	2,396	4,04
JSI157		1146,4	665,3	481,1	2,383	4,55
JSI158		1147,4	668,4	479,0	2,395	4,05
JSI159		1156,6	674,4	482,2	2,399	3,92
JSI160		1153,1	671,7	481,4	2,395	4,05
JSI161		1153,1	672,6	480,5	2,400	3,87
JSI162		1148,8	666,3	482,5	2,381	4,63
JSI163		1153,8	672,5	481,3	2,397	3,98
JSI164		1152,6	672,5	480,1	2,401	3,84
JSI165		1153,4	671,4	482,0	2,393	4,15
JSI166		1145,4	665,5	479,9	2,387	4,40

Tabela D.12 – Programa Experimental – Massas, volumes, densidades e Vv dos corpos-de-prova com 3% de EVA.

CP nº	Env. (h)	Massa ao ar (g)	Massa imersa (g)	Volume (cm ³)	Dap	Vv (%)
JSI167	0	1141,3	657,4	483,9	2,359	3,84
JSI168		1142,0	657,5	484,5	2,357	3,90
JSI169		1119,7	644,3	475,4	2,355	3,97
JSI170		1133,3	653,0	480,3	2,360	3,80
JSI171		1131,3	651,2	480,1	2,356	3,93
JSI172		1134,3	650,5	483,8	2,345	4,41
JSI173		1131,8	653,4	478,4	2,366	3,54
JSI174		1119,4	642,1	477,3	2,345	4,38
JSI175		1129,2	648,9	480,3	2,351	4,14
JSI176		1133,3	654,7	478,6	2,368	3,45
JSI177		1132,1	654,2	477,9	2,369	3,42
JSI178		1133,5	655,1	478,4	2,369	3,40
JSI179	2	1127,9	648,2	479,7	2,351	4,14
JSI180		1135,9	657,5	478,4	2,374	3,19
JSI181		1153,4	664,8	488,6	2,361	3,75
JSI182		1149,2	661,9	487,3	2,358	3,85
JSI183		1151,8	662,1	489,7	2,352	4,10
JSI184		1154,2	664,4	489,8	2,356	3,92
JSI185		1154,1	664,8	489,3	2,359	3,83
JSI186		1148,0	661,4	486,6	2,359	3,81
JSI187		1147,3	662,0	485,3	2,364	3,61
JSI188		1148,3	660,5	487,8	2,354	4,02
JSI189		1147,2	660,3	486,9	2,356	3,94
JSI190		1150,4	661,4	489,0	2,353	4,08
JSI191	4	1150,3	662,5	487,8	2,358	3,85
JSI192		1149,9	662,6	487,3	2,360	3,79
JSI193		1154,8	663,5	491,3	2,350	4,17
JSI194		1149,6	663,1	486,5	2,363	3,66
JSI195		1153,7	661,5	492,2	2,344	4,43
JSI196		1153,5	661,5	492,0	2,345	4,41
JSI197		1151,1	663,6	487,5	2,361	3,73
JSI198		1151,1	660,1	491,0	2,344	4,41
JSI199		1154,5	662,0	492,5	2,344	4,42
JSI200		1158,2	665,7	492,5	2,352	4,12
JSI201		1153,5	663,9	489,6	2,356	3,94
JSI202		1158,4	658,8	499,6	2,319	5,46
JSI203	4	1154,0	660,4	493,6	2,338	4,68
JSI204		1154,7	662,1	492,6	2,344	4,43
JSI205		1154,2	662,1	492,1	2,345	4,37
JSI206		1154,7	661,9	492,8	2,343	4,47
JSI207		1154,0	662,6	491,4	2,348	4,25
JSI208		1154,3	667,3	487,0	2,370	3,36

APÊNDICE E

Ensaaios Exploratórios

A seguir são apresentados os cálculos de resistência à tração para o corpo-de-prova JSI025 como exemplo. Os demais corpos-de-prova ensaiados foram calculados analogamente.

Leitura no anel de carga : 25,70

Constante de anel de carga : 45,50 kgf

Diâmetro do corpo-de-prova : 10,17 cm

Altura de corpo-de-prova : 5,98 cm

Carga aplicada = 25,70 x 45,50 = 1169,35 kgf

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} = \frac{2 \times 1169,35}{3,14 \times 10,17 \times 5,98}$$

$$RT = 12,25 \frac{kg}{cm^2} = 1,225 MPa$$

Os módulos de resiliência foram calculados através da média do módulo total de cada pulso do ensaio. A Tabela E1 apresenta os resultados dos ensaios exploratórios.

Tabela E.1 – Ensaios Exploratórios – Resultado dos ensaios.

CP nº	Teor de EVA (%)	RT (MPa)	RT médio (MPa)	MR (MPa)	MR médio (MPa)	MR/RT	MR/RT médio
JSI025	2,5	1,225	1,228	6067	6033	4953	4914
JSI026		1,228		5985		4874	
JSI027		1,239		6184		4991	
JSI028		1,218		5895		4840	
JSI029	5,0	1,142	1,142	6708	6686	5874	5856
JSI030		1,150		6838		5946	
JSI031		1,138		6540		5747	
JSI032		1,136		6658		5861	
JSI033	7,5	1,039	1,066	6494	6585	6250	6180
JSI034		1,075		6594		6134	
JSI035		1,078		6682		6199	
JSI036		1,070		6568		6138	
JSI037	10,0	0,980	0,972	2956	3013	3016	3102
JSI038		0,988		2977		3013	
JSI039		0,965		3019		3128	
JSI040		0,953		3098		3251	

APÊNDICE F

Módulos de Resiliência por Compressão Diametral

F.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral foi realizado nos 184 corpos-de-prova que correspondem aos ensaios exploratórios e ao programa experimental. As Tabelas F.1 a F.12 apresentam os dados dos ensaios de módulo de resiliência total, ensaios de módulo de resiliência instantâneo, carga de ensaio e desvios padrão de cada ensaio do programa experimental.

