

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**KEYLA JUNKO CHAVES SHINOHARA**

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO LIGANTE PELO POLÍMERO  
EVA NO CONCRETO ASFÁLTICO E SUA INFLUÊNCIA NO  
DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

**Professor Orientador:  
Dr. Leto Momm**

Florianópolis - SC  
2017

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da  
Universidade Federal de Santa Catarina

xxx Shinohara, Keyla Junko Chaves

Efeito da modificação do ligante pelo polímero EVA no concreto asfáltico e sua influência no dimensionamento do pavimento [tese] / Keyla Junko Chaves Shinohara; orientador, Leto Momm - Florianópolis, SC, 2017.

xxx p.: il., grafs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Concreto asfáltico. 3. Polímero EVA. I. Momm, Leto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

xxx

**KEYLA JUNKO CHAVES SHINOHARA**

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO LIGANTE PELO POLÍMERO  
EVA NO CONCRETO ASFÁLTICO E SUA INFLUÊNCIA NO  
DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

**Professor Orientador:  
Dr. Leto Momm**

Florianópolis - SC  
2017



# **EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO LIGANTE PELO POLÍMERO EVA NO CONCRETO ASFÁLTICO E SUA INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO**

Esta tese foi julgada para a obtenção do título de DOUTORA em Engenharia, especialidade em ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Leto Momm – Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci  
Departamento de Engenharia Civil – USP

Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Departamento de Engenharia Civil – UFRGS

Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior  
Departamento de Engenharia Civil – USP-SCar

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Florianópolis - SC  
2017

*“QUANDO DEDICAMOS TODOS OS ESFORÇOS NA TAREFA  
ATUAL, ABRE-SE A PORTA DO FUTURO.  
O ser humano vem a este mundo para viver cada momento da vida com  
todas as forças. Devemos nos empenhar em aprimorar a alma,  
valorizando o passado e visualizando um futuro radioso. Dedique todos  
os esforços naquilo que deve ser feito agora. É essencial cumprir bem a  
missão que lhe cabe no momento. Só assim abrir-se-á a porta de seu  
futuro.”*

Seicho-no-ie





*Dedico esse trabalho aos meus pais,  
Alberto Tetsuo Shinohara e Yolanda  
Fumie Shinohara, e ao meu esposo  
Leonardo Corrêa Chaves.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Leto Momm, por todo o conhecimento repassado desde a época da graduação até o presente momento e que levarei para o resto da vida.

Muito obrigada à professora Prof. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci, Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti, Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior e ao Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira por aceitarem prontamente fazer parte da banca examinadora e por contribuírem para a melhoria da minha pesquisa. Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Glicério Trichês que me ajudou muito e esteve sempre à disposição durante os contratemplos ocorridos no Laboratório de Pavimentação.

Agradeço ao meu esposo, Leonardo Corrêa Chaves, por toda compreensão e companheirismo durante os anos dedicados à realização deste trabalho. Muito obrigada pela paciência e pela incansável torcida a cada etapa concluída dessa tese.

Aos meus amigos de laboratório Carlos, José Marcos, Manu, Sárvia, Vanessa e Gabi por acompanharem os árduos e cansativos momentos dos ensaios laboratoriais que foram amenizados pelas companhias, sorrisos e pela torcida. Ressalto o agradecimento eterno e especial ao meu amigo Adosindro que acompanhou todos os ensaios e os estudos dedicados à pesquisa, ajudando-me sempre que precisei, e pelas conversas infundáveis de troca de conhecimentos e informações que adquirimos durante a convivência acadêmica.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante os quatro anos do curso de pós-graduação; à Rede Temática de Asfalto pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC; à BRASKEM pelo fornecimento do polímero EVA utilizado nessa pesquisa; e à CBB pelo fornecimento do ligante asfáltico e pela disponibilização do laboratório de ensaios.

Agradeço à minha madrinha tia Laura e tia Yoko por acompanharem o meu crescimento e mostrarem a importância da união em família. A minha avó querida Adélia que aos 95 anos é meu exemplo de vida. Agradeço também aos meus avós Momoe, Kunio e Takeo que hoje estão descansando em paz, mas sempre me guiando nas decisões.

O agradecimento aos meus irmãos Karen, Kleber e Kleyton é acompanhado de um sorriso largo no rosto, pois é com eles que guardo e passo os momentos mais divertidos da vida. Agradeço à minha mãe Yolanda, a pessoa mais especial, por toda preocupação, dedicação e amor que recebo até hoje. E o maior agradecimento deste trabalho é para o meu pai Alberto que sempre me incentivou em tudo que é relacionado aos estudos e ao trabalho, e conseqüentemente, fazendo com que eu torne uma pessoa cada dia melhor.

Um agradecimento eterno a Deus por permitir mais essa conquista em minha vida. *Domo arigatoo.*

## RESUMO

A pesquisa trata-se do estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA para fins de dimensionamento de pavimento asfáltico. O ligante convencional CAP 50/70 é modificado com teores de 5%, 7,5% e 10% de EVA e submetido aos ensaios de caracterização, PCG (NF 98-252, 1999), Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) e os ensaios fundamentais de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007). A propriedade mecânica de módulo de rigidez do material é influenciada pela variação de temperatura e frequência de solicitações, destarte, as misturas asfálticas são ensaiadas nas temperaturas de -10°C, 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C e 40°C e nas frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz. Através do plano Cole-Cole (módulo real *versus* módulo imaginário) é determinada a temperatura crítica ( $\theta_{crit}$ ) das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA e comparadas com as misturas asfálticas convencionais. Os ensaios de Fadiga são realizados tanto na temperatura normativa de 10°C, quanto na temperatura crítica a fim de adquirir as deformações admissíveis para um milhão ( $10^6$ ) de ciclos. A conclusão desse trabalho mostra o comportamento da mistura asfáltica nos diferentes teores de polímero EVA em relação ao módulo de rigidez e fadiga, definindo em 7,5% como o teor ótimo de polímero EVA para modificação de ligantes asfálticos. A eficácia do polímero em relação às misturas convencionais é reafirmada em todos os resultados dos ensaios realizados neste trabalho. Conclui-se, também, que a temperatura crítica dos quatro tipos de misturas é de 20°C através da maior componente imaginária, porém é na temperatura de 10°C que o material possui a menor resistência visualizada nas retas de fadiga. Por fim, o modelo reológico de Huet-Sayegh, que considera o comportamento viscoelástico do material, é aplicado para simular o dimensionamento de uma mistura asfáltica modificada pelo polímero EVA, que mostrou redução de 56% na espessura da camada asfáltica se comparado ao concreto convencional.

**Palavras-chave:** Mistura asfáltica. Polímero EVA. Módulo complexo. Fadiga.



## ABSTRACT

The research is about the study of mechanical properties of asphalt concrete modified by EVA polymer for design purposes of pavement. The conventional asphalt binder CAP 50/70 is modified with 5%, 7.5% and 10% of EVA polymer and subjected to characterization tests, PCG test (NF 98-252, 1999), Modified Lottman test (AASHTO T-283, 1989), Rutting test (NF 98-253-1, 1993) and the fundamental tests of Complex Module (NF 12697-26, 2004) and Fatigue (NF 12697-24 + A1, 2007). The mechanical properties of stiffness modulus of the material are influenced by the temperature variation and frequency of requests, therefore the asphalt mixtures are tested at temperatures of  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  and  $40^{\circ}\text{C}$  and in the frequencies of 1Hz, 3Hz, 10Hz and 30Hz. The critical temperature ( $\theta_{\text{crit}}$ ) of the asphalt concrete modified by EVA polymer is determined by Cole-Cole plan (real module versus imaginary module) and compared with the conventional asphalt concrete. Fatigue tests are performed at standard temperature ( $10^{\circ}\text{C}$ ) and the critical temperature in order to obtain the admissible deformations for one million cycles ( $10^6$ ). The conclusion of this research shows the behavior of the asphalt concrete in different contents of EVA polymer in relation to the stiffness modulus and fatigue, defining in 7,5% as the optimal content of EVA polymer for modification of asphaltic binders. The polymer effectiveness over the conventional mixtures is reaffirmed in all results of the tests performed in this research. It is also concluded that the critical temperature of the four types of mixtures is  $20^{\circ}\text{C}$  through the higher imaginary component, but it is at  $10^{\circ}\text{C}$  that the material has the lowest resistance seen in the fatigue graphic. Finally, Huet-Sayegh's rheological model, which considers the material viscoelastic behavior, is applied to simulate the design of asphalt concrete modified by EVA polymer, which showed a reduction of 56% in the asphalt layer thickness when compared to conventional asphalt concrete.

**Keywords:** Asphalt concrete. EVA polymer. Complex modulus. Fatigue.





## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Rodovias federais, estaduais e municipais brasileiras .....  | 39 |
| Figura 2 - Afundamento no ensaio de deformação permanente .....   | 41 |
| Figura 3 - Vida de fadiga para 300 $\mu$ def.....   | 42 |
| Figura 4 - Sinais sinusoidais na série de Fourier .....   | 43 |
| Figura 5 - Sinais da deformação longitudinal (laboratório e campo)  | 44 |
| Figura 6 - Plano Cole-Cole da mistura convencional.....   | 46 |
| Figura 7 - Plano Cole-Cole da mistura modificada pelo EVA .....   | 47 |
| Figura 8 - Fluxograma dos ensaios da pesquisa .....   | 52 |
| Figura 9 - Níveis de formulação e os respectivos ensaios .....  | 70 |
| Figura 10 - Volume para cálculo de Densidade Máxima Medida .....  | 73 |
| Figura 11 - Equipamento do ensaio de PCG .....  | 74 |
| Figura 12 - Conformidade da compactação das misturas asfálticas ...   | 76 |
| Figura 13 - Características volumétricas dos diferentes teores de EVA<br>- a) trabalhabilidade b) % de vazios c) VMA d) VFB ..... | 77 |
| Figura 14 - Prensa de compressão diametral .....  | 80 |
| Figura 15 - Equipamento do ensaio de Deformação Permanente.....   | 81 |
| Figura 16 - Máquina compactadora de placas para o ensaio de<br>Deformação Permanente.....   | 82 |
| Figura 17 - Equipamento do ensaio de Módulo Complexo .....  | 84 |
| Figura 18 - Corpo de prova trapezoidal.....   | 85 |
| Figura 19 - Curvas Isotérmicas de mistura asfáltica convencional ....   | 89 |
| Figura 20 - Curvas Frequência-Temperatura de mistura asfáltica<br>convencional.....   | 90 |
| Figura 21 - Curvas Isócronas de mistura asfáltica convencional.....   | 91 |
| Figura 22 - Curvas do Espaço de Black de mistura asfáltica<br>convencional.....   | 92 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 23 - | Curvas da função <i>Damping</i> .....                                  | 93  |
| Figura 24 - | Curvas do plano Cole-Cole de mistura asfáltica convencional.....       | 94  |
| Figura 25 - | Curva granulométrica da pesquisa.....                                  | 107 |
| Figura 26 - | Polímero EVA HM-728 em forma de péletes .....                          | 109 |
| Figura 27 - | Máquina de modificação do ligante asfáltico .....                      | 110 |
| Figura 28 - | Ensaio de adesividade.....   | 111 |
| Figura 29 - | Fluxograma dos ensaios de caracterização dos agregados e ligantes..... | 112 |
| Figura 30 - | Fluxograma do ensaio da PCG .....                                      | 113 |
| Figura 31 - | Mistura do corpo de prova e molde do ensaio da PCG .                   | 115 |
| Figura 32 - | Máquina do ensaio da PCG e retirada do corpo de prova ...<br>.....     | 116 |
| Figura 33 - | Aferição manual do corpo de prova da PCG.....                          | 116 |
| Figura 34 - | Fluxograma do ensaio Lottman Modificado<br>.....                       | 117 |
| Figura 35 - | Corpos de prova Lottman refrigerados .....                             | 118 |
| Figura 36 - | Fluxograma do ensaio de Deformação Permanente .....                    | 119 |
| Figura 37 - | Acomodação da mistura asfáltica .....                                  | 120 |
| Figura 38 - | Compactação da placa para o ensaios de Deformação Permanente .....     | 121 |
| Figura 39 - | Pesagem das placas para massa específica .....                         | 121 |
| Figura 40 - | Placas moldadas para o ensaio de Deformação Permanente<br>.....        | 122 |
| Figura 41 - | Termopar inserido na placa de Deformação Permanente ...<br>.....       | 122 |
| Figura 42 - | Pontos de leitura do ensaio de Deformação Permanente                   | 123 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 43 - Vista lateral da máquina de Deformação Permanente ...                         | 123 |
| Figura 44 - Fluxograma dos ensaios de Módulo Complexo.....                                | 124 |
| Figura 45 - Compactação da placa de Módulo Complexo.....                                  | 126 |
| Figura 46 - Etapas de corte dos corpos de prova trapezoidais.....                         | 127 |
| Figura 47 - Corpos de provas trapezoidais .....   | 128 |
| Figura 48 - Fluxograma do ensaio de Fadiga .....  | 129 |
| Figura 49 - Curva do ensaio de Penetração dos ligantes modificados e convencional.....    | 135 |
| Figura 50 - Curva do Ponto de Amolecimento dos ligantes modificados e convencional.....   | 136 |
| Figura 51 - Curva de Recuperação Elástica dos ligantes modificados ... ..                 | 137 |
| Figura 52 - Curva de Viscosidade Brookfield dos ligantes modificados e convencional ..... | 138 |
| Figura 53 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 .....                               | 139 |
| Figura 54 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 5% EVA .....                    | 140 |
| Figura 55 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 7,5% EVA.....                   | 141 |
| Figura 56 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 10% EVA.....                    | 142 |
| Figura 57 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura CONV... ..                        | 149 |
| Figura 58 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura CONV ... ..                       | 150 |
| Figura 59 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA5.... ..                       | 150 |
| Figura 60 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA5..... ..                      | 151 |
| Figura 61 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA7,5. ..                        | 152 |
| Figura 62 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA7,5.. ..                       | 152 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 63 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA10..                            | 153 |
| Figura 64 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA10 ..                           | 154 |
| Figura 65 - Resultado final da PCG para as misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.....        | 156 |
| Figura 66 - Comparativo da % de vazios dos diferentes teores de EVA no ensaio da PCG ..... | 157 |
| Figura 67 - Resistência à tração no ensaio de Lottman Modificado                           | 159 |
| Figura 68 - Relação dos valores de r/R dos ensaios de Duriez e Lottman Modificado .....    | 161 |
| Figura 69 - Resultado de Deformação Permanente da mistura CONV ..                          | 163 |
| Figura 70 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA5 .....                       | 164 |
| Figura 71 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA7,5 .....                     | 165 |
| Figura 72 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA10 ..                         | 166 |
| Figura 73 - Afundamento (%) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10..... | 168 |
| Figura 74 - Afundamento no ensaio de Deformação Permanente....                             | 169 |
| Figura 75 - Curvas isotérmicas da mistura CONV.....  | 175 |
| Figura 76 - Curvas isotérmicas da mistura EVA5.....  | 176 |
| Figura 77 - Curvas isotérmicas da mistura EVA7,5.....                                      | 176 |
| Figura 78 - Curvas isotérmica da mistura EVA10 .....                                       | 177 |
| Figura 79 - Curva equivalência freq-temp da mistura CONV.....                              | 178 |
| Figura 80 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA5.....                              | 178 |
| Figura 81 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA7,5.....                            | 179 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 82 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA10.....  | 180 |
| Figura 83 - Curvas isócronas da mistura CONV.....   | 180 |
| Figura 84 - Curvas isócronas da mistura EVA5.....   | 181 |
| Figura 85 - Curvas isócronas da mistura EVA7,5.....   | 182 |
| Figura 86 - Curvas isócronas da mistura EVA10.....  | 182 |
| Figura 87 - Função <i>damping</i> da mistura CONV.....  | 183 |
| Figura 88 - Função <i>damping</i> da mistura EVA5.....  | 183 |
| Figura 89 - Função <i>damping</i> da mistura EVA7,5.....  | 184 |
| Figura 90 - Função <i>damping</i> da mistura EVA10.....   | 184 |
| Figura 91 - Curva do Espaço de Black da mistura CONV.....   | 185 |
| Figura 92 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA5.....   | 186 |
| Figura 93 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA7,5.....   | 186 |
| Figura 94 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA10.....  | 187 |
| Figura 95 - Curva Cole-Cole da mistura CONV.....  | 188 |
| Figura 96 - Curva Cole-Cole da mistura EVA5.....  | 188 |
| Figura 97 - Curva Cole-Cole da mistura EVA7,5.....  | 189 |
| Figura 98 - Curva Cole-Cole da mistura EVA10.....   | 190 |
| Figura 99 - Isotérmicas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e<br>EVA10.....                                 | 191 |
| Figura 100 - Curvas equivalência frequência-temperatura das misturas<br>CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10..... | 192 |
| Figura 101 - Curvas isócronas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e<br>EVA10.....                           | 193 |
| Figura 102 - Curvas do Espaço de Black das misturas CONV, EVA5,<br>EVA7,5 e EVA10.....                  | 194 |
| Figura 103 - Curvas Cole-Cole das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e<br>EVA10.....                           | 196 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 104 - Temperaturas de inversão das mistura CONV .....   | 199 |
| Figura 105 - Temperaturas de inversão das mistura EVA5 .....   | 199 |
| Figura 106 - Temperaturas de inversão das mistura EVA7,5 .....   | 200 |
| Figura 107 - Temperaturas de inversão das mistura EVA10 .....  | 200 |
| Figura 108 - Variação do módulo imaginário em função das<br>temperaturas e frequências das mistura CONV .....                        | 201 |
| Figura 109 - Variação do módulo imaginário em função das<br>temperaturas e frequências das mistura EVA5 .....                        | 202 |
| Figura 110 - Variação do módulo imaginário em função das<br>temperaturas e frequências das mistura EVA7,5 .....                      | 203 |
| Figura 111 - Variação do módulo imaginário em função das<br>temperaturas e frequências das mistura EVA10 .....                       | 204 |
| Figura 112 - Curva de Fadiga: CONV_NORM (10°C, 25Hz).....  | 207 |
| Figura 113 - Curva de Fadiga: CONV_CRIT (20°C, 25Hz).....  | 207 |
| Figura 114 - Curva de Fadiga: EVA5_NORM (10°C, 25Hz).....  | 208 |
| Figura 115 - Curva de Fadiga: EVA5_CRIT (20°C, 25Hz).....  | 209 |
| Figura 116 - Curva de Fadiga: EVA7,5_NORM (10°C, 25Hz).....  | 209 |
| Figura 117 - Curva de Fadiga: EVA7,5_CRIT (20°C, 25Hz).....  | 210 |
| Figura 118 - Deformações $\epsilon_6$ das misturas asfálticas para 1 milhão de<br>ciclos.....  | 212 |
| Figura 119 - Deformação ( $\mu_{def}$ ) para misturas CAP 50/70 convencional<br>em ensaios de fadiga realizados a 10°C e 25 Hz ..... | 213 |
| Figura 120 - Inclinação da reta de fadiga das misturas convencionais   | 214 |
| Figura 121 - Inclinação da reta de fadiga das misturas modificadas..   | 215 |
| Figura 122 - Parâmetros de Huet-Sayegh CONV .....  | 219 |
| Figura 123 - Parâmetros de Huet-Sayegh EVA5 .....  | 220 |
| Figura 124 - Parâmetros de Huet-Sayegh EVA7,5 .....  | 221 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 125 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura CONV .....              | 222 |
| Figura 126 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA5 .....              | 223 |
| Figura 127 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA7,5 .....            | 223 |
| Figura 128 - Sinal de deformação abaixo da camada asfáltica (x) ..... | 228 |
| Figura 129 - Sinal de deformação no topo do subleito (z).....         | 229 |
| Figura 130 - Espessuras finais dos pavimentos .....                   | 230 |





## LISTA DE TABELAS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabela 1 -  | Valores da granulometria.....   | 106 |
| Tabela 2 -  | Quantitativo do ensaio da PCG.....  | 114 |
| Tabela 3 -  | Quantitativo final do ensaio de Lottman Modificado ....                             | 118 |
| Tabela 4 -  | Quantitativo do ensaio de Deformação Permanente .....                               | 120 |
| Tabela 5-   | Quantitativo do ensaio de Módulo Complexo e Fadiga.                                 | 125 |
| Tabela 6 -  | Resultados da caracterização dos agregados.....                                     | 132 |
| Tabela 7 -  | Resultados dos ensaios de caracterização do ligante convencional .....              | 133 |
| Tabela 8 -  | Resultados dos ensaios de caracterização do ligante modificado .....                | 134 |
| Tabela 9 -  | Temperaturas recomendadas de usinagem e compactação ..<br>.....                     | 143 |
| Tabela 10 - | Classificação Grau Flexpave da ANP para os ligantes modificados por polímeros ..... | 144 |
| Tabela 11 - | Massa volumétrica real granular da mistura CONV .....                               | 145 |
| Tabela 12 - | Massa volumétrica real granular da mistura EVA5 .....                               | 145 |
| Tabela 13 - | Massa volumétrica real granular da mistura EVA7,5 ....                              | 146 |
| Tabela 14 - | Massa volumétrica real granular da mistura EVA10 .....                              | 146 |
| Tabela 15 - | Resumo da MVRg e MVRc.....  | 147 |
| Tabela 16 - | Resultados do ensaio da PCG .....   | 148 |
| Tabela 17 - | Volume de vazios do ensaio da PCG a 80 giros .....                                  | 155 |
| Tabela 18 - | Relação r/R do ensaio Lottman Modificado .....                                      | 158 |
| Tabela 19 - | Relação r/R do ensaio Duriez .....  | 160 |
| Tabela 20 - | Resultado de Deformação Permanente da mistura CONV ..<br>.....                      | 162 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 21 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA5 .....                               | 163 |
| Tabela 22 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA7,5 .....                             | 164 |
| Tabela 23 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA10. ....                              | 165 |
| Tabela 24 - Afundamento (%) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.....         | 167 |
| Tabela 25 - Afundamento (mm) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.....        | 168 |
| Tabela 26 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura CONV.....                           | 171 |
| Tabela 27 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA5.....                           | 172 |
| Tabela 28 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA7,5.....                         | 173 |
| Tabela 29 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA10.....                          | 174 |
| Tabela 30 - Deformações $\epsilon_6$ das misturas asfálticas para 1 milhão de ciclos.....          | 211 |
| Tabela 31 - Parâmetros para o dimensionamento.....   | 216 |
| Tabela 32 - Dados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo para o dimensionamento do pavimento..... | 217 |
| Tabela 33 - Valores de sigma ( $\sigma$ ) para cada tipo de mistura.....                           | 218 |
| Tabela 34 - Valores dos coeficientes e as deformações admissíveis                                  | 218 |
| Tabela 35 - Parâmetros de Huet-Sayegh.....   | 222 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 36 - Dimensionamento do pavimento da mistura CONV_NORM .....                     | 225 |
| Tabela 37 - Dimensionamento do pavimento da mistura CONV_CRIT .....                     | 225 |
| Tabela 38 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA5_NORM .....                     | 226 |
| Tabela 39 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA5_CRIT .<br>.....                | 226 |
| Tabela 40 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA7,5_NORM .....                   | 227 |
| Tabela 41 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA7,5_CRIT .....                   | 227 |
| Tabela 42 - Deformações calculadas e admissíveis das misturas CONV, EVA5 e EVA7,5 ..... | 231 |



**LISTA DE QUADROS**

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Quadro 1 -  | Especificação para ligantes modificados por polímeros ..               | 61  |
| Quadro 2 -  | Materiais mais utilizados como modificadores de asfalto nos EUA.....   | 62  |
| Quadro 3 -  | Estudos com polímero EVA para modificação de ligantes asfálticos ..... | 67  |
| Quadro 4 -  | Limites para caracterização dos agregados.....                         | 71  |
| Quadro 5 -  | Limites para a caracterização dos ligantes asfálticos.....             | 73  |
| Quadro 6 -  | Classes de tráfego .....   | 99  |
| Quadro 7 -  | Classe de capacidade da plataforma .....                               | 102 |
| Quadro 8 -  | Deformações controladas ( $\mu_{def}$ ) do ensaio de Fadiga ...        | 130 |
| Quadro 9 -  | Exemplo de variação de módulos para baixas temperaturas .....          | 197 |
| Quadro 10 - | Exemplo de variação de módulos para altas temperaturas... ..           | 197 |
| Quadro 11 - | Exemplo de variação de E1 e E2 para alta temperatura.                  | 198 |
| Quadro 12 - | Exemplo de variação de E1 e E2 para baixa temperatura.... ..           | 198 |
| Quadro 13 - | Valores ponderados do módulo imaginário (E2) para 25 Hz.....           | 205 |



## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| AASHTO  | <i>Association of State Highway and Transportation Officials</i>                                       |
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ADP     | Asfalto Diluídos de Petróleo   |
| ANP     | Agência Nacional de Petróleo   |
| APP     | Mistura modificada com EVA   |
| ASTM    | <i>American Society for Testing and Materials</i>  |
| BBM     | <i>Béton Bitumineux Mince</i>  |
| BBME    | <i>Béton Bitumineux Module Elevé</i>   |
| BM      | Mistura de referência  |
| BM-A    | Mistura modificada com EVA   |
| BM-B    | Mistura modificada com polietileno   |
| CA      | Concreto Asfáltico   |
| CAM     | Coefficiente de agressividade  |
| CAP     | Cimento Asfáltico de Petróleo  |
| CONV    | Mistura asfáltica convencional   |
| CVCR    | <i>Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante</i>  |
| DMM     | Densidade Máxima Medida  |
| DNER    | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem   |
| DNIT    | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes   |
| DOU     | Diário Oficial da União  |
| DSR     | <i>Dynamic Shear Rheometer</i>   |
| EBA     | Etil Acrilato de Butila  |
| EM      | Especificação de Material  |
| EMA     | Etil Acrilato de Metila  |
| ES      | Especificação de Serviço   |
| EUA     | Estados Unidos da América  |
| EVA     | Etileno Acetato de Vinila  |
| EVA5    | Mistura asfáltica modificada com 5% de polímero EVA  |
| EVA7,5  | Mistura asfáltica modificada com 7,5% de polímero EVA  |
| EVA10   | Mistura asfáltica modificada com 10% de polímero EVA   |
| FTIR    | <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>   |
| GB      | <i>Grave-bitume</i>  |
| GPC     | Cromatografia  |
| IE      | Instruções de Ensaio   |
| IFSTTAR | <i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement, et des Réseaux</i> |
| IPR     | Instituto de Pesquisas Rodoviárias   |
| LCPC    | <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>  |
| LEP9    | Mistura modificada com polietileno   |

|          |   |
|----------|---|
| LPC      | <i>Laboratoire des Ponts et Chaussées</i>                     |
| MBM      | Mistura modifica de referência                                |
| ME       | Método de Ensaio  |
| MVA      | Massa Volumétrica Aparente                                    |
| MVRc     | Massa Volumétrica Real calculada                              |
| MVRg     | Massa Volumétrica Real dos granulares                         |
| NBR      | Norma Brasileira  |
| NCHRP    | <i>National Cooperative Highway Research Program</i>          |
| NF       | Norma Francesa  |
| PBT      | Peso Bruto Total  |
| PCG      | Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório              |
| PIARC    | <i>Permanent International Association of Road Congresses</i> |
| PIB      | Poliisobuteno   |
| PPGEC    | Programa de Pós Graduação em Engenharia                       |
| PRO      | Procedimento  |
| PVC      | Policloreto de Vinila   |
| QFV      | Quadro de Fabricantes de Veículos                             |
| REF      | Referência  |
| RET      | Terpolímero Elastomérico Reativo                              |
| RTFOT    | <i>Rolling Thin Film Oven Test</i>                            |
| SARA     | Saturadas, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos                   |
| SBR      | Estireno Butadieno Randômico                                  |
| SBS      | Estireno Butadieno Estireno                                   |
| SETRA    | <i>Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes</i>   |
| SHRP     | <i>Strategic Highway Research Program</i>                     |
| SICRO    | Sistema de Custos Referenciais de Obras                       |
| SNV      | Sistema Nacional de Viação                                    |
| TGA      | Termogravimetria  |
| UFAM     | Universidade Federal do Amazonas                              |
| UFC      | Universidade Federal do Ceará                                 |
| UFRGS    | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                     |
| UFRJ     | Universidade Federal do Rio de Janeiro                        |
| UFSC     | Universidade Federal de Santa Catarina                        |
| USP      | Universidade de São Paulo                                     |
| USP-SCar | Universidade de São Paulo – Campus São Carlos                 |
| UV       | Ultravioleta  |
| VFB      | Volume cheio de betume  |
| VMA      | Volume da mistura dos agregados                               |
| VMDA     | Volume médio diário anual                                     |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                    |   |
|--------------------|---|
| %v                 | porcentagem de vazios                                 |
| $\Delta$           | variação  |
| ®                  | marca registrada                                      |
| a                  | coeficiente (interseção da regressão)                 |
| A'                 | área da seção transversal                             |
| A''                | profundidade da deformação a 1.000 ciclos             |
| B                  | base maior do corpo de prova                          |
| b                  | coeficiente   |
| b'                 | inclinação da reta de fadiga                          |
| c                  | 0,02 para estruturas habituais                        |
| C                  | acúmulo do fator para o período de cálculo            |
| cP                 | <i>centipoise</i> (unidade do ensaio Brookfield)      |
| d                  | abertura da malha da peneira                          |
| D                  | deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova |
| dmáx               | diâmetro máximo                                       |
| e                  | espessura do corpo de prova                           |
| E*                 | norma do módulo complexo                              |
| E( $\theta_{eq}$ ) | módulo complexo na temperatura equivalente            |
| E0                 | módulo zero, elástico estático                        |
| E1                 | módulo elástico real                                  |
| E2                 | módulo imaginário                                     |
| E $\infty$         | módulo infinito                                       |
| F                  | carga máxima de ruptura                               |
| f                  | flecha  |
| F                  | força aplicada para gerar o deslocamento D            |
| h                  | altura do corpo de prova                              |
| hmín               | altura mínima dos corpos de prova                     |
| i                  | número complexo ( $i^2 = -1$ )                        |
| k                  | parâmetro dos elementos parabólicos do modelo         |
| kc                 | coeficiente de calagem                                |
| kr                 | coeficiente de risco                                  |
| ks                 | coeficiente de redução                                |
| K $\sigma$         | coeficiente relacionado à dimensão do cp (tensão)     |
| K $\epsilon$       | coeficiente relacionado à dimensão do cp (deformação) |
| m                  | massa do corpo de prova                               |
| n                  | expoente em função de D, d e % de finos               |
| N                  | tráfego acumulado por faixa                           |
| NE                 | número de eixos equivalentes (eixo padrão 130 kN)     |
| p                  | % que passa na peneira de malha “d”                   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| P                  | período de projeto inicial                             |
| r                  | com imersão  |
| R                  | sem imersão  |
| SH                 | dispersão sobre a espessura da camada (desvio padrão). |
| SN                 | desvio-padrão dos resíduos (fadiga)                    |
| ssf                | unidade do ensaio Saybolt Furol                        |
| T                  | classe dos veículos                                    |
| t                  | tempo  |
| $T_R$              | temperatura de referência                              |
| u                  | associada ao risco                                     |
| Y                  | profundidade da deformação em N ciclos                 |
| $\gamma$           | fator de forma   |
| $\delta$           | desvio-padrão da distribuição                          |
| $\theta_{crít}$    | temperatura crítica                                    |
| $\mu$              | fator de massa   |
| $\mu_{def}$        | microdeformação  |
| $\sigma$           | valores das amplitudes da tensão                       |
| $\tau$             | taxa de crescimento anual                              |
| $\varphi$          | ângulo de fase ou defasagem                            |
| $\omega$           | pulsação do sinal                                      |
| $\epsilon$         | deformação   |
| $\epsilon_6$       | deformação $10^6$ de ciclos                            |
| $\epsilon_{máx}$   | deformação máxima                                      |
| $\epsilon_{x,adm}$ | deformação admissível na base da camada asfáltica      |
| $\epsilon_{z,adm}$ | deformação admissível na plataforma de suporte         |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| RESUMO  | i         |
| ABSTRACT  | iii       |
| LISTA DE FIGURAS  | v         |
| LISTA DE TABELAS  | xiii      |
| LISTA DE QUADROS  | xvii      |
| LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS                             | xix       |
| LISTA DE SÍMBOLOS   | xxi       |
| <b>CAPÍTULO 1</b>   | <b>39</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                       | <b>39</b> |
| 1.1 OBJETIVO GERAL  | 49        |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                 | 49        |
| 1.3 PROCEDIMENTOS PARA ATINGIR O OBJETIVO                 | 49        |
| 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA                    | 53        |
| 1.5 JUSTIFICATIVAS PARA O TEMA PROPOSTO                   | 53        |
| 1.6 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA                               | 55        |
| <b>CAPÍTULO 2</b>   | <b>57</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                            | <b>57</b> |
| 2.1 MATERIAIS   | 57        |
| 2.1.1 Ligante asfáltico                                   | 57        |
| 2.1.2 Polímero  | 58        |
| 2.1.2.1 Polímero EVA                                      | 63        |
| 2.1.2.2 EVA versus SBS                                    | 66        |
| 2.1.2.3 Teor ótimo de polímero EVA                        | 66        |
| 2.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS LABORATORIAIS                 | 69        |
| 2.2.1 Metodologia de ensaio de caracterização do agregado | 71        |
| 2.2.2 Metodologia de ensaio de caracterização do ligante  | 72        |
| 2.2.3 Metodologia de ensaio Rice - Densidade              | 73        |

|                         |   |            |
|-------------------------|---|------------|
| 2.2.4                   | Metodologia do ensaio da PCG .....                                      | 74         |
| 2.2.5                   | Metodologia do ensaio de Lottman Modificado .....                       | 79         |
| 2.2.6                   | Metodologia do ensaio de Deformação Permanente .....                    | 81         |
| 2.2.7                   | Metodologia do ensaio de Módulo Complexo .....                          | 83         |
| 2.2.8                   | Metodologia do ensaio de Fadiga .....                                   | 94         |
| 2.3                     | MODELO DE DIMENSIONAMENTO .....   | 98         |
| 2.3.1                   | Deformação admissível ( $\epsilon_{x,adm}$ e $\epsilon_{z,adm}$ ) ..... | 98         |
| 2.3.2                   | Parâmetros de Huet-Sayegh .....   | 102        |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b> |   | <b>105</b> |
| <b>3</b>                | <b>MATERIAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS.....</b>                           | <b>105</b> |
| 3.1                     | MATERIAIS .....   | 105        |
| 3.1.1                   | Agregados e curva granulométrica .....                                  | 105        |
| 3.1.2                   | Ligantes .....  | 107        |
| 3.1.2.1                 | Ligante Convencional.....   | 107        |
| 3.1.2.2                 | Ligante Modificado pelo EVA.....  | 108        |
| 3.2                     | ENSAIOS LABORATORIAIS.....  | 110        |
| 3.2.1                   | Execução dos ensaios de caracterização do agregado.....                 | 110        |
| 3.2.2                   | Execução dos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos .        | 111        |
| 3.2.3                   | Execução do ensaio da PCG .....   | 112        |
| 3.2.4                   | Execução do ensaio de Lottman Modificado .....                          | 117        |
| 3.2.5                   | Execução do ensaio de Deformação Permanente.....                        | 119        |
| 3.2.6                   | Execução do ensaio de Módulo Complexo .....                             | 124        |
| 3.2.7                   | Execução do ensaio de Fadiga .....                                      | 128        |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b> |   | <b>131</b> |
| <b>4</b>                | <b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS .....</b>                          | <b>131</b> |
| 4.1                     | CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....                                      | 131        |
| 4.1.1                   | Resultados da caracterização dos agregados.....                         | 131        |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.1.2   | Análise e discussão dos resultados de caracterização dos agregados .....    | 132 |
| 4.2     | CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES .....   | 132 |
| 4.2.1   | Resultados da caracterização dos ligantes .....                             | 133 |
| 4.2.1.1 | Ligante convencional .....  | 133 |
| 4.2.1.2 | Ligantes modificados .....  | 133 |
| 4.2.2   | Análise e discussão dos resultados de caracterização dos ligantes... ..     | 134 |
| 4.2.2.1 | Temperatura de usinagem e compactação .....                                 | 138 |
| 4.3     | ENSAIO RICE .....   | 144 |
| 4.3.1   | Resultados do ensaio Rice (MVRg) .....                                      | 144 |
| 4.3.2   | Análise e discussão dos resultados do ensaio Rice .....                     | 147 |
| 4.4     | ENSAIO DA PCG .....   | 147 |
| 4.4.1   | Resultados do ensaio da PCG .....   | 148 |
| 4.4.2   | Análise e discussão dos resultados do ensaio da PCG .....                   | 154 |
| 4.5     | ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO .....   | 157 |
| 4.5.1   | Resultados do ensaio de Lottman Modificado .....                            | 158 |
| 4.5.2   | Análise e discussão dos resultados do ensaio de Lottman Modificado .....    | 159 |
| 4.6     | ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....                                       | 162 |
| 4.6.1   | Resultados do ensaio de Deformação Permanente .....                         | 162 |
| 4.6.2   | Análise e discussão dos resultados do ensaio de Deformação Permanente ..... | 167 |
| 4.7     | ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO .....   | 170 |
| 4.7.1   | Resultados do ensaio de Módulo Complexo .....                               | 170 |
| 4.7.2   | Análise e discussão dos resultados do ensaio de Módulo Complexo .....       | 190 |
| 4.7.2.1 | Isotérmicas .....   | 190 |

|                         |   |            |
|-------------------------|---|------------|
| 4.7.2.2                 | Equivalência Frequência-Temperatura .....   | 192        |
| 4.7.2.3                 | Isócronas .....   | 193        |
| 4.7.2.4                 | Espaço de Black.....  | 194        |
| 4.7.2.5                 | Plano Cole-Cole.....  | 195        |
| 4.8                     | ENSAIO DE FADIGA.....   | 206        |
| 4.8.1                   | Resultados do ensaio de Fadiga .....  | 206        |
| 4.8.2                   | Análises e discussão dos resultados do ensaio de Fadiga .....                     | 211        |
| 4.9                     | DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO.....   | 215        |
| 4.9.1                   | Cálculo da deformação admissível ( $\epsilon_{x,adm}$ e $\epsilon_{z,adm}$ )..... | 216        |
| 4.9.2                   | Cálculo dos parâmetros Huet-Sayegh - Viscoanalyse.....                            | 218        |
| 4.9.3                   | Dimensionamento das misturas asfálticas CONV, EVA5 e EVA7,5<br>.....              | 224        |
| 4.9.3.1                 | Dimensionamento da mistura CONV_NORM .....  | 224        |
| 4.9.3.2                 | Dimensionamento da mistura CONV_CRIT .....  | 225        |
| 4.9.3.3                 | Dimensionamento da mistura EVA5_NORM.....   | 225        |
| 4.9.3.4                 | Dimensionamento da mistura EVA5_CRIT .....  | 226        |
| 4.9.3.5                 | Dimensionamento da mistura EVA7,5_NORM.....                                       | 226        |
| 4.9.3.6                 | Dimensionamento da mistura EVA7,5_CRIT .....                                      | 227        |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b> |   | <b>233</b> |
| <b>5</b>                | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>   | <b>233</b> |
| 5.1                     | CONCLUSÕES .....  | 233        |
| 5.2                     | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....  | 235        |

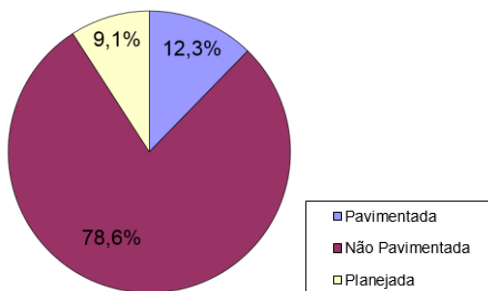
# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente poder destrutivo dos veículos de cargas pesadas no Brasil faz com que ocorra a perda do módulo de rigidez e cause a fadiga das misturas asfálticas, impulsionando o fim da vida útil do pavimento. Há a necessidade da comunidade acadêmica concentrar esforços nos avanços das pesquisas e atualização dos normativos que regem as especificações dos materiais e serviços da infraestrutura rodoviária.

O Brasil possui mais de 1,7 milhões de km de rodovias entre pavimentadas, não pavimentadas e planejadas, sendo que apenas 211.468,3 km (12,3%) são pavimentadas (SNV, 2015), como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Rodovias federais, estaduais e municipais brasileiras



Fonte: SNV (2015)

Mais de 80% das rodovias não são pavimentadas e, dependendo da necessidade, podem vir a ser pavimentadas mostrando a importância do conhecimento e estudo sobre o comportamento dos materiais asfálticos a fim de aplicá-los de modo duradouro e econômico, evitando constantes manutenções. Os dados da rede rodoviária no Brasil de 2015 com maiores detalhes, encontram-se no Anexo 1.

O pavimento asfáltico comporta-se em conjunto e em hierarquia, com as tensões concentradas nas camadas de rolamento e dissipando-se nas camadas de base, sub-base e subleito. O tráfego passante na rodovia e as influências do meio ambiente (temperatura, água e ar) influenciam

no comportamento e vida útil das misturas asfálticas mostrando a importância da escolha correta dos materiais constituintes.

Os dois principais problemas no pavimento asfáltico são a deformação permanente, gerada em rodovias com alto tráfego de veículos pesados e as trincas por fadiga. A passos lentos, porém muito importantes, são presenciadas as construções de pavimentos com o uso de ligantes modificados pelo país, principalmente nas rodovias concessionadas.

Entre os polímeros mais utilizados estão o SBS (estireno butadieno estireno), o SBR (estireno butadieno randômico) e o EVA (etileno acetato de vinila). Para a presente pesquisa definiu-se estudar o comportamento das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA e propor soluções que melhorem o desempenho e aumente a vida útil do pavimento.