Tabela F.1 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI041	7983,08	346,94	8509,36	270,09	114,70	1,67
JSI042	7136,42	153,38	7772,41	170,24	144,82	1,94
JSI043	6815,77	279,09	7228,96	226,12	122,90	1,50
JSI044	8210,82	205,04	9154,93	253,61	154,75	1,62
JSI045	8690,82	378,28	9429,07	324,84	150,87	1,35
JSI046	7529,12	239,74	8353,22	226,75	147,09	1,20
JSI047	7115,35	188,89	7698,05	335,61	148,85	1,53
JSI048	6737,09	166,21	7449,72	153,51	123,71	1,81
JSI049	7266,03	260,02	7970,07	419,38	127,34	1,32
JSI050	6218,98	205,52	6763,08	354,13	119,63	1,81
JSI051	7678,24	219,84	8275,09	270,18	143,92	1,93
JSI052	7375,87	175,65	7929,48	249,96	140,75	1,44
JSI053	7856,94	278,09	8459,67	215,28	145,23	1,51
JSI054	7438,56	197,45	8098,43	310,97	141,55	1,49

Tabela F.2 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI055	6814,85	315,91	7658,16	255,34	153,46	1,57
JSI056	7582,34	289,67	8561,74	310,77	150,73	1,43
JSI057	7209,43	364,38	8001,46	351,28	155,64	1,87
JSI058	6706,48	199,99	7754,25	329,12	147,33	2,01
JSI059	8238,39	377,86	9218,09	270,29	140,98	1,38
JSI060	7401,27	180,25	7898,59	710,28	141,71	1,56
JSI061	8694,67	485,41	9663,49	671,85	157,26	1,45
JSI062	6801,36	252,95	7512,64	403,30	114,34	1,78
JSI063	7699,62	326,57	8782,94	417,57	158,84	2,42
JSI064	8090,71	269,94	8986,45	335,52	154,1	1,22
JSI065	8111,07	343,94	9288,50	308,26	159,42	1,35
JSI066	6847,83	252,12	7462,05	366,23	148,54	2,26
JSI067	7759,83	247,87	8421,84	357,18	156,37	2,10
JSI068	7550,12	269,54	8291,75	452,68	154,78	1,67

Tabela F.3 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI069	9168,62	410,80	9669,77	306,27	167,13	1,55
JSI070	7206,69	143,11	7773,93	206,21	151,63	3,18
JSI071	7877,04	283,48	8491,19	252,14	130,17	1,18
JSI072	8299,10	294,75	9129,58	231,25	167,15	3,37
JSI073	6694,08	173,79	7365,62	205,47	158,95	4,24
JSI074	7551,57	561,78	8254,02	343,36	145,59	4,21
JSI075	7423,76	298,15	8549,29	296,48	132,26	1,34
JSI076	7274,30	324,53	8415,89	252,09	143,53	1,47
JSI077	6959,68	229,47	7650,35	171,25	172,61	3,23
JSI078	7921,10	328,32	8614,33	228,06	136,29	2,18
JSI079	7276,69	350,48	8366,28	288,10	160,53	2,52
JSI080	8623,24	339,31	9330,44	240,78	149,28	2,08
JSI081	7354,87	326,48	7948,37	254,86	154,58	1,98
JSI082	7265,42	314,95	7898,14	247,24	152,73	2,45

Tabela F.4 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI083	4988,99	214,07	5218,44	187,07	93,52	1,47
JSI084	5503,03	199,91	5758,13	176,40	105,86	1,09
JSI085	5225,54	164,28	5224,76	353,89	99,17	1,46
JSI086	5659,53	185,60	5877,35	408,98	92,50	1,58
JSI087	6151,32	118,72	6473,54	146,03	122,25	1,29
JSI088	5741,24	197,52	5748,62	615,30	96,16	1,65
JSI089	4967,35	193,04	5219,17	266,62	85,68	2,94
JSI090	4974,33	190,92	5236,77	428,09	89,28	2,96
JSI091	7020,52	207,55	7072,07	587,16	102,23	1,21
JSI092	6815,60	247,57	7052,69	156,01	105,88	2,24
JSI093	5968,77	184,57	6128,67	257,94	115,27	1,47
JSI094	5425,80	187,29	5682,31	310,75	110,43	1,68
JSI095	4789,57	190,96	5121,62	338,28	96,48	1,60
JSI096	6219,38	228,41	7770,22	473,27	125,01	1,55

Tabela F.5 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI097	5856,50	249,18	6421,06	329,74	105,59	1,33
JSI098	6058,54	174,55	6339,28	377,50	118,78	2,34
JSI099	5496,46	127,98	5963,62	306,88	90,55	1,79
JSI100	5930,70	258,49	6332,82	179,10	109,18	1,22
JSI101	5489,99	173,35	5935,68	151,37	112,69	2,02
JSI102	6220,88	218,65	6266,61	403,99	115,79	1,65
JSI103	5256,21	175,70	5699,20	202,67	119,25	1,41
JSI104	6151,49	258,27	6548,58	642,58	122,35	1,50
JSI105	5055,10	141,30	5592,05	117,92	101,21	1,26
JSI106	6106,79	183,95	6447,38	243,32	120,04	1,25
JSI107	6138,50	194,37	6473,18	348,29	98,54	1,54
JSI108	6015,78	181,51	6391,74	405,37	124,36	1,66
JSI109	6117,63	172,13	6442,06	449,64	122,71	1,93
JSI110	6615,52	253,82	7269,78	279,95	128,45	2,25

Tabela F.6 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI111	6776,01	718,28	7315,81	647,29	114,71	2,05
JSI112	9686,47	518,09	10272,13	767,66	141,79	1,33
JSI113	8219,36	246,80	8899,86	734,20	155,16	2,33
JSI114	6282,27	322,07	7007,41	202,48	127,63	1,41
JSI115	8458,92	222,74	9000,65	596,36	145,36	3,39
JSI116	7330,63	474,35	8222,51	323,86	131,67	2,03
JSI117	7442,12	261,27	8077,48	609,68	140,97	1,73
JSI118	8606,01	249,40	9592,43	743,99	182,32	3,01
JSI119	7677,23	414,69	8614,34	240,79	173,18	1,17
JSI120	9184,20	417,01	9751,43	759,41	169,45	1,55
JSI121	8167,33	387,46	8739,41	455,98	179,36	1,46
JSI122	8859,47	284,39	9455,29	331,99	141,85	1,20
JSI123	8249,08	325,78	9201,26	229,66	145,55	1,27
JSI124	6799,48	311,54	7476,90	204,53	144,49	1,50