O uso de asfaltos modificados no Brasil, já conhecido e aplicado em outros países, cresce a cada dia e é assunto corrente nas soluções para projetos de pavimentação. Esse fato é reforçado pelas quatorze normas brasileiras homologadas sobre o assunto publicadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que possui na coletânea um total de 409 normas publicadas.

As normas mais recentes que especificam materiais (EM) com polímero são a DNIT 128/2010-EM e DNIT 129/2011-EM que tratam das emulsões e cimentos asfálticos respectivamente. Ambas referem-se apenas aos polímeros elastoméricos, havendo um déficit nas especificações de polímeros plastômeros. Há a necessidade ainda das atualizações das especificações de serviço (ES), procedimentos (PRO), instrução de ensaio (IE) e métodos de ensaios (ME) que acompanhem os normativos de especificação de materiais (EM). A proposta por estudos das misturas asfálticas modificadas com polímeros, como é o caso desse trabalho, podem auxiliar na abertura para essas discussões.

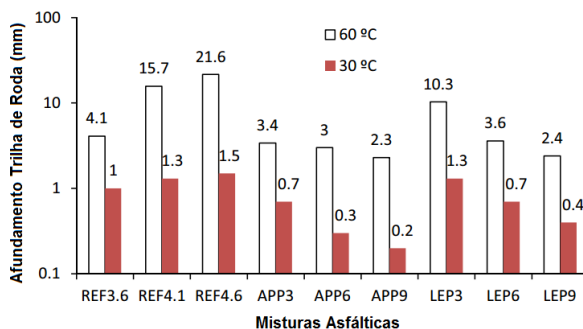
Na literatura, existem estudos sobre o comportamento da mistura asfáltica modificada pelo polímero EVA comprovando melhores desempenhos se comparados às misturas convencionais em relação à deformação permanente, módulo de rigidez e ruptura por fadiga.

Uma análise foi realizada na Itália por Brovelli *et al* (2015) sobre a influência da temperatura e deformação permanente nas misturas modificadas com 3%, 6% e 9% de polímero EVA. O ensaio de deformação permanente foi realizado seguindo a metodologia europeia EN 12697-22 (2003). Na Itália, assim como outros países europeus, a variação térmica é alta variando entre -10°C e 50°C, fenômeno este preocupante em relação ao comportamento das misturas asfálticas.



Nessa linha, é possível verificar na Figura 2 uma maior deformação permanente nos ensaios a 60°C chegando a 21,6 mm de afundamento *versus* 1,5 mm a 30°C, ambos referentes às misturas convencionais de referência (REF) com 4,6% de ligante.

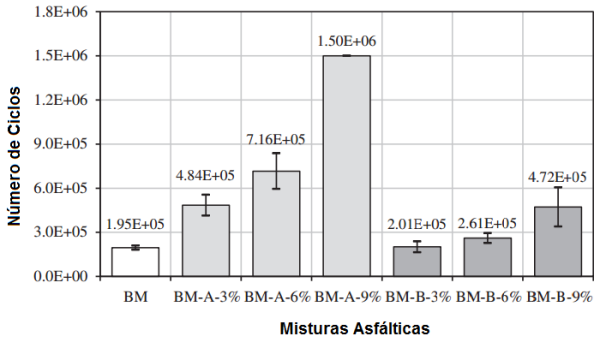
Figura 2 - Afundamento no ensaio de deformação permanente



Fonte: Brovelli *et al* (2015)

Outra avaliação, na mesma Figura 2, é em relação à eficácia das misturas modificadas com 9,0% de polímero EVA (LEP9) na qual demonstraram deformações baixas em relação às temperaturas de 60°C e 30°C quanto em relação às misturas de referências (REF), porém maiores que às misturas modificadas com polietileno (APP).

Também, outro estudo sobre as misturas modificadas pelos diferentes teores de polímero EVA (3%, 6% e 9%) foi em relação à fadiga na pesquisa de Toraldo e Mariani (2014) realizados à flexão alternada a quatro pontos, temperatura de 20°C, frequência de 10 Hz e deformação controlada de 300 $\mu$ def. A vida de fadiga nas misturas analisadas é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Vida de fadiga para 300 $\mu$ def

Fonte: Toraldo e Mariani (2014)

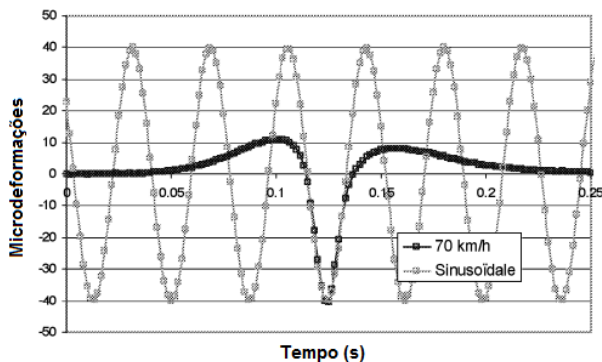
Observa-se que apenas a mistura modificada com 9% de polímero EVA (BM-A) resistiu mais que 1 milhão de ciclos ( $10^6$ ), números de ciclos estes maiores que às misturas de referência (BM) e as misturas com polietileno (BM-B). Salienta-se que nesses casos, o ensaio poderia ter sido realizado a uma deformação controlada menor de 300 $\mu$ def para que atingisse o mínimo de 1 milhão de ciclos.

Já nos ensaios em relação ao módulo de rigidez realizados por Magalhães (2004) foi observado resultado próximo ao dobro do valor de módulo para misturas modificadas pelo EVA em relação ao convencional, passando de 7.000 Mpa para 13.000 Mpa, respectivamente. Desta forma, percebe-se a importância da modificação do ligante asfáltico por polímeros para os materiais de pavimentação, elencando as discussões e pesquisas sobre a porcentagem ideal de polímero nas misturas asfálticas. Há estudos que demonstram que os resultados de módulo começam a estagnar para teores de EVA acima de 6%, porém com 9% de EVA ainda é verificada uma crescente em relação à resistência à fadiga (Toraldo e Mariani, 2014).

Em se tratando do carregamento cíclico das passagens de carga no qual o pavimento é submetido sabe-se que são gerados sinais que são dependentes da velocidade de carga. Esses sinais são difíceis de serem replicados em laboratório, sendo que os sinais sinusoidais são os que mais se aproximam da realidade em campo. Os sinais sinusoidais são caracterizados por transcrever os picos de compressão, tração e, novamente, compressão dos ensaios à flexão alternada. A ocorrência da inversão dos sinais verificados durante a passagem de carga é demonstrada nos estudos de De La Roche (1996) e Perret (2003). Esses

autores avaliaram os carregamentos a diferentes temperaturas e velocidades de carga demonstrando influência no comportamento das misturas asfáltica, principalmente em relação à fadiga. Um exemplo do sinal sinusoidal na frequência da velocidade de 70 km/h, eixo dianteiro, roda simples, é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Sinais sinusoidais na série de Fourier

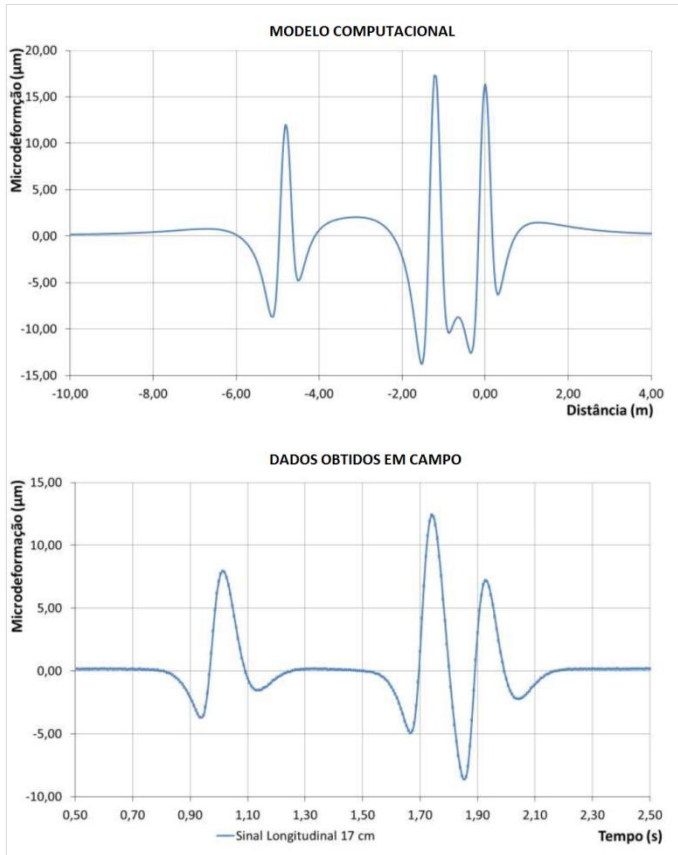


Fonte: Perret (2003)

A superposição é realizada com o sinal de deformação longitudinal em campo e as curvas sinusoidais de frequência extraídas da série de Fourier. Perret (2003) verificou que esse sinal corresponde ao sinal longitudinal, onde é possível notar dois picos de compressão (acima) e um pico de tração (embaixo), lembrando que para os sinais transversais somente ocorre o pico de tração. Desta maneira, os ensaios de misturas asfálticas, geralmente, são realizados à flexão alternada, pois os sinais sinusoidais são os que mais se assemelham aos sinais obtidos em campo.

Nos estudos realizados por Otto *et al* (2011) são mostrados dois gráficos que relacionam o sinal obtido nos ensaios realizados à flexão alternada e sinal obtido em campo, com passagem de tráfego real, como ilustra a Figura 5. No modelo computacional é simulado o efeito da carga dinâmica de solicitações do tipo senoidal.

Figura 5 - Sinais da deformação longitudinal (laboratório e campo)



Fonte: Otto *et al* (2011)

O sinal em campo foi obtido da pista experimental no município de Araranguá/SC, BR-101 km 418, a uma profundidade do concreto asfáltico de 17 cm, temperatura do asfalto de 34°C, velocidade de 20 km/h de um veículo 3C (QFV, 2012), ou seja, é possível observar a passagem do caminhão simples de três eixos.

Estabelecido o tipo de sinal almejado e, conseqüentemente, os tipos de ensaios a serem realizados, à flexão alternada, é importante definir metodologias para obtenção do teor ótimo de polímero EVA para modificar uma mistura asfáltica. Pelos dados mostrados anteriormente, é possível verificar que para resistência à deformação permanente e à

fadiga, quanto maior for à porcentagem de polímero adicionado, maior é o desempenho, influenciando diretamente no dimensionamento. Porém, deve-se ter um limite máximo desse teor, que até o momento não foi encontrado na literatura.

Apesar de um número considerável de estudos já realizados em relação ao comportamento das misturas asfálticas com diferentes teores de EVA, é importante submetê-los aos ensaios mais rigorosos das metodologias europeias de formulação, mais especificamente os ensaios franceses. Nos ensaios fundamentais de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) obtém-se em torno de 95% de grau de confiança nesses ensaios, e diferem-se dos demais ensaios de módulo e fadiga devido a:

- Maior quantidade de corpos de prova necessários para cada ensaio.
- Triagem dos corpos de prova com tolerância de 1 mm nas dimensões e análises de desvio padrão e estatísticas.
- Corpo de prova trapezoidal que anula a influência da fixação dos apoios nos resultados.
- Possibilidade de modelação com parâmetros viscoelásticos obtidos por esses ensaios.

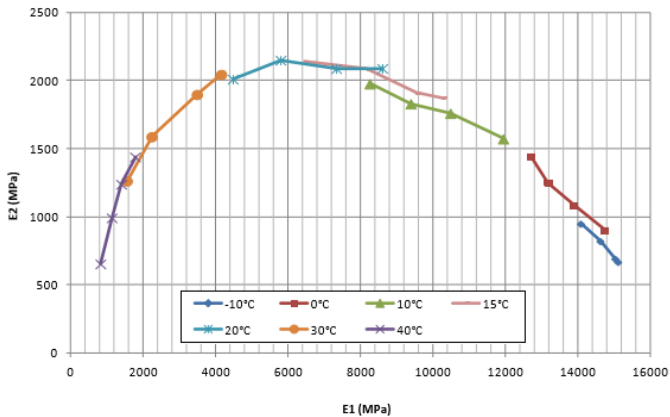
A metodologia francesa de formulação não é apenas uma metodologia de dimensionamento. É uma concepção sobre o entendimento do comportamento dos materiais viscoelásticos envolvidos na pavimentação na qual as componentes elásticas e viscosas dependem das variáveis do próprio material e das condições externas como as frequências de solitação, temperaturas e deformações submetidas.

O método de dimensionamento considera para o ensaio de fadiga, na situação mais severa, a temperatura de 10°C e frequência de 25 Hz para determinar a deformação admissível, valores estes fixados após anos de estudos e análises do comportamento do pavimento no carrossel de fadiga no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), hoje denominado *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement, et des Réseaux* (IFSTTAR). A temperatura equivalente considerada na França é de 15°C, temperatura essa que possui certa dificuldade em obtê-la, pois é em função dos danos causados na mistura asfáltica dependentes da sazonalidade e tempo de projeto.

A compatibilização entre a temperatura da fadiga e a temperatura equivalente é realizada com a trasladação pela relação modular. Alguns estudos científicos têm evidenciado que as misturas asfálticas têm uma temperatura crítica superior ao estabelecido pelos franceses, assunto este que será abordado e discutido na presente pesquisa. Quintero (2016) cita que o uso de consistências mais elevadas de ligantes asfálticos, faz com que dificulte ainda mais a definição da temperatura equivalente no Brasil, que possui maiores temperaturas ambientais quando comparadas com a França.

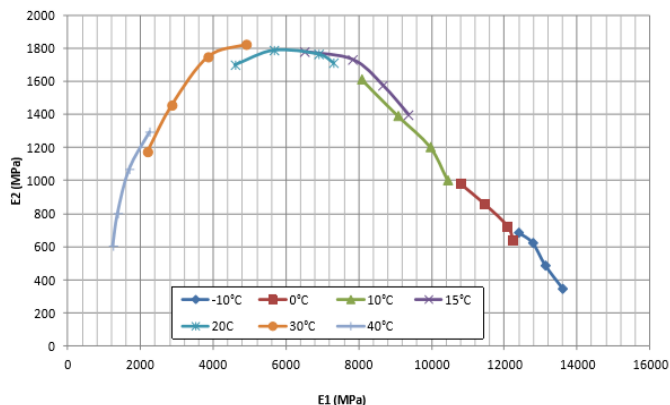
Sabe-se que o comportamento à fadiga é influenciado, além da frequência de solicitação e temperatura, pelo tipo de ligante e material granular. Desta maneira, os valores de módulo imaginário máximos do plano Cole-Cole ensaiados com materiais brasileiros e realizados com o protótipo da máquina francesa de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) resultou em temperaturas críticas que variaram entre 15°C e 30°C. Ou seja, a temperatura crítica dos materiais brasileiros ocorre a uma temperatura maior do que previsto na metodologia francesa. No estudo da própria autora em Shinohara (2012), o material utilizado foi 4,75% de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 convencional e 5,0% CAP 50/70 modificado pelo EVA, nas quais as temperaturas críticas foram de 20°C e 30°C respectivamente, como ilustram as Figura 6 e Figura 7.

Figura 6 - Plano Cole-Cole da mistura convencional



Fonte: Shinohara (2012)

Figura 7 - Plano Cole-Cole da mistura modificada pelo EVA



Fonte: Shinohara (2012)

No estudo de Almeida (2013) o teor de ligante utilizado foi de 4,70% de *Grave-Bitume-4* (GB-4), 4,95% de *Béton Bitumineux Module Elevé-4* (BBME-4) e 4,45% de *Béton Bitumineux Mince-3* (BBM-3), nas quais as temperaturas críticas foram de 20°C, 20°C e 15°C respectivamente. Assim como nos estudos de Barra (2009), Otto (2009), Quintero (2011) e Pérez (2013) também mostraram a temperatura crítica acima de 10°C utilizando-se de um protótipo de um equipamento construído na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nos ensaios de Momm (1998), realizados no próprio LCPC na cidade francesa de Nantes, a temperatura crítica também foi acima de 10°C, pois o material ensaiado foi usinado com materiais brasileiros. Não se trata aqui da discussão sobre os métodos e definições da norma do ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007), mas, se caso necessário, adaptar as temperaturas de ensaios considerando a variabilidade de comportamento dos diferentes tipos de materiais.

Com os dados da deformação admissível ( $\epsilon_6$ ) para 1 milhão de ciclos ( $10^6$ ) na temperatura crítica no ensaio de Fadiga e os parâmetros obtidos no ensaio de Módulo Complexo ( $|E^*|$ ) é possível modelar uma estrutura. As variáveis desses ensaios, juntamente com os parâmetros viscoelásticos, são as mais importantes para o correto dimensionamento de um pavimento rodoviário.

O modelo de cálculo que converge os dados dos ensaios é o modelo reológico de Huet-Sayegh que considera o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas e a transformada de Fourier nas

direções longitudinal e transversal, calculando as deformações e as tensões nas diferentes posições da estrutura de acordo com a intensidade de carga, temperatura e velocidade do veículo, ou seja, proporciona as características reais da mistura asfáltica com base na sollicitação desejada.

Além dos dados dos ensaios fundamentais de Módulo e Fadiga, outras variáveis são necessárias para concluir o dimensionamento, como o coeficiente de agressividade (CAM), o volume médio diário anual (VMDA), a taxa de crescimento anual ( $\tau$ ), o período de projeto inicial (p), a classe dos veículos (T), o eixo-padrão, o tráfego acumulado por faixa (N) e o coeficiente de risco.

A equação elaborada para dimensionar um pavimento é em função da deformação calculada ( $\epsilon_6$ ) na temperatura crítica ( $\theta_{crit}$ ) a 25 Hz e a inclinação da reta (b') a partir do ensaio de Fadiga; valores de módulo complexo na temperatura crítica ( $E_{\theta_{crit}}$ ) e na temperatura equivalente ( $E_{\theta_{eq}}$ ); e o número de eixos (NE), como mostra a Equação (1.1).

$$\epsilon_{(NE, \theta_{eq}, f)} = \epsilon_{6(\theta_{crit}, 25Hz)} \cdot \left( \frac{E_{(\theta_{crit})}}{E_{(\theta_{eq})}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (1.1)$$

Para o cálculo da deformação admissível ( $\epsilon_{adm}$ ) são considerados também os coeficientes de correção Kr, Kc e Ks; além das variáveis de classe de capacidade de suporte do subleito; e parâmetros do modelo de Huet-Sayegh ( $E_\infty$ ,  $E_0$ , k, h,  $\delta$  e  $\tau$ ) que serão melhores detalhados no item 2.3.1.

Assim, o foco da pesquisa é avaliar o comportamento das misturas asfálticas em razão da modificação do ligante asfáltico, tendo em vista a variação da temperatura e frequências de sollicitações, nos diferentes teores de polímero EVA submetidos aos ensaios fundamentais à flexão alternada de Módulo Complexo e de Fadiga com o reflexo no dimensionamento do pavimento.



## **1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o comportamento das misturas asfálticas pela modificação do ligante, por diferentes teores de polímero EVA nas misturas asfálticas, em relação às propriedades mecânicas de módulo de rigidez e deformações admissíveis, e sua influência no aumento da durabilidade dos revestimentos asfálticos de pavimentos.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos desta pesquisa são considerar os resultados obtidos na dissertação da própria autora (Shinohara, 2012) a fim de dar continuidade e aprofundamento no conhecimento sobre ligante asfáltico modificado pelo polímero EVA. Na sequência, modificar o ligante CAP 50/70 com diferentes teores de polímero EVA a fim de compará-los com os convencionalmente adotados no Brasil e ensaiá-los seguindo a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas. Com isso, determinar no gráfico do plano Cole-Cole a temperatura crítica ( $\theta_{crit}$ ) de cada tipo de mistura e fazer uma modelação numérica através dos parâmetros de Huet-Sayegh e dimensionar um pavimento simulado. Por fim, verificar a eficiência da mistura asfáltica modificado pelo polímero EVA nos diferentes teores em relação à mistura asfáltica convencional.

## **1.3 PROCEDIMENTOS PARA ATINGIR O OBJETIVO**

Os procedimentos para atingir os objetivos específicos e, consequentemente, atingir o objetivo geral são:

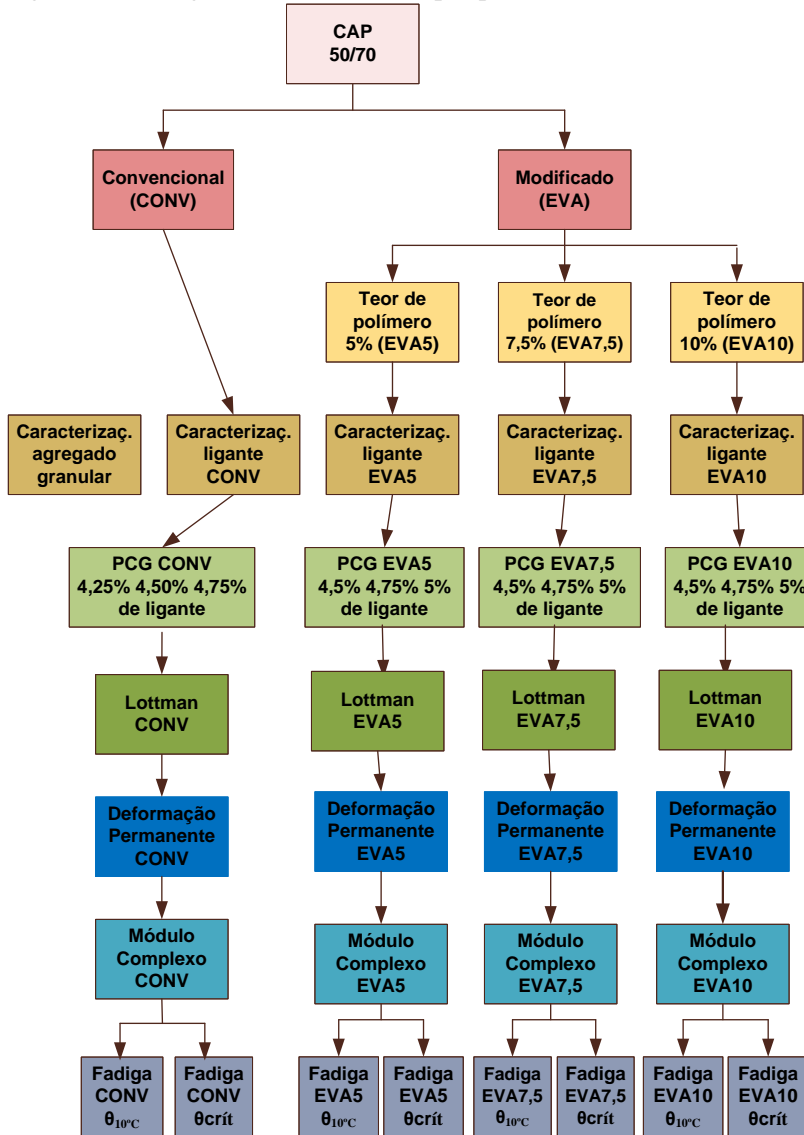
- Modificar o CAP 50/70 convencional (CONV) com 5% de EVA (EVA5), com 7,5% de EVA (EVA7,5) e com 10% de EVA (EVA10).
- Caracterizar os ligantes CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 nos ensaios de Ductilidade (NBR 6293, 2015); Massa Específica (NBR 6296, 2012); Penetração (NBR 6576, 2007); Ponto de Amolecimento (NBR 6560, 2008), Ponto de Fulgor (NBR 11341, 2014); Recuperação Elástica (NBR 15086, 2006); Solubilidade em Tricloroetileno (NBR 14855, 2015); e Viscosidade Brookfield (NBR 15184, 2004).

- Caracterizar o material granular de brita graduada nos ensaios de Adesividade (DNER-ME 078, 1994); Densidade (DNER-ME 081, 1998); Durabilidade (DNER-ME 089, 1994); e abrasão Los Angeles (DNER-ME 035, 1998).
- Definir um teor ótimo de ligante para as misturas asfálticas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10) através do ensaio da PCG (NF 98-252, 1999), tendo como ponto de partida os teores ótimos obtidos por Shinohara (2012) através do método Marshall (DNER-ME 043, 1995).
- Ensaiar corpos de prova, nos teores ótimos já definidos das misturas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10), em relação à resistência à água seguindo os normativos para o ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989).
- Verificar a resistência quanto ao afundamento nas trilhas de roda nas misturas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10) através do ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) e observar as limitações causadas pelos diferentes teores de EVA no ligante asfáltico.
- Obter as propriedades mecânicas de módulo de rigidez no ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004), definindo a temperatura crítica ( $\theta_{crít}$ ) no plano Cole-Cole para todas as misturas com os diferentes teores de polímero EVA e, também, para a mistura convencional.
- Definir a deformação admissível no ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) na temperatura crítica ( $\theta_{crít}$ ) e na temperatura normativa de 10°C ( $\theta_{10°C}$ ), também, para todas as misturas com os diferentes teores de polímero EVA e para a mistura convencional.
- Explorar os resultados dos ensaios, por meio da avaliação do desempenho mecânico de módulo de rigidez e deformações admissíveis das misturas asfálticas.
- Modelação de Huet-Sayegh e dimensionamento simulado de um pavimento com os dados do ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e da Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007).

- Verificar a eficiência da mistura asfáltica modificado pelo polímero EVA frente à mistura asfáltica convencional através de dados, tabelas e gráficos comparativos.

A estrutura dos ensaios da pesquisa encontra-se no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma dos ensaios da pesquisa



Fonte: autora (2017)

## 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

A metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas delimita a presente pesquisa, porém os dados obtidos podem ser comparados com as demais metodologias, desde que consideradas as diferentes variáveis utilizadas.

A realização da pesquisa limita-se aos ensaios laboratoriais e não foram coletados dados em campo para possível relação campo-laboratório.

Os ensaios de Fadiga desta pesquisa foram limitados a deformação máxima de 180 $\mu$ def, que é considerado uma deformação alta e usual nas rodovias brasileiras.

Para uma melhor homogeneidade é recomendável pela comunidade científica utilizar o polímero EVA em formato de pó ou líquido, mas os polímeros disponíveis no Brasil são em formato de *pellets* (pequenos grãos ovais).

Não é objetivo do trabalho a comparação das metodologias de dimensionamento existentes no mundo. O trabalho fica restrito à fixação de um tipo de ligante alternando os teores de polímero para análise das misturas asfálticas nos ensaios mecanicistas.

## 1.5 JUSTIFICATIVAS PARA O TEMA PROPOSTO

O aumento da durabilidade das misturas asfálticas é de importância nacional, tendo em vista os constantes processos de manutenção que são submetidos os pavimentos rodoviários brasileiros, que não acompanham, em termos estruturais, os aumentos constantes da tolerância dos limites de Peso Bruto Total (PBT) aprovados pela legislação. Com o desenvolvimento de materiais tecnológicos, como a modificação de materiais convencionais, há a possibilidade de aumentar a durabilidade do pavimento e, concomitantemente, reduzir o custo de construção através da diminuição da espessura da camada de mistura asfáltica em rodovias de alto tráfego. Para isso, o estudo da modificação de ligantes asfálticos por polímero torna-se fundamental ao refletir diretamente no dimensionamento de um pavimento.

A definição da porcentagem ideal do teor de polímero EVA na modificação dos ligantes asfálticos tem sido obtida, em outros estudos, através de ensaios de caracterização, módulo de resiliência ou ensaios de fadiga. Porém, não foi encontrado, até o momento, dados de ensaios que põem em prova aos ensaios mais rigorosos como, por exemplo, os ensaios fundamentais das metodologias europeias, mais especificamente

as das metodologias francesas. O desempenho mecânico da resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga é, também, relacionado ao teor de polímero nas misturas asfálticas. Desta maneira, os diferentes teores de modificação do polímero EVA, ainda pouco estudado no Brasil, são colocados em foco nesta pesquisa para o estudo sobre as propriedades mecânicas do módulo de rigidez, assim como as deformações admissíveis das misturas asfálticas.

Os estudos das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA não possuem definições concretas em relação ao comportamento dessa mistura relacionando teores de polímero com a variação da temperatura. Sabe-se que o meio ambiente (temperatura, ar e água) e as variações de velocidade (tempo de aplicação das cargas e frequências de sollicitação), assim como as características do material devem ser considerados para um correto dimensionamento dos pavimentos rodoviários, pois esses fatores influenciam diretamente na durabilidade do concreto asfáltico. Visto isso, serão avaliados nesta pesquisa três teores de polímero a sete temperaturas diferentes no ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e em quatro diferentes frequências de sollicitação.

O gráfico Cole-Cole é uma das representações obtidas desse ensaio no qual é possível indicar a temperatura crítica do material ensaiado. Essa temperatura é relacionada ao tipo de ligante e tipo de material granular que o compõem. Segundo a metodologia francesa de formulação para o ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007), a temperatura crítica dos materiais viscoelásticos ocorre a 10°C e a 25 Hz. Porém, em estudos realizados por Almeida (2013), Shinohara (2012), Barra (2009), entre outros, testaram a mesma metodologia com materiais nacionais e tiveram como temperatura crítica valores que chegaram a 30°C. Nessa linha, cabe um estudo, principalmente em relação às misturas modificadas, para considerar essas temperaturas nos ensaios de fadiga para determinação das deformações máximas admissíveis e obter os parâmetros necessários para o dimensionamento do pavimento.

Estudar o comportamento das propriedades mecânicas de módulo de rigidez e as deformações admissíveis no domínio viscoelástico através dos resultados dos ensaios fundamentais de Módulo Complexo e Fadiga, juntamente com os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh, darão embasamento nas discussões sobre modificação de ligantes por polímeros EVA nas misturas asfálticas utilizadas no Brasil.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente tese está organizada em cinco capítulos descritos a seguir:

**Capítulo 1 - Introdução:** contém as considerações iniciais, o objetivo geral, os objetivos específicos, os procedimentos para atingir o objetivo, as delimitações do espaço da pesquisa, as justificativas para o tema proposto e a organização da pesquisa. Nesse capítulo estão as principais informações sobre o conteúdo do trabalho.

**Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** aborda uma revisão bibliográfica sobre ligantes asfálticos; polímero EVA; ensaios laboratoriais de caracterização do agregado e ligante; ensaio da PCG (NF 98-252, 1999); ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989); ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993); ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004); e o ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007). Nesse capítulo também é abordado a modelação através dos parâmetros de Huet-Sayegh.

**Capítulo 3 - Materiais e Ensaios Laboratoriais:** encontra-se a descrição dos materiais utilizados neste trabalho (agregado e ligante) e a execução dos ensaios de caracterização dos materiais, PCG (NF 98-252, 1999), Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) e os ensaios fundamentais de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007).

**Capítulo 4 - Resultados e Análises dos Ensaios Laboratoriais:** são expostos e analisados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, PCG (NF 98-252, 1999), Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993), Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007). É realizado, também, uma modelação e um exemplo de dimensionamento de pavimento com as misturas asfálticas estudadas nessa pesquisa.

**Capítulo 5 - Conclusões:** encontra-se a conclusão final da pesquisa e as recomendações para estudos futuros.

Por fim, a relação das referências bibliográficas utilizadas nessa pesquisa.





## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo é abordada a revisão bibliográfica dos materiais e metodologia dos ensaios presentes nesse trabalho. O item sobre os materiais é dividido em três partes, iniciando pelas principais características dos ligantes asfálticos, em seguida, as definições e características do polímero EVA e finalizando com os estudos sobre a modificação do ligante asfáltico pelo polímero EVA.

O estudo da arte dos ensaios laboratoriais é subdividido em sete partes iniciando pela caracterização do agregado e do ligante, seguido pelos ensaios de PCG (NF 98-252, 1999); ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989); ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993); ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004); e, por fim, o ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007). É realizada também uma explanação sobre a modelação através dos parâmetros de Huet-Sayegh.

#### 2.1 MATERIAIS

Na lista de materiais utilizados na pavimentação rodoviária incluem-se ligantes asfálticos, agregados graúdos e miúdos, emulsões, aditivos, polímeros, calcificantes, fíleres, melhoradores de adesividade etc. A revisão sobre materiais deste trabalho será focado no ligante asfáltico, mais precisamente sobre a modificação com polímeros.

##### 2.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico é a parte nobre dos pavimentos flexíveis utilizados na pavimentação rodoviária. É um composto de hidrocarbonetos fracionados em quatro classes químicas denominadas de frações SARA (saturadas, aromáticos, resinas e asfaltenos). A matriz dos maltenos (parte volátil do ligante asfáltico) é constituída pelas frações saturadas, aromáticas e pelas resinas. Já os asfaltenos (parte rígida) determina a estrutura do ligante asfáltico.

Uma das características mais importantes é a ligação que faz com o material granular gerando um corpo asfáltico, doravante nessa pesquisa de mistura asfáltica. Se a adesividade não possuir união

suficiente sobre o ligante-agregado, a mistura pode resultar em uma camada susceptível à desagregação quando sujeitas à aplicação das cargas em campo.

A desagregação superficial caracteriza-se pelo desprendimento do agregado devido aos esforços do pneu em contato com o pavimento em consequência da falta de resistência suficiente desse contato ligante-agregado. A desagregação gera uma heterogeneidade nas misturas e descontinuidades que permitem a penetração d'água, que ao atingir as camadas inferiores do pavimento faz com que reduzam suas capacidades de suporte degenerando, por fim, a capacidade estrutural do pavimento como um todo (De Moura, 2001).

A espessura do ligante ao redor do agregado é relacionada à velocidade com que ocorre a deterioração por fadiga e a deformação permanente. Uma porcentagem baixa ou uma porcentagem muito alta de ligante fará com que a mistura asfáltica sofra rapidamente uma ruptura. Tendo em vista esse fato é de suma importância um correto cálculo do teor ótimo do ligante para prolongar a vida útil do pavimento.

O ligante é capaz de garantir a flexibilidade com a passagem de carga, por ser considerado um material viscoelástico. Os materiais viscoelásticos são suscetíveis à variação de temperatura e frequência de aplicação das cargas. No entanto, as misturas asfálticas apresentam comportamento praticamente linear (elástico) à alta frequência de aplicação de carga. Já, se a frequência de aplicação de carga é baixa o material comporta-se como material viscoso. A viscoelasticidade é a base para o estudo do comportamento mecânico de módulo de rigidez, pois as características do ligante asfáltico são herdadas das misturas asfálticas que o compõem (Momm, 1998).

### **2.1.2 Polímero**

Um polímero é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas e simples unidades químicas, chamadas de monômeros, ligadas covalentemente. Os polímeros são classificados em quatro categorias em relação ao comportamento frente às variações térmicas (Bernucci *et al*, 2008):

- Termorrígidos: são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias

moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster e poliuretano.

- Termoplásticos: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporadores aos asfaltos de alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno e policloreto de vinila (PVC).
- Elastômeros: são aqueles que, quando aquecidos, decompõem-se antes de amolecer com propriedades elásticas. Por exemplo: estireno butadieno estireno (SBS), estireno butadieno randômico (SBR) e etileno acetato de vinila (EVA).
- Elastômeros termoplásticos (plastômeros): são aqueles que, à baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamentos termoplásticos. Por exemplo: alguns tipos de SBS e EVA.

Historicamente, os primeiros países que utilizaram misturas asfálticas modificadas foram os países europeus e norte-americanos, destacando-se a França, a Espanha, a Alemanha e os Estados Unidos (EUA). No Brasil as primeiras experiências datam da década de 70.

Os normativos mais conhecidos mundialmente sobre ligantes modificados por polímeros são o americano *Strategic Highway Research Program* (SHRP), divididos em quatro normas ASTM D 5840 (2000), ASTM D 5841 (2000), ASTM D 5892 (2000) e ASTM D 5976 (2000) e o francês *Méthode d'essai de Laboratoire des Ponts et Chaussées* (LPC). Especificamente para o polímero EVA, os franceses publicaram o *Identification et dosage par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier des copolymères SBS et EVA dans les liants bitumineux: Méthode d'essai* (2009).

Já no Brasil, existe a coletânea de Asfaltos Modificados por Polímeros publicada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Essas normas estão disponíveis no site do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR/DNIT), que englobam quatorze normas listadas a seguir:

- DNER-ES 385/99 - Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero

- DNER-ES 386/99 - Pavimentação - pré- misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito
- DNER-ES 387/99 - Pavimentação - areia asfalto a quente com asfalto polímero
- DNER-ES 388/99 - Pavimentação - micro pré-misturado a quente com asfalto polímero
- DNER-ES 390/99 - Pavimentação - pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero
- DNER-ES 391/99 - Pavimentação - tratamento superficial simples com asfalto polímero
- DNER-ES 392/99 - Pavimentação - tratamento superficial duplo com asfalto polímero
- DNER-ES 393/99 - Pavimentação - tratamento superficial triplo com asfalto polímero
- DNER-ES 394/99 - Pavimentação - macadame por penetração com asfalto polímero
- DNER-ES 395/99 - Pavimentação - Pavimentação - pintura de ligação com asfalto polímero
- DNIT-ME 128/2010 - Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos
- DNIT-ME 129/2011 - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico
- DNER-ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cântabro
- DNER-ME 384/99 - Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero

Como visto, no ano de 1999 foram publicadas várias normas de especificações de serviços em se tratando de asfaltos modificados, porém estas estão desatualizadas em relação a enorme variedade de materiais e equipamentos disponíveis nos dias de hoje.

Além das normas anteriormente citadas, também há as normas brasileiras NBR 14896 (2002) e NBR 14948 (2003) específicas para ligantes modificados por polímeros, aprovadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) através da Resolução nº 32 de 21/09/2010 e no Regulamento Técnico nº 04/2010 publicado no Diário Oficial da União (DOU) em 22/09/2010, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Especificação para ligantes modificados por polímeros

| GRAU (ponto de amolecimento mín. / Recuperação Elástica mín.) |             | FLEXPAVE                |         |         |
|---|-------------|-------------------------|---------|---------|
|   |             | 55/75                   | 60/85   | 65/90   |
| ENSAIOS NA AMOSTRA VIRGEM:                                    | MÉTODO ABNT | LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO |         |         |
| Penetração 25°C, 5s, 100g, dmm                                | NBR-6576    | 45 a 70                 | 40 a 70 | 40 a 70 |
| Ponto de Amolecimento mín., °C                                | NBR-6560    | 55                      | 60      | 65      |
| Ponto de Fulgor, mín.   | NBR-11341   | 235                     | 235     | 235     |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx., cP  | NBR-15184   | 3000                    | 3000    | 3000    |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx., cP  | NBR-15184   | 2000                    | 2000    | 2000    |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx., cP | NBR-15184   | 1000                    | 1000    | 1000    |
| Ensaio de Separação de Fase, máx., °C                         | NBR-15166   | 5                       | 5       | 5       |
| Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín., %                    | NBR-15086   | 75                      | 85      | 90      |
| <b>ENSAIO NO RESÍDUO DO RTFOT</b>                             |             |                         |         |         |
| Varição de massa, máx., %                                     | NBR-15235   | 1                       | 1       | 1       |
| Varição do PA, °C máx.  | NBR-6560    | -5 a +7                 | -5 a +7 | -5 a +7 |
| Porcentagem de Penetração Original, mín.                      | NBR-6576    | 60                      | 60      | 60      |
| Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.     | NBR-15086   | 80                      | 80      | 80      |

Fonte: ANP (2010)

Já a avaliação da aplicabilidade da *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder* da *Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) fez parte de um projeto realizado por Bahia *et al* (2001) para ligantes asfálticos modificados, como mostra o Quadro 2. O estudo foi baseado em coleta de dados e revisão bibliográfica listando os materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos (EUA) e publicado no *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP).

## Quadro 2 - Materiais mais utilizados como modificadores de asfalto nos EUA

| Tipo de Modificador     | Classe                                       | Aplicação         |                   |                    |                   |                   |
|-------------------------|--|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|                         |  | DP <sup>(a)</sup> | TF <sup>(b)</sup> | TBT <sup>(c)</sup> | DU <sup>(d)</sup> | EO <sup>(e)</sup> |
| Polímeros Elastômeros   | eStireno-Butadieno (SB)                      | x                 |                   | x                  | x                 |                   |
|                         | eStireno-Butadieno-eStireno (SBS)            | x                 | x                 | x                  |                   |                   |
|                         | eStireno-Butadieno-Rubber (SBR)              | x                 |                   | x                  |                   |                   |
| Polímeros Plastômeros   | Etileno-Acetato de Vinila (EVA)              | x                 | x                 |                    |                   |                   |
| Borracha moída de Pneus | Diferentes tamanhos, tratamentos e processos | x                 | x                 | x                  |                   |                   |
| Agentes Antidescolantes | Amidoaminas                                  |                   |                   |                    | x                 |                   |
|                         | poliamidas                                   |                   |                   |                    | x                 |                   |
|                         | Cal Hidratada                                |                   |                   |                    | x                 |                   |
| hidrocarbonetos         | Asfalto Natural                              | x                 | x                 | x                  | x                 |                   |
| Fibras                  | Celulose                                     | x                 |                   |                    |                   |                   |
|                         | Polipropileno                                | x                 | x                 | x                  |                   |                   |
|                         | poliéster                                    | x                 |                   | x                  |                   |                   |
|                         | Mineral                                      | x                 |                   |                    |                   |                   |
| Fíler Mineral           | Cal Hidratada                                | x                 | x                 | x                  | x                 | x                 |
| Antioxidantes           | Cal Hidratada                                |                   |                   |                    | x                 | x                 |
| Extensores              | Enxofre                                      | x                 | x                 | x                  |                   |                   |

<sup>(a)</sup> Deformação Permanente

<sup>(b)</sup> Trincamento por Fadiga

<sup>(c)</sup> Trincamento em Baixas Temperaturas

<sup>(d)</sup> Danos por Umidade

<sup>(e)</sup> Envelhecimento Oxidativo

Fonte: Bahia *et al* (2001) apud Cezaro (2008)

Os dados referem-se à catalogação da aplicação com materiais dos Estados Unidos (EUA). Dentre esses modificadores ressalta-se a importância dos polímeros, conferindo principalmente para soluções na fadiga e deformações permanentes, problemas esses solucionados devido ao aumento da elasticidade e devido à redução da suscetibilidade térmica, respectivamente.