Tabela F.7 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI125	4588,05	181,66	4894,35	359,92	82,18	1,43
JSI126	5357,41	218,73	5842,70	450,05	83,87	1,38
JSI127	5508,68	308,44	6177,34	554,61	99,15	1,37
JSI128	5045,96	209,16	5360,79	346,15	95,70	1,60
JSI129	5412,25	219,67	5880,52	147,18	94,85	1,28
JSI130	4513,82	231,35	4605,46	255,41	95,96	2,36
JSI131	5519,21	176,07	5643,44	225,97	94,03	1,70
JSI132	4912,39	176,41	5587,47	264,00	97,36	1,61
JSI133	4687,41	212,96	5032,56	320,06	99,28	2,03
JSI134	4352,27	179,43	4848,23	440,06	82,43	1,32
JSI135	5212,87	205,37	5739,01	146,76	100,77	2,98
JSI136	4587,63	217,18	5095,96	325,88	96,79	1,62
JSI137	5570,95	210,10	5968,31	264,12	84,65	1,54
JSI138	5720,41	215,51	5932,97	475,71	99,68	1,63

Tabela F.8 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI139	6525,70	221,00	6851,63	371,57	96,27	1,38
JSI140	7049,11	166,61	7644,09	524,45	118,80	1,42
JSI141	6814,57	271,60	7063,29	496,28	102,91	1,41
JSI142	6141,43	236,57	6848,41	414,95	107,41	1,79
JSI143	6887,16	196,17	7284,82	683,60	119,35	1,19
JSI144	7185,04	348,44	7993,82	385,28	129,16	1,48
JSI145	6113,41	185,78	6443,88	530,57	120,69	1,51
JSI146	7160,08	180,57	7996,83	424,99	146,17	1,41
JSI147	6668,71	199,30	6749,10	358,95	133,52	1,40
JSI148	6954,76	210,87	7329,68	394,71	116,84	1,25
JSI149	7084,69	178,34	7445,92	388,52	119,36	1,57
JSI150	7084,56	169,44	7494,36	410,75	142,57	1,37
JSI151	6123,25	213,44	6712,84	417,23	126,02	1,42
JSI152	7166,80	283,92	7834,09	610,06	127,47	1,38

Tabela F.9 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI153	5893,35	203,41	6320,20	399,36	121,77	1,45
JSI154	5876,50	241,82	6430,53	416,71	112,76	1,65
JSI155	6112,04	133,99	6772,98	308,73	122,01	1,01
JSI156	6319,54	250,23	6719,60	221,80	114,52	1,41
JSI157	5897,76	208,17	6365,16	303,51	120,53	1,81
JSI158	6975,31	218,59	7205,12	472,19	137,41	1,52
JSI159	5897,78	199,98	6521,70	317,45	124,65	1,63
JSI160	5641,20	272,03	6346,39	218,06	126,35	1,32
JSI161	7371,94	244,05	7802,68	417,32	122,36	1,72
JSI162	6648,93	235,16	7017,77	229,69	142,74	3,63
JSI163	4843,56	66,12	5508,66	89,73	216,07	2,01
JSI164	5963,78	199,64	6381,29	267,91	115,35	1,59
JSI165	5958,56	238,33	6495,19	400,89	113,48	1,44
JSI166	5361,56	254,19	6123,53	191,28	102,67	1,73

Tabela F.10 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI167	3742,45	160,09	4185,47	359,92	60,63	1,00
JSI168	2321,16	73,65	2487,58	162,04	56,52	1,43
JSI169	2991,90	110,50	3109,46	223,50	58,35	1,32
JSI170	2515,70	91,23	2637,31	154,09	50,56	1,22
JSI171	3288,75	132,40	3488,21	333,77	53,91	1,82
JSI172	3050,21	85,48	3343,18	84,66	79,82	1,60
JSI173	3296,17	505,99	3421,74	191,24	57,72	1,24
JSI174	3613,22	245,55	3628,40	290,43	77,02	1,91
JSI175	3569,09	139,80	3768,88	193,38	65,97	1,56
JSI176	2668,47	77,75	2819,18	145,44	55,66	1,29
JSI177	3126,54	89,64	3368,37	154,67	71,25	1,11
JSI178	3265,45	76,17	3599,75	147,59	58,69	1,36
JSI179	3156,56	78,27	3303,38	111,09	70,56	1,08
JSI180	3350,76	157,74	3482,47	190,56	74,45	1,65

Tabela F.11 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI181	4943,30	288,35	5078,02	357,81	85,55	1,18
JSI182	3504,18	115,21	3735,06	231,58	73,60	1,31
JSI183	4362,17	108,93	4562,50	202,77	78,87	1,17
JSI184	3730,53	105,33	4035,52	328,84	83,99	1,36
JSI185	3511,39	101,15	3860,97	97,11	77,15	1,26
JSI186	4525,08	135,13	4827,16	349,12	81,79	1,09
JSI187	4043,87	115,80	4243,39	253,37	81,53	1,32
JSI188	4922,90	159,77	5319,73	373,95	89,67	1,47
JSI189	4429,00	72,86	4551,39	303,03	88,11	1,18
JSI190	5128,96	135,61	5788,56	337,02	85,69	1,33
JSI191	4459,86	141,74	4667,28	348,15	76,21	1,21
JSI192	4654,89	158,32	4900,01	391,46	80,46	1,15
JSI193	4423,85	336,01	4941,82	555,09	81,73	1,41
JSI194	4280,69	99,76	4631,42	229,85	79,76	1,30

Tabela F.12 – Programa experimental – Dados do ensaio de MR para 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _{total} (MPa)	Desvio Padrão MR _{total} (MPa)	MR _{inst.} (MPa)	Desvio Padrão MR _{inst.} (MPa)	Carga (kgf)	Desvio Padrão Carga (kgf)
JSI195	4439,78	179,41	4757,80	293,26	97,58	1,06
JSI196	5256,30	133,67	5512,93	450,37	101,43	0,98
JSI197	4793,53	131,62	5159,14	364,27	88,75	1,15
JSI198	3960,27	157,51	4496,03	130,88	85,67	0,98
JSI199	4205,17	165,15	4712,30	195,24	85,80	1,36
JSI200	4012,23	101,99	4352,23	203,84	77,19	1,37
JSI201	3869,30	108,35	4400,04	292,97	83,43	1,12
JSI202	3700,25	107,93	3951,06	477,60	86,23	1,17
JSI203	5099,74	196,16	5554,87	386,78	99,79	1,19
JSI204	4804,84	215,70	5362,91	361,32	99,18	0,94
JSI205	4354,83	146,82	4875,14	268,43	95,61	0,99
JSI206	4651,29	137,43	5029,84	218,49	96,22	1,11
JSI207	4279,16	121,12	4621,02	338,24	88,40	1,24
JSI208	4625,24	248,35	5193,47	404,62	96,58	0,98

F.2. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os dados relativos aos módulos totais do programa experimental são apresentados nas Tabelas F.13 a F.24, estas que apresentam, também, as médias e os desvios padrão antes e depois de ser aplicado o teste t com significância de 0,95.

Número de amostras para cada condição experimental: 14

Intervalo de confiança: 0,95

} t = 2,16

Após a Tabela F.13 estão apresentados os cálculos para a condição 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento, e para as outras condições experimentais os cálculos foram análogos.

Tabela F.13 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				7064 ← → 7801		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (Mpa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI041	7983	7432	638	-	7363	206
JSI042	7136			7136		
JSI043	6816			-		
JSI044	8211			-		
JSI045	8691			-		
JSI046	7529			7529		
JSI047	7115			7115		
JSI048	6737			-		
JSI049	7266			7266		
JSI050	6219			-		
JSI051	7678			7678		
JSI052	7376			7376		
JSI053	7857			-		
JSI054	7439			7439		

A seguir é apresentado o método utilizado para determinar o intervalo de confiança para a condição experimental 0% de EVA e 0 horas de envelhecimento.

$$EE_{DP,0-0} = \frac{DP_i}{\sqrt{n}} = \frac{638}{\sqrt{14}}$$

$$EE_{DP,0-0} = 171$$

Intervalo de confiança:

$$L_{menor_{0-0}} = MR_{i,médio} - t \times EE_{DP,0-0} = 7432 - 2,16 \times 171$$

$$L_{menor_{0-0}} = 7064 MPa$$

$$L_{maior_{0-0}} = MR_{i,médio} + t \times EE_{DP,0-0} = 7432 + 2,16 \times 171$$

$$L_{maior_{0-0}} = 7801 MPa$$

em que:

$EE_{DP,0-0}$: estimativa de erro do desvio padrão (MPa);

DP_i : desvio padrão inicial (MPa);

n : número de amostras analisadas;

$L_{infr_{0-0}}$: limite inferior (MPa);

$L_{sup_{0-0}}$: limite superior (MPa);

$MR_{i,médio}$: MR médio antes do tratamento estatístico (MPa);

$MR_{f,médio}$: MR médio após o tratamento estatístico (MPa);

t : fator multiplicativo tabelado.

Tabela F.14 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				7182 ← → 7891		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI055	6815	7536	614	-	7534	202
JSI056	7582			7582		
JSI057	7209			7209		
JSI058	6706			-		
JSI059	8238			-		
JSI060	7401			7401		
JSI061	8695			-		
JSI062	6801			-		
JSI063	7700			7700		
JSI064	8091			-		
JSI065	8111			-		
JSI066	6848			-		
JSI067	7760			7760		
JSI068	7550			7550		

Tabela F.15 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				7245 ← → 8026		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI069	9169	7635	677	-	7493	268
JSI070	7207			-		
JSI071	7877			7877		
JSI072	8299			-		
JSI073	6694			-		
JSI074	7552			7552		
JSI075	7424			7424		
JSI076	7274			7274		
JSI077	6960			-		
JSI078	7921			7921		
JSI079	7277			7277		
JSI080	8623			-		
JSI081	7355			7355		
JSI082	7265			7265		

Tabela F.16 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				5274 ← → 6076		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI083	4989	5675	694	-	5660	213
JSI084	5503			5503		
JSI085	5226			-		
JSI086	5660			5660		
JSI087	6151			-		
JSI088	5741			5741		
JSI089	4967			-		
JSI090	4974			-		
JSI091	7021			-		
JSI092	6816			-		
JSI093	5969			5969		
JSI094	5426			5426		
JSI095	4790			-		
JSI096	6219			-		

Tabela F.17 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				5649 ← → 6138		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI097	5856	5894	423	5856	6014	103
JSI098	6059			6059		
JSI099	5496			-		
JSI100	5931			5931		
JSI101	5490			-		
JSI102	6221			-		
JSI103	5256			-		
JSI104	6151			-		
JSI105	5055			-		
JSI106	6107			6107		
JSI107	6138			-		
JSI108	6016			6016		
JSI109	6118			6118		
JSI110	6616			5856		

Tabela F.18 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 1% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				7416 ← → 8546		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI111	6776	7982	979	-	8036	389
JSI112	9686			-		
JSI113	8219			8219		
JSI114	6282			-		
JSI115	8459			8459		
JSI116	7331			-		
JSI117	7442			7442		
JSI118	8606			-		
JSI119	7677			7677		
JSI120	9184			-		
JSI121	8167			8167		
JSI122	8859			-		
JSI123	8249			8249		
JSI124	6799			-		

Tabela F.19 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				4805 ← → 5336		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI125	4588	5071	460	-	5057	151
JSI126	5357			-		
JSI127	5509			-		
JSI128	5046			5046		
JSI129	5412			-		
JSI130	4514			-		
JSI131	5519			-		
JSI132	4912			4912		
JSI133	4687			-		
JSI134	4352			-		
JSI135	5213			5213		
JSI136	4588			-		
JSI137	5571			-		
JSI138	5720			-		

Tabela F.20 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				6550 ← → 7016		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI139	6526	6783	404	-	6831	123
JSI140	7049			-		
JSI141	6815			6815		
JSI142	6141			-		
JSI143	6887			6887		
JSI144	7185			-		
JSI145	6113			-		
JSI146	7160			-		
JSI147	6669			6669		
JSI148	6955			6955		
JSI149	7085			-		
JSI150	7085			-		
JSI151	6123			-		
JSI152	7167			-		

Tabela F.21 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 2% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				5689 ← → 6421		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI153	5893	6054	636	5893	5990	153
JSI154	5877			5877		
JSI155	6112			6112		
JSI156	6320			6320		
JSI157	5898			5898		
JSI158	6975			-		
JSI159	5898			5898		
JSI160	5641			-		
JSI161	7372			-		
JSI162	6649			-		
JSI163	4844			-		
JSI164	5964			5964		
JSI165	5959			5959		
JSI166	5362			5893		