A diminuição à suscetibilidade térmica está ligada ao aumento à prevenção ao envelhecimento fazendo com que a superfície do pavimento, parte mais exposta às radiações, mantenha as propriedades iniciais do material. O asfalto possui vida útil relacionada à degradação na presença da radiação ultravioleta (UV), oxigênio e variação de temperatura, fenômenos estes conhecidos como envelhecimento do ligante. A parte mais leve do ligante, quando oxidadas transformam-se em asfaltenos. Esse aumento de massa molecular com a perda da viscoelasticidade faz com apareçam as primeiras fissuras e contribuam para o surgimento de trincas por fadiga.

Uma das primeiras conclusões positivas em relação aos antioxidantes nos ligantes asfálticos foi realizado por Vonk *et al* (1994) e, recentemente, no Brasil por Oliveira (2015). Vonk *et al* (1994) fez os

estudos através de cromatografia (GPC) onde observou a melhor adesividade nas ramificações dos polímeros que ligavam ao ligante asfáltico. Já Oliveira (2015) utilizou espectroscopia no infravermelho (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy* - FTIR) concluindo o potencial retardante de envelhecimento do asfalto modificado.

Outros ensaios de envelhecimento foram realizados por Silva (2005), Naskar *et al* (2013) e Melo (2014) que utilizaram o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (ASTM D 2872-88), simulador de envelhecimento através de uma fina camada de ligante exposta a altas temperaturas. Naskar *et al* (2013) demonstrou que os polímeros elastoméricos, que é o caso do EVA utilizado na presente pesquisa, concede maior proteção ao ligante do que os ligantes modificados com plastômeros ou nanofíleres.

### **2.1.2.1 Polímero EVA**

Após estudos sobre os tipos de modificadores de ligantes asfálticos, definiu-se para essa pesquisa modificar o ligante asfáltico com polímero Etileno Acetato de Vinila - EVA. Segundo Freitas (1996), o EVA como modificador de ligante asfáltico é muito utilizado em alguns países, destacando-se, por exemplo, a França e Espanha. Os primeiros experimentos com o polímero EVA nas misturas asfálticas já datam quase 40 anos, desde os estudos de Hameau e Druon (1976), porém ainda se nota pouco explorado no universo acadêmico.

O polímero EVA é um dos polímeros mais utilizados na modificação de misturas asfálticas, juntamente com o SBS (estireno butadieno estireno) e o SBR (estireno butadieno randômico). Segundo estudos no *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (2001), no *Permanent International Association of Road Congresses* - PIARC (1998) e Létoffé (2000), o polímero EVA é o mais utilizado entre os plastômeros, que são classificados dependendo do teor de acetato de vinila. Nessa família, ainda existem o EMA (etil acrilato de metila), EBA (etil acrilato de butila) e o PIB (poliisobuteno), mas apenas o EVA, até o momento, foi estudado e normatizado pela *Strategic Highway Research Program* (SHRP) americana.

O EVA é um polímero que pode variar de um plastômero a um elastômero, dependendo da porcentagem de acetato de vinila, como citado anteriormente. O teor de EVA para misturas asfálticas deve conter entre 18% e 33% de acetato de vinila (PIARC, 1999; Brulé, 1998), que quanto maior é essa porcentagem, mais próximo ao

comportamento elástico. Mesmo em teores baixos de acetato (18%) é possível notar uma melhor estabilidade de estocagem e também baixa suscetibilidade (Hussein *et al*, 2006). Os polímeros ditos elastoméricos são materiais com alongamento de ruptura muito elevado, na ordem de 400% (família dos termoplásticos com cadeias lineares). Já os plastômeros apresentam menor alongamento, na ordem de 70 a 100%, sendo normalmente constituídos por cadeias cruzadas ou ramificadas.

Após análises dos estudos sobre o material, a porcentagem entre 27% e 29% de acetato de vinila é a mais utilizada, por ser mais flexível, e indicado para modificar asfaltos rodoviários (Gorkem, 2009). O teor de acetato utilizado para modificar o ligante desta pesquisa é de 28%, teor este também indicado pelo fornecedor do polímero (Braskem, 2010) que o nomeia de HM-728. Portanto, esse polímero é considerado um elastômero para efeito de classificação. Todas as descrições, aplicações e propriedades do polímero EVA HM-728 encontram-se no Anexo 2.

O polímero EVA possui estabilidade térmica próxima a 300°C testado por termogravimetria (TGA), que é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida, em função da temperatura, enquanto esta é submetida a uma programação controlada (ALLEN *et al*, 2000; Saoula *et al*, 2012; Naskar *et al*, 2013).

As principais características do polímero EVA no ligante asfáltico é o aumento da viscosidade na qual diminui a suscetibilidade à deformação permanente devido, em parte, à capacidade de solubilização do EVA nas frações saturadas do asfalto (Leite, 1999; Bringel *et al*, 2005; Ildefonso, 2007; Rodrigues *et al*, 2009; Frota e D'Antona, 2011; Toraldo e Mariani, 2014, Brovelli *et al*, 2014).

Outra característica é a diminuição do ângulo de fase devido ao aumento da elasticidade do material (Ildefonso, 2007; Rodrigues *et al*, 2009; Glaoui *et al*, 2011; Toraldo e Mariani, 2014; Brovelli *et al*, 2014) reduzindo a deterioração por fadiga.

Também, foram avaliadas as características de suscetibilidade à umidade em pesquisas de Gorkem e Sengoz (2009) onde o ligante modificado pelo polímero EVA mostrou aumento na aderência ligante-agregado através de criações de estrutura de rede dentro do ligante convencional.

A seguir, encontram-se uma compilação das vantagens do ligante e da mistura asfáltica modificada pelo polímero EVA em relação aos convencionais (Shinohara, 2012):



- Aumento da viscosidade.
- Diminuição do valor de penetração.
- Aumento da temperatura do ponto de amolecimento.
- Melhor desempenho na recuperação elástica.
- Maior flexibilidade em virtude da maior concentração de elastômero.
- Maior resistência à umidade.
- Suporta condições mais agressivas de tráfego em relação à deformação permanente.
- Reduz os custos de manutenção de pavimentos por suportar uma maior solitação de carga.
- Aumento da vida útil do pavimento.
- Permite a redução da espessura da camada asfáltica no pavimento, para as mesmas solicitações de tráfego.

Na sequência, a compilação de algumas desvantagens do ligante e da mistura asfáltica modificada pelo polímero EVA em relação aos convencionais (Shinohara, 2012):

- Com o aumento da viscosidade pode ocasionar maiores custos nas manutenções dos equipamentos, maiores gastos de energia durante a usinagem e na aplicação em campo durante o bombeamento.
- A mistura asfáltica modificada chega, em média, a ser 20% mais cara que as misturas convencionais. Isso se deve ao fato de ser um produto obtido sob encomenda e ainda não ser disponibilizado em grande escala.

Porém, mesmo com essas desvantagens, assim como ocorrem com qualquer outro material, a vantagem tecnológica e a necessidade devido à demanda de mercado sobressaem e mantém o produto competitivo.

Em relação à aplicação em campo da mistura asfáltica modificada pelo EVA nas rodovias brasileiras, a concessionária CCR Autoban já realizou testes em pistas experimentais e em alguns trechos da Rodovia Anhanguera SP-330.

### **2.1.2.2 EVA versus SBS**

Uma das constantes comparações e indagações em relação ao polímero EVA é em relação ao polímero SBS, que atualmente é mais utilizado no país. A maior utilização deste último é devido ao menor custo, pois já é produzido em escala comercial, ao contrário do EVA que ainda não se inseriu no mercado nacional. Esses polímeros diferenciam-se principalmente devido ao EVA possuir melhor solubilidade e trabalhabilidade no momento da modificação (homogeneidade); melhor adesividade; e melhor flexibilidade por possuir comportamento de um elastômero.

O ligante modificado pelo SBS possui uma menor força e resistência à penetração, à alta temperatura, prejudicando a rigidez do material (Gorkem, 2009). Em relação ao envelhecimento, os asfaltos modificados pelo EVA apresentam resultados mais eficientes em relação ao SBS, pois possuem menor ângulo de fase ganhando elasticidade, ao contrário do asfalto modificado pelo SBS, problema este provavelmente relacionado com as duplas ligações butadiênicas que oxidam mais rapidamente (Isacsson e Lu, 2000).

Nos estudos sobre ligantes asfálticos modificados também é encontrado o polímero Elvaloy®, em alguns casos confundidos com o polímero EVA. O Elvaloy® é o nome comercialmente registrado do Terpolímero Elastomérico Reativo (RET) composto de etileno, butilacrilato e glicidilmetacrilato. Um terpolímero é um polímero com repetições de três unidades químicas diferentes. Apesar da aparente semelhança no nome, o Elvaloy® possui cadeias químicas totalmente diferentes do EVA e os teores utilizados para modificação do ligante asfáltico normalmente é baixo, em torno de 1% a 2%.

### **2.1.2.3 Teor ótimo de polímero EVA**

A modificação do asfalto é uma técnica na qual uma escolha certa do tipo de polímero e uma dosagem correta do teor adicionado no ligante melhoram as características viscoelásticas do material (Torald e Mariani, 2014).

Nos ensaios de desempenho mecânico de rigidez desses autores foi demonstrado que as misturas asfálticas modificadas com teores de EVA abaixo de 3% obtiveram resultados muito semelhantes ao ligante convencional, ou seja, sem influência nos resultados da modificação. Já

para misturas com teores acima de 6%, não aumentam o desempenho em relação ao módulo de rigidez, mas melhoram na fadiga.

Os resultados dos ensaios de recuperação elástica mostram que o teor de 5% de polímero EVA incorporado ao ligante asfáltico é o mínimo necessário para alcançar uma recuperação com bom desempenho, segundo estudos de Morilha (2004).

Para que a definição dos teores de polímero da presente pesquisa possua embasamento científico, foram selecionados os estudos de pesquisadores que utilizaram ligantes asfálticos modificados pelo polímero EVA, que se encontram compilados no Quadro 3. Além dos pesquisadores e ano de publicação, também constam dados do tipo de CAP, teor de polímero EVA e o país de estudo (sendo este no Brasil, também se inseriu a universidade correspondente).

Quadro 3 - Estudos com polímero EVA para modificação de ligantes asfálticos

| REFERÊNCIAS                   | CAP    | TEOR DE POLÍMERO EVA (%) | PAÍS           |
|-------------------------------|--------|--------------------------|----------------|
| Leite (1999)                  | 50/70  | 5, 6, 10 e 15            | Brasil, UFRJ   |
| Morilha (2004)                | 50/70  | 5                        | Brasil, UFSC   |
| Magalhães (2004)              | 20     | 7 e 5                    | Brasil, UFRJ   |
| Zattera <i>et al</i> (2005)   | 50/70  | 3 e 9                    | Brasil, UFRGS  |
| Bringel <i>et al</i> (2005)   | 50/70  | 4 e 5                    | Brasil, UFC    |
| Hussein <i>et al</i> (2006)   | -      | 4                        | Arábia Saudita |
| Santos <i>et al</i> (2007)    | 50/70  | 7 e 5                    | Brasil, USP    |
| Rodrigues <i>et al</i> (2009) | 50/70  | 4                        | Brasil, UFC    |
| Alencar <i>et al</i> (2009)   | 50/70  | 4 e 5                    | Brasil, UFC    |
| Gorkem <i>et al</i> (2009)    | 50/70  | 3, 4, 5, 6 e 7           | Turquia        |
| Glaoui <i>et al</i> (2011)    | 40/50  | 5                        | Argélia        |
| Frota <i>et al</i> (2011)     | 50/70  | 4                        | Brasil, UFAM   |
| Saoula <i>et al</i> (2012)    | 40/50  | 5                        | Argélia        |
| Toraldo <i>et al</i> (2014)   | 70/100 | 3, 6 e 9                 | Itália         |
| Brovelli <i>et al</i> (2015)  | 50/70  | 3, 6 e 9                 | Itália         |

Fonte: autora (2017)

Analisando o Quadro 3, observa-se que os teores variaram de 3% a 15%.

Os tipos de ensaios realizados pelos pesquisadores que modificaram o ligante asfáltico pelo polímero EVA, seguindo a mesma ordem em que aparecem na Quadro 3, foram:

- Leite (1999)
- Morilha (2004): Marshall (DNER-ME 43/64), RTFOT (ASTM D 2872), penetração (ASTM D 5), ponto de amolecimento (MB 164), recuperação elástica (DNER 382/99) e viscosidade (MB 517 e ASTM D 4402).
- Magalhães (2004): módulo de resiliência (DNER-ME 133/94 e ASTM D 4123), resistência à fadiga, deformação permanente e Lottman (AASHTO T 283-89).
- Zattera *et al* (2005): TGA, resistência à tração (ASTM D638), resistência ao impacto Izod (ASTM D256) e dureza (ASTM D2240).
- Bringel *et al* (2005): TGA, espectro infravermelho, RTFOT (ASTM D2872), cisalhamento dinâmico (AASHTO TP5) e Brookfield (ASTM D4402).
- Hussein *et al* (2006): Marshall (ASTM D 1559), Lottman (AASHTO T-283-89) , Módulo de resiliência (ASTM D 4123, 1982) e deformação permanente.
- Santos *et al* (2007): ponto de amolecimento.
- Rodrigues *et al* (2009)
- Alencar *et al* (2009): estabilidade à estocagem.
- Gorkem *et al* (2009): adesividade (ASTM D1664, 1985) e Lottman (AASHTO T-283, 1989).
- Glaoui *et al* (2011): fadiga térmica, DSR e módulo dinâmico.
- Frota *et al* (2011): densidade (NBR 6296/2004), penetração (ABNT 6576/98), ponto de amolecimento (NBR 6560/2000), ponto de fulgor (NBR 11341/ 2014), Brookfield (ASTM D 4402), reômetro de cisalhamento dinâmico (ASTM D 7175/2002) e RTFOT (ASTM D 2872).
- Saoula *et al* (2012): TGA, Marshall, tração indireta e resistência á água.
- Toraldo *et al* (2014): GSC (SHRP A-379, 1994), módulo (NF 12697-26, 2004), deformação permanente (EN 12697-22, 2003) e fadiga (EN 12697-24, 2005).
- Brovelli *et al* (2015): deformação permanente (EN 12697-22, 2003) e fadiga (EN 12697-24, 2005).

O teor ótimo de polímero deve ser o suficiente para criar uma matriz polimérica com a estrutura do ligante asfáltico incluída nessas

malhas interligadas ao invés de uma matriz de ligante asfáltico com pontos de polímeros (De Moura, 2001).

Alguns estudos como de Toraldo e Mariani (2014) e Brovelli *et al* (2014) adicionaram o polímero EVA diretamente durante a usinagem da mistura asfáltica e não previamente no ligante asfáltico para realizar os ensaios de deformação permanente, módulos de rigidez e fadiga. Apesar do método de inserção do polímero EVA ainda não estar estabelecido nas metodologias e normas de modificação por ligantes, os resultados desses pesquisadores foram satisfatórios em relação às misturas convencionais.

Para a presente pesquisa, optou-se por realizar a modificação tradicional no próprio ligante, para seguir a mesma metodologia da pesquisa precedente de Shinohara (2012) e para que fosse possível realizar os ensaios de caracterização dos ligantes modificados.

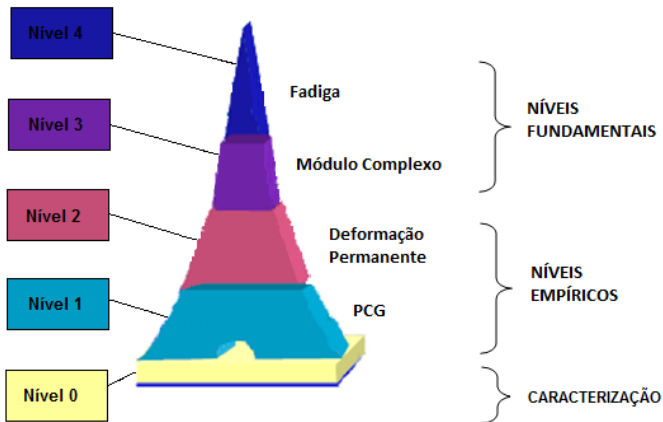
## **2.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS LABORATORIAIS**

Para que os resultados de uma pesquisa possam embasar estudos futuros e servirem como parâmetros para efeitos comparativos é necessário utilizar-se de metodologias mundialmente padronizadas, através dos respectivos normativos, e seguirem à risca aos procedimentos estabelecidos, assim como, as especificações de equipamentos e materiais.

Além de definir qual metodologia será utilizada para direcionar uma pesquisa é importante, também, saber qual a relação que os ensaios possuem com a realidade. No caso dessa pesquisa, os ensaios da metodologia francesa foram selecionados por possuírem uma estreita relação dos dados obtidos em campo e em laboratório, conferidos nos estudos realizados na pista de testes do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC). Os ensaios da PCG (NF 98-252, 1999) e Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) (níveis empíricos), assim como, os ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) (níveis fundamentais) seguem a hierarquia dos ensaios da metodologia francesa. Assim, os ensaios de formulação de misturas asfálticas encontram-se ilustrados na Figura 9, com os respectivos níveis de formulação.

Todas as iniciais dos nomes de ensaios citados nessa pesquisa serão escritos em letras maiúsculas, para diferenciá-los dos substantivos comuns.

Figura 9 - Níveis de formulação e os respectivos ensaios



Fonte: adaptado de LCP (2007)

O Nível 0 corresponde aos ensaios de caracterização dos materiais e composição preliminar dos concretos asfálticos. Nos ensaios iniciais (Nível 1 e 2) as formulações são testadas com diferentes teores de ligante asfáltico para obtenção de um teor ótimo. Os ensaios finais (Nível 3 e 4), geralmente testados com apenas um teor de ligante devido à complexidade e a alta demanda de tempo, é testado para verificar se o concreto asfáltico suporta as solicitações de campo propostas pelo projetista.

Para que a proposta de construir bons concretos asfálticos seja eficiente, cada formulação deverá ter um desempenho mínimo que esteja de acordo com as especificações referentes ao tipo de mistura em que se enquadram (NF 98-130 a NF 98-141, 1993). Ressalta-se que todos os níveis são de caráter eliminatório, porém mesmo no caso de aprovação dos teores, não significa estarem aptos para aplicação em campo. Os desempenhos devem ser simulados e avaliados com o auxílio de ferramentas computacionais de cálculo destinadas ao dimensionamento de pavimentos, a fim de verificar a conformação conjunta das características de rigidez e de resistência à ruptura por fadiga (LPC, 2007).

Além dos ensaios citados, são descritas também nesse capítulo as metodologias dos ensaios de caracterização dos agregados, caracterização dos ligantes asfálticos convencional e modificado pelo

polímero EVA e o ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), que substituiu o ensaio Duriez (NF 98-251-1, 1995) no qual o motivo será dissertado adiante.

### 2.2.1 Metodologia de ensaio de caracterização do agregado

Os normativos dos ensaios de caracterização dos agregados foram elaborados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) nos anos 90. Por serem ensaios compulsórios em quase todas as obras de pavimentação no Brasil e largamente conhecidos pela comunidade acadêmica, os ensaios serão apenas citados e não explanados o passo-a-passo.

Os ensaios realizados nos agregados utilizados nessa pesquisa são:

- DNER-ME 035 (1998): Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”.
- DNER-ME 078 (1994): Agregado graúdo - Adesividade de ligante betuminoso.
- DNER-ME 089 (1994): Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato.
- DNER-ME 086 (1994): Agregado - Determinação do índice de forma.

No Quadro 4 encontram-se os limites preconizados pela norma de especificação de serviço DNIT 031-ES (2006), para os ensaios de caracterização de agregados.

Quadro 4 - Limites para caracterização dos agregados

| ENSAIO              | LIMITES |
|---------------------|---------|
| Abrasão Los Angeles | ≤ 50%   |
| Adesividade         | visual  |
| Durabilidade        | < 12%   |
| Índice de forma     | > 0,5   |

Fonte: DNIT 031-ES (2006)

### 2.2.2 Metodologia de ensaio de caracterização do ligante

Assim como os ensaios de caracterização dos agregados, os ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos também são largamente conhecidos pela comunidade acadêmica, sendo apenas citados nesse capítulo e não explanados o passo-a-passo.

Os ensaios dos ligantes convencionais e modificados para o estudo dos diferentes teores de polímero EVA são apresentados a seguir, com as respectivas normas.

- NBR 6293 (2015): Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade.
- NBR 6296 (2012): Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa.
- NBR 6576 (2007): Materiais asfálticos - Determinação da penetração.
- NBR 6560 (2008): Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.
- NBR 11341 (2014): Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.
- NBR 15086 (2006): Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro.
- NBR 14855 (2015): Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno.
- NBR 15184 (2004): Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (Brookfield).

No Quadro 5 encontram-se os limites preconizados para os ensaios de caracterização do ligante convencional CAP 50/70 (DNIT 095-EM, 2006) e dos ligantes modificados (DNIT 129-EM, 2011).



Quadro 5 - Limites para a caracterização dos ligantes asfálticos

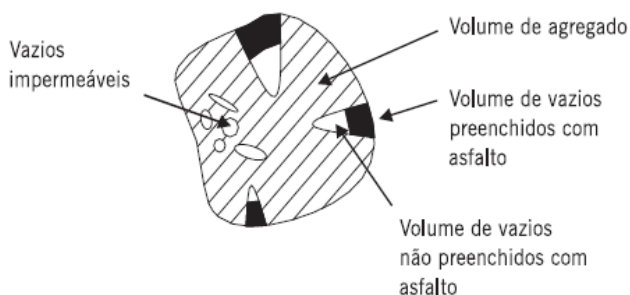
| CARACTERIZAÇÃO            | DNIT 095-EM<br>(2006) | DNIT 129-EM<br>(2011) |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ductilidade (cm)          | 60                    | 75                    |
| Pto Amolecimento (°C)     | 46                    | 55                    |
| Penetração (0,1mm)        | 50-70                 | 45-70                 |
| Pto Fulgor (°C)           | 235                   | 235                   |
| Solub.Tricloroetileno (%) | 99,5                  | -                     |
| Recup. Elástica (%)       | -                     | 80                    |
| 135°C                     | 274                   | 3000                  |
| Viscos Brookf. 150°C      | 112                   | 2000                  |
| 177°C                     | 57-285                | 1000                  |

Fonte: DNIT 095-EM (2006) e DNIT 129-EM (2011)

### 2.2.3 Metodologia de ensaio Rice - Densidade

A Densidade Máxima Medida (DMM), ou massa específica máxima medida ou *G<sub>mm</sub>*, é obtida através do método Rice, seguindo o normativo ASTM D 2041 (2000). A DMM é a razão entre a massa da mistura asfáltica e a soma dos volumes (agregados, asfalto, vazios impermeáveis e vazios permeáveis não preenchidos com asfalto).

Figura 10 - Volume para cálculo de Densidade Máxima Medida



Fonte: Bernucci *et al* (2008)

Nesta pesquisa, a DMM é utilizada no cálculo de percentual de vazios das misturas asfálticas compactadas a fim de fornecer valores de partida para a compactação na PCG.

O ensaio consiste em colocar uma amostra de mistura asfáltica, em um recipiente com água a 25°C até submersão total da amostra. Em seguida, aplica-se o vácuo que deverá ser mantido por aproximadamente 15 minutos em um agitador mecânico. Neste instante será possível observar o desprendimento de ar pela aplicação do vácuo.

O volume da amostra da mistura é obtido complementando o nível do recipiente com água. A partir das medidas de massa, calcula-se a densidade real (DMM) da mistura.

#### 2.2.4 Metodologia do ensaio da PCG

O primeiro ensaio para definição do teor ótimo de ligante nas misturas asfálticas desta pesquisa é realizado pelo ensaio de Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (NF 98-252, 1999). Através desse ensaio verifica-se a habilidade de compactação das misturas asfálticas impondo uma compactação lenta e isotérmica sob compressão estática, executada por um movimento cisalhante giratório de uma de suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova. O equipamento desse ensaio é visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Equipamento do ensaio de PCG



Fonte: autora (2017)

É recomendado pela norma NF 98-252 (1999) pelo menos três corpos de prova por tipo de mistura e por teor de ligante, obtendo como

resultado a média dos três valores obtidos. Após a compactação giratória de ensaio, a altura mínima dos corpos de prova deve estar entre 150 mm e 160 mm para moldes com diâmetro interno de 150 mm  $\pm$  0,1 mm e 160 mm  $\pm$  0,1 mm, respectivamente.

A quantidade de material para moldar os corpos de prova é obtida através das Equações (2.1) para o diâmetro de 150 mm e pela Equação (2.2) para corpos de prova com diâmetro de 160 mm.

$$M = 2,651.MVR \quad (2.1)$$

$$M = 3,016.MVR \quad (2.2)$$

Onde:

M = massa do corpo de prova (kg)

MVR = massa volumétrica real da mistura asfáltica (kg/m<sup>3</sup>)

Para uma média de densidade real dos granulares de 2.500 kg/m<sup>3</sup>, os corpos de prova do ensaio da PCG possuem aproximadamente 7,0 kg.

O ensaio é realizado com força aplicada entre 10 kN e 12 kN, para os corpos de prova de 150 mm e entre 11,5 kN e 13,5 kN para os corpos de prova com 160 mm, alcançando uma tensão vertical próximo a 0,6 MPa. A variação da força a cada giro do eixo não deve estar acima de  $\pm$  1.200 N e de  $\pm$  250 N na metade do ensaio.

As leituras das alturas durante os ensaios são obtidas nos giros 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80, e em alguns casos nos giros 100, 120, 150, 200, 250, 300, 400 e 500 giros, sem a interrupção da rotação. O resultado do ensaio é obtido pela Equação (2.3).

$$\%v = 100 \cdot \left( \frac{h_1 - h_{min}}{h_1} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

%v = porcentagem de vazios das misturas asfálticas

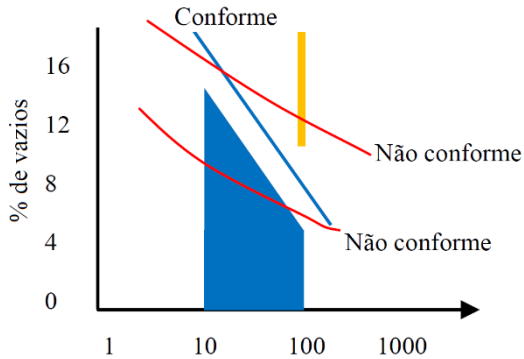
h<sub>1</sub> = altura média dos três ensaios por número de giros especificado das misturas asfálticas (mm)

h<sub>mín</sub> = altura mínima dos corpos de prova (mm)

Para que as misturas asfálticas tenham um bom comportamento nos próximos níveis de ensaios na metodologia adotada, é estabelecido um limite através de um gráfico logarítmico de número de giros *versus*

porcentagem de vazios (%) com os resultados obtidos para verificar a habilidade de compactação da mistura asfáltica, como ilustrado na Figura 12.

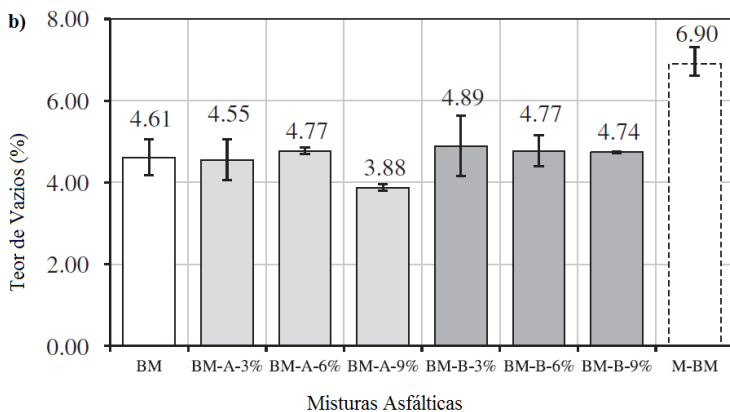
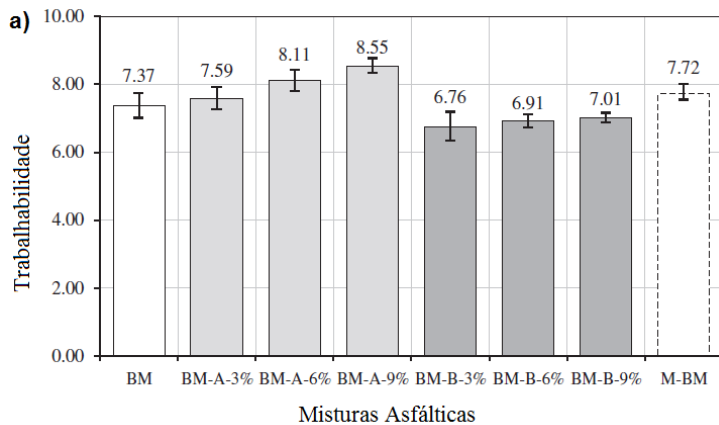
Figura 12 - Conformidade da compactação das misturas asfálticas

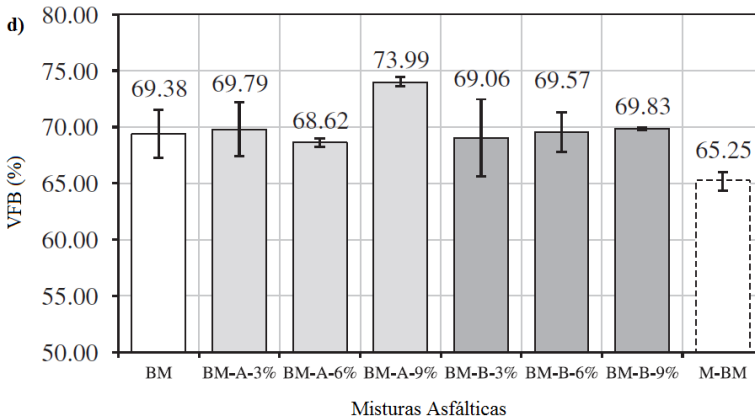
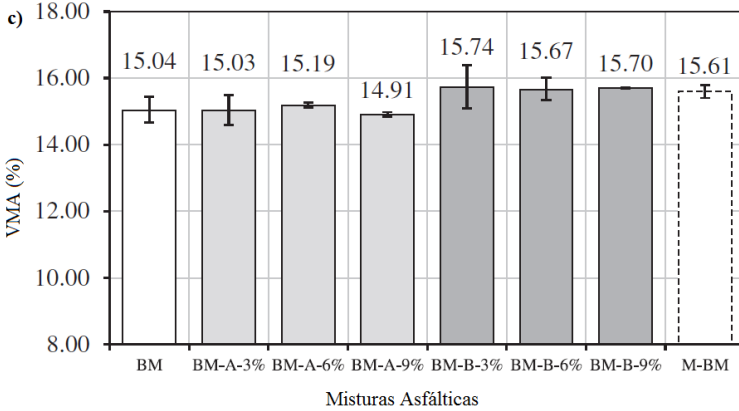


Fonte: LCPC (2009)

Através do ensaio da PCG é possível acompanhar a evolução da compactação das misturas. Deste modo, espera-se que os diferentes teores de polímero EVA, adicionados ao ligante, não devam alterar em demasiado os valores de trabalhabilidade; porcentagem de vazios; volume da mistura dos agregados (VMA); e volume cheio de betume (VFB). Esses parâmetros foram analisados nos ensaios de Toraldo e Mariani (2014), como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Características volumétricas dos diferentes teores de EVA -  
 a) trabalhabilidade b) % de vazios c) VMA d) VFB





Fonte: Toraldo e Mariani (2014)

As misturas analisadas na pesquisa dos autores citados foram: mistura de referência (BM), misturas com EVA (BMA-3%, BMA-6%, BMA-9%), mistura com polietileno (BMB-3%, BMB-6%, BMB-9%) e, por fim, mistura modifica de referência (MBM). Essa última diferenciou-se pelo polímero ser adicionado no ligante e não diretamente na mistura durante a usinagem.

Após análises, as mistura asfáltica consideradas aptas em relação à porcentagem de vazios na PCG, em função do número de giros, partem para a próxima etapa de avaliação à sensibilidade à água.

## 2.2.5 Metodologia do ensaio de Lottman Modificado

Após a definição do teor ótimo das misturas asfálticas pelo ensaio da PCG (NF 98-252, 1999), realiza-se a avaliação da perda de resistência à tração por umidade induzida. Pela metodologia francesa, o ensaio estabelecido para tal avaliação é o ensaio de Duriez (NF 98-251-1, 1995). Porém, como nos estudos de Shinohara (2012) esse ensaio foi realizado nas mesmas condições do presente trabalho e os resultados foram além do satisfatório, optou-se por adicionar o ensaio Lottman (AASHTO T-283, 1989) e compará-los com os dados de Duriez. O grau de severidade dos dois ensaios difere-se principalmente devido à temperatura de condicionamento que é de 18°C para o ensaio de Duriez e de 60°C para o ensaio de Lottman.

Os corpos de provas do ensaio Lottman são moldados pelo mesmo processo do ensaio Marshall até que atinja a porcentagem de vazios definida para a pesquisa, ou seja, teores de vazios de 7,0%  $\pm$  1,0% (6,0% e 8,0%). Segundo a norma AASHTO T-283 (1989), são necessários no mínimo seis corpos de prova para cada mistura asfáltica, sendo que três são condicionados e outros três sem condicionamento.

Utiliza-se uma bomba de vácuo para o processo de saturação no mínimo de 55%. Na sequência, os corpos de prova são condicionados em um congelador à temperatura de -18°C por um período de 16 horas e depois colocados em banho-maria à temperatura de 60°C por 24 horas. Após essa etapa, os corpos de prova são colocados novamente em banho-maria, porém a 25°C por um período de 1 hora. Por fim, os corpos de prova são ensaiados na resistência à tração indireta por compressão diametral.

Para que seja possível realizar a medição da suscetibilidade à água em relação à perda de resistência após o condicionamento, são moldados, também, corpos de prova sem condicionamento para referência.

Assim como no ensaio Duriez, que também mede a sensibilidade à água, a resistência à compressão é obtida através da relação  $r/R$  (sendo  $r$ , com imersão, e  $R$ , sem imersão). Para o tipo de concreto asfáltico utilizado nessa pesquisa, a relação  $r/R$  deve ter um valor superior a 0,70 que significa perda de menos de 30% de resistência. Existem outros tipos de misturas que estabelecem valores de tolerância de acordo com as suas classificações (NF P 98-130 a NP P 98-141, 1993).

O método de ruptura é executado pela prensa de compressão diametral, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Prensa de compressão diametral



Fonte: autora (2017)

O cálculo da resistência à compressão (em MPa) é realizado através da Equação (2.4).

$$\sigma = \frac{F}{A'} \quad (2.4)$$

Onde:

F = carga máxima de ruptura (kgf)  
 A' = área da seção transversal (cm<sup>2</sup>)

Castañeda (2004), em suas pesquisas, analisou as recuperações das propriedades mecânicas das misturas asfálticas sobre o efeito da água também no ensaio Lottman Modificado. Concluiu que os diferentes teores de vazios determinados no momento da compactação podem induzir a avaliações equivocadas, ou seja, se limitar a aceitação em 20% de perda de resistência pode conduzir à aceitação ou rejeição de uma formulação.



Já nos estudos de Barra (2009) sobre a avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas foi observado, especificamente no ensaio de Lottman Modificado, que devido ao processo de condicionamento térmico severo houve a remoção da película que envolve as partículas que compõem o esqueleto mineral devido à ação deletérea da água, ou seja, devido às alterações na viscosidade do ligante betuminoso provocou a diminuição da resistência da mistura. Já no ensaio de Duriez, no qual o condicionamento térmico é mais ameno, não ocorreu influência significativa na resistência das misturas asfálticas.

### **2.2.6 Metodologia do ensaio de Deformação Permanente**

Após definido o teor ótimo pelo ensaio da PCG (NF 98-252, 1999) e avaliado a ação da água das misturas asfálticas convencionais e das misturas asfálticas modificadas pelo EVA, é realizado o ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) que visa verificar a resistência das misturas asfálticas em relação ao afundamento nas trilhas de roda. O equipamento desse ensaio é visualizado na Figura 15.

Figura 15 - Equipamento do ensaio de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

As placas que são moldadas para o ensaio possuem as dimensões de 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm ou 10 cm de espessura, dependendo da espessura de utilização em campo. As placas

são moldadas em uma mesa compactadora pneumática de acordo com os critérios da NF 98-250-2 (1991), como ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Máquina compactadora de placas para o ensaio de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

Depois de compactadas, as placas devem permanecer no mínimo dois dias para o período de cura da mistura asfáltica e, na sequência, colocadas na máquina de ensaio. A máquina comporta ensaiar duas placas ao mesmo tempo utilizando duas rodas lisas em um eixo simples com carga de 5,0 kN, pressão de inflação de 0,6 MPa e temperatura de 60°C.

As primeiras leituras são realizadas para avaliar as condições superficiais da placa. São utilizados medidores de deslocamento para medir quinze pontos distintos que servem como ponto de partida às leituras realizadas após as solicitações durante 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos. Uma passagem de ida e volta do eixo resultam em um ciclo.

Calcula-se a média dos quinze pontos de afundamento em cada ciclo após a ação do carregamento. Os ciclos são submetidos à frequência constante de 1 Hz na qual o eixo solicitante percorre as placas na mesma trilha de roda. Se caso o afundamento médio alcançar 15% do valor da espessura inicial, o ensaio é interrompido.

Os resultados do ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) são calculados segundo a Equação (2.5).

$$Y = A'' \cdot \left( \frac{N}{1.000} \right)^b \quad (2.5)$$

Onde:

- Y = profundidade da deformação em N ciclos  
 A'' = profundidade da deformação a 1.000 ciclos  
 N = número de ciclos  
 b' = inclinação da reta em coordenadas logarítmicas

O resultado do ensaio de Deformação Permanente é satisfatório quando a espessura final não ultrapassar 5%, 7,5% ou 10% da espessura inicial. As placas que tiverem resultados abaixo de 10% não apresentam riscos de deformação permanente em condições ditas “severas” e resultados abaixo de 5% não apresentam riscos em condições ditas “muito severas”. O valor de 7,5% é uma condição intermediária (LCP, 2007).

### 2.2.7 Metodologia do ensaio de Módulo Complexo

Os primeiros ensaios realizados com materiais brasileiros seguindo a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas datam do ano de 2009. A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foi a pioneira no país a conceber o protótipo da máquina dos ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) nos mesmos moldes exigidos pela metodologia francesa e difundida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) na França. A máquina de ensaio encontra-se na quarta versão e pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 - Equipamento do ensaio de Módulo Complexo



Fonte: Shinohara (2012)

O ensaio de Módulo Complexo, para determinação do módulo de rigidez das misturas asfálticas, é realizado nessa pesquisa à flexão alternada de dois pontos de apoio em modo contínuo com o controle da amplitude de deslocamento do corpo de prova trapezoidal. A cada passagem de um veículo pelo pavimento, causando deterioração por fadiga, é por flexão alterada.

Os ensaios partem dos valores de força e deformações aplicadas nos corpos de prova para determinar os valores de módulo. O material é submetido a solicitações do tipo senoidal, na qual a deformação apresenta uma defasagem com relação à tensão, o que é traduzido por um ângulo de fase ( $\varphi$ ) entre os dois sinais, como mostra a Equação (2.6). O ângulo de fase permite estimar a energia de dissipação do material mostrando a característica de um material viscoelástico.

$$\varepsilon = \varepsilon \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (2.6)$$

Onde:

- $\varepsilon$  = deformação
- $\omega$  = pulsação do sinal
- $t$  = tempo
- $\varphi$  = ângulo de fase ou defasagem

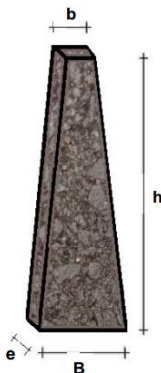
Os parâmetros indicam a predominância viscosa ou elástica do material, para os valores limites de  $\varphi = 0^\circ$ , para materiais puramente elásticos, e  $\varphi = 90^\circ$  para materiais puramente viscosos. A defasagem de sinais depende da dimensão do corpo de prova e dos efeitos da inércia do corpo de prova.

As temperaturas de teste para o ensaio de Módulo Complexo são de  $-10^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$  e frequências de solitação de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz, obtendo-se assim o comportamento a diversas temperaturas e frequências de solitação. Para efeitos comparativos, a frequência de 10 Hz equivale a uma velocidade aproximada de 70 km/h.

Os corpos de prova para o ensaio de Módulo Complexo são retirados de placas com dimensões de 60 cm de comprimento, 40 cm de largura e 12 cm de espessura. As placas são serradas seguindo a norma NF 98-250-3 (1993) e, para o equipamento de corte atualmente utilizado, a velocidade média é de 2 cm por minuto.

Os corpos de provas trapezoidais obtidos possuem espessura (e)  $25,00 \pm 1,00$  mm, base maior (B)  $70,00 \pm 1,00$  mm, base menor (b)  $25,00 \pm 1,00$  mm e altura (h)  $250,00 \pm 1,00$  mm, como pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Corpo de prova trapezoidal



Fonte: Shinohara (2012)

A escolha pelo tipo trapezoidal para o ensaio é devido à reprodução da força que se distribui sem afetar a integridade do corpo de prova e faz com que a ruptura por fadiga ocorra fora dos pontos de apoio (base maior) e da aplicação da carga (base menor).

Após o processo de serragem, os corpos de provas trapezoidais ficam em repouso a uma temperatura ambiente abaixo de 30°C (de preferência a 18°C) para que não ocorram problemas de deformação. O tempo de cura das amostras é de 15 dias.