Tabela F.22 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 0 hora de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				2903 ← → 3377		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI167	3742	3140	411	-	3191	129
JSI168	2321			-		
JSI169	2992			2992		
JSI170	2516			-		
JSI171	3289			3289		
JSI172	3050			3050		
JSI173	3296			3296		
JSI174	3613			-		
JSI175	3569			-		
JSI176	2668			-		
JSI177	3127			3127		
JSI178	3265			3265		
JSI179	3157			3157		
JSI180	3351			3351		

Tabela F.23 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 2 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				4059 ← → 4644		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI181	4943	4351	507	-	4413	84
JSI182	3504			-		
JSI183	4362			4362		
JSI184	3731			-		
JSI185	3511			-		
JSI186	4525			4525		
JSI187	4044			-		
JSI188	4923			-		
JSI189	4429			4429		
JSI190	5129			-		
JSI191	4460			4460		
JSI192	4655			-		
JSI193	4424			4424		
JSI194	4281			4281		

Tabela F.24 – Programa experimental – Tratamento estatístico para o ensaio de MR em corpos-de-prova com 3% de EVA e 4 horas de envelhecimento.

CP nº	MR _i (MPa)	MR _{i,médio} (MPa)	Desvio Padrão Inicial da Média (MPa)	Intervalo Significante		
				4164 ← → 4701		
				MR _f (MPa)	MR _{f,médio} (MPa)	Desvio Padrão Final (MPa)
JSI195	4440	4432	465	4440	4426	182
JSI196	5256			-		
JSI197	4794			-		
JSI198	3960			-		
JSI199	4205			4205		
JSI200	4012			-		
JSI201	3869			-		
JSI202	3700			-		
JSI203	5100			-		
JSI204	4805			-		
JSI205	4355			4355		
JSI206	4651			4651		
JSI207	4279			4279		
JSI208	4625			4625		

APÊNDICE G

Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática

Na Tabela G.1 estão apresentados os dados referentes aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral. A *Leitura no Anel* refere-se aos valores lidos na célula de carga, que tem uma constante de carga de 45,5 kg. Após a tabela estão demonstrados como foram feitos os cálculos através de um exemplo com os dados do corpo-de-prova JSI043.

Diâmetro do corpo-de-prova : 10,16 cm

Altura de corpo-de-prova : 5,88 cm

Leitura no anel de carga : 25,40

Constante de anel de carga : 45,50 kgf

Carga real aplicada = 25,40 x 45,50 = 1155,70 kgf

$$RT_{JSI043} = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} = \frac{2 \times 1155,70}{3,14 \times 10,16 \times 5,88}$$

$$RT_{JSI043} = 12,33 \frac{kg}{cm^2} = 1,233 MPa$$

Para os demais corpos-de-prova os cálculos foram análogos.

Tabela G.1 – Programa Experimental – Dados do ensaio de RT.

CP nº	EVA (%)	Env. (h)	Leitura no Anel	Carga Real (kgf)	RT (MPa)	RT média (MPa)	Desvio Padrão	
							(MPa)	(%)
JSI043	0	0	25,40	1155,70	1,233	1,234	0,001	0,09
JSI045			25,60	1164,80	1,235			
JSI054			25,50	1160,25	1,233			
JSI057		2	26,10	1187,55	1,254	1,255	0,010	0,83
JSI058			26,80	1219,40	1,266			
JSI068			26,30	1196,65	1,246			
JSI073		4	26,20	1192,10	1,228	1,289	0,055	4,30
JSI075			28,30	1287,65	1,336			
JSI082			27,60	1255,80	1,304			
JSI085	1	0	20,50	932,75	0,988	1,036	0,047	4,50
JSI094			21,60	982,80	1,040			
JSI096			22,50	1023,75	1,081			
JSI104		2	25,60	1164,80	1,231	1,211	0,017	1,43
JSI107			25,10	1142,05	1,203			
JSI109			24,70	1123,85	1,199			
JSI115		4	25,40	1155,70	1,209	1,268	0,059	4,66
JSI120			27,70	1260,35	1,327			
JSI122			26,50	1205,75	1,269			
JSI133	2	0	20,00	910,00	0,953	0,946	0,006	0,67
JSI134			19,60	891,80	0,941			
JSI136			19,90	905,45	0,945			
JSI142		2	22,70	1032,85	1,079	1,103	0,023	2,09
JSI144			23,80	1082,90	1,125			
JSI148			23,20	1055,60	1,103			
JSI159		4	25,60	1164,80	1,223	1,240	0,015	1,23
JSI164			26,30	1196,65	1,253			
JSI165			26,20	1192,10	1,243			
JSI168	3	0	17,20	782,60	0,779	0,825	0,054	6,57
JSI175			18,90	859,95	0,885			
JSI177			17,70	805,35	0,813			
JSI187		2	21,50	978,25	1,024	1,048	0,021	1,97
JSI191			22,60	1028,30	1,062			
JSI193			22,50	1023,75	1,058			
JSI200		4	23,10	1051,05	1,083	1,119	0,040	3,58
JSI203			24,80	1128,40	1,162			
JSI206			23,70	1078,35	1,113			

APÊNDICE H

Fluência por Compressão Uniaxial Estática

A deformação total (ϵ_{total}), a deformação recuperável ($\epsilon_{\text{recuperável}}$), a inclinação da curva e a tensão (T) são parâmetros lidos no ensaio. A seguir são demonstrados os cálculos para a determinação da deformação permanente, da recuperação, do módulo de fluência aos 3600 segundos e aos 4500 segundos. Os dados estão com aproximação, por esse motivo podem diferir em algum momento.

$$MF(MPa) = \frac{T}{10 \times \epsilon_{\text{permanente}}} = \frac{3,98}{10 \times 0,00017}$$

$$MF = 2249,46 MPa$$

O ensaio de fluência por compressão uniaxial estática foi realizado em 36 corpos-de-prova, sendo 3 corpos-de-prova por condição experimental e as Tabelas H.1 a H.7 apresentam os dados dos ensaios.

Tabela H.1 – Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,00214	0,00284
		JSI051	0,00182	0,00158
		JSI053	0,00203	0,00215
	2	JSI055	0,00187	0,00259
		JSI056	0,00164	0,00289
		JSI067	0,00172	0,00271
	4	JSI069	0,00252	0,00233
		JSI074	0,00226	0,00272
		JSI081	0,00229	0,00274
1	0	JSI084	0,00500	0,00592
		JSI090	0,00655	0,00328
		JSI093	0,00490	0,00370
	2	JSI099	0,00496	0,00570
		JSI106	0,00245	0,00745
		JSI108	0,00366	0,00265
	4	JSI112	0,00328	0,00321
		JSI121	0,00377	0,00315
		JSI123	0,00387	0,00332
2	0	JSI128	0,00808	0,00830
		JSI135	0,00780	0,00657
		JSI138	0,00860	0,00870
	2	JSI139	0,00903	0,00450
		JSI149	0,01029	0,00425
		JSI151	0,00698	0,01086
	4	JSI154	0,00545	0,00458
		JSI157	0,00955	0,00647
		JSI163	0,00936	0,00487
3	0	JSI167	0,00824	0,00808
		JSI170	0,01400	0,01250
		JSI178	0,01370	0,01373
	2	JSI182	0,01068	0,00519
		JSI188	0,01036	0,01300
		JSI192	0,01279	0,01108
	4	JSI196	0,01105	0,00932
		JSI202	0,00915	0,00744
		JSI205	0,01010	0,00975

Tabela H.2 – Programa experimental – Deformações recuperáveis medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,00174	0,00207
		JSI051	0,00164	0,00141
		JSI053	0,00161	0,00207
	2	JSI055	0,00156	0,00198
		JSI056	0,00134	0,00270
		JSI067	0,00138	0,00218
	4	JSI069	0,00227	0,00174
		JSI074	0,00197	0,00194
		JSI081	0,00184	0,00223
1	0	JSI084	0,00386	0,00537
		JSI090	0,00580	0,00278
		JSI093	0,00409	0,00333
	2	JSI099	0,00454	0,00478
		JSI106	0,00205	0,00628
		JSI108	0,00299	0,00219
	4	JSI112	0,00275	0,00292
		JSI121	0,00310	0,00240
		JSI123	0,00299	0,00303
2	0	JSI128	0,00689	0,00780
		JSI135	0,00649	0,00599
		JSI138	0,00695	0,00826
	2	JSI139	0,00810	0,00397
		JSI149	0,00904	0,00373
		JSI151	0,00564	0,00975
	4	JSI154	0,00455	0,00376
		JSI157	0,00826	0,00546
		JSI163	0,00828	0,00429
3	0	JSI167	0,00649	0,00650
		JSI170	0,01312	0,01046
		JSI178	0,01283	0,01234
	2	JSI182	0,00822	0,00463
		JSI188	0,00922	0,01144
		JSI192	0,01116	0,00952
	4	JSI196	0,00902	0,00764
		JSI202	0,00808	0,00645
		JSI205	0,00857	0,00801

Tabela H.3 – Programa experimental – Deformações permanente medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,00040	0,00077
		JSI051	0,00018	0,00016
		JSI053	0,00042	0,00008
	2	JSI055	0,00031	0,00061
		JSI056	0,00030	0,00018
		JSI067	0,00034	0,00053
	4	JSI069	0,00025	0,00059
		JSI074	0,00029	0,00078
		JSI081	0,00044	0,00051
1	0	JSI084	0,00114	0,00055
		JSI090	0,00075	0,00050
		JSI093	0,00081	0,00037
	2	JSI099	0,00042	0,00092
		JSI106	0,00040	0,00117
		JSI108	0,00067	0,00046
	4	JSI112	0,00053	0,00029
		JSI121	0,00067	0,00075
		JSI123	0,00088	0,00029
2	0	JSI128	0,00119	0,00050
		JSI135	0,00131	0,00058
		JSI138	0,00165	0,00044
	2	JSI139	0,00093	0,00053
		JSI149	0,00125	0,00052
		JSI151	0,00134	0,00111
	4	JSI154	0,00090	0,00082
		JSI157	0,00129	0,00101
		JSI163	0,00108	0,00058
3	0	JSI167	0,00175	0,00158
		JSI170	0,00088	0,00204
		JSI178	0,00087	0,00139
	2	JSI182	0,00246	0,00056
		JSI188	0,00114	0,00156
		JSI192	0,00163	0,00156
	4	JSI196	0,00203	0,00168
		JSI202	0,00107	0,00099
		JSI205	0,00153	0,00174

Tabela H.4 – Programa experimental – Recuperações medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	81,31%	72,89%
		JSI051	90,11%	89,24%
		JSI053	79,31%	96,28%
	2	JSI055	83,42%	76,45%
		JSI056	81,71%	93,43%
		JSI067	80,23%	80,44%
	4	JSI069	90,08%	74,68%
		JSI074	87,17%	71,32%
		JSI081	80,35%	81,39%
1	0	JSI084	77,20%	90,71%
		JSI090	88,55%	84,76%
		JSI093	83,47%	90,00%
	2	JSI099	91,53%	83,86%
		JSI106	83,67%	84,30%
		JSI108	81,69%	82,64%
	4	JSI112	83,84%	90,97%
		JSI121	82,23%	76,19%
		JSI123	77,26%	91,27%
2	0	JSI128	85,27%	93,98%
		JSI135	83,21%	91,17%
		JSI138	80,81%	94,94%
	2	JSI139	89,71%	88,22%
		JSI149	87,85%	87,76%
		JSI151	80,80%	89,78%
	4	JSI154	83,49%	82,10%
		JSI157	86,49%	84,39%
		JSI163	88,46%	88,09%
3	0	JSI167	78,76%	80,45%
		JSI170	93,71%	83,68%
		JSI178	93,65%	89,88%
	2	JSI182	76,97%	89,21%
		JSI188	89,00%	88,00%
		JSI192	87,26%	85,92%
	4	JSI196	81,63%	81,97%
		JSI202	88,31%	86,69%
		JSI205	84,85%	82,15%