Depois do intervalo de cura dos corpos de prova trapezoidais, estes são submetidos a um processo de triagem em função do teor de vazios e das dimensões, na qual para estes últimos a tolerância é de apenas  $\pm 1,0$  mm.

As variáveis da triagem são denominadas  $K_{\sigma}$  e  $K_{\epsilon}$  como mostram as Equações (2.7) e (2.8) respectivamente. Os valores de  $K_{\sigma}$  e  $K_{\epsilon}$  correlacionam a forma do corpo de prova (cp).

$$K_{\sigma} = \frac{3 \cdot h}{2 \cdot e \cdot b \cdot (B - b)} \quad (2.7)$$

$$K_{\epsilon} = \frac{(B - b)^2}{8 \cdot b \cdot h^2 \cdot \left( \frac{(B - b) \cdot (3B - b)}{2 \cdot B^2} - \ln \frac{B}{b} \right)} \quad (2.8)$$

Onde:

- $K_{\sigma}$  = coeficiente relacionado à dimensão do cp (tensão)
- $K_{\epsilon}$  = coeficiente relacionado à dimensão do cp (deformação)
- $h$  = altura do corpo de prova (mm)
- $e$  = espessura do corpo de prova (mm)
- $B$  = base maior do corpo de prova (mm)
- $b$  = base menor do corpo de prova (mm)

A triagem é realizada em duas etapas na qual a primeira eliminação é em relação às dimensões e a segunda eliminação é em relação ao teor de vazios onde os corpos de prova devem estar entre os limites do desvio padrão, ou seja,  $\leq 0,5$ . O teor de vazios é calculado conforme Equação (2.9).

$$V(\%) = \frac{100 \cdot (MVR - MVA)}{MVR} \quad (2.9)$$

Onde:

- $MVR$  = massa volumétrica real do corpo de prova
- $MVA$  = massa volumétrica aparente do corpo de prova

Os corpos de provas devem estar dentro das especificações normativas, assim como o teor de vazios devem estar entre os limites do desvio padrão, após a serragem. Os corpos de prova que obedecerem a esses requisitos são separados conforme a homogeneidade e agrupados em quartetos. Lembrando que no processo de triagem, o coeficiente de variação de  $K\varepsilon$  deve ser  $\leq 1,0\%$ .

São utilizados, no mínimo, vinte e quatro corpos de prova, divididos em três grupos de oito unidades. Para cada um dos três grupos é testado um nível diferente de deformação em que a flecha e a amplitude do deslocamento são calculadas pelas Equações (2.10) e (2.11) respectivamente.

$$f = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{K\varepsilon} \quad (2.10)$$

$$A = 2 \cdot f \quad (2.11)$$

Onde:

- f = flecha do deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova  
 $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  = deformação máxima escolhida pelo projetista ( $10^{-6}$ )  
 $K\varepsilon$  = coeficiente relacionado às dimensões do corpo de prova (mm-1)  
 A = amplitude do deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova

A flecha e a amplitude do deslocamento serão aferidas nos eixos excêntricos antes do início dos ensaios. A captação de dados do ensaio de Módulo Complexo é feita por múltiplo sequencial. Nesse tipo de captação, os dados são armazenados por pacotes em intervalos determinados.

No início do ensaio, os corpos de provas são colocados na máquina, aferidos e mantidos por no mínimo seis horas à temperatura inicial de ensaio. Para as demais temperaturas, esse período pode ser reduzido para quatro horas. Para cada temperatura são testadas as quatro variações de frequência de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz.

O ensaio é realizado a uma deformação controlada de 40 microdeformações ( $\mu\text{def}$ ).

Após os ensaios, são realizados os cálculos do módulo complexo ( $|E^*|$ ) que é um número definido pela relação entre duas amplitudes, ou seja, uma amplitude complexa da tensão sinusoidal da pulsação ( $\omega$ )

aplicada ao material e uma amplitude complexa da deformação sinusoidal que resulta em regime estável. As Equações (2.12), (2.13) e (2.14) determinam o valor de módulo complexo  $E^*$ .

$$\sigma(t) = lm[\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}] \text{ para } \sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon(t) = lm[\varepsilon^*(t)] \text{ para } \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.13)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 e^{-i\varphi}} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (2.43)$$

Onde:

- $\sigma$  = valores das amplitudes da tensão
- $\varepsilon$  = valores das amplitudes da deformação
- $i$  = número complexo ( $i^2 = -1$ )
- $\omega(2\pi f)$  = pulsação do sinal e  $f$  é a frequência da sollicitação
- $\sigma^*$  = valores complexos da tensão
- $\varepsilon^*$  = valores complexos da deformação
- $\varphi$  = ângulo de fase ou defasagem
- $|E^*|$  = norma do módulo complexo

O módulo complexo pode ser expresso segundo a Equação (2.15).

$$|E^*| = E_1 + i \cdot E_2 \quad (2.15)$$

Onde:

- $|E^*|$  = norma do módulo complexo
- $E_1$  = módulo real
- $E_2$  = módulo imaginário
- $i$  = número complexo ( $i^2 = -1$ )

As Equações (2.16) e (2.17) representam as partes real e imaginária do módulo complexo. A energia perdida do módulo  $E_2$  é irreversível devido ao atrito interno no material.

$$E_1 = \gamma \left( \frac{F}{D} \cos\varphi + \mu\omega^2 \right) \quad (2.16)$$



$$E_2 = \gamma \left( \frac{F}{D} \operatorname{sen} \varphi \right) \quad (2.17)$$

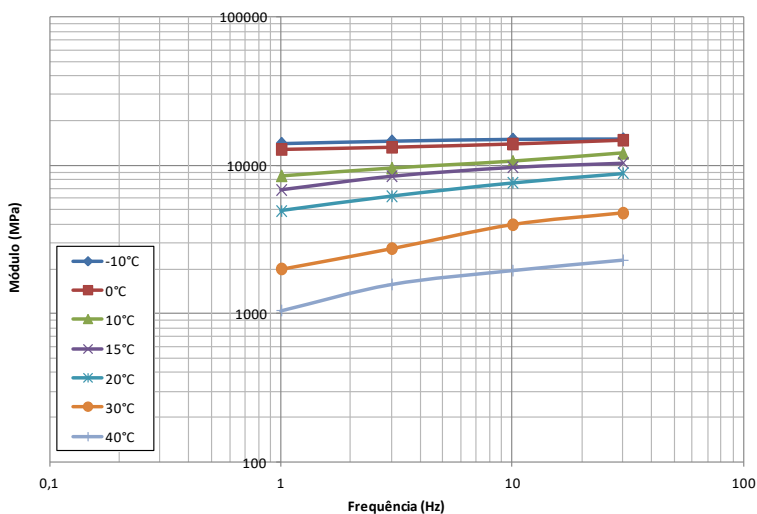
Onde:

- E1 = módulo real
- E2 = módulo imaginário
- $\gamma$  = fator de forma
- F = força aplicada para gerar o deslocamento D
- D = deslocamento aplicado na base menor do corpo de prova
- $\varphi$  = ângulo de fase ou defasagem
- $\mu$  = fator de massa
- $\omega(2\pi f)$  = pulsação do sinal e f é a frequência da solicitação

Os resultados experimentais  $|E^*|$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  e  $\varphi$  variam com a temperatura e a frequência de solicitações fixadas para cada ensaio. A análise é feita nas representações das curvas Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Espaço de Black, função *Damping* e no plano Cole-Cole.

As curvas Isotérmicas são obtidas pelo módulo complexo ( $|E^*|$ ) em função da frequência e por cada temperatura de ensaio em coordenadas logarítmicas. Essas curvas isotérmicas permitem estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura.

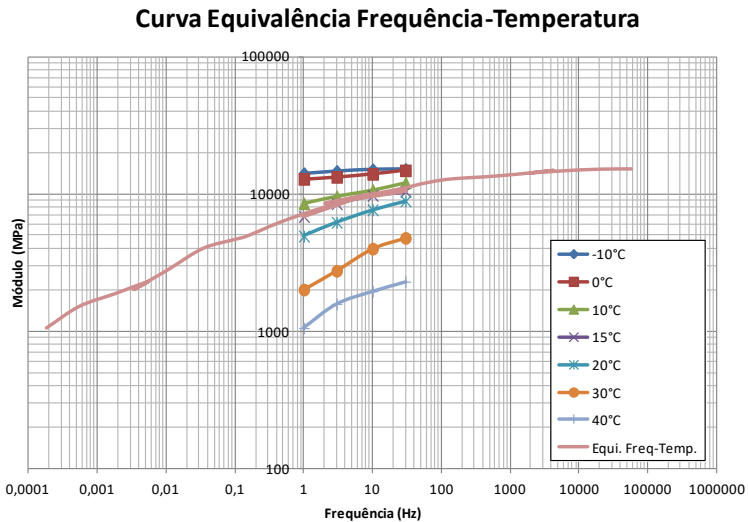
Figura 19 - Curvas Isotérmicas de mistura asfáltica convencional



Fonte: Shinohara (2012)

As curvas Frequência-Temperatura são obtidas pela norma do módulo complexo ( $|E^*|$ ) em função da frequência, em coordenadas logarítmicas, em uma temperatura de referência ( $T_R$ ) escolhida arbitrariamente. Assim, é possível construir uma curva com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica. A curva obtida é denominada curva mestra. Esta representação gráfica fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, ou seja, uma união de pontos das curvas com o mesmo valor de módulo do material.

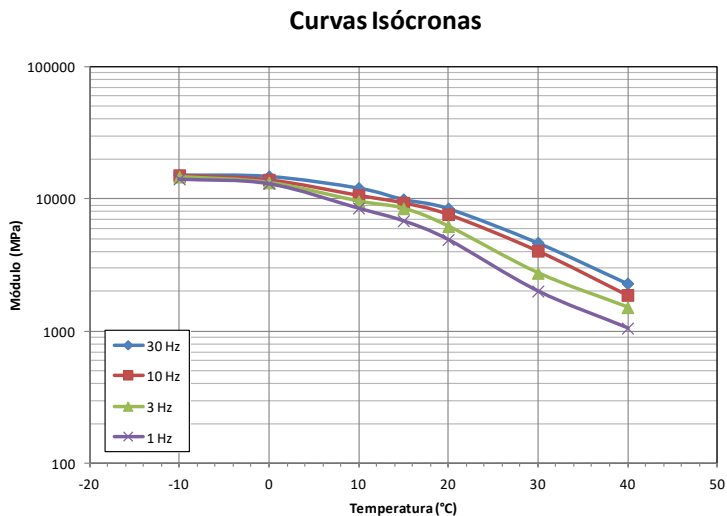
Figura 20 - Curvas Frequência-Temperatura de mistura asfáltica convencional



Fonte: Shinohara (2012)

As curvas Isócronas permitem visualizar a diminuição do valor do módulo complexo com o aumento da temperatura.

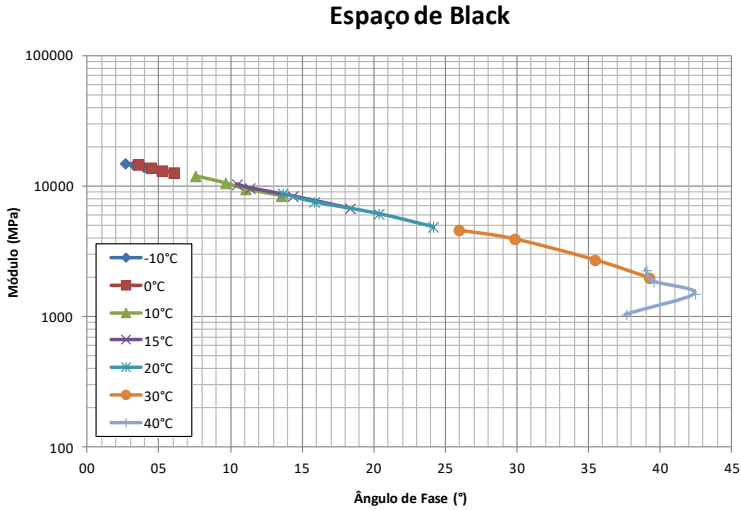
Figura 21 - Curvas Isócronas de mistura asfáltica convencional



Fonte: Shinohara (2012)

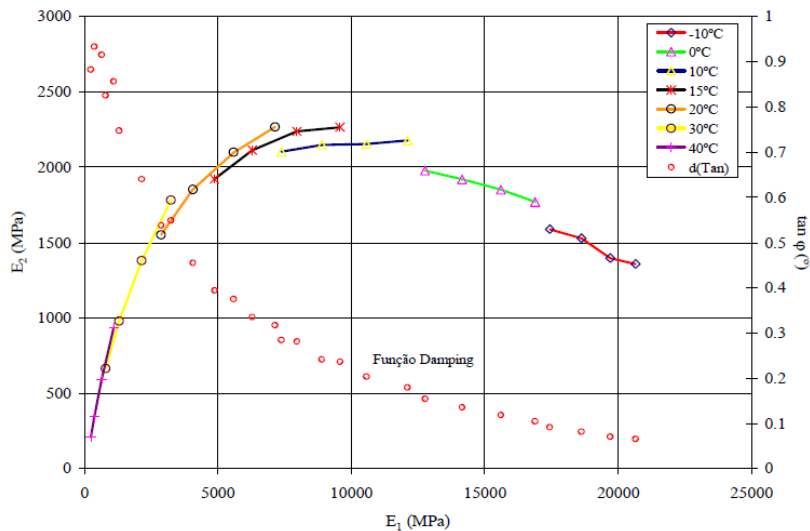
As curvas do Espaço de Black são obtidas pelo módulo complexo ( $|E^*|$ ) em função do ângulo de fase ( $\varphi$ ) em coordenadas logarítmicas. Esta curva permite visualizar que nos baixos valores de módulo e altos valores do ângulo de fase, a influência da temperatura é maior. Se a mistura asfáltica obedece ao princípio da equivalência frequência-temperatura, a curva obtida é uma só, ou seja, cada valor da defasagem ( $\varphi$ ) corresponde a um único valor de módulo complexo ( $|E^*|$ ). Quando a temperatura aumenta, o ângulo de fase ( $\varphi$ ) também aumenta e o valor de módulo complexo diminui. A representação do Espaço de Black serve para determinar o módulo  $E_\infty$  utilizado no modelo de Huet-Sayegh.

Figura 22 - Curvas do Espaço de Black de mistura asfáltica convencional



Fonte: Shinohara (2012)

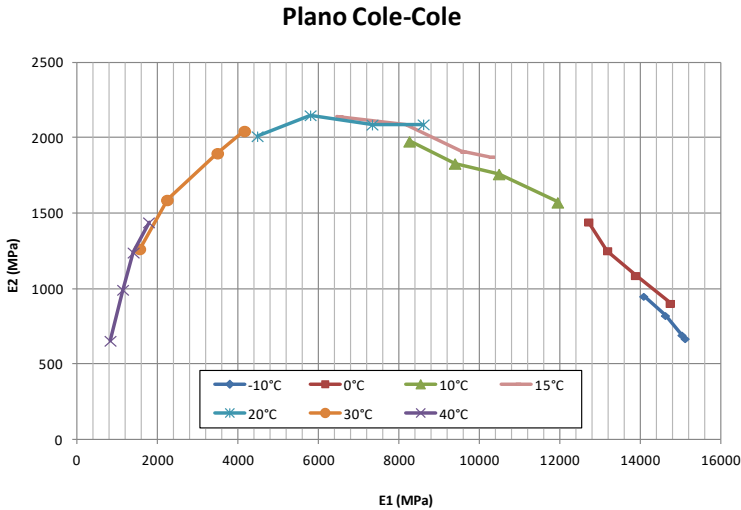
O gráfico da função *Damping* mostra a relação entre a tangente do ângulo de fase ( $\phi$ ), ou seja  $E1/E2$ , e as variações da temperatura e da frequência de solicitação. Na Figura 23, o exemplo exposto da função *Damping* encontra-se no mesmo gráfico do Plano Cole-Cole.

Figura 23 - Curvas da função *Damping*

Fonte: Barra (2009)

O plano Cole-Cole consiste na apresentação dos valores da parte real no eixo das abscissas ( $E_1$ ) e os valores da parte imaginária no eixo das ordenadas ( $E_2$ ), como mostra a Figura 24. Segundo a metodologia francesa, a temperatura crítica das misturas asfálticas é de 10°C a uma frequência de 25 Hz.

Figura 24 - Curvas do plano Cole-Cole de mistura asfáltica convencional



Fonte: Shinohara (2012)

O estudo desses gráficos possibilita a análise das propriedades mecânicas de módulo de rigidez das misturas asfálticas.

### 2.2.8 Metodologia do ensaio de Fadiga

A fadiga do material, juntamente com a deformação permanente, é um dos principais problemas encontrados em pavimentos asfálticos. Os carregamentos dinâmicos devido ao tráfego de veículos e a variação da temperatura influenciam diretamente na fadiga e são afetados também pelo teor de ligante, pelas características dos agregados (distribuição, forma e tamanho das partículas), assim como pela propriedade da interface ligante-agregado.

Nos estudos de Van Rompu *et al* (2012), que testaram novos testes de fadiga em ligantes betuminosos (modelo 2S2P1D), afirmaram que a fadiga é um dos principais fenômenos que causa a deterioração dos pavimentos, iniciando pelos danos a níveis microscópicos (micro-fissuras) até o surgimento a níveis macroscópicos (macro-fissuras).

Há três principais tipos de ensaios de fadiga: ensaios de flexão a quatro pontos, ensaio de flexão a dois pontos e ensaio de tração indireta. Este último é comumente adotado por possibilitar o uso de corpos de prova compactados pelo método Marshall (DNER-ME 043, 1995) ou pela PCG (NF 98-252, 1999), assim como dos corpos de prova extraídos em campo (Hartman *et al*, 2001). Porém esses ensaios possuem baixo grau de confiança em relação aos ensaios de flexão, devido ao método de compactação por golpes e não por pneumáticos, como ocorre em campo.

Os estudos de DI BENEDETTO *et al* (2004) mostraram diferenças no valor da deformação para um milhão de ciclos nos diferentes tipos de ensaio de Fadiga, porém, cabe lembrar que cada resultado está associado a métodos de dimensionamento do pavimento específico para cada tipo de ensaio.

Um dos ensaios mais rigorosos para determinação da fadiga é o ensaio à flexão alternada com apoio em dois pontos. A curva de fadiga alcança alto grau de confiança para análise dos dados através de tratamentos estatísticos. Durante o ensaio, os corpos de prova são submetidos, no mínimo, a três valores de deformação controlada, concedendo dados suficientes para gerar a hipérbole de confiança, de onde é obtido a deformação ( $\epsilon_6$ ) para 1 milhão de ciclos utilizado para o dimensionamento de pavimentos.

O ensaio de Fadiga passa por três fases:

- Fase I: aquecimento, ou seja, fase de adaptação do material com a diminuição dos valores de módulo complexo com o aumento da temperatura, devido à energia liberada durante o ensaio.
- Fase II: início dos danos devido à fadiga e micro-fissuras, com a diminuição linear do módulo complexo com aumento do número de ciclos e temperatura estacionária.
- Fase III: ruptura do material com a queda dos valores de módulo complexo e propagação das fissuras com o surgimento das macro-fissuras.

O ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) dessa pesquisa é realizado à flexão alternada em modo contínuo, que reproduz a inversão dos esforços de distensão-contração-distensão. Esse ensaio simula a camada no pavimento submetida a solicitações repetidas e o equipamento de ensaio é o mesmo utilizado no Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004), apresentado na Figura 17.

No ensaio de Fadiga o material é submetido a solicitações do tipo senoidal, assim como no ensaio de Módulo Complexo, e esta medida é efetuada no domínio das pequenas deformações na qual a mistura asfáltica comporta-se como um material viscoelástico linear (Momm, 1998).

O processo para obtenção do corpo de prova trapezoidal do ensaio de Fadiga segue as mesmas condições do ensaio de Módulo Complexo, citado anteriormente. O processo é idêntico, desde o formato das placas de mistura asfáltica à triagem dos corpos de prova.

O ensaio, porém, diferencia-se nas variações de temperaturas, frequências e deformações controladas. A captação de dados do ensaio é feito por múltiplo programado. Para que se inicie esse ensaio os corpos de provas são colocados na máquina, aferidos e mantidos por no mínimo seis horas à temperatura inicial de ensaio para homogeneização, como ocorre no ensaio de Módulo Complexo.

A definição do final do ensaio de fadiga depende de cada metodologia adotada, que inclui atingir certa porcentagem da rigidez inicial (normalmente 50%); atingir o dobro da deformação inicial; ou atingir a metade da tensão inicial (Lundstrom *et al*, 2004). Esses critérios investigam o comportamento da fadiga baseados na relação matemática entre a tensão (ou deformação) e o número de carregamento cíclico que a mistura necessita para chegar à fadiga. Nesta pesquisa o ensaio de Fadiga é finalizado quando o valor da força registrado no início do ensaio chega à metade. O resultado é interpretado pela representação em escala logarítmica da deformação pelo número de ciclos corresponde a cada corpo de prova, indicando o valor da deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ) com um grau de confiança de 95%.

A região de ruptura deve estar situada no intervalo que compreende ao terço médio dos corpos de prova trapezoidais, pois é nessa região que atua o maior momento fletor, ou seja, a zona mais solicitada à fadiga pelas tensões aplicadas durante o ensaio.

Conforme a norma de determinação da resistência à fadiga das misturas de hidrocarbonetos (NF P 98-261-1, 1993), a representação gráfica da curva deve ser feita em escala log-log e conter:

- Representação das hipérbolas da zona de confiança.
- Indicação da deformação épsilon 6 ( $\epsilon_6$ ).
- Variação do épsilon 6 ( $\Delta\epsilon_6$ ).
- Equação da curva de Fadiga.
- Desvio padrão dos resíduos.



- Características da mistura asfáltica.

O cálculo da hipérbole é feito através de coeficientes da regressão estatística. O valor de N é calculado conforme a Equação (2.18).

$$N = a \cdot \varepsilon^{-b} \quad (2.18)$$

Onde:

|               |   |                                       |
|---------------|---|---------------------------------------|
| N             | = | número de aplicações da solicitação   |
| a             | = | coeficiente (interseção da regressão) |
| b             | = | coeficiente                           |
| $\varepsilon$ | = | deformação                            |

O cálculo da deformação para um milhão de ciclos ( $\varepsilon_6$ ) é feito conforme a Equação (2.19).

$$\varepsilon_6 = 10^{(6-a)/-b} \quad (2.19)$$

O cálculo da zona de confiança é determinado pelas Equações (2.20), (2.21), (2.22), (2.23) e (2.24).

$$\Delta \varepsilon_6 = 0,5 \cdot \varepsilon_6 \cdot 10^{((-2 \cdot \frac{S_0}{-b}) - (2 \cdot \frac{S_0}{-b}))} \quad (2.20)$$

$$S_0 = SN * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\text{Log}(\varepsilon_0) - \text{Log}(\varepsilon))^2}{(n-1) * S^2(\text{log}(\varepsilon))}} \quad (2.21)$$

$$SN = S(\text{log}(N)) \cdot \sqrt{\frac{((1-R^2)-(n-1))}{(n-2)}} \quad (2.22)$$

$$\text{Log}(N)_{\text{inf}}^{\text{sup}} = N_0 \pm S_0 \quad (2.23)$$

$$N = 10^{(N_0 \pm S_0)} \quad (2.24)$$

Com o cálculo das hipérbolas da zona de confiança, a partir dos coeficientes da regressão estatística, cria-se o gráfico da curva de fadiga.

## 2.3 MODELO DE DIMENSIONAMENTO

Para que os dados obtidos em ensaios laboratoriais possam ser analisados corretamente, insere-se nessa pesquisa uma aplicação de modelos viscoelásticos à proposição de formulação de misturas asfálticas. Segundo De La ROCHE (1996), a modelação matemática para estudos no pavimento consideram o comportamento da mistura asfáltica no domínio das pequenas deformações como linear (tensão é proporcional à deformação), homogêneo (a nível macroscópico) e isotrópico (propriedades iguais em todas as direções).

É realizado uma modelação de Huet-Sayegh e um dimensionamento simulado de pavimento a fim de comparar o desempenho das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA.

### 2.3.1 Deformação admissível ( $\epsilon_{x,adm}$ e $\epsilon_{z,adm}$ )

O dimensionamento determina as espessuras das camadas do pavimento considerando as características mecânicas dos materiais combinadas com dados experimentais, que nessa pesquisa são fornecidos pelos ensaios de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) e de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004). A deformação admissível e a rigidez dos materiais sob cargas solicitantes são uma das variáveis mais importantes para o correto dimensionamento de um pavimento.

Os dados de fadiga necessários são a deformação  $\epsilon_6$  ( $10^6$ ) na temperatura de  $10^\circ\text{C}$  e na temperatura crítica, ambas na frequência de 25 Hz, além da inclinação da reta (b). Os dados de módulos necessários são as normas dos módulos complexos ( $|E^*|$ ) na temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , na temperatura crítica e na temperatura de referência de  $15^\circ\text{C}$ , todas na frequência de 10 Hz, para cada tipo de mistura.

Os programas Elsym 5 (U.C. Berkeley, 1986), Everstress 5.0 (WSDOT, 1999), Alizé (LCPC, 2005) entre outros fornecem as deformações das camadas do pavimento para um dimensionamento simulado, porém não consideram o comportamento e variáveis viscoelásticas das misturas asfálticas. Já, o programa *Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante* (CVCR), assim como o programa *Viscoroute*, ambos desenvolvidos no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), consideram os parâmetros viscoelásticos, obtidos pelo modelo de Huet-Sayegh por exemplo, que será descrito mais adiante.

Nessa linha, selecionou-se o método de cálculo pelo Viscoroute no qual abrange a viscoelasticidade dos materiais asfálticos utilizando-se de um modelo reológico de comportamento das misturas asfálticas e a série de *Fourier* para cálculo analítico. Leva-se de uma referência fixa a uma referência em movimento que abrange a velocidade, sendo solucionado pela dupla transformada de *Fourier* nas direções longitudinal e transversal, calculando as deformações e as tensões nas diferentes posições da estrutura de acordo com a intensidade de carga, temperatura e velocidade do veículo (Duhamel *et al*, 2005).

Há duas deformações admissíveis, sendo uma no topo das camadas subjacentes à superfície ( $\epsilon_z$ ) relacionada aos materiais componentes das camadas de base, sub-base e subleito; e outra na base da camada asfáltica ( $\epsilon_x$ ) relacionada com o limite de deformação de acordo com os parâmetros observados no ensaio de Fadiga.

Comparam-se essas duas deformações que são calculadas através das variáveis de coeficiente de agressividade (CAM), volume médio diário anual (VMDA), taxa de crescimento anual ( $\tau$ ), período de projeto inicial (p), classe dos veículos (T), eixo-padrão, tráfego acumulado por faixa (N) e coeficiente de risco. A taxa de crescimento anual, geralmente é obtida através de estudo de tráfego.

As subdivisões das classes de tráfego são obtidas do *Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA) do LCPC mostradas no Quadro 6.

Quadro 6 - Classes de tráfego

| CLASSE             | T5 | T4 | T3 |     | T2  |     | T1  |     | T0   |      | TS   |      | TEX  |
|--------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                    |    |    | -  | +   | -   | +   | -   | +   | -    | +    | -    | +    |      |
| <b>VMDA mínimo</b> | 0  | 25 | 50 | 85  | 150 | 200 | 300 | 500 | 750  | 1200 | 2000 | 3000 | >    |
| <b>VMDA máximo</b> | 25 | 50 | 85 | 150 | 200 | 300 | 500 | 750 | 1200 | 2000 | 3000 | 5000 | 5000 |

Fonte: SETRA (1997)

Já o número de eixos equivalentes (NE) e o tráfego acumulado por faixa (N) são calculados utilizando-se as equações (2.25), (2.26) e (2.27). O NE é o número de eixos que equivale à passagem de um eixo-padrão simples de roda dupla. O eixo-padrão considerado para a pesquisa é de 130 kN definido pelo manual do SETRA (1997).

$$NE = N \cdot CAM \quad (2.25)$$

$$N = 365 \cdot VMDA \cdot C \quad (2.26)$$

$$C = \frac{(1 + \tau)^p - 1}{\tau} \quad (2.27)$$

Onde:

|        |   |  |
|--------|---|--|
| NE     | = | número de eixos equivalentes               |
| N      | = | tráfego acumulado por faixa                |
| CAM    | = | coeficiente de agressividade               |
| VMDA   | = | volume médio diário anual                  |
| C      | = | acúmulo do fator para o período de cálculo |
| $\tau$ | = | taxa de crescimento anual (%)              |
| p      | = | período de projeto inicial (anos)          |

A deformação admissível no topo das camadas subjacentes à superfície para tráfego médio é definida pela Equação (2.28).

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,012 \cdot (NE)^{-0,222} \quad (2.28)$$

Onde:

|                       |   |   |
|-----------------------|---|---|
| $\varepsilon_{z,adm}$ | = | deformação admissível da plataforma               |
| NE                    | = | número de eixos equivalentes (eixo padrão 130 kN) |

A Equação (2.29), juntamente com a Equação (2.30), já citada no início dessa pesquisa, é uma das mais importantes para o dimensionamento de pavimentos, visto que define a deformação admissível do material na base das camadas asfálticas ( $\varepsilon_{t,adm}$ ) em função do número de eixos 130 kN (NE) da temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ), da frequência de solitação (f) e dos coeficientes.

$$\varepsilon_{(x,adm)} = \varepsilon_{(NE,\theta_{eq},f)} \cdot kc \cdot kr \cdot ks \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{(NE,\theta_{eq},f)} = \varepsilon_{6(10^\circ C, 25Hz)} \cdot \left( \frac{E_{(10^\circ C)}}{E_{(\theta_{eq})}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (2.30)$$

Onde:

- $\varepsilon_{(x,adm)}$  = deformação admissível xx
- $\varepsilon_{(NE,\theta_{eq},f)}$  = deformação admissível em função do número de eixo equivalente, temperatura equivalente e frequência de sollicitação
- kc = coeficiente de calagem ou ajuste dos resultados do comportamento observados de outros materiais (1,3 para misturas asfálticas da camada de ligação; 1,1 para camada de superfície e 1,0 para camada de estrutura do pavimento)
- kr = coeficiente de risco que ajusta o valor da deformação horizontal em função dos fatores de dispersão da espessura da camada (SH) e dos resultados do ensaio de Fadiga (SN)
- ks = coeficiente de redução de efeito de heterogeneidade da capacidade da plataforma de suporte (PF) sendo: 1,0/1,2 para módulo entre 20Mpa e 50MPa; 1,0/1,1 para módulo entre 50Mpa e 120Mpa e 1,0 para módulo maiores que 120 Mpa.
- $\varepsilon_6$  = deformação calculada a partir do ensaio de fadiga a 10°C e 25 Hz
- $E(10^\circ\text{C})$  = módulo complexo a 10°C e 10Hz
- $E(\theta_{eq})$  = módulo complexo à temperatura equivalente de estudo (15°C, 10Hz)
- NE = número de eixos equivalente
- b = inclinação da reta de fadiga

A temperatura equivalente ( $\theta_{eq}$ ) é a temperatura representativa que produz o dano no material na mistura asfáltica, considerando os efeitos sazonais durante o período do projeto.

Os coeficientes de correção kr, kc e ks são aplicados aos valores de deformações admissíveis das camadas betuminosas. O coeficiente de risco (r) adotado é de 20%. O coeficiente kr ajusta a deformação admissível em consideração ao risco (r). As Equações (2.31) e (2.32) (SETRA, 1997) mostram o cálculo de kr e  $\delta$  respectivamente.

$$kr = 10^{-ub\delta} \quad (2.31)$$

$$\delta = (SN^2 + \left(\frac{c^2}{b^2}\right) \cdot SH^2)^{0,5} \quad (2.32)$$

Onde:

|          |   |   |
|----------|---|---|
| kr       | = | coeficiente de risco  |
| u        | = | associada ao risco (r) u = -0,84 para valor de risco de 20% |
| b        | = | inclinação da reta de fadiga do material                    |
| $\delta$ | = | desvio-padrão da distribuição                               |
| SN       | = | desvio-padrão dos resíduos (fadiga)                         |
| c        | = | 0,02 para estruturas habituais                              |
| SH       | = | dispersão sobre a espessura da camada (desvio padrão).      |

O valor de 1,0 para o coeficiente  $k_c$  correspondente às misturas asfálticas. Ele ajusta os resultados do modelo computacional de acordo com o comportamento observado sobre estruturas de pavimentos reais do mesmo tipo.

O coeficiente  $k_s$  refere-se à falta de uniformidade de suporte do subleito, adotado o valor 1 para esta pesquisa.

Ainda, necessita-se da escolha da Classe do subleito de acordo com o Quadro 7. Os valores para as camadas subjacentes de sub-base e base são obtidos em função dessa escolha, multiplicando por três e novamente por três, respectivamente, para obter o valor de módulo.

Quadro 7 - Classe de capacidade da plataforma

| CLASSE              | PF1 | PF2 | PF3 | PF4   |
|---------------------|-----|-----|-----|-------|
| Módulo mínimo (MPa) | 20  | 50  | 120 | > 200 |
| Módulo máximo (MPa) | 50  | 120 | 200 |       |

Fonte: SETRA (1997)

O coeficiente de Poisson considerado para o cálculo do dimensionamento geralmente é de 0,35 segundo a SETRA (1997), e este o valor utilizado na pesquisa.

### 2.3.2 Parâmetros de Huet-Sayegh

As características reais de deformações e tensões nas variadas posições da estrutura de uma mistura asfáltica relacionando-as com o tráfego solicitado são obtidas através do modelo reológico de Huet-Sayegh. Esse modelo considera o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas e a transformada de Fourier nas direções longitudinal

e transversal pelo software Viscoanalyse, desenvolvido também pelo LCPC.

O desenvolvimento desse modelo analógico iniciou-se com os estudos de Huet (1963) na qual uniu dois elementos colocados em série adicionados a uma mola de rigidez ( $E_\infty$ ) representando o módulo instantâneo do material. A evolução do modelo surgiu na sequência, após dois anos, com o modelo de Huet-Sayegh (1965) utilizando-se de dois ramos paralelos, sendo um lado com mola e dois amortecedores parabólicos e outro somente com uma mola (comportamento estático).

Ainda, existe o modelo chamado de 2S2P1D, uma evolução do modelo de Huet-Sayegh, que adiciona um amortecedor linear junto ao ramo da mola com os elementos parabólicos, permitindo análises para as elevadas temperaturas e baixas frequências. Na presente pesquisa, esse novo modelo não será abordado.

No modelo de Huet-Sayegh, adotado para esta pesquisa, são obtidos os parâmetros viscoelásticos para o dimensionamento para cada tipo de mistura. Os seis parâmetros viscoelásticos utilizados como dados de entrada no software, além das três constantes térmicas ( $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$ ), são:

- $E_\infty$ : módulo infinito altas frequências e baixas temperaturas (módulo instantâneo)
- $E_0$ : módulo zero, elástico estático ( $\text{freq} \rightarrow 0$ )
- $k$ : parâmetro dos elementos parabólicos do modelo  $0 < k < h < 1$
- $h$ : parâmetro dos elementos parabólicos do modelo  $0 < k < h < 1$
- $\delta$ : em função da consistência do ligante para componente imaginária.
- $\tau$ : em função da consistência do ligante e a temperatura (tempo de relaxação dos amortecedores do modelo)

O valor de  $E_\infty$  é obtido no gráfico do Espaço de Black e plano Cole-Cole do ensaio de Módulo Complexo, onde o ângulo de fase ( $\varphi$ ) tende a zero e o produto da frequência pelo tempo de relação tende ao infinito ( $\omega\tau \rightarrow \infty$ ) e este valor de módulo é utilizado para a calibração do módulo de Huet-Sayegh.

Obtêm-se, então, através do dimensionamento simulado as espessuras finais das camadas de misturas asfálticas convencional e modificado, base e sub-base. Essas espessuras são obtidas comparando-se os valores de deformação admissíveis obtidas a partir do ensaio de Fadiga e as deformações calculadas pelo *software* ViscoRoute, que

simula de uma maneira bem próxima as deformações que ocorrem em campo.

Para que a espessura sugerida seja válida, segue-se a relação:

$$\epsilon_{\text{calculada}} < \epsilon_{\text{admissível}}$$

Destarte, é avaliada a eficácia da modificação do polímero nas misturas asfálticas. Espera-se que a camada final definida para mistura asfáltica modificada seja menor que a camada de mistura asfáltica convencional, para assim, comprovar eficácia do polímero EVA.



## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS

O capítulo 3 descreve os materiais e ensaios laboratoriais realizados nessa tese. Inicia-se com a descrição do agregado, curva granulométrica definida para as misturas asfálticas, os tipos de ligantes com as respectivas porcentagens definidas para a modificação pelo polímero EVA. Em seguida, a metodologia dos ensaios laboratoriais de caracterização de agregados e ligantes, ensaio da PCG (NF 98-252, 1999); ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989); ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993); ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004); e, por fim, o ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007).

#### 3.1 MATERIAIS

Os principais materiais que compõem uma mistura asfáltica são os agregados granulares e o ligante asfáltico. No caso dessa pesquisa o agregado selecionado foi do tipo granito e o Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP é o 50/70. Além desses dois materiais, o polímero EVA é um dos componentes de elevada importância que caracterizará os diferentes tipos de ligantes modificados em função do teor utilizado.

Aproximadamente, foram necessários 100 kg de ligante e 2.000 kg de granulares.

##### 3.1.1 Agregados e curva granulométrica

Os agregados graníticos são fornecidos pela pedreira Santa Bárbara, britados pela Vogelsanger, localizada no município de Santo Amaro da Imperatriz em Santa Catarina. A escolha pelo granito foi devido ao melhor intertravamento entre as partículas e por possuírem formas subangulares e superfícies rugosas.

A curva granulométrica é um dos principais fatores que regem o comportamento das misturas asfálticas, pois a granulometria juntamente com a forma dos agregados influenciam na duração da vida útil do pavimento (Momm, 1998). A curva granulométrica utilizada nesta pesquisa encaixa-se na faixa “C” do DNIT (DNIT 031-ES, 2006), densa e graduada, já utilizada pela autora na dissertação intitulada *Estudo do*

*Comportamento do Concreto Asfáltico Modificado pelo Polímero EVA no Módulo Complexo e na Fadiga* (Shinohara, 2012), valores estes calculados e, também, utilizadas nos estudos de Quintero (2011).

A curva granulométrica foi obtida através das equações de Fuller e Thompson (1907) demonstrado na Equação (3.1). Os autores concluíram que a distribuição granulométrica influencia na compactidade da mistura.

$$p = 100. \left( \frac{d}{dm_{\max}} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde:

- p = % que passa na peneira de malha “d”  
d = abertura da malha da peneira  
 $d_{\max}$  = diâmetro máximo  
n = expoente

O expoente “n” calculado foi de 0,5 para um agregado bem graduado entre os limites de D e d. Segundo as especificações do DNIT (2006), uma curva granulométrica situado na faixa de  $0,55 < n < 0,75$  é considerado uma curva aberta e quando estiver entre  $0,35 < n < 0,55$  é considerado de graduação densa.

Na Tabela 1 encontram-se as porcentagens de material passante em cada peneira e os limites da faixa “C” do DNIT 031-ES (2006).

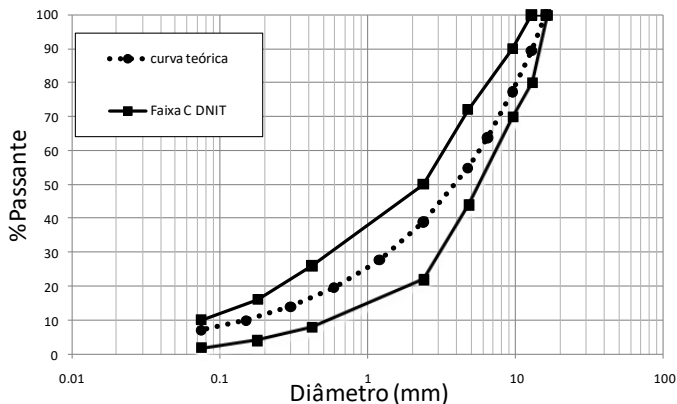
Tabela 1 - Valores da granulometria

| <b>PENEIRA (mm)</b> | <b>% PASSANTE</b> | <b>FAIXA "C"<br/>DNIT 031-ES (2006)</b> |
|---------------------|-------------------|---|
| 16                  | 100,0             | 100-100                                 |
| 12,5                | 89,4              | 85-100                                  |
| 9,5                 | 77,3              | 75-100                                  |
| 6,3                 | 63,7              | -                                       |
| 4,75                | 54,8              | 50-85                                   |
| 2,36                | 38,9              | 30-75                                   |
| 1,18                | 27,7              | -                                       |
| 0,6                 | 19,5              | -                                       |
| 0,3                 | 13,9              | 15-40                                   |
| 0,15                | 9,9               | 8-30                                    |
| 0,075               | 7,0               | 5-10                                    |

Fonte: Shinohara (2012)

A curva granulométrica com os valores da Tabela 1 utilizada nessa tese encontra-se no gráfico da Figura 25.

Figura 25 - Curva granulométrica da pesquisa



Fonte: Shinohara (2012)

### 3.1.2 Ligantes

O ligante asfáltico possui uma estrutura sólida, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molecular que resultaram da destilação de matérias orgânicas, principalmente de carvão. São semissólidos a baixas temperaturas, viscoelásticos à temperatura ambiente e líquidos a altas temperaturas.

Possui a função primordial nas misturas asfálticas como elemento aglutinante das partículas de agregado mineral, proporcionando durabilidade e alta resistência. O Cimento asfáltico de Petróleo (CAP), ou ligante asfáltico, representa aproximadamente 30% do custo de construção de um pavimento (SICRO, 2016).

#### 3.1.2.1 Ligante Convencional

O ligante asfáltico definido para esta pesquisa é o CAP 50/70, tanto para o ligante convencional de referência (CONV) como para os modificados pelo polímero EVA (EVA). A escolha do ligante 50/70 para essa tese deve-se ao fato de possuir boa trabalhabilidade, alta

disponibilidade no mercado e ser o mais utilizado atualmente pelas empresas de pavimentação no Brasil.