Tabela H.5 – Programa experimental – Módulo de fluência em MPa medidos aos 3600 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	185,83	140,04
		JSI051	211,80	243,65
		JSI053	197,72	186,32
	2	JSI055	214,25	154,74
		JSI056	235,06	133,89
		JSI067	231,40	146,86
	4	JSI069	164,85	177,80
		JSI074	170,95	142,37
		JSI081	175,57	146,59
1	0	JSI084	78,80	66,55
		JSI090	61,22	122,26
		JSI093	80,00	105,95
	2	JSI099	78,83	68,60
		JSI106	162,86	53,56
		JSI108	107,65	148,68
	4	JSI112	123,48	126,17
		JSI121	105,04	125,71
		JSI123	101,81	118,67
2	0	JSI128	49,01	47,71
		JSI135	51,15	60,73
		JSI138	44,42	43,91
	2	JSI139	43,85	88,00
		JSI149	38,58	93,41
		JSI151	56,73	36,46
	4	JSI154	71,19	84,72
		JSI157	41,47	61,21
		JSI163	40,92	78,64
3	0	JSI167	47,33	48,27
		JSI170	27,21	30,48
		JSI178	28,47	28,40
	2	JSI182	37,08	76,30
		JSI188	36,68	29,23
		JSI192	30,73	35,47
	4	JSI196	35,38	41,95
		JSI202	43,28	53,23
		JSI205	39,41	40,82

Tabela H.6 – Programa experimental – Módulo de fluência em MPa medidos aos 4500 segundos no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	986,16	140,04
		JSI051	2160,37	243,65
		JSI053	960,45	186,32
	2	JSI055	1301,82	154,74
		JSI056	1273,43	133,89
		JSI067	1170,59	146,86
	4	JSI069	1681,93	177,80
		JSI074	1328,56	142,37
		JSI081	904,90	146,59
1	0	JSI084	345,61	716,36
		JSI090	534,67	802,00
		JSI093	483,95	1059,46
	2	JSI099	930,95	425,00
		JSI106	997,50	341,03
		JSI108	588,06	856,52
	4	JSI112	764,15	1396,55
		JSI121	591,04	528,00
		JSI123	447,73	1358,62
2	0	JSI128	332,77	792,00
		JSI135	304,58	687,93
		JSI138	231,52	868,18
	2	JSI139	426,26	747,17
		JSI149	317,60	763,46
		JSI151	295,52	356,76
	4	JSI154	431,11	473,17
		JSI157	306,98	392,08
		JSI163	354,63	660,34
3	0	JSI167	222,86	246,84
		JSI170	432,95	186,76
		JSI178	448,28	280,58
	2	JSI182	160,98	707,14
		JSI188	333,33	243,59
		JSI192	241,10	251,92
	4	JSI196	192,61	232,74
		JSI202	370,09	400,00
		JSI205	260,13	228,74

Tabela H.7 – Programa experimental – Inclinação das curvas medidas no estágio secundário no ensaio de fluência por compressão uniaxial estática.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,0671318	0,0236098
		JSI051	0,0359211	0,0284775
		JSI053	0,0617616	0,0199706
	2	JSI055	0,0362215	0,0261207
		JSI056	0,0351581	0,0260685
		JSI067	0,0418545	0,0385846
	4	JSI069	0,0327564	0,0522735
		JSI074	0,0217209	0,0337805
		JSI081	0,0392745	0,0231666
1	0	JSI084	0,0602275	0,0113785
		JSI090	0,0483572	0,0476273
		JSI093	0,0604273	0,0302804
	2	JSI099	0,0425206	0,0389592
		JSI106	0,0329158	0,0398239
		JSI108	0,0261657	0,0489000
	4	JSI112	0,0411136	0,0332805
		JSI121	0,0378857	0,0344466
		JSI123	0,0386536	0,0352197
2	0	JSI128	0,0435576	0,0523550
		JSI135	0,0543907	0,0798149
		JSI138	0,0675716	0,0613071
	2	JSI139	0,0410886	0,0486978
		JSI149	0,0472091	0,0439448
		JSI151	0,0487740	0,0428968
	4	JSI154	0,0544968	0,0236741
		JSI157	0,0422021	0,0481164
		JSI163	0,0496250	0,0365000
3	0	JSI167	0,0835582	0,0769193
		JSI170	0,0667452	0,0763328
		JSI178	0,0875717	0,0811216
	2	JSI182	0,0822379	0,0456610
		JSI188	0,0789477	0,0556735
		JSI192	0,0573398	0,0439995
	4	JSI196	0,0671171	0,0462915
		JSI202	0,0372504	0,0470780
		JSI205	0,0663055	0,0571893

APÊNDICE I

Fluência por Compressão Uniaxial Dinâmica

A deformação total (ϵ_{total}), a inclinação da curva e a tensão (σ) são parâmetros lidos no ensaio. A seguir são demonstrados os cálculos para a determinação da do módulo de fluência. Os dados estão com aproximação, por esse motivo podem diferir em algum momento.

$$MF_{CD}(MPa) = \frac{\sigma}{10 \times \epsilon_{total}} = \frac{4,06}{10 \times 0,00665}$$

$$MF_{CD} = 62,59 MPa$$

O ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica foi realizado em 36 corpos-de-prova, sendo 3 corpos-de-prova por condição experimental e as Tabelas I.1 a I.3 apresentam os dados dos ensaios.

Tabela I.1 – Programa experimental – Deformações totais medidas no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,00910	0,00651
		JSI051	0,00645	0,00685
		JSI053	0,00908	0,00514
	2	JSI055	0,00705	0,01394
		JSI056	0,01196	0,01430
		JSI067	0,01054	0,01034
	4	JSI069	0,01149	0,01197
		JSI074	0,00539	0,00910
		JSI081	0,01085	0,00914
1	0	JSI084	0,01660	0,01397
		JSI090	0,01104	0,01721
		JSI093	0,01644	0,01439
	2	JSI099	0,01548	0,01087
		JSI106	0,00926	0,01416
		JSI108	0,01086	0,01206
	4	JSI112	0,01399	0,01338
		JSI121	0,01030	0,00967
		JSI123	0,00948	0,01375
2	0	JSI128	0,02348	0,01787
		JSI135	0,01468	0,02399
		JSI138	0,02036	0,02117
	2	JSI139	0,01057	0,01114
		JSI149	0,02584	0,02389
		JSI151	0,01101	0,02319
	4	JSI154	0,02087	0,01018
		JSI157	0,02027	0,01006
		JSI163	0,00909	0,01771
3	0	JSI167	0,02203	0,02330
		JSI170	Rompeu	Rompeu
		JSI178	Rompeu	Rompeu
	2	JSI182	0,02455	0,01785
		JSI188	0,02571	0,02376
		JSI192	0,02003	0,01904
	4	JSI196	0,02552	0,01174
		JSI202	0,02474	0,01691
		JSI205	0,02473	0,01116