Todos os ligantes utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa CBB Indústria e Comércio de Asfaltos e Engenharia LTDA, localizada no município de Curitiba no estado do Paraná.

O teor de partida da mistura asfáltica convencional para preparação e definição dos teores ótimos é com base na porcentagem obtida na pesquisa de dissertação da própria autora (Shinohara, 2012) servindo de base para o estudo continuado da presente pesquisa. Determinou-se o teor de partida de 4,75% para as misturas asfálticas convencionais (CONV).

### **3.1.2.2 Ligante Modificado pelo EVA**

Assim como no ligante convencional, o ligante asfáltico utilizado para modificação pelo polímero etileno acetato de vinila (EVA) é o CAP 50/70, com teor de partida para as misturas asfálticas definido em 5,0% obtido, também, na pesquisa de Shinohara (2012).

O teor de polímero e o tempo de mistura possuem forte influência nas propriedades mecânica de rigidez das misturas asfálticas modificadas. Nos estudos de Saoula *et al* (2011), os teores utilizados foram de 3% e 5% e os tempos de mistura analisados foram de 0,5; 1, 1,5, 2, 3 e 4 horas. Os resultados mais eficientes foram para o maior teor (5%) e o maior tempo de mistura (4h) em relação à suscetibilidade térmica do material. Além disso, o tempo de mistura reduzido para a modificação do ligante pelo polímero pode ocasionar problemas na estabilidade à estocagem. Assim, definiu-se para a presente pesquisa que o tempo total de mistura para a modificação será de 4 horas.

O polímero EVA da pesquisa foi cedido pela empresa Braskem e encontra-se em formato de péletes, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Polímero EVA HM-728 em forma de péletes



Fonte: autora (2017)

A modificação do ligante é realizado antes da preparação da mistura asfáltica, ao contrário dos estudos realizados por Brovelli *et al* (2014) e Toraldo e Mariani (2014) que adicionaram o polímero no momento da usinagem da mistura asfáltica.

As porcentagens de polímero EVA nas misturas foram definidas em 5%, 7,5% e 10% para modificação do ligante asfáltico convencional CAP 50/70. A porcentagem de partida foi escolhida após a verificação do comportamento das misturas asfálticas através do ensaio de viscosidade realizado por Morilha (2004), Bringel (2007) e Shinohara (2012).

A modificação do ligante foi realizada na própria fábrica em Curitiba/PR. Conforme dados da Braskem (2010), empresa fornecedora do EVA, a temperatura ideal para modificar o ligante asfáltico com o polímero é de 150°C. Essa temperatura de mistura não deve exceder 200°C para que as características do EVA e os ligantes asfálticos não sejam prejudicados.

A máquina modificadora utilizada é de fabricante WEG<sup>®</sup> que segue os normativos preconizados na NBR 17094-2 (2016) com rotação de 1.160 rpm, frequência de 60 Hz e temperatura que oscila entre 140-160°C, como ilustra a Figura 27. Na presente pesquisa não é utilizado nenhum tipo de aditivo. O ligante asfáltico é modificado apenas pelo polímero EVA.

Figura 27 - Máquina de modificação do ligante asfáltico



Fonte: autora (2017)

## 3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Nesse item são apresentados os ensaios laboratoriais executados nessa pesquisa iniciando pela caracterização dos agregados e caracterização dos ligantes asfálticos e seguidos pelos ensaios da PCG (NF 98-252, 1999), Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993), Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007).

### 3.2.1 Execução dos ensaios de caracterização do agregado

Para caracterização dos agregados graníticos são realizados os ensaios de abrasão “Los Angeles” (DNER-ME 035, 1998), adesividade de ligante betuminoso (DNER-ME 078, 1994), densidade de agregado graúdo (DNER-ME 081, 1994), índice de forma (DNER-ME 086, 1994) e durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato (DNER-ME 089, 1994).

No caso do ensaio de adesividade foi utilizado o melhorador de adesividade Betudope fornecido pelo fabricante Ipiranga Asfaltos, em que foram testados os teores de 0%, 0,5%, 1% e 1,5% em relação ao peso do ligante asfáltico, para possíveis manutenções do comportamento adesivo das misturas asfálticas. A Figura 28 mostra os agregados envoltos pelo ligante asfáltico, com diferentes porcentagens de dope, imersos em água destilada.

Figura 28 - Ensaio de adesividade



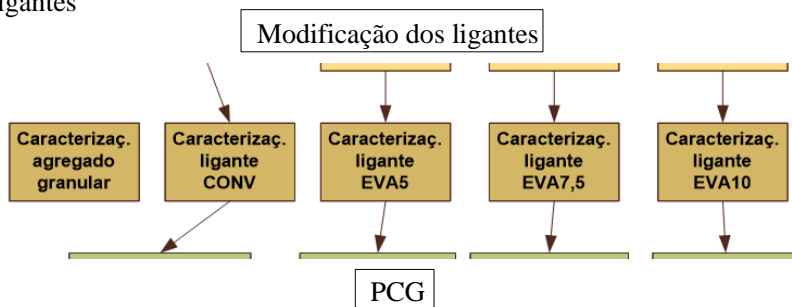
Fonte: autora (2017)

Como esses ensaios são usualmente conhecidos na comunidade científica rodoviária, as respectivas metodologias não serão detalhadas neste volume.

### **3.2.2 Execução dos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos**

Os ligantes asfálticos, tanto o convencional quanto os modificados com 5%, 7,5% e 10% de polímero EVA, são caracterizados pelos ensaios de ductilidade (NBR 6293, 2015); massa específica (NBR 6296, 2012); ponto de amolecimento (NBR 6560, 2008); penetração (NBR 6576, 2007); ponto de fulgor (NBR 11341, 2014); solubilidade em tricloroetileno (NBR 14855, 2015); recuperação elástica (NBR 15086, 2006); e viscosidade Brookfield (NBR 15184, 2004). A Figura 29 mostra o fluxograma dos ensaios de caracterização dos agregados e ligantes, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 29 - Fluxograma dos ensaios de caracterização dos agregados e ligantes



Fonte: autora (2017)

Cabe ressaltar que o ensaio de ponto de amolecimento foi realizado em um equipamento automático com aumento da temperatura controlada por termopar (5°C por minuto) e a leitura realizada através de feixe a laser na qual a acurácia é maior, diferentemente do equipamento manual na qual o aumento de temperatura é controlado por chama do bico de Bunsen e a leitura é realizada a olho nu.

Definiu-se para o ensaio de viscosidade o método Brookfield ao invés do Saybolt Furol (NBR 14950, 2003) devido ao comportamento não newtoniano característico dos ligantes modificados. A alta viscosidade dos asfaltos modificados pode danificar o equipamento Saybolt Furol e demandam demasiado tempo, se comparados com o outro método. Para a correlação entre os resultados Brookfield (cp) e Saybolt Furol (ssf), ensaios dinâmicos e cinemáticos respectivamente, são necessários analisar as curvas de viscosidade em relação à temperatura, por tipo de ligante e as respectivas densidades.

Assim, como os ensaios de caracterização dos granulares, estes ensaios também são usualmente conhecidos na comunidade científica rodoviária, logo, as metodologias de ensaio não serão detalhadas.

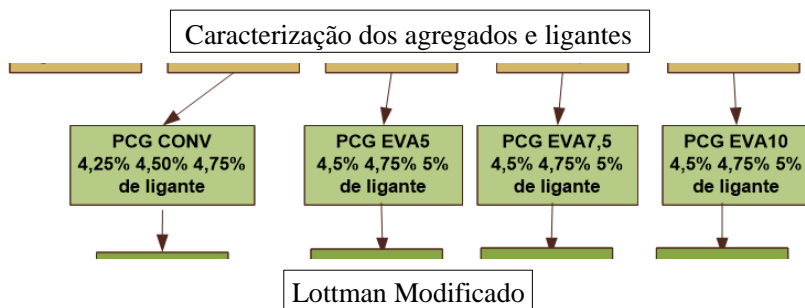
### 3.2.3 Execução do ensaio da PCG

O ensaio da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório (PCG) regido pela norma NF 98-252 (1999) foi realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com um equipamento de modelo australiano.



Os teores de partida de 4,50% para a mistura asfáltica convencional e de 4,75% para a mistura modificada pelo polímero EVA foram obtidos na pesquisa de Shinohara (2012), através do método Marshall (DNER-ME 043, 1995). Considerando que o ensaio de dosagem Marshall não traduz exatamente o que ocorre em campo (como por exemplo, a compactação por golpes) esses teores serão ensaiados novamente na PCG. Além do teor de partida, mais dois teores (com diferença de  $\pm 0,25\%$ ) são testados para cada uma das quatro misturas, ou seja, para a mistura convencional são testados os teores de ligante 4,25%, 4,50% e 4,75% e para as misturas modificadas são testados os teores de 4,50%, 4,75% e 5,00%. A Figura 29 mostra o fluxograma do ensaio da PCG, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 30 - Fluxograma do ensaio da PCG



Fonte: autora (2017)

Assim, para as quatro misturas, com três porcentagens de ligantes cada, com no mínimo de três corpos de prova, totalizam-se trinta e seis corpos de prova de aproximadamente 7,0 kg cada. O quantitativo de material granular e ligante desse ensaio encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantitativo do ensaio da PCG

| Diâmetro<br>(mm) | Passante<br>(%) | Tipo Mistura   | CONC     |          |          | EVA5     |          |
|------------------|-----------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |                 | Ligante (%)    | 4,25     | 4,50     | 4,75     | 4,50     | 4,75     |
|                  |                 | Ligante (g)    | 285,06   | 301,76   | 318,18   | 301,72   | 315,82   |
|                  |                 | Agregado (g)   | 6.422,28 | 6.403,92 | 6.380,31 | 6.403,17 | 6.333,00 |
|                  |                 | Peso Total (g) | 6707,35  | 6705,68  | 6698,49  | 6704,89  | 6648,82  |
| 16               | 100,00000       | 0,00000        | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| 12,75            | 89,35168        | 10,64832       | 683,87   | 681,91   | 679,40   | 681,83   | 674,36   |
| 9,52             | 77,30197        | 12,04971       | 773,87   | 771,65   | 768,81   | 771,56   | 763,11   |
| 6,45             | 63,73101        | 13,57095       | 871,57   | 869,07   | 865,87   | 868,97   | 859,45   |
| 4,76             | 54,81758        | 8,91343        | 572,45   | 570,81   | 568,70   | 570,74   | 564,49   |
| 2,38             | 38,87310        | 15,94448       | 1024,00  | 1021,07  | 1017,31  | 1020,95  | 1009,76  |
| 1,20             | 27,68093        | 11,19217       | 718,79   | 716,74   | 714,10   | 716,65   | 708,80   |
| 0,59             | 19,46662        | 8,21431        | 527,55   | 526,04   | 524,10   | 525,98   | 520,21   |
| 0,30             | 13,92000        | 5,54662        | 356,22   | 355,20   | 353,89   | 355,16   | 351,27   |
| 0,15             | 9,87117         | 4,04883        | 260,03   | 259,28   | 258,33   | 259,25   | 256,41   |
| 0,075            | 7,00000         | 2,87117        | 184,39   | 183,87   | 183,19   | 183,85   | 181,83   |
| F                | 0,00000         | 7,00000        | 449,56   | 448,27   | 446,62   | 448,22   | 443,31   |

| Tipo Mistura   | EVA5     | EVA7,5   |          |          | EVA10    |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ligante (%)    | 5,00     | 4,50     | 4,75     | 5,00     | 4,50     | 4,75     | 5,00     |
| Ligante (g)    | 330,61   | 301,48   | 316,93   | 331,58   | 302,04   | 317,70   | 333,74   |
| Agregado (g)   | 6.281,66 | 6.398,07 | 6.355,27 | 6.300,06 | 6.409,99 | 6.370,75 | 6.341,15 |
| Peso Total (g) | 6612,27  | 6699,55  | 6672,20  | 6631,64  | 6712,03  | 6688,45  | 6674,89  |
| 0,00000        | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| 10,64832       | 668,89   | 681,29   | 676,73   | 670,85   | 682,56   | 678,38   | 675,23   |
| 12,04971       | 756,92   | 770,95   | 765,79   | 759,14   | 772,39   | 767,66   | 764,09   |
| 13,57095       | 852,48   | 868,28   | 862,47   | 854,98   | 869,90   | 864,57   | 860,55   |
| 8,91343        | 559,91   | 570,29   | 566,47   | 561,55   | 571,35   | 567,85   | 565,21   |
| 15,94448       | 1001,58  | 1020,14  | 1013,32  | 1004,51  | 1022,04  | 1015,78  | 1011,06  |
| 11,19217       | 703,05   | 716,08   | 711,29   | 705,11   | 717,42   | 713,03   | 709,71   |
| 8,21431        | 515,99   | 525,56   | 522,04   | 517,51   | 526,54   | 523,31   | 520,88   |
| 5,54662        | 348,42   | 354,88   | 352,50   | 349,44   | 355,54   | 353,36   | 351,72   |
| 4,04883        | 254,33   | 259,05   | 257,31   | 255,08   | 259,53   | 257,94   | 256,74   |
| 2,87117        | 180,36   | 183,70   | 182,47   | 180,89   | 184,04   | 182,92   | 182,07   |
| 7,00000        | 439,72   | 447,87   | 444,87   | 441,00   | 448,70   | 445,95   | 443,88   |

Fonte: autora (2017)

O ensaio inicia-se com o peneiramento do material granular, subdividindo-o nas aberturas das peneiras e, na seqüência, os mesmos são pesados e separados. Os ligantes convencionais e modificados a serem utilizados são pré-aquecidos nas temperaturas de usinagem (obtidas pelas curvas de viscosidade) para o início da mistura do concreto asfáltico, como ilustra a Figura 31 (a).

Após a mistura, o material é colocado em estufa e depois de atingir a temperatura de compactação (obtida pela curva de viscosidade) o material asfáltico é inserido no molde, Figura 31 (b), que também é pré-aquecido a fim de evitar a perda de temperatura, e levado até a máquina de compactação.

Figura 31 - Mistura do corpo de prova e molde do ensaio da PCG



Fonte: autora (2017)

A habilidade de compactação da mistura asfáltica é testada durante a compressão estática, executada pelo movimento cisalhante giratório na parte superior do corpo de prova em torno do eixo de simetria. A força aplicada foi de 12.000 N e a variação da força a cada giro do eixo não ultrapassou 1.200 N em nenhum dos ensaios, assim como, foram verificadas as forças na metade dos ensaios e que não ultrapassaram 250 N.

As leituras das alturas foram realizadas nos giros de 1 a 100, sem a interrupção da rotação, com destaque para os giros 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80.

Após o fim do ensaio, o corpo de prova é desmoldado na própria máquina, tarefa esta facilitada devido à alta temperatura do material e elevação de uma plataforma interna ao molde.

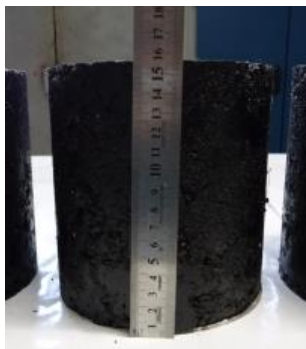
Figura 32 - Máquina do ensaio da PCG e retirada do corpo de prova



Fonte: autora (2017)

Como recomendado pela norma, a aferição da altura dos corpos de prova é realizada, como mostra a Figura 33, que também é determinada automaticamente pelo *software*, pois o volume de vazios é em relação à altura atingida pela compactação. Verificou-se que todos os corpos de prova atingiram a altura mínima de 150 mm.

Figura 33 - Aferição manual do corpo de prova da PCG



Fonte: autora (2017)

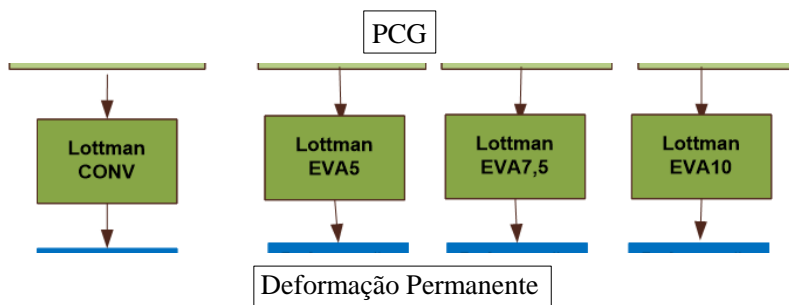
Com a finalização dos ensaios da PCG, o próximo ensaio a ser executado é o ensaio Lottman Modificado.

### 3.2.4 Execução do ensaio de Lottman Modificado

O ensaio Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989) possui o objetivo de avaliar a ação da água no comportamento das misturas asfálticas, com limites mais rigorosos que o ensaio francês de Duriez (NF 98-251-1, 1995).

O teor ótimo de 4,5% de ligante para as misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 foram definidos pelo ensaio da PCG (NF 98-252, 1999). A Figura 34 mostra o fluxograma do ensaio Lottman Modificado, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 34 - Fluxograma do ensaio Lottman Modificado



Fonte: autora (2017)

Os corpos de prova foram moldados seguindo as especificações da AASHTO T-283 (1989), na qual totalizaram vinte e quatro corpos de prova, seis para cada tipo de mistura. O quantitativo de material granular e asfáltico encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantitativo final do ensaio de Lottman Modificado

| Diâmetro (mm) | Passante (%) | Mistura                      | CONC     | EVA5     | EVA7,5   | EVA10    |
|---------------|--------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|               |              | MVR 11% (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,259    | 2,260    | 2,258    | 2,263    |
|               |              | Volume (cm <sup>3</sup> )    | 498,73   | 498,73   | 498,73   | 498,73   |
|               |              | Peso total (g)               | 1.126,62 | 1.127,25 | 1.126,35 | 1.128,45 |
|               |              | Ligante (%)                  | 4,50     | 4,50     | 4,50     | 4,50     |
|               |              | Ligante (g)                  | 50,70    | 50,73    | 50,69    | 50,78    |
|               |              | Agregado (g)                 | 1.075,92 | 1.076,52 | 1.075,67 | 1.077,67 |
| 16            | 100,00000    | 0,00000                      | -        | -        | -        | -        |
| 12,75         | 89,35168     | 10,64832                     | 114,57   | 114,63   | 114,54   | 114,75   |
| 9,52          | 77,30197     | 12,04971                     | 129,65   | 129,72   | 129,61   | 129,86   |
| 6,45          | 63,73101     | 13,57095                     | 146,01   | 146,09   | 145,98   | 146,25   |
| 4,76          | 54,81758     | 8,91343                      | 95,90    | 95,96    | 95,88    | 96,06    |
| 2,38          | 38,87310     | 15,94448                     | 171,55   | 171,65   | 171,51   | 171,83   |
| 1,20          | 27,68093     | 11,19217                     | 120,42   | 120,49   | 120,39   | 120,62   |
| 0,59          | 19,46662     | 8,21431                      | 88,38    | 88,43    | 88,36    | 88,52    |
| 0,30          | 13,92000     | 5,54662                      | 59,68    | 59,71    | 59,66    | 59,77    |
| 0,15          | 9,87117      | 4,04883                      | 43,56    | 43,59    | 43,55    | 43,63    |
| 0,075         | 7,00000      | 2,87117                      | 30,89    | 30,91    | 30,88    | 30,94    |
| F             | 0,00000      | 7,00000                      | 75,31    | 75,36    | 75,30    | 75,44    |

Fonte: autora (2017)

Antes de definir o peso total ideal dos corpos de prova, são realizados testes com teores de 9%, 10 e 11% para que o volume de vazios esteja entre 6 a 8%. O quantitativo desse primeiro teste e os resultados são apresentados no Apêndice E.

Metade desses corpos de prova foi condicionada, como ilustra a Figura 35, e a outra metade permaneceu sem o condicionamento, para fins comparativos.

Figura 35 - Corpos de prova Lottman refrigerados



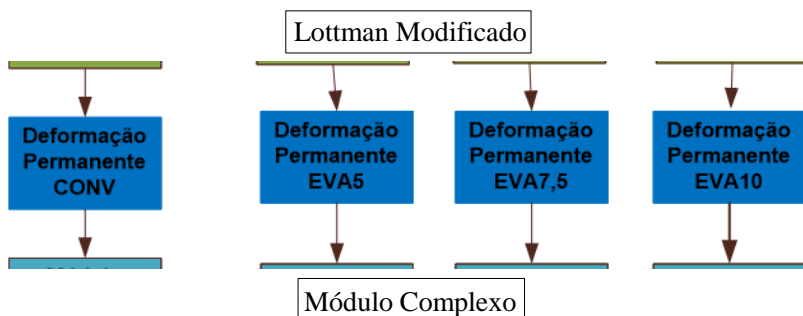
Fonte: autora (2017)

Após 16 horas condicionados à temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  os corpos de prova foram colocados em banho-maria à temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, além de mais 1 hora a  $25^{\circ}\text{C}$ . Com o término dos condicionamentos, são ensaiados na tração indireta por compressão diametral.

### 3.2.5 Execução do ensaio de Deformação Permanente

Após os ensaios dos teores ótimos das misturas asfálticas no Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989) são realizados os ensaios de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) para cada uma das misturas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10). A Figura 36 mostra o fluxograma do ensaio de Deformação Permanente, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 36 - Fluxograma do ensaio de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

A preparação das placas para executar o ensaio de Deformação Permanente é direcionada pela norma NF 98-250-2 (1991). A quantidade de material utilizada foi aproximadamente de 10 kg por placa, visto as dimensões de 50 x 18 x 5 cm ( $4.500\text{ cm}^3$ ) com densidade média de  $2,4\text{ g/cm}^3$ , como apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantitativo do ensaio de Deformação Permanente

| Diâmetro<br>(mm) | Passante<br>(%) | Mistura                   | CONC      | EVA5      | EVA7,5    | EVA10     |
|------------------|-----------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  |                 | MVR (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,367     | 2,415     | 2,405     | 2,401     |
|                  |                 | Volume (cm <sup>3</sup> ) | 4500      | 4500      | 4500      | 4500      |
|                  |                 | Perda (g)                 | 30        | 30        | 30        | 30        |
|                  |                 | Peso total (g)            | 10.683,42 | 10.897,24 | 10.850,66 | 10.833,10 |
|                  |                 | Ligante (%)               | 4,50      | 4,50      | 4,50      | 4,50      |
|                  |                 | Ligante (g)               | 480,75    | 490,38    | 488,28    | 487,49    |
|                  |                 | Agregado (g)              | 10.202,67 | 10.406,86 | 10.362,38 | 10.345,61 |
| 16               | 100,00000       | 0,00000                   | -         | -         | -         | -         |
| 12,75            | 89,35168        | 10,64832                  | 1.086,41  | 1.108,16  | 1.103,42  | 1.101,63  |
| 9,52             | 77,30197        | 12,04971                  | 1.229,39  | 1.254,00  | 1.248,64  | 1.246,62  |
| 6,45             | 63,73101        | 13,57095                  | 1.384,60  | 1.412,31  | 1.406,27  | 1.404,00  |
| 4,76             | 54,81758        | 8,91343                   | 909,41    | 927,61    | 923,64    | 922,15    |
| 2,38             | 38,87310        | 15,94448                  | 1.626,76  | 1.659,32  | 1.652,23  | 1.649,55  |
| 1,20             | 27,68093        | 11,19217                  | 1.141,90  | 1.164,75  | 1.159,78  | 1.157,90  |
| 0,59             | 19,46662        | 8,21431                   | 838,08    | 854,85    | 851,20    | 849,82    |
| 0,30             | 13,92000        | 5,54662                   | 565,90    | 577,23    | 574,76    | 573,83    |
| 0,15             | 9,87117         | 4,04883                   | 413,09    | 421,36    | 419,56    | 418,88    |
| 0,075            | 7,00000         | 2,87117                   | 292,94    | 298,80    | 297,52    | 297,04    |
| F                | 0,00000         | 7,00000                   | 714,19    | 728,48    | 725,37    | 724,19    |

Fonte: autora (2017)

A Figura 37 mostra o momento de nivelamento da mistura asfáltica no molde da máquina de compactação.

Figura 37 - Acomodação da mistura asfáltica



Fonte: autora (2017)

A passagem do pneumático na mistura asfáltica para compactação, ilustrado na Figura 38, também é regida pela norma NF



98-250-2 (1991). O posicionamento dos pneus durante a compactação é direcionado para a posição frontal, central e traseira.

Figura 38 - Compactação da placa para o ensaios de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

A balança utilizada para cálculo da massa específica das placas de Deformação Permanente, mostrada na

Figura 39, foram pesadas no Laboratório de Construção Civil da UFSC.

Figura 39 - Pesagem das placas para massa específica



Fonte: autora (2017)

Considerando os quatro tipos de misturas dessa pesquisa (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10) e sendo necessárias no mínimo duas placas

por mistura, foram moldadas oito placas seguindo a metodologia NF 98-250-2 (1991), como mostra a Figura 40.

Figura 40 - Placas moldadas para o ensaio de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

Na sequência do repouso necessário das placas de no mínimo dois dias, inicia-se a preparação de montagem na máquina para execução do ensaio. São ensaiadas duas placas ao mesmo tempo, do mesmo tipo de mistura e com a mesma espessura. Um termopar é inserido em uma das placas para acompanhamento do ensaio, como mostra a Figura 41.

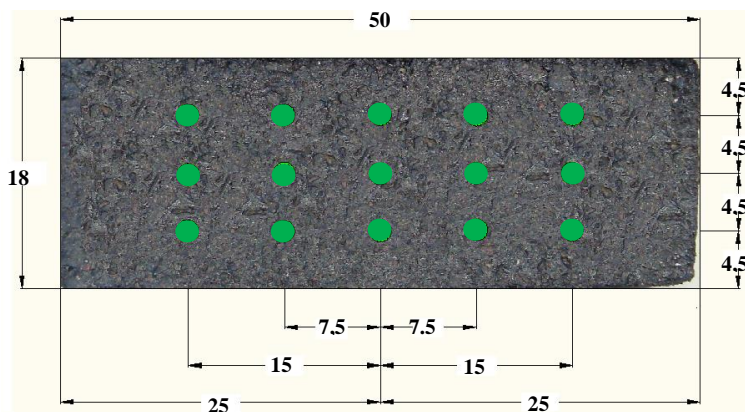
Figura 41 - Termopar inserido na placa de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

A medição do afundamento inicial inerente à placa é anotada para que as demais medidas sejam em relação a essa referência. Os posicionamentos dos quinze pontos equidistantes são ilustrados na Figura 42 e, após cada carregamento, é calculada a média desses pontos como resultantes.

Figura 42 - Pontos de leitura do ensaio de Deformação Permanente



Fonte: Shinohara (2012)

É necessária uma homogeneização da temperatura interna da máquina após a instalação das placas com os devidos moldes parafusados. O tempo estabelecido para esse procedimento é em torno de doze horas. O ensaio é iniciado após as variáveis inseridas no painel de controle e fechamento da câmara. Neste instante o pneu, que se encontra elevado (Figura 43) e previamente calibrado a 6 bars, atinge o nível da placa. A pressão vertical na qual as placas são submetidas é de 5.000 N.

Figura 43 - Vista lateral da máquina de Deformação Permanente



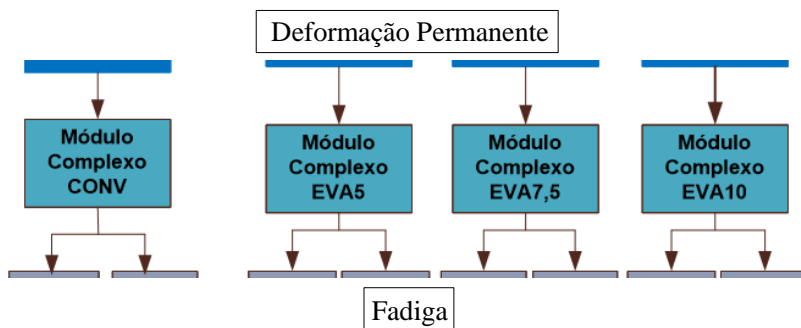
Fonte: autora (2017)

Assim, ao atingir 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos o ensaio é finalizado temporariamente e registradas as medidas que serão comparadas com o afundamento inicial.

### 3.2.6 Execução do ensaio de Módulo Complexo

Os teores ótimos de ligante das misturas convencionais e modificadas validados no ensaio de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) serão submetidos aos ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) para cada uma das quatro misturas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10). A Figura 44 mostra o fluxograma do ensaio de Módulo Complexo, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 44 - Fluxograma dos ensaios de Módulo Complexo



Fonte: autora (2017)

A obtenção dos corpos de provas trapezoidais por mistura asfáltica é obtida de placas com 60 cm de comprimento, 40 cm de largura e 12 cm de espessura. A preparação das placas para executar o ensaio de Módulo Complexo, e também de Fadiga, é direcionada pela norma NF 98-250-2 (1991).

A quantidade de material utilizada foi aproximadamente de 70 kg por placa (total de 16 placas), como apresenta a Tabela 5.

Tabela 5- Quantitativo do ensaio de Módulo Complexo e Fadiga

| Diâmetro<br>(mm) | Passante<br>(%) | Mistura                   | CONC      | EVA5      | EVA7,5    | EVA10     |
|------------------|-----------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  |                 | MVR (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,367     | 2,415     | 2,405     | 2,401     |
|                  |                 | Volume (cm <sup>3</sup> ) | 28800     | 28800     | 28800     | 28800     |
|                  |                 | Perda (g)                 | 60        | 60        | 60        | 60        |
|                  |                 | Peso total (g)            | 68.241,90 | 69.610,31 | 69.312,19 | 69.199,81 |
|                  |                 | Ligante (%)               | 4,50      | 4,50      | 4,50      | 4,50      |
|                  |                 | Ligante (g)               | 3.070,89  | 3.132,46  | 3.119,05  | 3.113,99  |
|                  |                 | Agregado (g)              | 65.171,02 | 66.477,85 | 66.193,14 | 66.085,82 |
| 16               | 100,00000       | 0,00000                   | -         | -         | -         | -         |
| 12,75            | 89,35168        | 10,64832                  | 6.939,62  | 7.078,77  | 7.048,46  | 7.037,03  |
| 9,52             | 77,30197        | 12,04971                  | 7.852,92  | 8.010,39  | 7.976,08  | 7.963,15  |
| 6,45             | 63,73101        | 13,57095                  | 8.844,33  | 9.021,68  | 8.983,04  | 8.968,48  |
| 4,76             | 54,81758        | 8,91343                   | 5.808,97  | 5.925,46  | 5.900,08  | 5.890,51  |
| 2,38             | 38,87310        | 15,94448                  | 10.391,18 | 10.599,55 | 10.554,15 | 10.537,04 |
| 1,20             | 27,68093        | 11,19217                  | 7.294,05  | 7.440,32  | 7.408,45  | 7.396,44  |
| 0,59             | 19,46662        | 8,21431                   | 5.353,35  | 5.460,70  | 5.437,31  | 5.428,49  |
| 0,30             | 13,92000        | 5,54662                   | 3.614,79  | 3.687,27  | 3.671,48  | 3.665,53  |
| 0,15             | 9,87117         | 4,04883                   | 2.638,67  | 2.691,58  | 2.680,05  | 2.675,70  |
| 0,075            | 7,00000         | 2,87117                   | 1.871,17  | 1.908,69  | 1.900,52  | 1.897,44  |
| F                | 0,00000         | 7,00000                   | 4561,97   | 4653,45   | 4633,52   | 4626,01   |

Fonte: autora (2017)

A máquina de compactação é a mesma utilizada no ensaio de Deformação Permanente, porém difere-se no molde utilizado (maior) e na quantidade de passagens do pneumático. A Figura 45 mostra momento da compactação de uma das placas para o ensaio de Módulo Complexo.

Figura 45 - Compactação da placa de Módulo Complexo

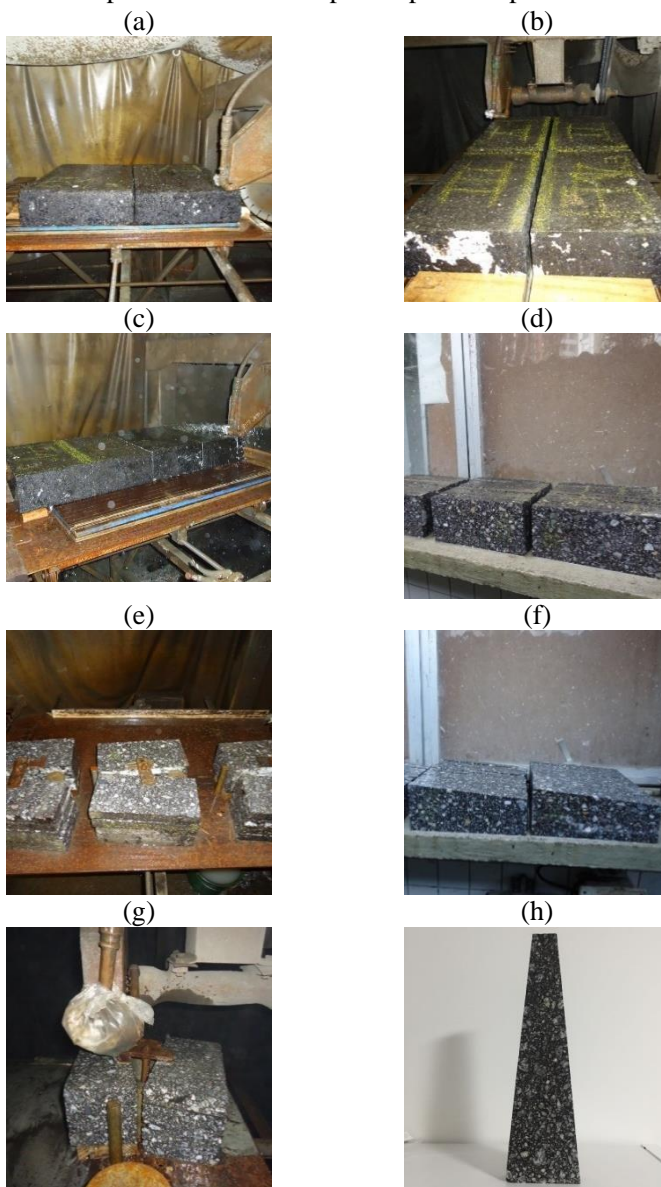


Fonte: autora (2017)

As placas são serradas seguindo a norma NF 98-250-3 (1993) e, para o equipamento de corte atualmente utilizado, a velocidade média é de 2 cm por minuto.

Na Figura 46 são ilustradas as etapas para a obtenção do corpo de prova trapezoidal: (a) duas placas de 60 x 40 x 12 cm lado a lado; (b) corte das bordas e altura de 25 cm; (c) as quatro metades das placas são reajustadas lado a lado; (d) tranchas 25 x 12 x 2,5 cm; (e) primeiro corte inclinado para a lateral do trapézio; (f) um lado trapezoidal cortado; (g) segundo corte inclinado para a lateral do trapézio; (h) corpo de prova trapezoidal.

Figura 46 - Etapas de corte dos corpos de prova trapezoidais



Fonte: autora (2017)



De cada placa de 60 x 40 x 12 cm, geralmente, são obtidas 10 fileiras aptas, que são dependentes da espessura do disco de corte e da espessura de corte das bordas. Cada fileira gera quatro tranchas que, após cortadas, são obtidos quarenta corpos de prova trapezoidais, como ilustra a Figura 47.

Figura 47 - Corpos de provas trapezoidais



Fonte: autora (2017)

Para o ensaio de Módulo Complexo são necessários apenas quatro corpos de prova e são ensaios não destrutivos. Já para o ensaio de Fadiga, são necessários no mínimo dezoito corpos de prova trapezoidais, por mistura, que são obtidos da mesma forma que os procedimentos anteriormente expostos. Assim, são obtidos os gráficos das Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Função *Damping*, Espaço de Black e Plano Cole-Cole para cada uma das misturas asfálticas da pesquisa.

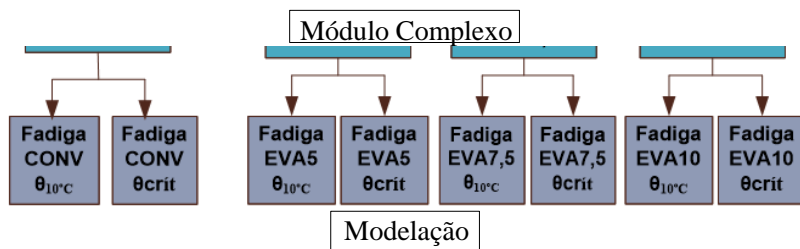
### 3.2.7 Execução do ensaio de Fadiga

Após definidas as temperaturas críticas através da análise do plano Cole-Cole do ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004), são realizados os ensaios de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) para cada uma das quatro misturas (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10) tanto na temperatura normativa (10°C) quanto na temperatura crítica. A Figura



48 mostra o fluxograma do ensaio de Fadiga, parte do fluxograma geral apresentado na Figura 8.

Figura 48 - Fluxograma do ensaio de Fadiga



Fonte: autora (2017)

A temperatura crítica também é ensaiada nesta pesquisa, pois segundo os estudos de Quintero (2016), a diferença dessas temperaturas afeta, na prática, as condições críticas para o dimensionamento do pavimento.

A metodologia do ensaio de Fadiga inicia-se com a usinagem das placas para obtenção dos corpos de provas trapezoidais, seguida pela compactação, corte e triagem, com os mesmos procedimentos descritos no item 3.1.8 do ensaio de Módulo Complexo.

São definidos, para esta pesquisa, quarenta e oito corpos de provas por mistura asfáltica, metade para temperatura normativa e a outra metade para a temperatura crítica. Totalizando cento e noventa e dois corpos de prova trapezoidais para o ensaio de fadiga.

Após a triagem e agrupamento dos corpos de prova ordenados pelo coeficiente  $K_c$  que relaciona às dimensões do corpo de prova (altura, espessura, base maior e base menor) e o volume de vazios, definem-se as deformações controladas nas quais o ensaio é submetido. Dos vinte e quatro corpos de prova, 1/3 deve estar acima de 1 milhão de ciclos ( $\cong 10^7$ ), 1/3 abaixo de 1 milhão ( $\cong 10^5$ ) e 1/3 próximos a 1 milhão ( $\cong 10^6$ ). No Quadro 8 encontram-se as deformações controladas para cada tipo de mistura.

Quadro 8 - Deformações controladas ( $\mu\text{def}$ ) do ensaio de Fadiga

| TIPO DE MISTURA | DEFORMAÇÃO ( $\mu\text{def}$ ) |        |          |
|-----------------|--------------------------------|--------|----------|
|                 | < $10^6$                       | $10^6$ | > $10^6$ |
| CONV            | 60                             | 90     | 150      |
| EVA5            | 120                            | 150    | 180      |
| EVA7            | 120                            | 150    | 180      |
| EVA10           | 120                            | 150    | 180      |

Fonte: autora (2017)

Os ensaios são iniciados com a deformação de 150  $\mu\text{def}$  que é uma referência para misturas asfálticas formuladas em laboratório, na qual geralmente atingem  $10^6$  ciclos. Para os ensaios de Fadiga que atingirem esse número de ciclos acima de 130  $\mu\text{def}$  ( $10^\circ\text{C}$  e 25 Hz) são consideradas misturas de modulo elevado (Quintero, 2015).

Observou-se que a mistura convencional, quando submetida à deformação de 150  $\mu\text{def}$ , não atingiu  $10^6$  ciclos, sendo necessário definir valores inferiores aos geralmente utilizados, ou seja, não é considerada uma mistura de módulo elevado.

Cada etapa do ensaio na máquina de fadiga comporta quatro corpos de prova que quando duplicados fornecem oito pontos no gráfico de fadiga, por cada deformação controlada, ou seja, em uma curva de fadiga são obtidos vinte e quatro pontos. Os ensaios são realizados, seguindo o normativo, na temperatura de  $10^\circ\text{C}$  e na temperatura crítica definida para cada mistura.

## CAPÍTULO 4

### **4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS LABORATORIAIS**

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas asfálticas de caracterização de agregado e ligantes, ensaios da PCG (NF 98-252, 1999), ensaios de Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), ensaios de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993), ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) e ensaios de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007).

Na sequência da apresentação de cada ensaio são realizadas as análises e as discussões desses resultados. Será, também, realizado nesse capítulo uma modelação de Huet-Sayegh e um dimensionamento simulado a fim de comparar o desempenho das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA.

#### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

A seguir, serão expostos os resultados e análise dos ensaios de caracterização dos agregados em relação à abrasão Los Angeles (DNER-ME 035, 1998), Adesividade (DNER-ME 078, 1994), Durabilidade (DNER-ME 089, 1994) e Índice de Forma (DNER-ME 086, 1994).

##### **4.1.1 Resultados da caracterização dos agregados**

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Todos os resultados dos ensaios para os agregados de brita graduada graníticos atenderam aos limites estabelecidos pela norma DNIT 031-ES (2006), como pode ser visualizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da caracterização dos agregados

| ENSAIO              | RESULTADOS     | LIMITES<br>DNIT 031-ES (2006) |
|---------------------|----------------|-------------------------------|
| Abrasão Los Angeles | 20,87%         | < 50%                         |
| Adesividade         | > 0,5% de dope | visual                        |
| Durabilidade        | 3,67%          | < 12%                         |
| Índice de Forma     | 1,44 e 1,68    | > 0,5                         |

Fonte: autora (2017)

Os dados com maiores detalhes e os respectivos resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, Adesividade, Durabilidade e Índice de Forma encontram-se nos Apêndices A, B, C e D respectivamente.

#### 4.1.2 Análise e discussão dos resultados de caracterização dos agregados

Em três amostras retiradas da mesma pedra, em épocas próximas, o resultado de abrasão Los Angeles variou de 10,5% a 20,87%. Entende-se que o valor em si não caracteriza o tipo de material, pois o resultado alterou quase 100% e, desde que não ultrapasse o limite preconizado pela norma, o agregado está apto para o uso nas misturas asfálticas.

No ensaio de Adesividade, os teores de 0,5%, 1% e 1,5% de dope obtiveram resultados satisfatórios na condição de manutenção do comportamento adesivo, já com 0% de dope ocorreu descolamento parcial do ligante asfáltico.

Já os granulares avaliados após os cinco ciclos no ensaio de Durabilidade não apresentaram partículas quebradiças.

Em relação aos resultados de Índice de Forma, os valores são próximo a 1,5, indicando grãos cúbicos considerados ideais para a pavimentação (desde que subangulares). Caso os valores fossem elevados, acima de 3 (da relação a/b) indicariam grãos lamelares não indicados para o uso.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES

A seguir, serão expostos os resultados e análise dos ensaios de caracterização dos ligantes convencional e modificados em relação à Ductilidade (NBR 6293, 2015), Penetração (NBR 6576, 2007), Ponto de

Amolecimento (NBR 6560, 2008), Pontos de Fulgor (NBR 11341, 2014), Solubilidade em Tricloroetileno (NBR 14855, 2015), Viscosidade Brookfield (NBR 15184, 2004), além dos ensaios de Massa Específica (NBR 6296, 2012) e Recuperação Elástica (NBR 15086, 2006).

#### 4.2.1 Resultados da caracterização dos ligantes

Todos os ensaios de caracterização dos ligantes foram realizados na empresa CBB Indústria e Comércio de Asfaltos e Engenharia LTDA localizada na cidade de Curitiba no estado do Paraná.

##### 4.2.1.1 Ligante convencional

Os resultados da caracterização do ligante convencional 50/70 atenderam os limites estabelecidos pela norma DNIT 095-EM (2006), como pode ser visualizada na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante convencional

| CARACTERIZAÇÃO            | RESULTADO CONV | DNIT 095-EM (2006) |
|---------------------------|----------------|--------------------|
| Ductilidade (cm)          | >100           | > <b>60</b>        |
| Penetração (0,1mm)        | 64             | <b>50-70</b>       |
| Pto Amolecimento (°C)     | 46,8           | > <b>46</b>        |
| Pto Fulgor (°C)           | 326            | > <b>235</b>       |
| Solub.Tricloroetileno (%) | 100            | > <b>99,5</b>      |
| 135°C                     | 288            | > <b>274</b>       |
| Viscos Brookf. 150°C      | 146            | > <b>112</b>       |
| 177°C                     | 57             | <b>57-285</b>      |

Fonte: autora (2017)

O Certificado de Análise dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 convencional encontra-se no Anexo 3.

##### 4.2.1.2 Ligantes modificados

Para os ligantes modificados com polímero EVA também foram realizados ensaios de caracterização e na maioria dos testes atenderam

os limites estabelecidos pela norma DNIT 129-EM (2011), como pode ser visualizada na Tabela 8. Exceção foi ao valor de Ductilidade do EVA10 e nos ensaios de Recuperação Elástica e Viscosidade Brookfield para os três tipos de ligantes modificados.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de caracterização do ligante modificado

| CARACTERIZAÇÃO          | EVA5  | EVA7,5 | EVA10 | DNIT 129-EM (2011) |
|-------------------------|-------|--------|-------|--------------------|
| Ductilidade (cm)        | > 100 | > 100  | 33,8  | > 75               |
| Massa Específica        | 0,996 | 1,005  | 1,014 | -                  |
| Penetração (0,1mm)      | 66    | 61     | 51    | 45-70              |
| Pto Amolecimento (°C)   | 57    | 61,4   | 65,1  | > 55               |
| Pto Fulgor (°C)         | 336   | 326    | 308   | > 235              |
| Recup. Elástica (%)     | 54    | 58     | 64    | > 80               |
| Solub. Tricloroetil (%) | 99,9  | 99,9   | 100   | -                  |
| 135°C                   | 1.452 | 1.827  | 3.130 | < 3000             |
| Viscos Brookf. 150°C    | 508   | 755    | 1.580 | < 2000             |
| 177°C                   | 191   | 342    | 580   | < 1000             |

Fonte: autora (2017)

Os Certificados de Análise dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 modificado com 5%, 7,5% e 10% de polímero EVA encontram-se respectivamente nos Anexos 4, 5 e 6.

#### 4.2.2 Análise e discussão dos resultados de caracterização dos ligantes

A maioria dos resultados de caracterização dos ligantes para os ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento, Ponto de Fulgor e Ductilidade estão dentro do limite estabelecido pela norma.

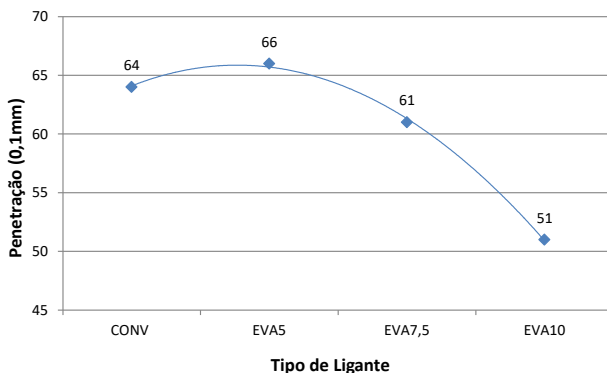
No ensaio de ductilidade os resultados foram satisfatórios para os ligantes CONV, EVA5 e EVA7,5. Porém, para o EVA10 o material rompeu-se em 33,8 cm o que demonstra que o alto teor de polímero (10%) no ligante tornou-o muito plástico a ponto de não atingir o alongamento de 100 cm. Nota-se que o ligante EVA7,5 também possui alto teor de polímero na modificação, porém suportou a limite estabelecido para os ligantes de acima e 60 cm. Salienta-se então a

necessidade de especificação de normativos para o ensaio de ductilidade para os asfaltos modificados por elastômeros e plastômeros.

O limite mínimo de ductilidade para o CAP 50/70 é de 60 cm, porém o resultado é de acima de 100 cm devido ao tanque de ensaio possuir esse comprimento e os normativos limitarem a esse valor para todos os tipos de materiais. Como se trata de CAP 50/70 o ensaio poderia ser interrompido se ultrapassasse 60 cm e para materiais menos viscosos como o CAP 85/100, 150/200 e Asfaltos Diluídos de Petróleo (ADPs) os materiais devem ultrapassar 100 cm, segundo NBR 6293.

O ensaio de penetração mostra a consistência do ligante asfáltico e os resultados são graficamente ilustrados na Figura 49. O ligante asfáltico modificado com 5% de polímero EVA mostrou ser menos consistente que o ligante convencional, o que não é comum. Os ligantes modificados com 7,5% e 10% de EVA seguiram a tendência de diminuição no valor de penetração com o aumento do teor de polímero.

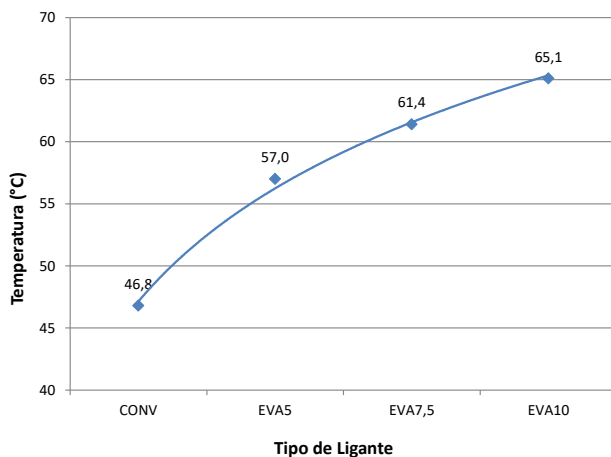
Figura 49 - Curva do ensaio de Penetração dos ligantes modificados e convencional



Fonte: autora (2017)

A curva da caracterização do Ponto de Amolecimentos dos ligantes asfálticos é ilustrada na Figura 50. O aumento da temperatura de amolecimento com o aumento do teor de polímero caracteriza a alta consistência do ligante e a alta viscosidade em função do teor de EVA.

Figura 50 - Curva do Ponto de Amolecimento dos ligantes modificados e convencional



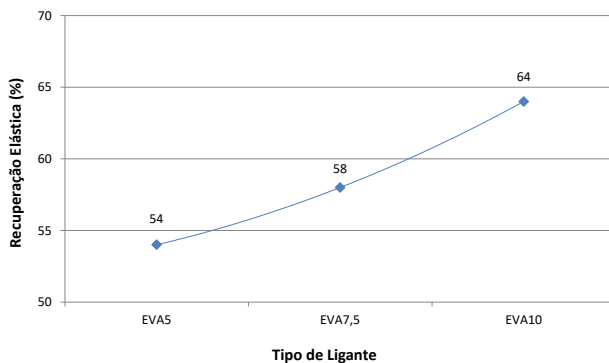
Fonte: autora (2017)

O teor máximo de polímero utilizado nesta pesquisa foi de 10%, mas cabe realizar outros ensaios para que chegue a conclusão da tendência da curva do ponto de amolecimento. Caso a porcentagem de polímero seja muito alta e o ponto de amolecimento ultrapassar 100°C, torna-se inviável devido ao gasto de energia para amolecer o material, pois ao invés de água será necessário o uso de glicerina para atingir temperaturas maiores de amolecimento. Inserindo esse fato à prática na pavimentação, o custo aumentaria demasiadamente para que o ligante atingisse a trabalhabilidade necessária. Nos casos em que as regiões a serem pavimentadas possuam temperaturas muito elevadas, os ligantes com 10% de polímero EVA, por exemplo, já seria o suficiente, pois como a temperatura de amolecimento é de 65,1°C e raramente os asfaltos ultrapassariam esse valor.

A curva de Recuperação Elástica dos ligantes modificados pelo polímero EVA é ilustrado na Figura 51. Não é realizado esse tipo de ensaio para ligantes convencionais, mas para efeito de teste o material foi testado resultando no valor de 9% de recuperação elástica. Nota-se o aumento da recuperação com o aumento do teor de polímero no ligante convencional.



Figura 51 - Curva de Recuperação Elástica dos ligantes modificados

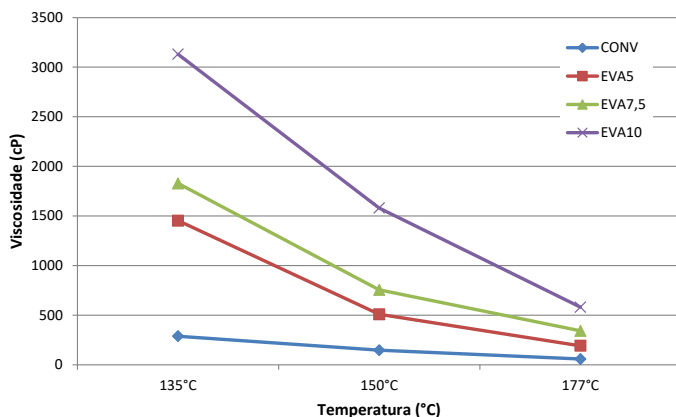


Fonte: autora (2017)

Para os ligantes asfálticos modificados não há limite estabelecido para o ensaio de Solubilidade ao Tricloroetileno. No entanto, se tomar como base a especificação da norma para os ligantes convencionais (DNIT 095-EM, 2006), ou seja, valores maiores que 99,5%, o ensaio é atendido.

As curvas de viscosidade Brookfield são ilustradas na Figura 52. Nota-se um alto valor de torque (dependendo da situação, difícil trabalhabilidade) a baixas temperaturas para os ligantes modificados, além de verificar uma alta variação dos valores de viscosidade se comparadas às três temperaturas (135°C, 150°C e 177°C), diferentemente do asfalto convencional que possui características de viscosidade próximas independentemente da temperatura. Nos asfaltos modificados há uma alta variação de viscosidade nas temperaturas mais baixas, ao contrário das temperaturas mais altas onde a tendência é a estabilidade.

Figura 52 - Curva de Viscosidade Brookfield dos ligantes modificados e convencional



Fonte: autora (2017)

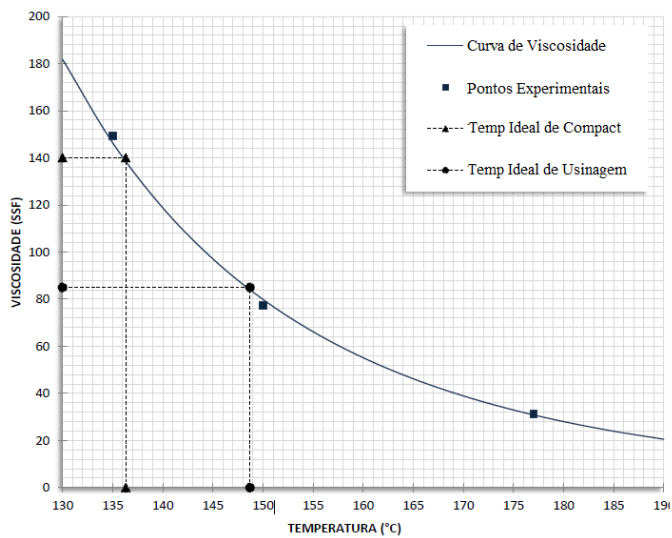
Com os resultados da Viscosidade Brookfield, é possível determinar as temperaturas de usinagem e temperatura de compactação das misturas asfálticas.

#### 4.2.2.1 Temperatura de usinagem e compactação

Após a realização de caracterização dos ligantes asfálticos na Viscosidade Brookfield define-se as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas modificadas EVA5, EVA7,5 e EVA10. Salienta-se que o gráfico de viscosidade da mistura asfáltica CONV foi obtida pelo método Saybolt Furol.

A curva de viscosidade da mistura convencional CAP 50/70 (CONV) indicando as temperaturas de usinagem e de compactação são ilustradas na Figura 53.

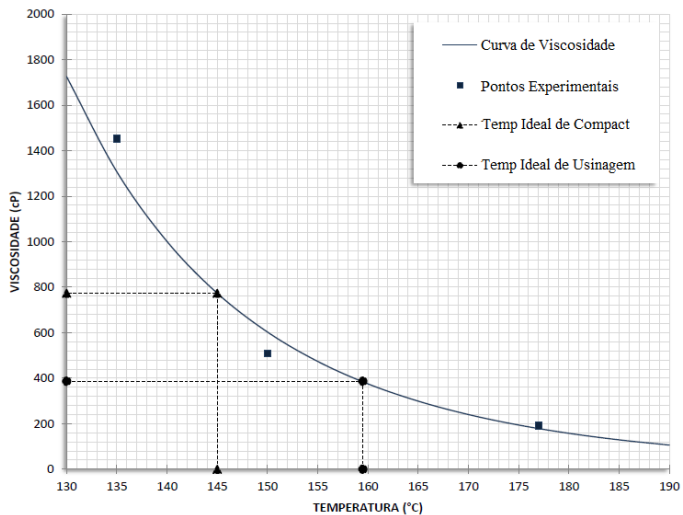
Figura 53 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70



Fonte: CBB (2016)

A curva de viscosidade da mistura asfáltica modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) indicando as temperaturas de usinagem e de compactação são ilustradas na Figura 54.

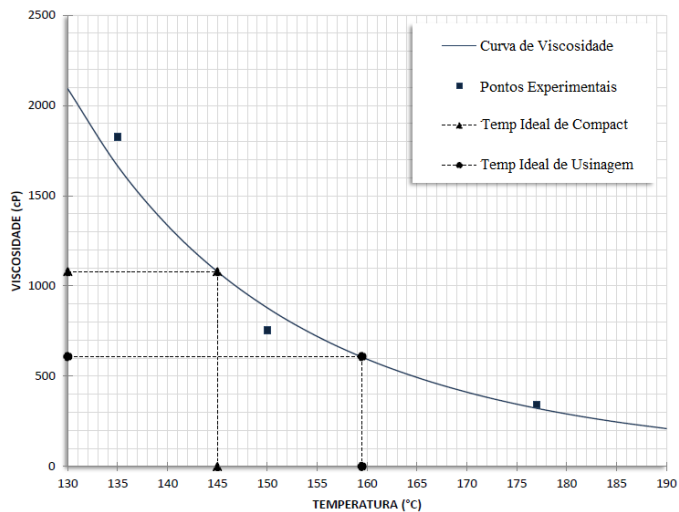
Figura 54 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 5% EVA



Fonte: CBB (2016)

A curva de viscosidade da mistura asfáltica modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) indicando as temperaturas de usinagem e de compactação são ilustradas na Figura 55.

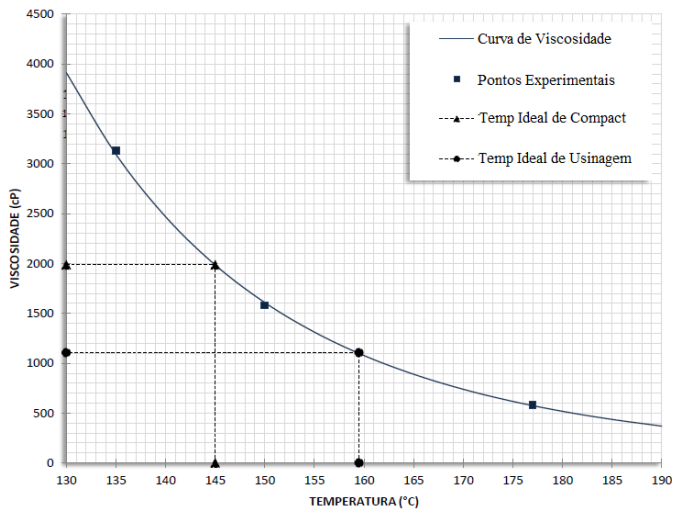
Figura 55 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 7,5% EVA



Fonte: CBB (2016)

A curva de viscosidade da mistura asfáltica modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) indicando as temperaturas de usinagem e de compactação são ilustradas na Figura 56.

Figura 56 - Curva viscosidade x temperatura CAP 50/70 com 10% EVA



Fonte: CBB (2016)

Assim, as recomendações de utilização do ligante asfáltico em relação às temperaturas de usinagem e temperaturas de compactação das misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 com CAP 50/70, obtidas através dos ensaios de viscosidades, são listadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Temperaturas recomendadas de usinagem e compactação

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMPERATURAS RECOMENDADAS<br>DE USINAGEM |               |       |             |
|----------------------|--|---------------|-------|-------------|
|                      | FAIXAS                                   |               | IDEAL | MÉDIA       |
|                      | °C                                       | Viscosidade   | °C    | Viscosidade |
| CONV                 | 146 - 152                                | 95 - 75 ssf   | 149   | 85 ssf      |
| EVA5                 | 162 - 157                                | 431 - 342 cP  | 159   | 387 cP      |
| EVA7,5               | 162 - 157                                | 667 - 551 cP  | 159   | 609 cP      |
| EVA10                | 162 - 157                                | 1212 - 998 cP | 159   | 1105 cP     |

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMPERATURAS RECOMENDADAS<br>DE COMPACTAÇÃO |               |       |         |
|----------------------|---|---------------|-------|---------|
|                      | FAIXAS                                      |               | IDEAL | MÉDIA   |
|                      | °C  | Viscosidade   | °C    | °C      |
| CONV                 | 134 - 139                                   | 155 - 125 ssf | 136   | 140 ssf |
| EVA5                 | -   | -             | 145   | 773 cP  |
| EVA7,5               | -   | -             | 145   | 1080 cP |
| EVA10                | -   | -             | 145   | 1986 cP |

Fonte: autora (2017)

A temperatura do ligante não deve exceder 177°C, pois ficará passível à queima dos maltenos (volatilização). Além disso, a temperatura máxima de armazenamento para períodos sem operação deve ser de 155°C para os ligantes convencionais e de 162°C para os modificados.

Outra análise com os resultados obtidos da caracterização dos ligantes é a classificação segundo o Grau Flexpave para ligantes modificados por polímeros da Agência Nacional de Petróleo – ANP de 2010 (listada no Capítulo 2 - Quadro 1). Os ligantes asfálticos modificados por polímero EVA são classificados, conforme mostra a Tabela 10, em relação ao ensaio de penetração e ponto de amolecimento.

Tabela 10 - Classificação Grau Flexpave da ANP para os ligantes modificados por polímeros

| <b>ENSAIO</b>                        | <b>EVA5</b>  | <b>EVA7,5</b> | <b>EVA10</b> |
|--------------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| Penetração (0,1mm)                   | 66           | 61            | 51           |
| Pto Amolecimento (°C)                | 57           | 61,4          | 65,1         |
| <b>GRAU FLEXPAVE<br/>(ANP, 2010)</b> | <b>55/75</b> | <b>60/85</b>  | <b>65/90</b> |

Fonte: autora (2017)

Na sequência, são realizados os ensaios para determinação dos parâmetros volumétricos.

### **4.3 ENSAIO RICE**

São expostos neste item os resultados e análises dos ensaios Rice regidos pela norma ASTM D 2041 (2000) para cálculo da Massa Volumétrica Real dos granulares (MVRg) para cada uma das misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.

#### **4.3.1 Resultados do ensaio Rice (MVRg)**

Os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas são obtidos previamente aos ensaios de formulação, propriamente ditos. O quantitativo de materiais do ensaio Rice encontra-se exposto no Apêndice F.

Os resultados do ensaio Rice da mistura asfáltica CONV são apresentados na Tabela 11.



Tabela 11 - Massa volumétrica real granular da mistura CONV

| ITEM  | TEOR LIGANTE                 |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   | 4,75%                        | 4,50%                        | 4,25%                        |
| Peso amostra seca                             | 592,70 g                     | 600,50 g                     | 598,10 g                     |
| Volume do picnômetro (calibrado)              | 1071,79 cm <sup>3</sup>      | 1071,79 cm <sup>3</sup>      | 1071,79 cm <sup>3</sup>      |
| Peso picnômetro+rolha                         | 506,30 g                     | 506,30 g                     | 506,30 g                     |
| Peso picnômetro+rolha+água                    | 949,40 g                     | 1030,00 g                    | 919,10 g                     |
| Peso picnômetro+rolha+água+amostra            | 1541,40 g                    | 1632,00 g                    | 1517,20 g                    |
| Peso pic+rolha+água+amostra(até menisco)      | 1933,80 g                    | 1940,10 g                    | 1937,80 g                    |
| Densidade da água 25C                         | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     |
| Peso amostra real                             | 592,00 g                     | 602,00 g                     | 598,10 g                     |
| Volume da água                                | 837,15 cm <sup>3</sup>       | 833,44 cm <sup>3</sup>       | 835,05 cm <sup>3</sup>       |
| Volume da amostra                             | 234,64 cm <sup>3</sup>       | 238,35 cm <sup>3</sup>       | 236,74 cm <sup>3</sup>       |
| <b>Massa Volumétrica Real granular (MVRg)</b> | <b>2,52 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,53 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,53 g/cm<sup>3</sup></b> |
|   | MVRc = 2,53                  | MVRc = 2,54                  | MVRc = 2,55                  |

Fonte: autora (2017)

Os resultados do ensaio Rice da mistura asfáltica EVA5 são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Massa volumétrica real granular da mistura EVA5

| ITEM  | TEOR LIGANTE                 |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   | 4,50%                        | 4,75%                        | 5,00%                        |
| Peso amostra seca                             | 599,20 g                     | 599,30 g                     | 597,00 g                     |
| Volume do picnômetro (calibrado)              | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      |
| Peso picnômetro+rolha                         | 506,30 g                     | 506,30 g                     | 506,30 g                     |
| Peso picnômetro+rolha+água                    | 1003,60 g                    | 1108,80 g                    | 1020,40 g                    |
| Peso picnômetro+rolha+água+amostra            | 1602,80 g                    | 1708,00 g                    | 1617,30 g                    |
| Peso pic+rolha+água+amostra(até menisco)      | 1937,60 g                    | 1935,60 g                    | 1932,90 g                    |
| Densidade da água 25C                         | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     |
| Peso amostra real                             | 599,20 g                     | 599,20 g                     | 596,90 g                     |
| Volume da água                                | 833,74 cm <sup>3</sup>       | 831,74 cm <sup>3</sup>       | 831,34 cm <sup>3</sup>       |
| Volume da amostra                             | 237,27 cm <sup>3</sup>       | 239,27 cm <sup>3</sup>       | 239,67 cm <sup>3</sup>       |
| <b>Massa Volumétrica Real granular (MVRg)</b> | <b>2,53 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,50 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,49 g/cm<sup>3</sup></b> |
|   | MVRc = 2,54                  | MVRc = 2,53                  | MVRc = 2,52                  |

Fonte: autora (2017)

Os resultados do ensaio Rice da mistura asfáltica EVA7,5 são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Massa volumétrica real granular da mistura EVA7,5

| ITEM  | TEOR LIGANTE                 |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   | 4,50%                        | 4,75%                        | 5,00%                        |
| Peso amostra seca                             | 597,00 g                     | 599,70 g                     | 597,00 g                     |
| Volume do picnômetro (calibrado)              | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      |
| Peso picnômetro+rolha                         | 506,30 g                     | 506,30 g                     | 506,30 g                     |
| Peso picnômetro+rolha+água                    | 1031,60 g                    | 945,60 g                     | 1003,80 g                    |
| Peso picnômetro+rolha+água+amostra            | 1628,30 g                    | 1545,40 g                    | 1601,70 g                    |
| Peso pic+rolha+água+amostra(até menisco)      | 1935,90 g                    | 1936,80 g                    | 1934,20 g                    |
| Densidade da água 25C                         | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     |
| Peso amostra real                             | 596,70 g                     | 599,80 g                     | 597,90 g                     |
| Volume da água                                | 834,54 cm <sup>3</sup>       | 832,34 cm <sup>3</sup>       | 831,64 cm <sup>3</sup>       |
| Volume da amostra                             | 236,47 cm <sup>3</sup>       | 238,67 cm <sup>3</sup>       | 239,37 cm <sup>3</sup>       |
| <b>Massa Volumétrica Real granular (MVRg)</b> | <b>2,52 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,51 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,50 g/cm<sup>3</sup></b> |
|   | MVRc = 2,54                  | MVRc = 2,53                  | MVRc = 2,52                  |

Fonte: autora (2017)

E por fim, os resultados do ensaio Rice da mistura asfáltica EVA10 são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Massa volumétrica real granular da mistura EVA10

| ITEM  | TEOR LIGANTE                 |                              |                              |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   | 4,50%                        | 4,75%                        | 5,00%                        |
| Peso amostra seca                             | 597,00 g                     | 595,00 g                     | 595,40 g                     |
| Volume do picnômetro (calibrado)              | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      | 1071,01 cm <sup>3</sup>      |
| Peso picnômetro+rolha                         | 506,30 g                     | 506,30 g                     | 506,30 g                     |
| Peso picnômetro+rolha+água                    | 1024,70 g                    | 901,10 g                     | 1128,20 g                    |
| Peso picnômetro+rolha+água+amostra            | 1621,50 g                    | 1495,80 g                    | 1722,70 g                    |
| Peso pic+rolha+água+amostra(até menisco)      | 1936,40 g                    | 1934,30 g                    | 1933,70 g                    |
| Densidade da água 25C                         | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     | 0,9980 g/cm <sup>3</sup>     |
| Peso amostra real                             | 596,80 g                     | 594,70 g                     | 594,50 g                     |
| Volume da água                                | 834,94 cm <sup>3</sup>       | 834,94 cm <sup>3</sup>       | 834,54 cm <sup>3</sup>       |
| Volume da amostra                             | 236,07 cm <sup>3</sup>       | 236,07 cm <sup>3</sup>       | 236,47 cm <sup>3</sup>       |
| <b>Massa Volumétrica Real granular (MVRg)</b> | <b>2,53 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,52 g/cm<sup>3</sup></b> | <b>2,51 g/cm<sup>3</sup></b> |
|   | MVRc = 2,54                  | MVRc = 2,53                  | MVRc = 2,52                  |

Fonte: autora (2017)

Definidos os valores de MVRg para cada mistura é possível iniciar a formulação das misturas asfálticas.

### 4.3.2 Análise e discussão dos resultados do ensaio Rice

Os valores de MVRg são compilados e listados na Tabela 15, juntamente com os valores da Massa Volumétrica Real calculada (MVRc), seguindo a relação de  $MVRg < MVRc$ .

Tabela 15 - Resumo da MVRg e MVRc

| <b>MISTURA<br/>ASFÁLTICA</b> | <b>TEOR<br/>LIGANTE</b> | <b>MVRg</b>  | <b>MVRc</b> |
|------------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| CONV                         | 4,25%                   | 2,523        | 2,533       |
|                              | <b>4,50%</b>            | <b>2,526</b> | 2,543       |
|                              | 4,75%                   | 2,526        | 2,554       |
| EVA5                         | <b>4,50%</b>            | <b>2,525</b> | 2,540       |
|                              | 4,75%                   | 2,504        | 2,530       |
|                              | 5,00%                   | 2,490        | 2,520       |
| EVA7,5                       | <b>4,50%</b>            | <b>2,523</b> | 2,542       |
|                              | 4,75%                   | 2,513        | 2,532       |
|                              | 5,00%                   | 2,490        | 2,522       |
| EVA10                        | <b>4,50%</b>            | <b>2,528</b> | 2,543       |
|                              | 4,75%                   | 2,519        | 2,533       |
|                              | 5,00%                   | 2,514        | 2,523       |

Fonte: autora (2017)

Assim, os valores de Massa Volumétrica Real dos granulares utilizados nos cálculos para preparação dos corpos de prova dos ensaios de formulação das misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 são 2,526 g/cm<sup>3</sup>; 2,525 g/cm<sup>3</sup>; 2,523 g/cm<sup>3</sup>; e 2,528 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, para teores de 4,5% de ligante. Esse teor é definido no ensaio da PCG, que será dissertado a seguir.

### 4.4 ENSAIO DA PCG

A seguir, serão expostos os resultados e análises dos ensaios da Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) regidos pela norma NF 98-252 (1999) para as misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.

#### 4.4.1 Resultados do ensaio da PCG

A definição do teor ótimo de ligante nas misturas asfálticas é com base no limite que a PCG estabelece para os teores de vazios. Três corpos de prova para cada teor teste de ligante, por tipo de mistura foram ensaiados e os resultados são listados na Tabela 16. As leituras foram realizadas com destaque para os giros 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100.

Tabela 16 - Resultados do ensaio da PCG

| GIROS | CONV |      |      |      |      |      |      |      |      | EVA5 |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | 4,25 |      |      | 4,50 |      |      | 4,75 |      |      | 4,50 |      |      | 4,75 |      |      | 5,00 |      |      |
| 1     | 20,6 | 22,2 | 21,7 | 21,8 | 21,6 | 21,6 | 20,6 | 23,5 | 23,3 | 20,6 | 20,8 | 21,1 | 19,4 | 20,3 | 17,7 | 18,0 | 18,3 | 18,0 |
| 5     | 20,2 | 16,8 | 16,5 | 16,3 | 16,3 | 15,8 | 20,1 | 18,6 | 18,1 | 15,0 | 15,0 | 15,5 | 13,6 | 14,6 | 11,5 | 12,2 | 12,5 | 12,3 |
| 10    | 19,6 | 14,2 | 13,9 | 13,5 | 13,6 | 13,1 | 19,6 | 16,0 | 15,3 | 12,1 | 12,1 | 12,6 | 10,7 | 11,7 | 8,3  | 9,3  | 9,6  | 9,4  |
| 15    | 19,1 | 12,6 | 12,3 | 11,9 | 12,0 | 11,7 | 19,0 | 14,4 | 13,7 | 10,4 | 10,4 | 11,0 | 9,0  | 10,0 | 6,5  | 7,5  | 7,8  | 7,6  |
| 20    | 18,5 | 11,4 | 11,2 | 10,7 | 10,9 | 10,7 | 18,4 | 13,3 | 12,5 | 9,2  | 9,2  | 9,8  | 7,8  | 8,8  | 5,3  | 6,3  | 6,6  | 6,4  |
| 25    | 17,9 | 10,5 | 10,3 | 9,8  | 10,0 | 10,0 | 17,7 | 12,4 | 11,6 | 8,3  | 8,3  | 8,9  | 6,9  | 7,9  | 4,3  | 5,4  | 5,7  | 5,5  |
| 30    | 17,3 | 9,9  | 9,6  | 9,1  | 9,3  | 9,4  | 17,1 | 11,7 | 10,9 | 7,6  | 7,5  | 8,2  | 6,2  | 7,1  | 3,6  | 4,7  | 5,1  | 4,8  |
| 40    | 16,2 | 8,8  | 8,6  | 8,0  | 8,3  | 8,6  | 15,8 | 10,6 | 9,7  | 6,5  | 6,5  | 7,1  | 5,1  | 6,0  | 2,4  | 3,7  | 4,1  | 3,8  |
| 50    | 14,9 | 8,0  | 7,8  | 7,2  | 7,5  | 8,1  | 14,5 | 9,8  | 8,9  | 5,7  | 5,7  | 6,3  | 4,3  | 5,2  | 1,6  | 3,0  | 3,5  | 3,2  |
| 60    | 13,7 | 7,4  | 7,2  | 6,6  | 6,8  | 7,6  | 13,2 | 9,2  | 8,2  | 5,0  | 5,1  | 5,6  | 3,8  | 4,6  | 1,0  | 2,5  | 3,1  | 2,8  |
| 70    | 12,4 | 6,8  | 6,7  | 6,1  | 6,3  | 7,3  | 11,8 | 8,7  | 7,7  | 4,5  | 4,6  | 5,1  | 3,3  | 4,2  | 0,6  | 2,1  | 2,7  | 2,4  |
| 80    | 11,0 | 6,4  | 6,3  | 5,7  | 5,9  | 7,0  | 10,3 | 8,3  | 7,2  | 4,1  | 4,3  | 4,7  | 3,0  | 3,8  | 0,2  | 1,9  | 2,5  | 2,2  |
| 90    | 9,6  | 6,1  | 6,0  | 5,3  | 5,6  | 6,8  | 8,8  | 7,9  | 6,8  | 3,8  | 4,0  | 4,4  | 2,7  | 3,5  | -0,1 | 1,6  | 2,3  | 2,0  |
| 100   | 8,2  | 5,8  | 5,7  | 5,0  | 5,3  | 6,6  | 7,3  | 7,6  | 6,5  | 3,5  | 3,8  | 4,1  | 2,5  | 3,3  | -0,3 | 1,5  | 2,1  | 1,9  |

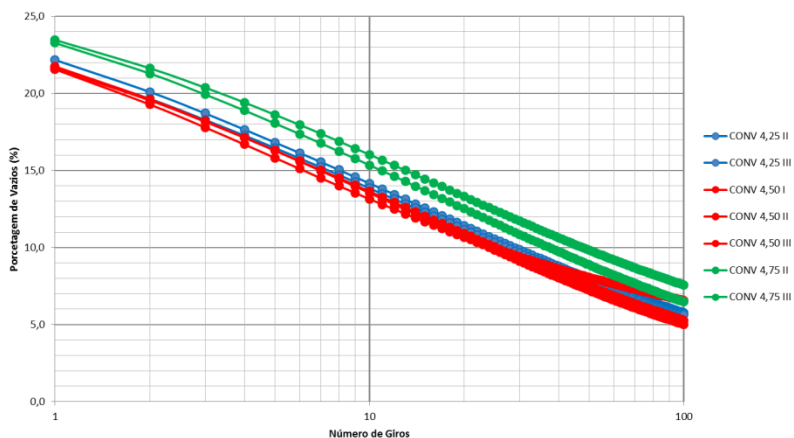
| GIROS | EVA7,5 |      |      |      |      |      |      |      |      | EVA10 |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | 4,50   |      |      | 4,75 |      |      | 5,00 |      |      | 4,50  |      |      | 4,75 |      |      | 5,00 |      |      |
| 1     | 21,1   | 20,7 | 21,1 | 21,3 | 20,2 | 20,3 | 19,4 | 19,1 | 19,1 | 20,6  | 21,4 | 21,0 | 20,3 | 20,1 | 19,3 | 19,8 | 20,5 | 19,0 |
| 5     | 15,5   | 15,0 | 15,3 | 15,7 | 14,5 | 14,6 | 13,8 | 13,5 | 13,5 | 15,1  | 15,8 | 15,5 | 14,7 | 14,4 | 13,6 | 14,2 | 14,5 | 13,3 |
| 10    | 12,7   | 12,1 | 12,4 | 13,0 | 11,8 | 11,7 | 11,0 | 10,7 | 10,7 | 12,3  | 12,9 | 12,7 | 11,9 | 11,5 | 10,8 | 11,4 | 11,5 | 10,5 |
| 15    | 11,0   | 10,4 | 10,7 | 11,3 | 10,1 | 10,0 | 9,3  | 9,0  | 9,0  | 10,7  | 11,3 | 11,1 | 10,2 | 9,9  | 9,1  | 9,7  | 9,7  | 8,8  |
| 20    | 9,9    | 9,3  | 9,6  | 10,2 | 9,0  | 8,8  | 8,1  | 7,8  | 7,8  | 9,5   | 10,1 | 9,9  | 9,1  | 8,7  | 7,9  | 8,6  | 8,5  | 7,6  |
| 25    | 9,0    | 8,4  | 8,7  | 9,3  | 8,1  | 7,9  | 7,2  | 6,9  | 6,9  | 8,6   | 9,3  | 9,1  | 8,2  | 7,9  | 7,0  | 7,7  | 7,6  | 6,8  |
| 30    | 8,3    | 7,7  | 8,0  | 8,6  | 7,4  | 7,2  | 6,5  | 6,2  | 6,2  | 7,9   | 8,6  | 8,4  | 7,5  | 7,2  | 6,3  | 7,0  | 6,9  | 6,1  |
| 40    | 7,2    | 6,6  | 6,9  | 7,6  | 6,4  | 6,1  | 5,5  | 5,2  | 5,2  | 6,9   | 7,5  | 7,3  | 6,4  | 6,2  | 5,2  | 6,0  | 5,9  | 5,1  |
| 50    | 6,5    | 5,8  | 6,1  | 6,9  | 5,7  | 5,4  | 4,8  | 4,4  | 4,5  | 6,1   | 6,8  | 6,6  | 5,7  | 5,5  | 4,5  | 5,3  | 5,2  | 4,5  |
| 60    | 5,9    | 5,2  | 5,5  | 6,3  | 5,1  | 4,8  | 4,2  | 3,9  | 4,0  | 5,5   | 6,2  | 6,0  | 5,1  | 4,9  | 3,9  | 4,9  | 4,7  | 4,1  |
| 70    | 5,4    | 4,8  | 5,1  | 5,9  | 4,7  | 4,3  | 3,8  | 3,5  | 3,6  | 5,0   | 5,7  | 5,5  | 4,6  | 4,5  | 3,5  | 4,5  | 4,3  | 3,8  |
| 80    | 5,1    | 4,4  | 4,7  | 5,5  | 4,4  | 4,0  | 3,5  | 3,1  | 3,4  | 4,7   | 5,3  | 5,1  | 4,3  | 4,2  | 3,2  | 4,3  | 4,1  | 3,5  |
| 90    | 4,8    | 4,1  | 4,4  | 5,2  | 4,1  | 3,7  | 3,3  | 2,9  | 3,1  | 4,4   | 5,0  | 4,8  | 4,0  | 3,9  | 3,0  | 4,1  | 3,8  | 3,4  |
| 100   | 4,5    | 3,8  | 4,1  | 5,0  | 3,9  | 3,4  | 3,1  | 2,7  | 3,0  | 4,1   | 4,7  | 4,6  | 3,8  | 3,7  | 2,8  | 3,9  | 3,7  | 3,2  |

Fonte: autora (2017)

Os resultados são inseridos em gráficos logarítmicos de número de giros *versus* porcentagem de vazios (%) para ilustrar os dados da Tabela 16. Além do teor de ligante, o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica em função do número de giros é dependente, também, da granulometria adotada.

Os resultados gráficos do ensaio da PCG da mistura convencional CAP 50/70 (CONV) são ilustrados na Figura 57. Para cada teor de ligante de 4,25%, 4,75% e 5,25% foram ensaiados três corpos de provas.

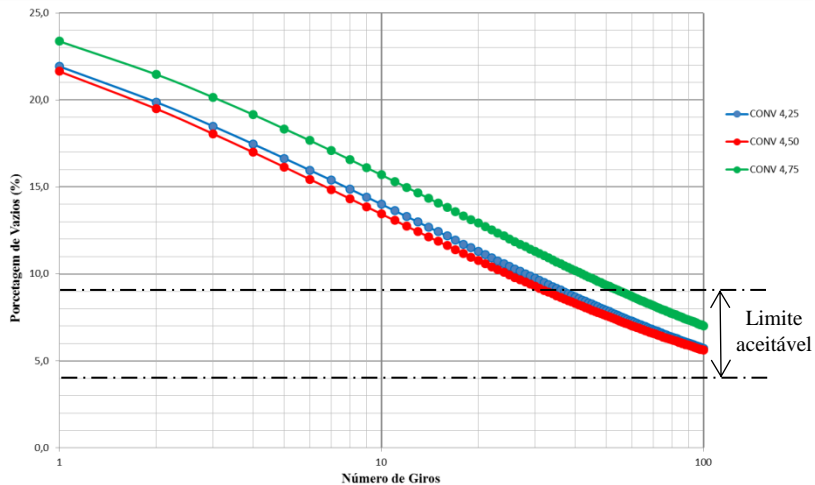
Figura 57 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A porcentagem de vazios final para os teores de 4,25%, 4,75% e 5,25% da mistura CONV é obtida através da média dos valores dos três corpos de provas, como mostra a Figura 58. O limite aceitável para as misturas com fins estruturais é de 4% a 9% de vazios.