Tabela I.2 – Programa experimental – Módulos de fluência, em MPa, medidos no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	44,73	62,52
		JSI051	64,48	60,69
		JSI053	44,82	81,07
	2	JSI055	59,48	30,09
		JSI056	34,62	28,93
		JSI067	38,52	39,26
	4	JSI069	36,15	34,71
		JSI074	76,98	45,60
		JSI081	37,33	44,31
1	0	JSI084	24,40	28,99
		JSI090	36,05	23,13
		JSI093	24,03	27,45
	2	JSI099	26,29	37,44
		JSI106	43,74	28,60
		JSI108	38,12	34,35
	4	JSI112	28,59	29,90
		JSI121	39,13	41,68
		JSI123	43,46	29,96
2	0	JSI128	17,07	22,43
		JSI135	27,74	16,97
		JSI138	20,12	19,35
	2	JSI139	38,58	36,62
		JSI149	15,78	17,07
		JSI151	37,33	17,73
	4	JSI154	19,26	39,49
		JSI157	20,37	41,05
		JSI163	45,54	23,38
3	0	JSI167	18,47	17,47
		JSI170	Rompeu	Rompeu
		JSI178	Rompeu	Rompeu
	2	JSI182	16,24	22,35
		JSI188	15,92	17,23
		JSI192	19,77	20,80
	4	JSI196	15,85	34,46
		JSI202	16,52	24,17
		JSI205	15,66	34,68

Tabela I.3 – Programa experimental – Inclinação das curvas medidas no estágio secundário no ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Canal	
			1	2
0	0	JSI049	0,4386049	0,4576827
		JSI051	0,3351043	0,3842287
		JSI053	0,3891336	0,3175060
	2	JSI055	0,4817249	0,5701201
		JSI056	0,5955104	0,4047618
		JSI067	0,5158468	0,4759671
	4	JSI069	0,6044564	0,5010597
		JSI074	0,5763055	0,4291037
		JSI081	0,5687414	0,4055761
	0	JSI084	0,5379688	0,5011562
		JSI090	0,4163040	0,4526530
		JSI093	0,4669890	0,5398233
1	2	JSI099	0,4703961	0,4421669
		JSI106	0,4770621	0,4334543
		JSI108	0,4503112	0,4823732
	4	JSI112	0,4219849	0,4370388
		JSI121	0,4193721	0,4257924
		JSI123	0,3966672	0,4312920
	0	JSI128	0,6229066	0,3550153
		JSI135	0,4332098	0,5401700
		JSI138	0,4738944	0,5269741
	2	JSI139	0,4881334	0,3925524
		JSI149	0,4536968	0,5251608
		JSI151	0,5975039	0,3370750
2	4	JSI154	0,5042920	0,4416574
		JSI157	0,6031042	0,2112276
		JSI163	0,3301656	0,5019895
	0	JSI167	0,6360374	0,4772065
		JSI170	Rompeu	Rompeu
		JSI178	Rompeu	Rompeu
	2	JSI182	0,6051360	0,3628961
		JSI188	0,5730907	0,3795538
		JSI192	0,5004083	0,3994782
	4	JSI196	0,5926604	0,5926604
		JSI202	0,4837655	0,4837655
		JSI205	0,5331387	0,5331387

APÊNDICE J

Desgaste por Abrasão no Ensaio Cantabro

O desgaste por abrasão medido no ensaio Cantabro foi realizado em 36 corpos-de-prova, sendo 3 corpos-de-prova por condição experimental. A Tabela J.1 apresenta os dados dos ensaios. O valor da abrasão se dá da seguinte maneira:

$$Abrasão(\%) = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \times 100 = \frac{1152,6 - 1108,7}{1152,6} \times 100$$

$$Abrasão = 3,8\%$$

Tabela J.1 – Programa experimental – Desgastes por abrasão medidos no ensaio Cantabro.

EVA (%)	Env. (h)	CP nº	Massa		Abrasão (%)
			Inicial	Final	
0	0	JSI049	1152,6	1108,7	3,8%
		JSI051	1144,1	1095,3	4,3%
		JSI053	1165,3	1111,5	4,6%
	2	JSI055	1165,2	1117,0	4,1%
		JSI056	1163,1	1112,3	4,4%
		JSI067	1168,1	1116,7	4,4%
	4	JSI069	1167,9	1119,6	4,1%
		JSI074	1168,6	1112,9	4,8%
		JSI081	1170,8	1120,0	4,3%
1	0	JSI084	1160,7	1121,6	3,4%
		JSI090	1152,1	1122,7	2,6%
		JSI093	1158,7	1119,3	3,4%
	2	JSI099	1158,9	1125,4	2,9%
		JSI106	1160,1	1117,9	3,6%
		JSI108	1158,6	1121,1	3,2%
	4	JSI112	1160,2	1119,7	3,5%
		JSI121	1162,8	1117,5	3,9%
		JSI123	1163,8	1118,7	3,9%
2	0	JSI128	1145,5	1121,4	2,1%
		JSI135	1145,6	1117,3	2,5%
		JSI138	1140,0	1119,9	1,8%
	2	JSI139	1150,1	1124,8	2,2%
		JSI149	1152,4	1125,4	2,3%
		JSI151	1147,6	1118,7	2,5%
	4	JSI154	1150,9	1116,4	3,0%
		JSI157	1146,4	1118,1	2,5%
		JSI163	1153,8	1122,8	2,7%
3	0	JSI167	1141,3	1120,6	1,8%
		JSI170	1133,3	1121,1	1,1%
		JSI178	1133,5	1119,2	1,3%
	2	JSI182	1149,2	1128,1	1,8%
		JSI188	1148,3	1126,3	1,9%
		JSI192	1149,9	1127,4	2,0%
	4	JSI196	1153,5	1127,5	2,3%
		JSI202	1158,4	1129,6	2,5%
		JSI205	1154,2	1126,4	2,4%