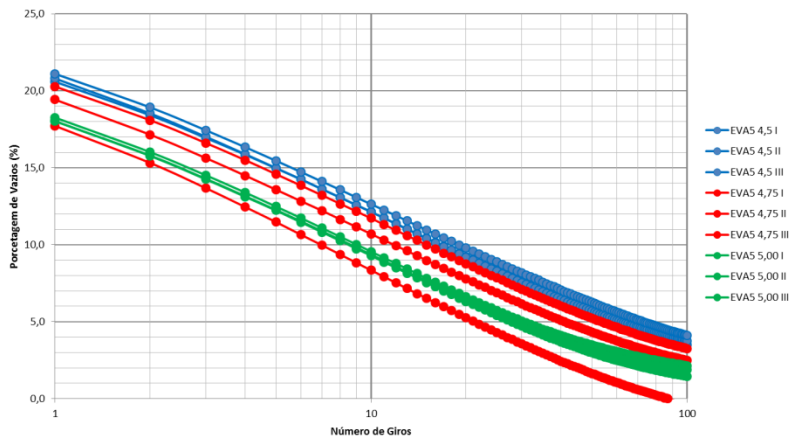
Figura 58 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

Os resultados gráficos do ensaio da PCG da mistura modificada com 5% de polímero EVA são ilustrados na Figura 59. Para cada teor de ligante de 4,5%, 5% e 5,5% foram ensaiados três corpos de provas.

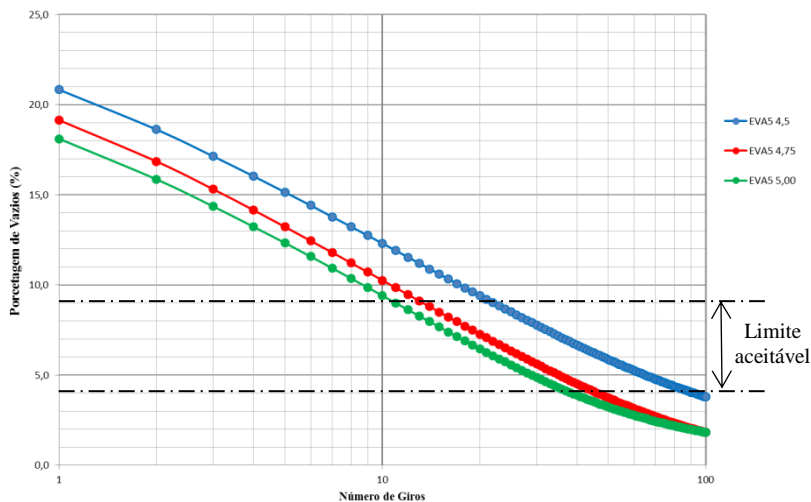
Figura 59 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A porcentagem de vazios final para os teores de 4,5%, 5% e 5,5% da mistura EVA5 é obtida através da média dos valores dos três corpos de provas, como mostra a Figura 60. O limite aceitável para as misturas com fins estruturais é de 4% a 9% de vazios.

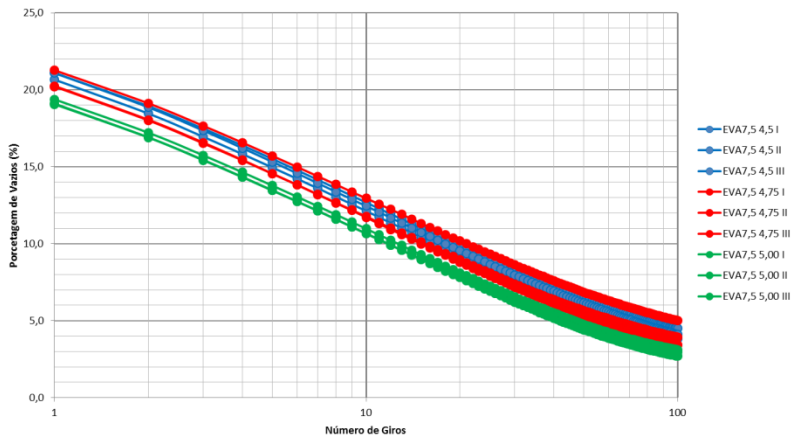
Figura 60 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

Na sequência, os resultados gráficos do ensaio da PCG da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA7,5) são ilustrados na Figura 61. Para cada teor de ligante de 4,5%, 5% e 5,5% foram ensaiados três corpos de provas.

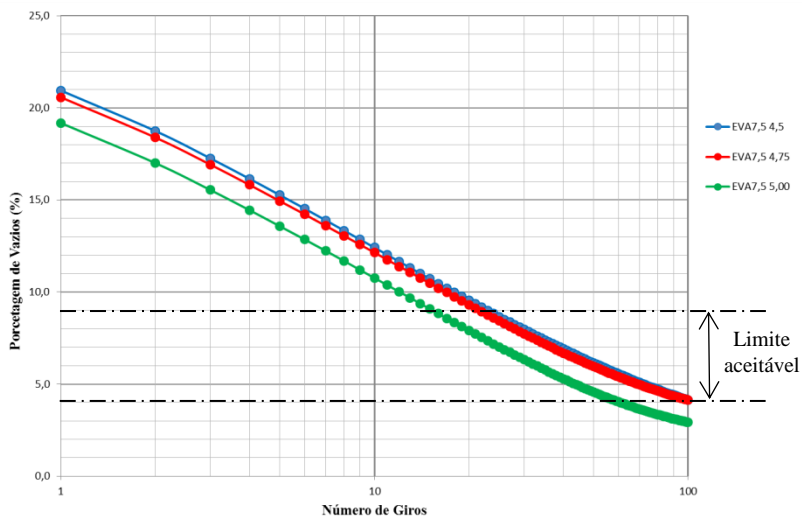
Figura 61 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A porcentagem de vazios final para os teores de 4,5%, 5% e 5,5% da mistura EVA7,5 é obtida através da média dos valores dos três corpos de provas, como mostra a Figura 62 (limite de 4% a 9%).

Figura 62 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA7,5

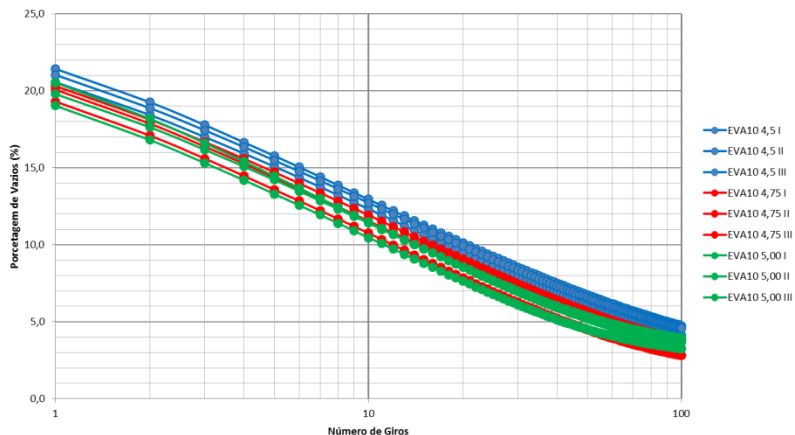


Fonte: autora (2017)



Os resultados gráficos do ensaio da PCG da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA5) são ilustrados na Figura 63. Para cada teor de ligante de 4,5%, 5% e 5,5% foram ensaiados três corpos de provas.

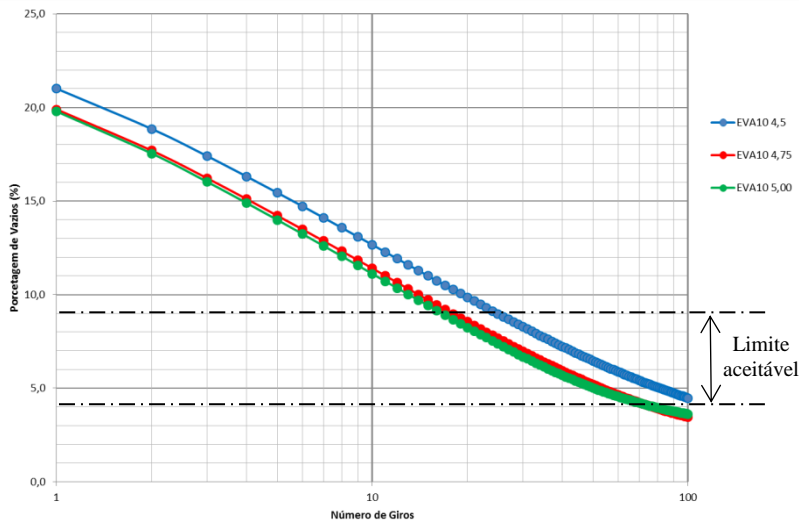
Figura 63 - Resultado geral do ensaio da PCG da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A porcentagem de vazios final para os teores de 4,5%, 5% e 5,5% da mistura EVA10 é obtida através da média dos valores dos três corpos de provas, como mostra a Figura 64. O limite aceitável para as misturas com fins estruturais é de 4% a 9% de vazios.

Figura 64 - Resultado final do ensaio da PCG da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A seguir são realizadas as análises dos resultados do ensaio da PCG, assim como a discussão desses resultados.

#### 4.4.2 Análise e discussão dos resultados do ensaio da PCG

Através do ensaio da PCG é possível acompanhar a evolução da compactidade das misturas dos diferentes teores de EVA, comparando-as com a mistura convencional de referência.

Conforme os limites estabelecidos no normativo, a mistura asfáltica para camadas estruturais é aceita desde que em 80 giros o volume de vazios esteja entre 4 e 9%. Além disso, os valores que estiverem entre 4% e 6% são considerados para as misturas de módulo elevado.

Todos os resultados do ensaio da PCG enquadram-se nos limites de mistura asfáltica para camadas estruturais aos 80 giros, como lista a Tabela 17. Tem-se que para a mistura convencional com 4,5% de ligante, o teor de vazios é de 6,20%, ou seja, não é classificado como uma mistura de módulo elevado, mas está apta para camadas estruturais. Já as misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA, para o mesmo teor de 4,5% de ligante asfáltico, enquadram-se como misturas de

módulo elevado com 4,37%, 4,71% e 5,04% de teor de vazios aos 80 giros para as misturas de EVA5, EVA7,5 e EVA10, respectivamente.

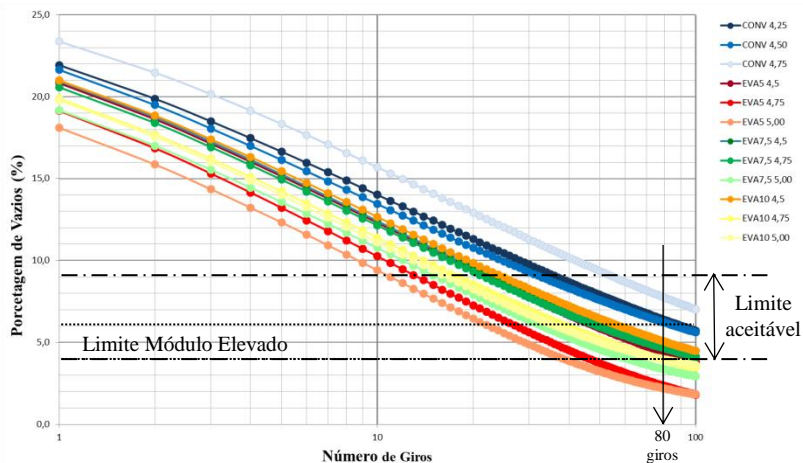
Tabela 17 - Volume de vazios do ensaio da PCG a 80 giros

| MISTURA ASFÁLTICA | TEOR DE LIGANTE (%) | VOLUME DE VAZIOS (%) |
|-------------------|---------------------|----------------------|
| CONV              | 4,25                | 6,36                 |
|                   | <b>4,50</b>         | <b>6,20</b>          |
|                   | 4,75                | 7,73                 |
| EVA5              | <b>4,50</b>         | <b>4,37</b>          |
|                   | 4,75                | 2,33                 |
|                   | 5,00                | 2,18                 |
| EVA7,5            | <b>4,50</b>         | <b>4,71</b>          |
|                   | 4,75                | 4,63                 |
|                   | 5,00                | 3,35                 |
| EVA10             | <b>4,50</b>         | <b>5,04</b>          |
|                   | 4,75                | 3,91                 |
|                   | 5,00                | 3,96                 |

Fonte: autora (2017)

Os gráficos gerados pelo ensaio da PCG mostram que há o aumento da compactidade com o número de giros e, conseqüentemente, uma diminuição do volume de vazios. Observa-se que a inclinação das curvas é decrescente até próximos aos 80 giros e após esse ponto as curvas são aproximadamente constantes e paralelas ao eixo x, ou seja, a mistura asfáltica atinge a compactidade relativa e ideal para cada tipo de mistura e mesmo que haja a continuidade de compactação por cisalhamento giratório o teor de vazios não terá alteração significativa. Para ilustrar esse fato, na Figura 65 encontra-se o gráfico resultante dos ensaios da PCG das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.

Figura 65 - Resultado final da PCG para as misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10

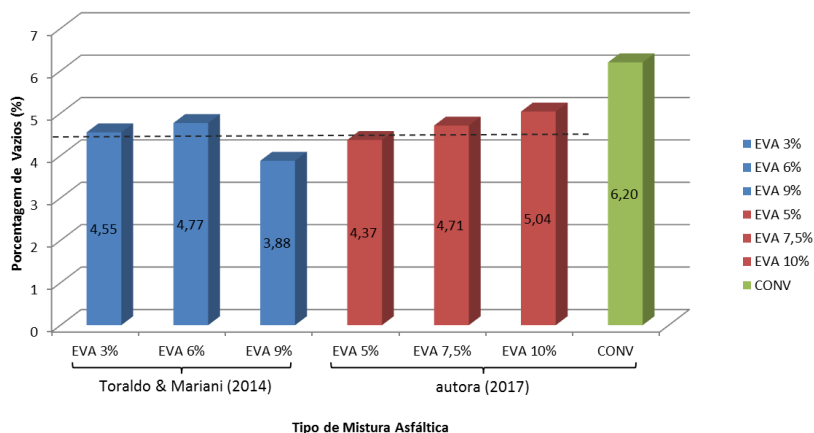


Fonte: autora (2017)

Conforme citado anteriormente, a mistura asfáltica para camadas estruturais é aceita desde que em 80 giros o volume de vazios esteja entre 4 e 9%. A partir das análises dos dados, os teores de ligante não aptos nesse limite são os 4,75% e 5% do EVA5 e 5% do EVA7,5. Assim, definiu-se para as misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 o teor ótimo de 4,50% para todas as misturas, no qual enquadraram-se também no limite de misturas de módulo elevado.

Um comparativo dos resultados obtidos nesses ensaios foi realizado com os dados de pesquisadores italianos que também ensaiaram misturas modificadas com o polímero EVA, seguindo os normativos da PCG NF 98-252 (1999), como demonstra a Figura 66.

Figura 66 - Comparativo da % de vazios dos diferentes teores de EVA no ensaio da PCG



Fonte: autora (2017)

De maneira similar aos estudos dos pesquisadores italianos Toraldo e Mariani (2014), os resultados das características volumétricas da presente pesquisa demonstraram que os diferentes teores de polímero não afetaram significativamente a porcentagem de vazios, que ficaram com média geral de 4,6% para todas as misturas, exceto a mistura convencional (CONV) de referência.

Diferentemente do estudo de 2014, que não ocorreu uma relação entre o aumento do teor de polímero e o aumento do teor de vazios, na presente pesquisa essa relação é notável, na qual a mistura com maior teor de polímero EVA, 10%, possui a maior porcentagem de vazios. Esse fato possivelmente deve-se ao aumento de viscosidade das misturas.

#### 4.5 ENSAIO LOTTMAN MODIFICADO

A seguir, serão expostos os resultados e análises dos ensaios Lottman modificado regidos pela norma AASHTO T-283 (1989) para as misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.

#### 4.5.1 Resultados do ensaio de Lottman Modificado

O ensaio para verificar a sensibilidade à água é realizado pelo ensaio americano de Lottman Modificado (AASHTO T-283, 1989), que possui o intuito de comparar os resultados com o ensaio francês de Duriez (NF 98-251-1, 1995).

A média dos resultados do ensaio de Lottman Modificado para as misturas asfálticas convencional (CONV) e modificadas pelo polímero EVA (EVA5, EVA7,5 e EVA10) encontram-se na Tabela 18. Trata-se da ruptura por tração indireta, após o condicionamento, juntamente com a relação  $r/R$  das resistências residuais.

Tabela 18 - Relação  $r/R$  do ensaio Lottman Modificado

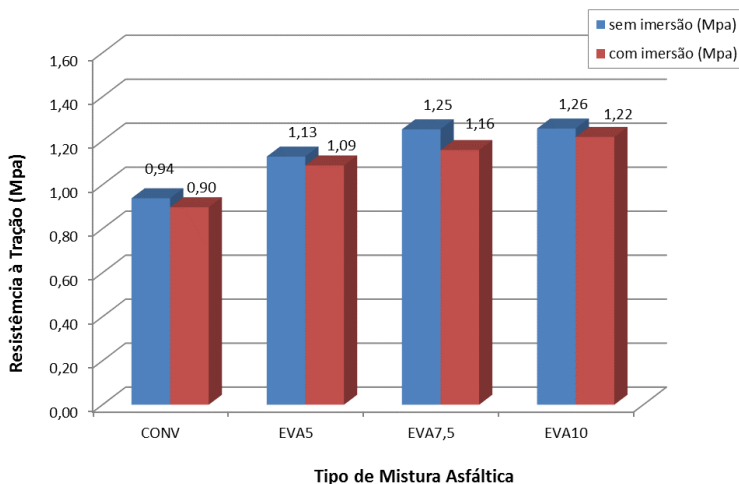
| MISTURA | LIGANTE (%) | CONDICIONAMENTO | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (MPa) | $r/R$ |
|---------|-------------|-----------------|-------------------------------------|-------|
| CONV    | 4,50        | sem imersão R   | 0,94                                | 0,96  |
|         |             | com imersão r   | 0,90                                |       |
| EVA5    | 4,50        | sem imersão R   | 1,13                                | 0,96  |
|         |             | com imersão r   | 1,09                                |       |
| EVA7,5  | 4,50        | sem imersão R   | 1,25                                | 0,93  |
|         |             | com imersão r   | 1,16                                |       |
| EVA10   | 4,50        | sem imersão R   | 1,26                                | 0,97  |
|         |             | com imersão r   | 1,22                                |       |

Fonte: Shinohara (2017)

Há uma evolução na resistência à tração indireta com o aumento do teor de polímero indicando uma constante relação, tanto nos corpos de prova sem imersão e com imersão.

Os dados do ensaio Lottman da presente pesquisa listada na Tabela 18, é ilustrada graficamente na Figura 67.

Figura 67 - Resistência à tração no ensaio de Lottman Modificado



Fonte: Shinohara (2017)

Na sequência, são realizadas as análises dos resultados do ensaio de Lottman Modificado, assim como a discussão desses resultados.

#### 4.5.2 Análise e discussão dos resultados do ensaio de Lottman Modificado

Previamente à análise dos resultados do ensaio de Lottman Modificado, são descritos os ensaios de Duriez realizados por Shinohara (2012), com os mesmos tipos de misturas asfálticas desta pesquisa (convencionais e modificados pelo polímero EVA) e que foram aprovados acima dos valores mínimos determinados pela norma, ou seja, 0,70 de relação entre corpos de provas imersos e não imersos. Esses resultados são listados na Tabela 19.

Tabela 19 - Relação r/R do ensaio Duriez

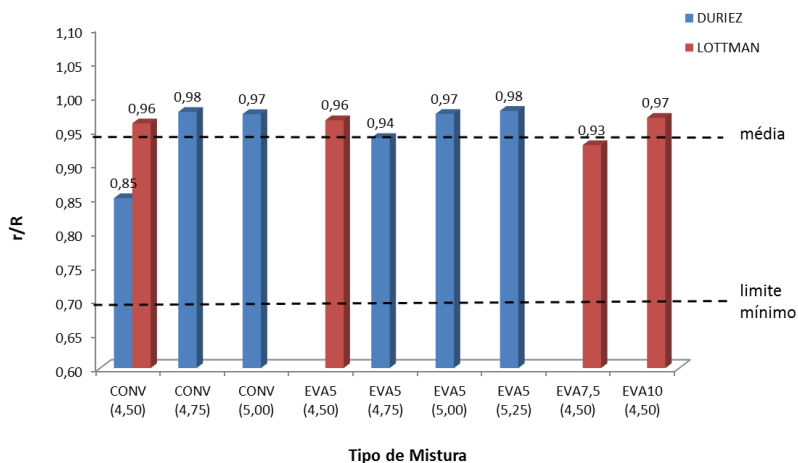
| MISTURA | LIGANTE (%) | CONDICIONAMENTO                | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) | r/R  |
|---------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| CONV    | 4,50        | sem imersão R<br>com imersão r | 40,32<br>34,16                 | 0,85 |
|         | 4,75        | sem imersão R<br>com imersão r | 41,60<br>40,64                 | 0,98 |
|         | 5,00        | sem imersão R<br>com imersão r | 41,70<br>40,60                 | 0,97 |
| EVA5    | 4,75        | sem imersão R<br>com imersão r | 61,20<br>57,44                 | 0,94 |
|         | 5,00        | sem imersão R<br>com imersão r | 55,36<br>53,92                 | 0,97 |
|         | 5,25        | sem imersão R<br>com imersão r | 54,68<br>53,50                 | 0,98 |

Fonte: Shinohara (2012)

A temperatura de condicionamento do ensaio de Duriez é de 18°C, já o ensaio Lottman Modificado o condicionamento é realizado à temperatura de 60°C. Considerando as condições de condicionamento mais rigorosas deste último ensaio, a tendência é que haja maiores diferenças entre a relação dos valores obtidos de resistência dos corpos de provas condicionados e não condicionados. Porém, esse fato não foi constatado, como mostra a Figura 68.



Figura 68 - Relação dos valores de  $r/R$  dos ensaios de Duriez e Lottman Modificado



Fonte: Shinohara (2017)

Observa-se que o limite mínimo para ambos os ensaios de 0,70 da relação  $r/R$  é atingida, com média dos resultados de 0,95, ou seja, a severidade do ensaio Lottman Modificado não fez com que as misturas asfálticas perdessem resistência após condicionados e imersos em água.

Com exceção à relação de 0,85 da mistura convencional no ensaio de Duriez, todos os demais resultados estão acima de 0,93. As misturas asfálticas convencionais, geralmente são mais susceptíveis à variação térmica, sofrendo degradações em maior número em relação às misturas modificadas.

Gorkem e Sengoz (2009) demonstraram que em relação à suscetibilidade à umidade, o ligante modificado pelo polímero EVA aumenta a aderência ligante-agregado através de criações de estrutura de rede dentro do ligante convencional, auxiliando na diminuição à suscetibilidade térmica.

Acredita-se que os tipos de misturas asfálticas são considerados de alta resistência, porém, ambos os ensaios não foram rigorosos o suficiente para diferenciar os tipos de misturas asfálticas. Em se tratando de ensaios eliminatórios para formulação de misturas asfálticas, no caso da metodologia francesa, todos os tipos de mistura estariam aptos para darem sequência à pesquisa.

## 4.6 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A seguir, serão expostos os resultados e análises dos ensaios de Deformação Permanente (NF 98-253-1, 1993) realizados nas misturas asfálticas convencionais (CONV) e nas misturas asfálticas modificadas com polímero EVA nos teores de 5% (EVA5), 7,5% (EVA7,5) e 10% (EVA10). Os teores ótimos de ligante foram definidos em 4,5% para todas as misturas no ensaio da PCG e validados, também, no ensaio de Lottman Modificado.

### 4.6.1 Resultados do ensaio de Deformação Permanente

Os resultados dos afundamentos são obtidos em relação à medição inicial, realizadas em quinze pontos equidistantes antes do início do ensaio propriamente dito. Assim, após os ciclos de número 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 o ensaio é interrompido e as medições realizadas. Ao atingir o afundamento superior a 15% o ensaio é interrompido definitivamente.

O resultado do ensaio de Deformação Permanente da mistura CAP 50/70 convencional (CONV) encontra-se na Tabela 20.

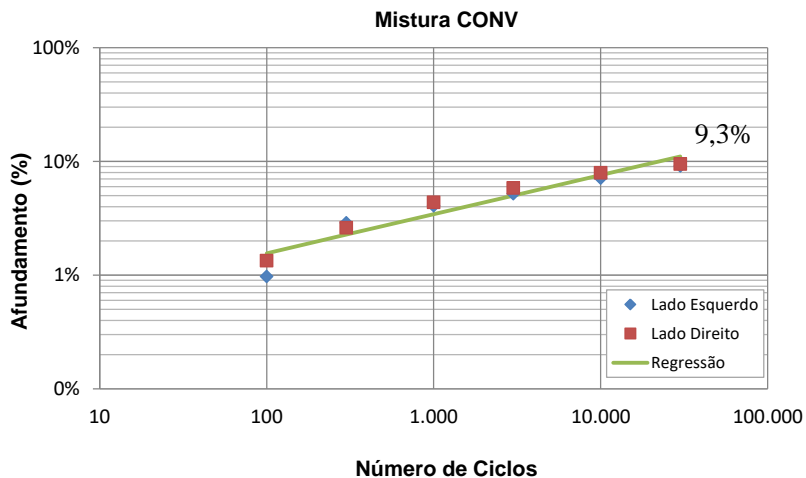
Tabela 20 - Resultado de Deformação Permanente da mistura CONV

| NÚMERO DE CICLOS | AFUNDAMENTO (%) |              | REGRESSÃO |
|------------------|-----------------|--------------|-----------|
|                  | LADO ESQUERDO   | LADO DIREITO |           |
| 100              | 1,0%            | 1,3%         | 1,6%      |
| 300              | 2,9%            | 2,6%         | 2,3%      |
| 1.000            | 4,1%            | 4,4%         | 3,4%      |
| 3.000            | 5,2%            | 5,8%         | 5,0%      |
| 10.000           | 7,1%            | 7,9%         | 7,6%      |
| 30.000           | 9,1%            | 9,5%         | 11,0%     |

Fonte: autora (2017)

A média entre o afundamento do lado esquerdo e do lado direito resultou em 9,3%, após 30.000 ciclos e pela regressão o resultado foi de 11%. O gráfico que corresponde aos resultados da Tabela 20 encontra-se na Figura 69.

Figura 69 - Resultado de Deformação Permanente da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

O resultado do ensaio de Deformação Permanente da mistura CAP 50/70 modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) encontra-se na Tabela 21.

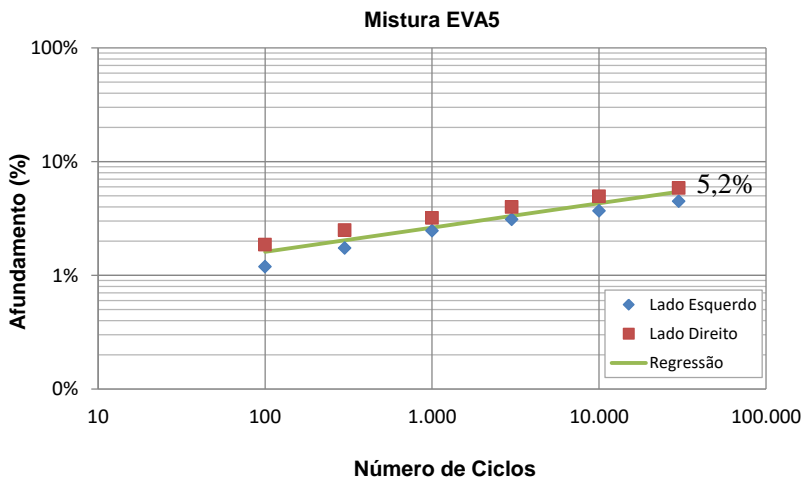
Tabela 21 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA5

| NÚMERO DE CICLOS | AFUNDAMENTO (%) |              | REGRESSÃO |
|------------------|-----------------|--------------|-----------|
|                  | LADO ESQUERDO   | LADO DIREITO |           |
| 100              | 1,2%            | 1,9%         | 1,6%      |
| 300              | 1,7%            | 2,5%         | 2,0%      |
| 1.000            | 2,5%            | 3,2%         | 2,6%      |
| 3.000            | 3,1%            | 4,0%         | 3,3%      |
| 10.000           | 3,7%            | 5,0%         | 4,3%      |
| 30.000           | 4,5%            | 5,9%         | 5,4%      |

Fonte: autora (2017)

A média entre o afundamento do lado esquerdo e do lado direito resultou em 5,2%, após 30.000 ciclos e pela regressão o resultado foi de 5,4%. O gráfico que corresponde aos resultados da Tabela 21 encontra-se na Figura 70.

Figura 70 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

O resultado do ensaio de Deformação Permanente da mistura CAP 50/70 modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) encontra-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA7,5

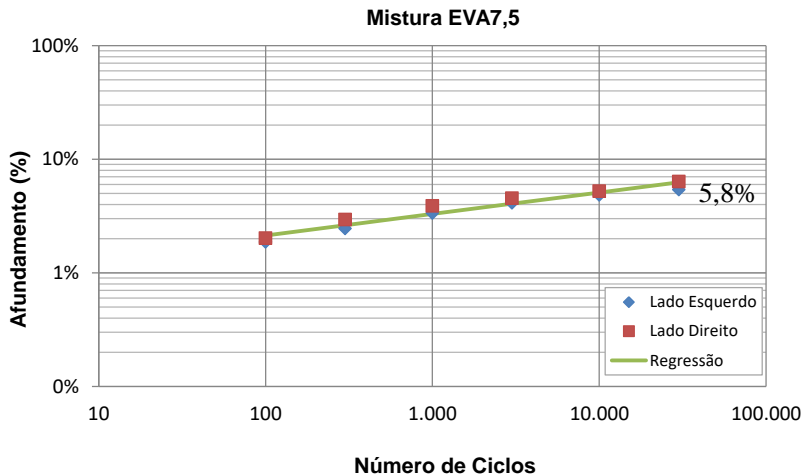
| NÚMERO DE CICLOS | AFUNDAMENTO (%) |              | REGRESSÃO |
|------------------|-----------------|--------------|-----------|
|                  | LADO ESQUERDO   | LADO DIREITO |           |
| 100              | 1,9%            | 2,0%         | 2,1%      |
| 300              | 2,5%            | 2,9%         | 2,6%      |
| 1.000            | 3,4%            | 3,9%         | 3,3%      |
| 3.000            | 4,1%            | 4,5%         | 4,1%      |
| 10.000           | 4,9%            | 5,2%         | 5,1%      |
| 30.000           | 5,4%            | 6,3%         | 6,3%      |

Fonte: autora (2017)

A média entre o afundamento do lado esquerdo e do lado direito resultou em 5,8%, após 30.000 ciclos e pela regressão o resultado foi de

6,3%. O gráfico que corresponde aos resultados da Tabela 22 encontra-se na Figura 71.

Figura 71 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

O resultado do ensaio de Deformação Permanente da mistura CAP 50/70 modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) encontra-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA10

| NÚMERO DE CICLOS | AFUNDAMENTO (%) |              | REGRESSÃO |
|------------------|-----------------|--------------|-----------|
|                  | LADO ESQUERDO   | LADO DIREITO |           |
| 100              | 1,7%            | 1,6%         | 2,5%      |
| 300              | 2,4%            | 2,5%         | 2,9%      |
| 1.000            | 2,9%            | 2,8%         | 3,3%      |
| 3.000            | 3,5%            | 4,0%         | 3,9%      |
| 10.000           | 4,7%            | 5,2%         | 4,5%      |
| 30.000           | -               | -            | -         |

Fonte: autora (2017)

Não foi possível finalizar o ensaio de Deformação Permanente para a mistura modificada com 10% de EVA devido a problemas

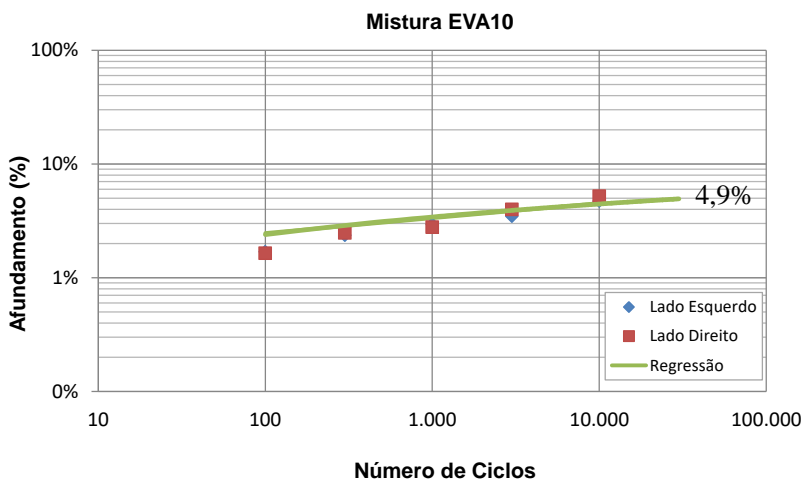
técnicos da máquina. O ensaio foi interrompido aos 12.703 ciclos e, mesmo não sendo o ideal, o afundamento para 30.000 ciclos é obtido pela regressão linear. A Equação (4.1) mostra a reta de regressão para obter o afundamento a 30.000 ciclos.

$$y = 0,0045 \cdot \ln(x) + 0,0034 \quad (4.1)$$

$$y = 0,0045 \cdot \ln(30.000) + 0,0034 = 0,049$$

Logo, o valor de afundamento estimado para 30.000 ciclos é de 4,9%. O gráfico que corresponde aos resultados da Tabela 23, assim como a extensão da linha de tendência para 30.000 ciclos, encontra-se na Figura 72.

Figura 72 - Resultado de Deformação Permanente da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A seguir são realizadas as análises dos resultados do ensaio da Deformação Permanente, assim como a discussão desses resultados.

#### 4.6.2 Análise e discussão dos resultados do ensaio de Deformação Permanente

As porcentagens de afundamento aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 desta pesquisa foram compiladas e são apresentadas na Tabela 24.

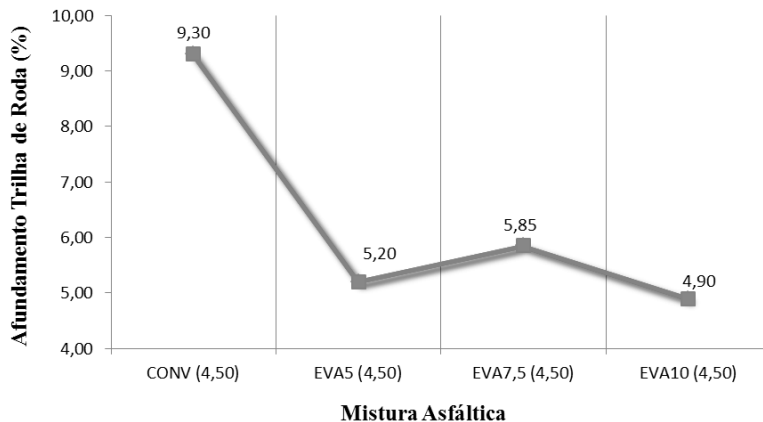
Tabela 24 - Afundamento (%) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | AFUNDAMENTO (%)  |                 | MÉDIA<br>(%) |
|----------------------|------------------|-----------------|--------------|
|                      | LADO<br>ESQUERDO | LADO<br>DIREITO |              |
| CONV (4,50)          | 9,10             | 9,50            | <b>9,30</b>  |
| EVA5 (4,50)          | 4,50             | 5,90            | <b>5,20</b>  |
| EVA7,5 (4,50)        | 5,40             | 6,30            | <b>5,85</b>  |
| EVA10 (4,50)         | 4,90             | 4,90            | <b>4,90</b>  |

Fonte: autora (2017)

Todos os resultados do ensaio de Deformação Permanente são satisfatórios quanto à especificação normativa de no máximo 10% de afundamento da espessura inicial. As placas das misturas asfálticas CONV, EVA5 e EVA7,5, que ficaram abaixo de 10%, não apresentam riscos ao uso para rodovias ditas “severas”. Já as misturas EVA10, que ficaram abaixo de 5% do afundamento inicial, são classificadas para uso em rodovias ditas “muito severas”, segundo classificação do LCP (2007), como ilustra o gráfico da Figura 73.

Figura 73 - Afundamento (%) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

Em relação às espessuras de afundamento aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 desta pesquisa são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Afundamento (mm) aos 30.000 ciclos das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | AFUNDAMENTO (mm) |                 | MÉDIA<br>(mm) |
|----------------------|------------------|-----------------|---------------|
|                      | LADO<br>ESQUERDO | LADO<br>DIREITO |               |
| CONV (4,50)          | 4,56             | 4,74            | <b>4,65</b>   |
| EVA5 (4,50)          | 2,24             | 2,93            | <b>2,58</b>   |
| EVA7,5 (4,50)        | 2,70             | 3,17            | <b>2,94</b>   |
| EVA10 (4,50)         | 2,36             | 2,61            | <b>2,49</b>   |

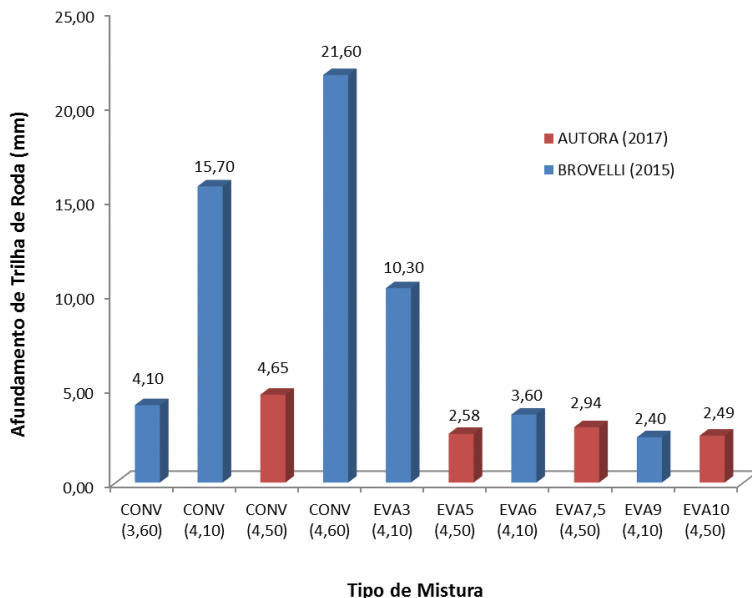
Fonte: autora (2017)

Juntamente com os resultados dessa pesquisa, realiza-se uma análise em conjunto com os dados de afundamento das misturas asfálticas modificadas com polímero EVA de Brovelli *et al* (2015). Estes autores analisaram misturas convencionais com 3,6%, 4,1% e



4,6% de ligante asfáltico (85 mm/10 de penetração e 44°C de ponto de amolecimento) e o ensaio de Deformação Permanente foi regido pela norma europeia EN 12697-22 (2003). Os teores de polímero EVA que eles utilizaram foram de 3%, 6% e 9%. O gráfico da Figura 74 está organizado por tipo de misturas (CONV e EVA), pelas porcentagens crescentes de polímero e pelo teor de ligante.

Figura 74 - Afundamento no ensaio de Deformação Permanente



Fonte: autora (2017)

Observa-se que as misturas convencionais, realmente, estão sujeitas aos maiores valores de afundamento nas trilhas de roda, ou seja, a modificação por polímero EVA diminui a suscetibilidade à deformação permanente, devido em parte ao aumento da viscosidade. Assim também, como concluíram os estudos de Leite (1999); Bringel *et al* (2005); Ildefonso (2007); Rodrigues *et al* (2009); Frota e D'Antona (2011); Toraldo e Mariani (2014) e Brovelli *et al* (2014 e 2015).

Outra análise é em relação às diferentes porcentagens de polímero que não altera significativamente o afundamento da mistura, visto que, com exceção à mistura EVA3, as demais misturas afundaram em média 2,80 mm. O aumento da porcentagem de polímero (3%, 5%,

6%, 7,5%, 9% e 10%) não preveniu a deformação permanente, isto é, uma porcentagem de polímero acima de 5% não melhora as características da mistura como imaginado.

Verifica-se, também, que a porcentagem de ligante modificado, que para essa análise em conjunto alterou entre 4,1% e 4,5% não mostrou diferenças significativas, ao contrário das misturas com ligante convencional (entre 3,6% e 4,6%) na qual aumentou até cinco vezes o valor de afundamento.

## **4.7 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO**

A seguir, serão expostos os resultados e análises dos ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) realizados após a aprovação dos teores ótimos de cada uma das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 no ensaio de Deformação Permanente.

### **4.7.1 Resultados do ensaio de Módulo Complexo**

O ensaio de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) fornece as características da mistura asfáltica em relação ao comportamento nas variadas temperaturas e frequência de solitação. Por se tratar de ensaios que consideram a viscoelasticidade do material, é possível obter a energia dissipada ( $E_2$ ) durante o carregamento e, principalmente, em qual temperatura essa situação ocorre.

Os ensaios são realizados a sete temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$  e em quatro frequências de solitação de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz para cada tipo de mistura asfáltica (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10) que resultaram nos valores da norma do módulo complexo ( $|E^*|$ ) e ângulo de fase ( $\phi$ ) listados na Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29, respectivamente

Tabela 26 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura CONV

| CONV |      |          |          |         |        |
|------|------|----------|----------|---------|--------|
| TEMP | FREQ | $ E^* $  | E1       | E2      | $\phi$ |
| -10  | 1    | 19913,21 | 19867,20 | 1350,17 | 3.9    |
| -10  | 3    | 20407,48 | 20370,92 | 1218,24 | 3.4    |
| -10  | 10   | 21245,70 | 21227,33 | 881,50  | 3.9    |
| -10  | 30   | 22718,20 | 22717,03 | 190,25  | 4.9    |
| 0    | 1    | 17691,53 | 17601,63 | 1777,16 | 3.9    |
| 0    | 3    | 18352,83 | 18279,66 | 1632,99 | 3.4    |
| 0    | 10   | 19468,28 | 19425,41 | 1286,97 | 3.9    |
| 0    | 30   | 19468,28 | 21114,91 | 627,26  | 4.9    |
| 10   | 1    | 13290,37 | 13054,23 | 2491,51 | 11.0   |
| 10   | 3    | 14245,42 | 14045,91 | 2372,99 | 10.0   |
| 10   | 10   | 15855,16 | 15721,36 | 2052,46 | 7.0    |
| 10   | 30   | 17834,96 | 17771,91 | 1491,69 | 5.0    |
| 15   | 1    | 11062,96 | 10714,70 | 2751,49 | 14.4   |
| 15   | 3    | 12052,72 | 11749,76 | 2682,76 | 12.9   |
| 15   | 10   | 13825,32 | 13610,08 | 2427,20 | 10.1   |
| 15   | 30   | 15899,86 | 15778,05 | 1959,00 | 7.1    |
| 20   | 1    | 8124,56  | 7613,80  | 2833,51 | 20.4   |
| 20   | 3    | 9189,86  | 8723,65  | 2887,99 | 18.3   |
| 20   | 10   | 11175,69 | 10817,29 | 2805,01 | 14.6   |
| 20   | 30   | 13366,86 | 13128,97 | 2506,22 | 10.8   |
| 30   | 1    | 2967,90  | 2382,40  | 1769,67 | 36.6   |
| 30   | 3    | 3762,95  | 3111,11  | 2116,46 | 34.2   |
| 30   | 10   | 5489,71  | 4808,25  | 2648,51 | 28.9   |
| 30   | 30   | 7521,05  | 6888,83  | 3017,30 | 23.7   |
| 40   | 1    | 997,27   | 742,18   | 665,92  | 41.9   |
| 40   | 3    | 1316,36  | 966,32   | 893,74  | 42.8   |
| 40   | 10   | 2234,46  | 1681,32  | 1471,62 | 41.2   |
| 40   | 30   | 3439,28  | 2671,61  | 2165,74 | 39.0   |

Fonte: autora (2017)

Tabela 27 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA5

| <b>EVA 5</b> |             |             |           |           |          |
|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|
| <b>TEMP</b>  | <b>FREQ</b> | <b> E* </b> | <b>E1</b> | <b>E2</b> | <b>φ</b> |
| -10          | 1           | 23365,59    | 23294,17  | 1817,17   | 4.5      |
| -10          | 3           | 24010,14    | 23954,20  | 1629,23   | 3.9      |
| -10          | 10          | 25068,94    | 25040,38  | 1186,62   | 2.7      |
| -10          | 30          | 26910,09    | 26906,69  | 359,64    | 0.8      |
| 0            | 1           | 17906,39    | 17695,88  | 2733,23   | 8.8      |
| 0            | 3           | 18976,85    | 18800,33  | 2577,93   | 7.8      |
| 0            | 10          | 20710,86    | 20596,50  | 2169,73   | 6.0      |
| 0            | 30          | 23008,77    | 22961,46  | 1465,20   | 3.7      |
| 10           | 1           | 14942,09    | 14607,69  | 3140,17   | 12.1     |
| 10           | 3           | 16065,55    | 15773,87  | 3044,52   | 10.9     |
| 10           | 10          | 18080,48    | 17874,79  | 2717,19   | 8.6      |
| 10           | 30          | 20530,28    | 20419,55  | 2122,60   | 6.0      |
| 15           | 1           | 13567,23    | 13178,28  | 3221,70   | 13.7     |
| 15           | 3           | 14857,73    | 14518,58  | 3152,95   | 12.2     |
| 15           | 10          | 17001,84    | 16756,06  | 2877,63   | 9.7      |
| 15           | 30          | 19632,53    | 19495,54  | 2309,49   | 6.8      |
| 20           | 1           | 8754,27     | 8190,95   | 3084,22   | 20.6     |
| 20           | 3           | 9998,63     | 9445,88   | 3273,46   | 19.1     |
| 20           | 10          | 12355,95    | 11886,30  | 3370,47   | 15.8     |
| 20           | 30          | 15061,59    | 14721,34  | 3180,44   | 12.2     |
| 30           | 1           | 2859,39     | 2437,36   | 1492,52   | 31.5     |
| 30           | 3           | 3644,46     | 3124,27   | 1872,96   | 31.0     |
| 30           | 10          | 5407,62     | 4746,12   | 2587,45   | 28.6     |
| 30           | 30          | 7658,47     | 6940,45   | 3234,66   | 25.0     |
| 40           | 1           | 1063,62     | 908,98    | 552,11    | 31.3     |
| 40           | 3           | 1303,20     | 1088,85   | 715,62    | 33.4     |
| 40           | 10          | 1975,67     | 1601,53   | 1155,68   | 35.9     |
| 40           | 30          | 2984,69     | 2348,41   | 1839,72   | 38.1     |

Fonte: autora (2017)

Tabela 28 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA7,5

| EVA 7,5 |      |          |          |         |        |
|---------|------|----------|----------|---------|--------|
| TEMP    | FREQ | E*       | E1       | E2      | $\phi$ |
| -10     | 1    | 24406,65 | 24352,57 | 1617,10 | 3.8    |
| -10     | 3    | 24916,73 | 24876,53 | 1407,45 | 3.2    |
| -10     | 10   | 25874,00 | 25856,55 | 944,13  | 2.1    |
| -10     | 30   | 27519,23 | 27518,32 | 176,08  | 0.4    |
| 0       | 1    | 18639,28 | 18414,14 | 2884,13 | 8.9    |
| 0       | 3    | 19697,90 | 19516,55 | 2662,48 | 7.8    |
| 0       | 10   | 21437,15 | 21327,45 | 2162,75 | 5.8    |
| 0       | 30   | 23675,50 | 23635,39 | 1363,82 | 3.3    |
| 10      | 1    | 13355,98 | 12874,26 | 3549,70 | 15.4   |
| 10      | 3    | 14676,42 | 14256,94 | 3479,46 | 13.7   |
| 10      | 10   | 16949,52 | 16653,30 | 3151,54 | 10.7   |
| 10      | 30   | 19539,61 | 19374,26 | 2528,04 | 7.4    |
| 15      | 1    | 10482,07 | 9935,36  | 3332,77 | 18.6   |
| 15      | 3    | 11800,31 | 11283,57 | 3446,33 | 17.0   |
| 15      | 10   | 14205,98 | 13792,20 | 3397,46 | 13.9   |
| 15      | 30   | 16928,32 | 16657,83 | 3004,11 | 10.2   |
| 20      | 1    | 7014,26  | 6410,18  | 2841,59 | 24     |
| 20      | 3    | 8234,59  | 7605,90  | 3149,40 | 22.6   |
| 20      | 10   | 10714,01 | 10124,75 | 3497,92 | 19.1   |
| 20      | 30   | 13562,78 | 13105,28 | 3484,00 | 14.9   |
| 30      | 1    | 3017,68  | 2616,23  | 1501,56 | 30.0   |
| 30      | 3    | 3707,42  | 3204,18  | 1861,86 | 30.3   |
| 30      | 10   | 5367,45  | 4697,25  | 2592,44 | 29.0   |
| 30      | 30   | 7551,14  | 6786,09  | 3304,20 | 26.1   |
| 40      | 1    | 893,17   | 787,78   | 420,65  | 28.2   |
| 40      | 3    | 1088,22  | 936,13   | 554,50  | 30.7   |
| 40      | 10   | 1628,11  | 1340,49  | 922,98  | 34.7   |
| 40      | 30   | 2435,03  | 1897,89  | 1521,96 | 39.0   |

Fonte: autora (2017)

Tabela 29 - Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura EVA10

| <b>EVA 10</b> |             |             |           |           |          |
|---------------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|
| <b>TEMP</b>   | <b>FREQ</b> | <b> E* </b> | <b>E1</b> | <b>E2</b> | <b>φ</b> |
| -10           | 1           | 20837,39    | 20738,81  | 2016,76   | 5.5      |
| -10           | 3           | 21557,86    | 21479,04  | 1833,28   | 4.8      |
| -10           | 10          | 22750,11    | 22707,03  | 1391,41   | 3.5      |
| -10           | 30          | 24471,15    | 24463,66  | 587,84    | 1.3      |
| 0             | 1           | 18060,25    | 17882,54  | 2522,48   | 7.9      |
| 0             | 3           | 19082,01    | 18937,10  | 2341,57   | 7.0      |
| 0             | 10          | 20681,48    | 20592,85  | 1907,27   | 5.2      |
| 0             | 30          | 22661,29    | 22633,15  | 1119,44   | 2.8      |
| 10            | 1           | 12970,61    | 12601,21  | 3068,27   | 13.6     |
| 10            | 3           | 14149,78    | 13819,73  | 3033,81   | 12.3     |
| 10            | 10          | 16181,26    | 15941,29  | 2773,14   | 9.8      |
| 10            | 30          | 18488,08    | 18357,55  | 2188,00   | 6.7      |
| 15            | 1           | 10931,68    | 10488,03  | 3076,33   | 16.3     |
| 15            | 3           | 12168,83    | 11759,45  | 3124,57   | 14.8     |
| 15            | 10          | 14391,73    | 14074,43  | 3002,12   | 12.0     |
| 15            | 30          | 16901,47    | 16710,39  | 2529,27   | 8.6      |
| 20            | 1           | 6453,88     | 5966,68   | 2451,43   | 22.4     |
| 20            | 3           | 7450,05     | 6926,25   | 2736,03   | 21.5     |
| 20            | 10          | 9533,84     | 9011,76   | 3105,02   | 19.0     |
| 20            | 30          | 11961,35    | 11528,11  | 3181,57   | 15.4     |
| 30            | 1           | 2638,64     | 2381,27   | 1132,94   | 25.7     |
| 30            | 3           | 3169,69     | 2839,99   | 1402,83   | 26.5     |
| 30            | 10          | 4437,86     | 3969,40   | 1978,20   | 26.6     |
| 30            | 30          | 6188,38     | 5604,97   | 2613,30   | 25.1     |
| 40            | 1           | 1150,74     | 1048,34   | 473,95    | 24.6     |
| 40            | 3           | 1337,97     | 1200,38   | 590,06    | 26.4     |
| 40            | 10          | 1836,11     | 1601,98   | 894,98    | 29.5     |
| 40            | 30          | 2516,45     | 2109,58   | 1365,68   | 33.2     |

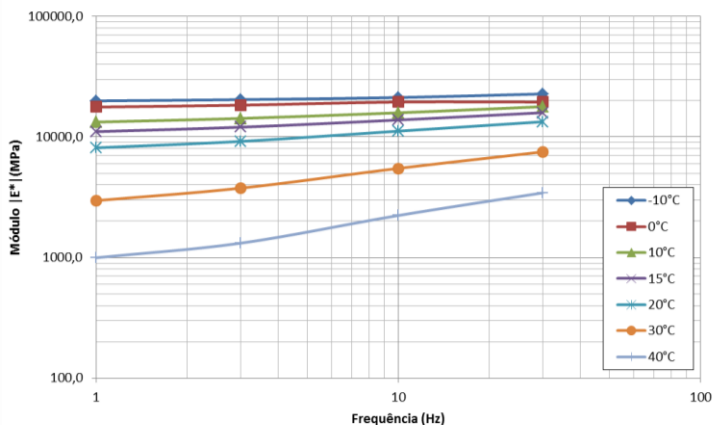
Fonte: autora (2017)

Através dos valores da Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29 são obtidos os gráficos das Isotérmicas, Equivalência Freqüência-

Temperatura, Isócronas, Função *Damping*, Espaço de Black e Plano Cole-Cole para cada uma das misturas asfálticas desta pesquisa.

A curva isotérmica da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 75. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 22.718,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 19.913,2 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com o valor de 3.439,3 MPa na frequência de 30 Hz e de 997,3 MPa na frequência de 1 Hz.

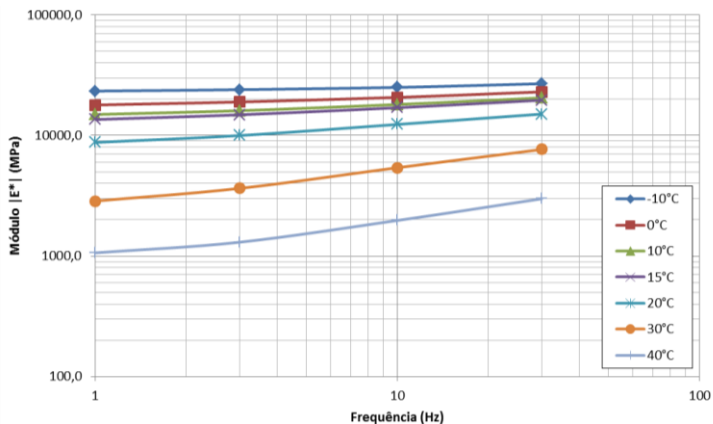
Figura 75 - Curvas isotérmicas da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva isotérmica da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 76. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 26.910,0 MPa na frequência de 30 Hz e de 23.365,6 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.984,7 MPa na frequência de 30 Hz e de 1.063,6 MPa na frequência de 1 Hz.

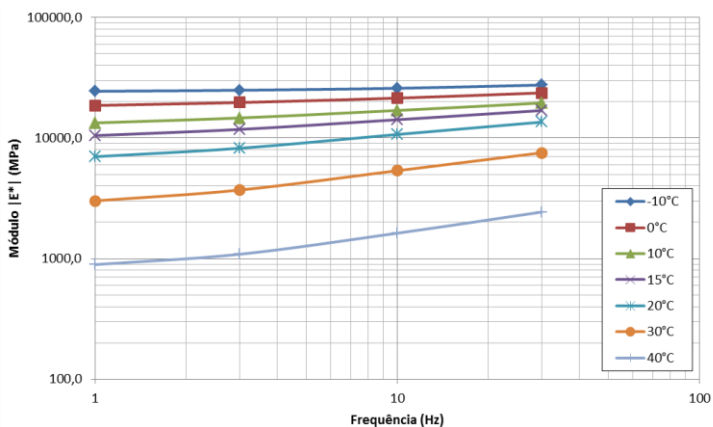
Figura 76 - Curvas isotérmicas da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva isotérmica da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada Figura 77. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 27.519,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 24.406,7 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.435,0 MPa na frequência de 30 Hz e de 893,2 MPa na frequência de 1 Hz.

Figura 77 - Curvas isotérmicas da mistura EVA7,5

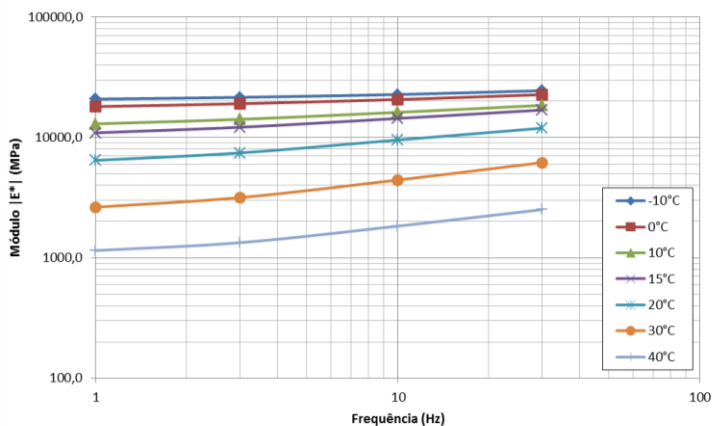


Fonte: autora (2017)



A curva isotérmica da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 78. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 24.471,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 20.837,4 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.516,4 MPa na frequência de 30 Hz e de 1.150,7 MPa na frequência de 1 Hz.

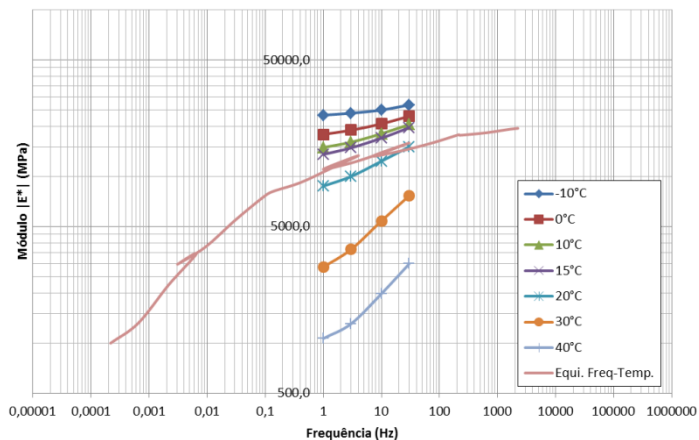
Figura 78 - Curvas isotérmica da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A curva equivalência frequência-temperatura da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 79. As curvas isotérmicas da Figura 75 são transladadas para a temperatura de referência de  $15^{\circ}\text{C}$ .

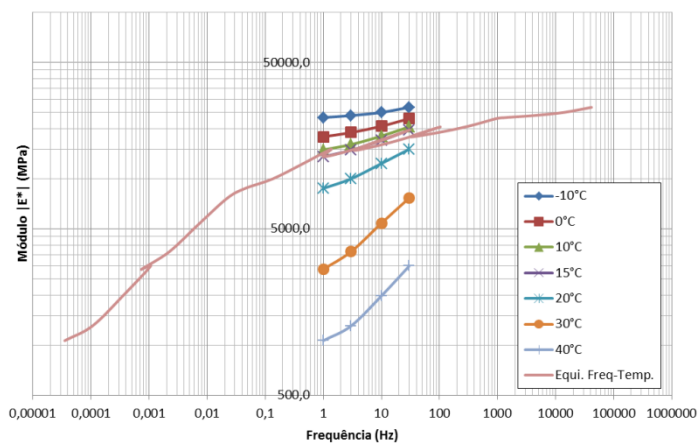
Figura 79 - Curva equivalência freq-temp da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva equivalência frequência-temperatura da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 80. As curvas isotérmicas da Figura 76 são transladadas para a temperatura de referência de 15°C.

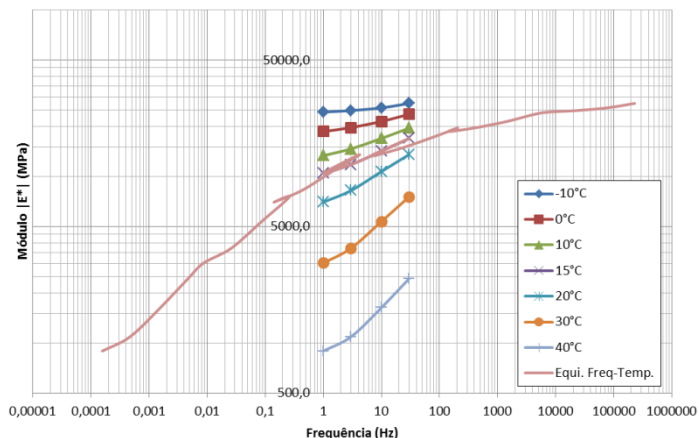
Figura 80 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva equivalência frequência-temperatura da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada na Figura 81. As curvas isotérmicas da Figura 77 são transladadas para a temperatura de referência de 15°C.

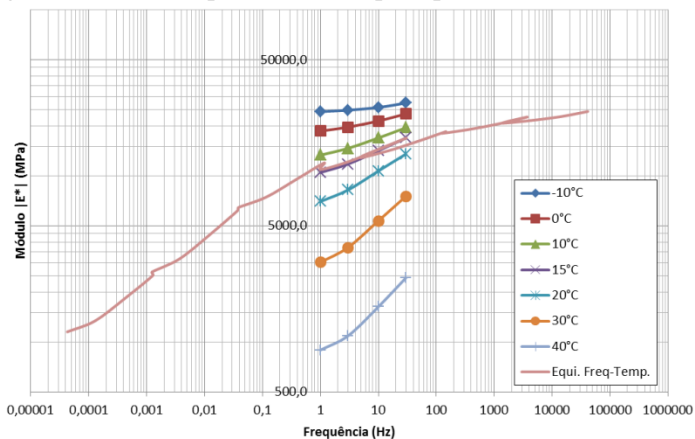
Figura 81 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A curva equivalência frequência-temperatura da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 82. As curvas isotérmicas da Figura 78 são transladadas para a temperatura de referência de 15°C.

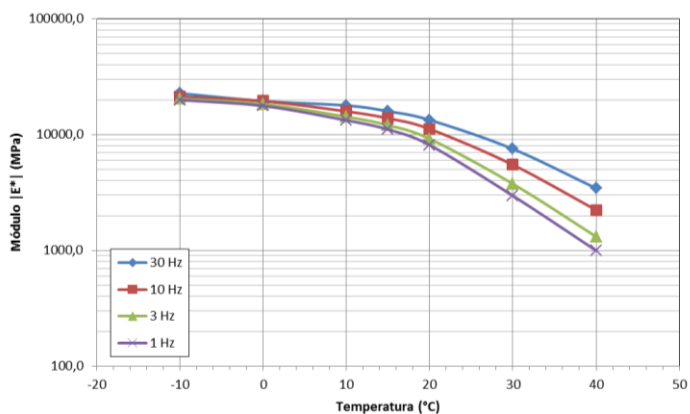
Figura 82 - Curva equivalência freq-temp da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A curva isócrona da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 83. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 22.718,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 19.913,2 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 3.439,3 MPa na frequência de 30 Hz e de 997,3 MPa na frequência de 1 Hz.

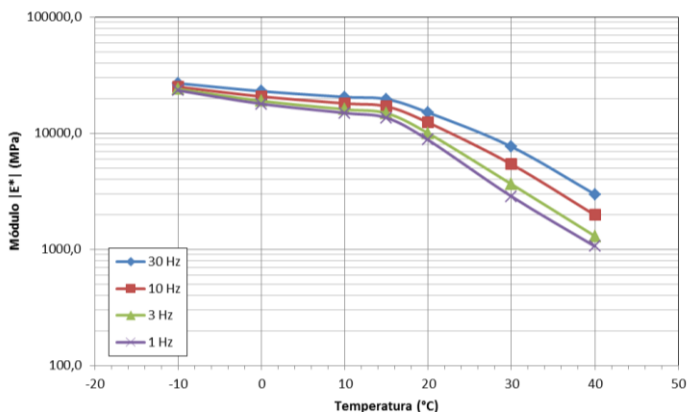
Figura 83 - Curvas isócronas da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva isócrona da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 84. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 26.910,0 MPa na frequência de 30 Hz e de 23.365,6 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.984,7 MPa na frequência de 30 Hz e de 1.063,6 MPa na frequência de 1 Hz.

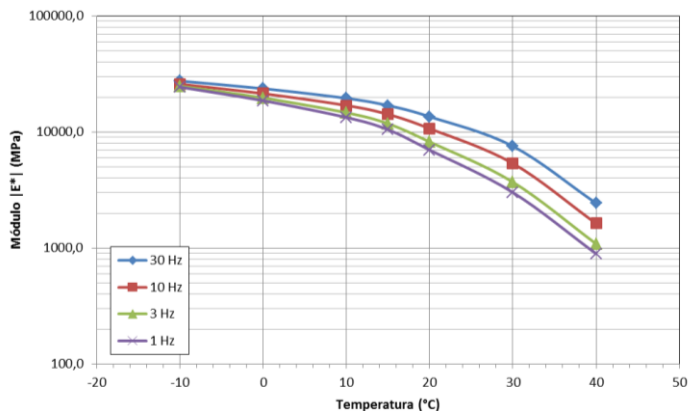
Figura 84 - Curvas isócronas da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva isócrona da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada na Figura 85. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 27.519,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 24.406,7 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $|E^*|$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.435,0 MPa na frequência de 30 Hz e de 893,2 MPa na frequência de 1 Hz.

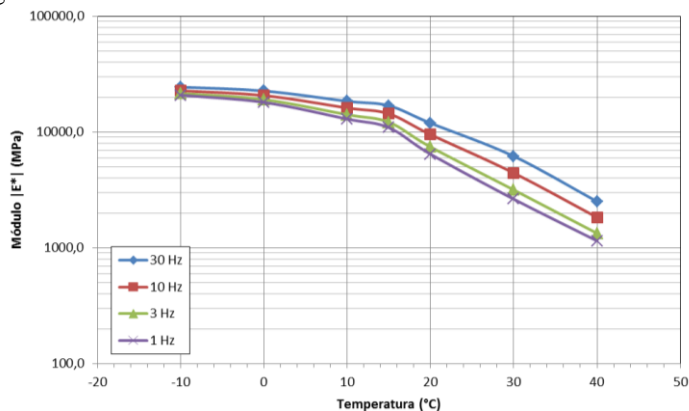
Figura 85 - Curvas isócronas da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A curva isócrona da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 86. O máximo valor de módulo  $[E^*]$  ocorre na temperatura mais baixa de  $-10^{\circ}\text{C}$  com 24.471,2 MPa na frequência de 30 Hz e de 20.837,4 MPa na frequência de 1 Hz. Já o menor valor de  $[E^*]$  ocorre na temperatura mais alta de  $40^{\circ}\text{C}$  com 2.516,4 MPa na frequência de 30 Hz e de 1.150,7 MPa na frequência de 1 Hz.

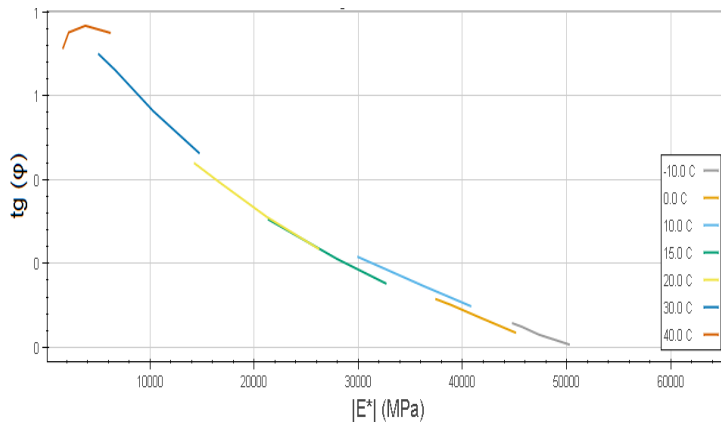
Figura 86 - Curvas isócronas da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A curva da função *damping* da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 87.

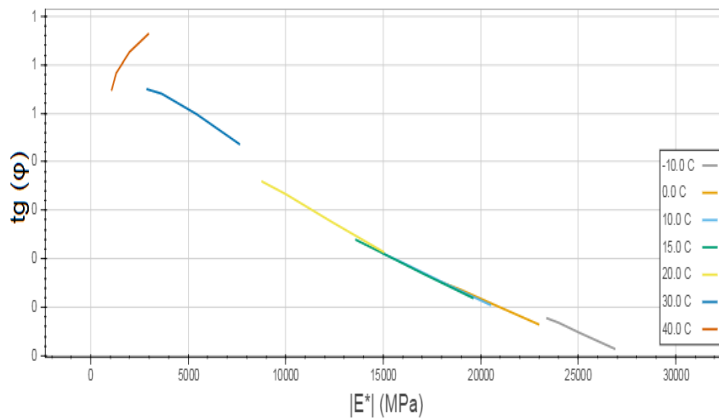
Figura 87 - Função *damping* da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva da função *damping* da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 88.

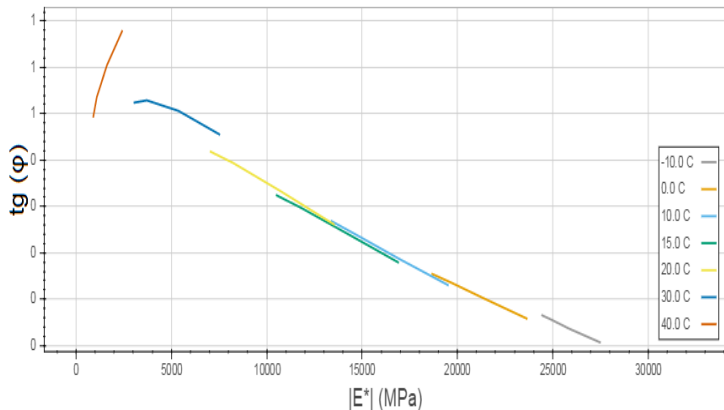
Figura 88 - Função *damping* da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva da função *damping* da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada na Figura 89.

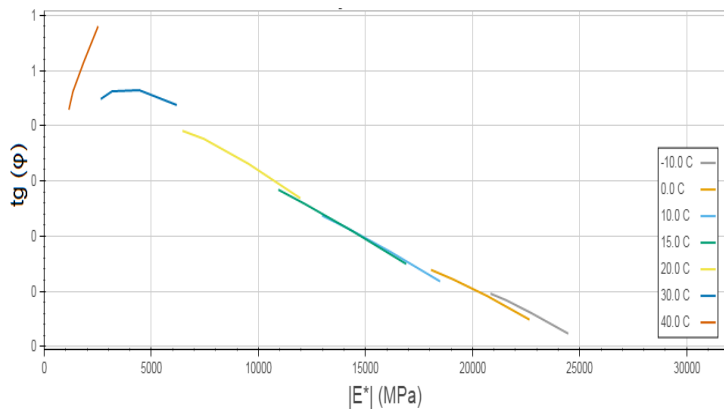
Figura 89 - Função *damping* da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A curva da função *damping* da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 90.

Figura 90 - Função *damping* da mistura EVA10

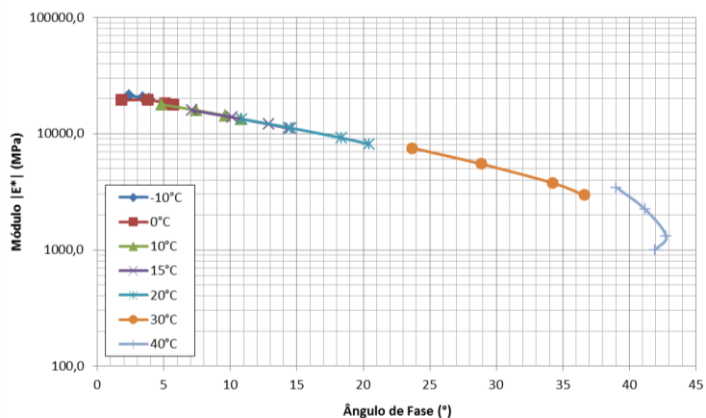


Fonte: autora (2017)



A curva do Espaço de Black da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 91. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na menor temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , na maior frequência de 30 Hz e no menor ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 22.718,2 MPa. Já o menor valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na maior temperatura  $40^{\circ}\text{C}$ , na menor frequência de 1 Hz e próximo do maior ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 997,3 MPa.

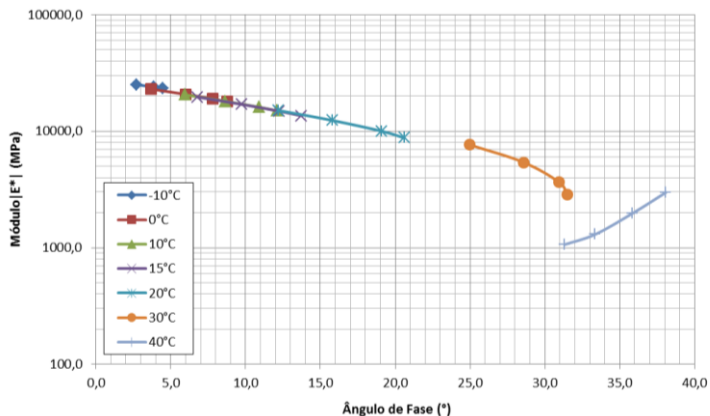
Figura 91 - Curva do Espaço de Black da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva do Espaço de Black da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 96. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na menor temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , na maior frequência de 30 Hz e no menor ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 26.910,1 MPa. Já o menor valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na maior temperatura  $40^{\circ}\text{C}$ , na menor frequência de 1 Hz e próximo do maior ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 1.063,6 MPa.

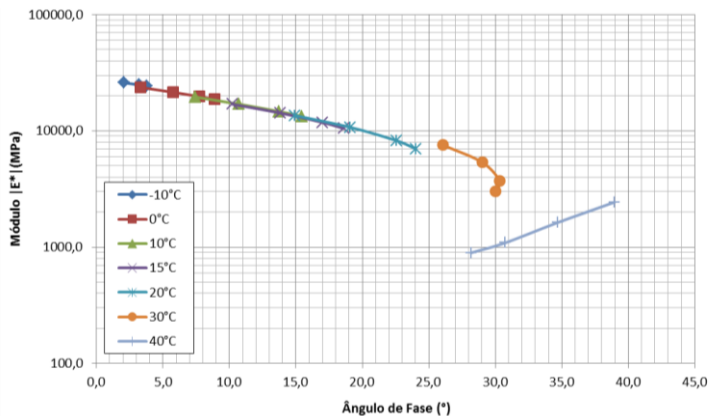
Figura 92 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva do Espaço de Black da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada na Figura 93. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na menor temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , na maior frequência de 30 Hz e no menor ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 27.519,2 MPa. Já o menor valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na maior temperatura  $40^{\circ}\text{C}$ , na menor frequência de 1 Hz e próximo do maior ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 893,2 MPa.

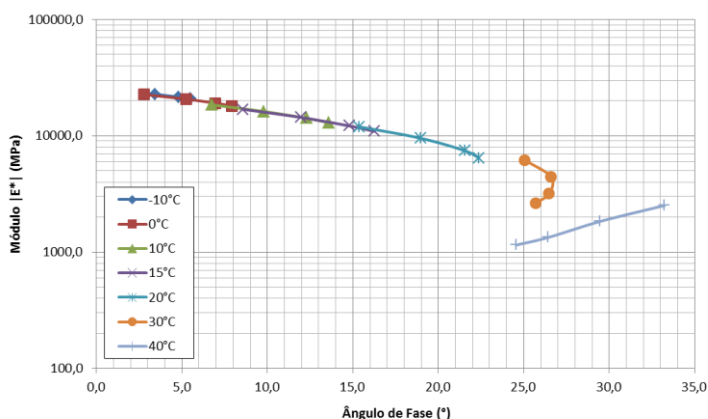
Figura 93 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A curva do Espaço de Black da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 94. O máximo valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na menor temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , na maior frequência de 30 Hz e no menor ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 24.471,2 MPa. Já o menor valor de módulo  $|E^*|$  ocorre na maior temperatura  $40^{\circ}\text{C}$ , na menor frequência de 1 Hz e próximo do maior ângulo de fase ( $\varphi$ ) com 1.150,7 MPa.

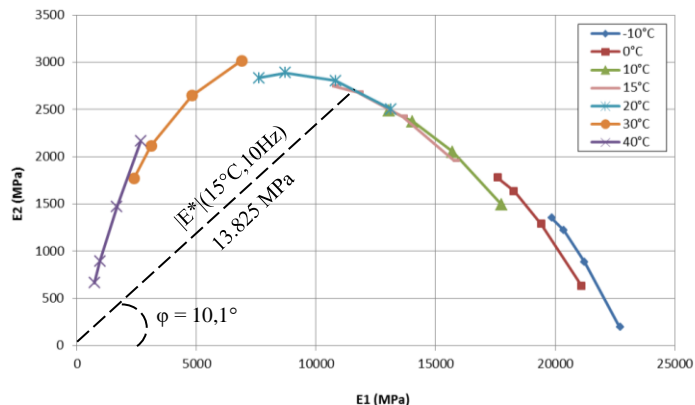
Figura 94 - Curva do Espaço de Black da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

A curva Cole-Cole da mistura convencional (CONV) de CAP 50/70 é mostrada na Figura 95. A parte real  $E_1$  (elástica) aumenta com a diminuição da temperatura, já a parte imaginária (viscosa) possui os menores valores nos extremos das temperaturas ( $40^{\circ}\text{C}$  e  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Os valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\varphi$ ) também são apontados no gráfico.

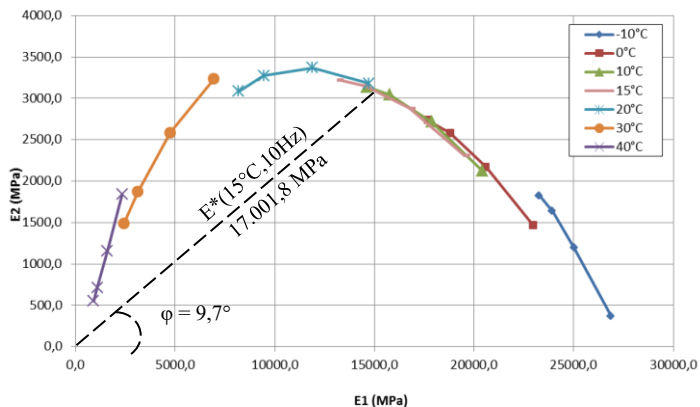
Figura 95 - Curva Cole-Cole da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

A curva Cole-Cole da mistura modificada com 5% de polímero EVA (EVA5) é mostrada na Figura 96. A parte real  $E_1$  (elástica) aumenta com a diminuição da temperatura, já a parte imaginária (viscosa) possui os menores valores nos extremos das temperaturas (40°C e -10°C). Os valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\varphi$ ) também são apontados no gráfico.

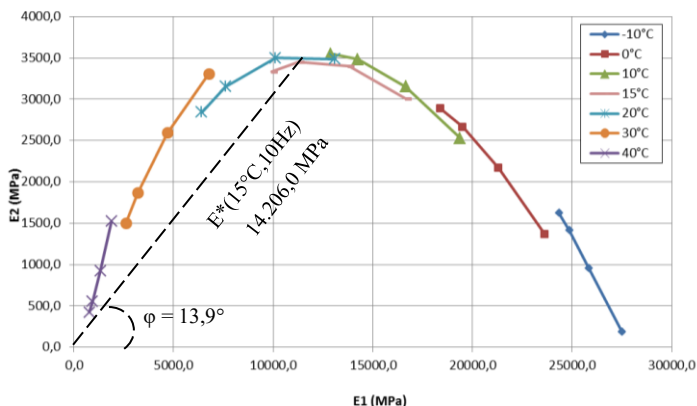
Figura 96 - Curva Cole-Cole da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

A curva Cole-Cole da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA (EVA7,5) é mostrada na Figura 96. A parte real  $E_1$  (elástica) aumenta com a diminuição da temperatura, já a parte imaginária (viscosa) possui os menores valores nos extremos das temperaturas (40°C e -10°C). Os valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\varphi$ ) também são apontados no gráfico.

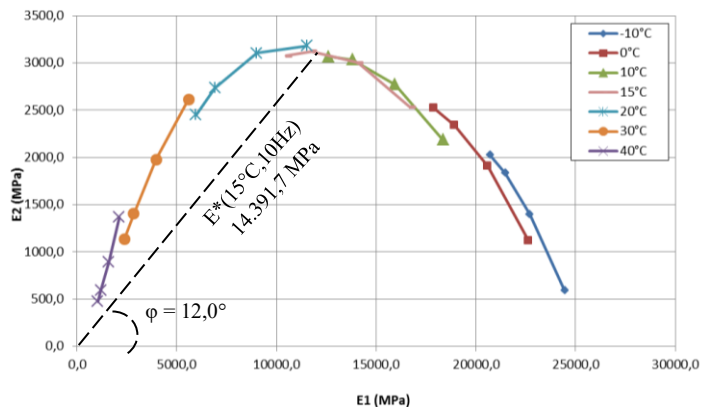
Figura 97 - Curva Cole-Cole da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

A curva Cole-Cole da mistura modificada com 10% de polímero EVA (EVA10) é mostrada na Figura 98. A parte real  $E_1$  (elástica) aumenta com a diminuição da temperatura, já a parte imaginária (viscosa) possui os menores valores nos extremos das temperaturas (40°C e -10°C). Os valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\varphi$ ) também são apontados no gráfico.

Figura 98 - Curva Cole-Cole da mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

Com os gráficos individuais de cada mistura asfáltica, mostrados anteriormente, é possível verificar as características de comportamento de cada material.

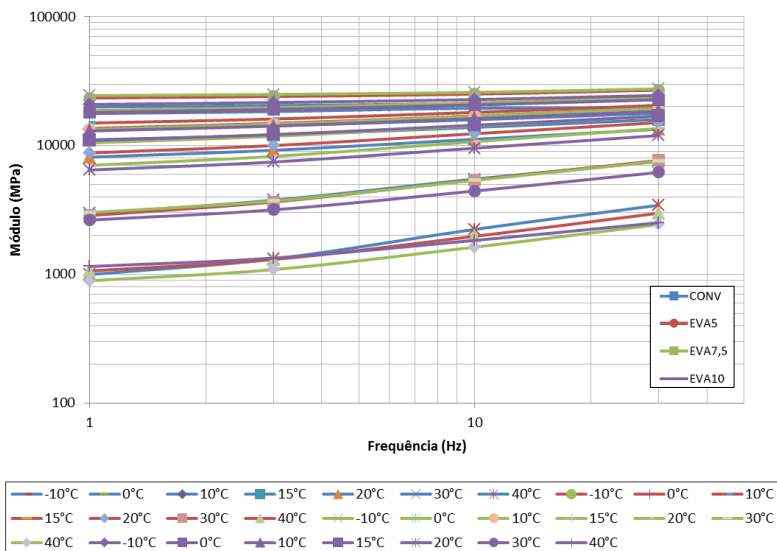
#### 4.7.2 Análise e discussão dos resultados do ensaio de Módulo Complexo

Faz-se a seguir uma análise conjunta dos dados obtidos nos ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004) das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 nas curvas Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Função *Damping*, Espaço de Black e Plano Cole-Cole.

##### 4.7.2.1 Isotérmicas

As curvas Isotérmicas possuem a característica de fixar a temperatura em diferentes frequências de solitação para visualização e análise da variação dos valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ). As curvas Isotérmicas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 sobrepostas são ilustradas Figura 99.

Figura 99 - Isotérmicas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

A sobreposição das curvas Isotérmicas para os quatro tipos de misturas da presente pesquisa não mostra grandes variações em relação ao comportamento do módulo  $|E^*|$ . Todas as misturas mostram uma concentração dos valores de módulo próximos a 10.000 MPa nas temperaturas de -10°C, 0°C, 10°C, 15°C e 20°C e nas temperaturas de 30°C e 40°C, há um afastamento decrescente do valor de módulo atingindo valores próximos a 1.000 MPa, para a frequência de 1Hz. Já para as frequências mais altas, é possível notar a diminuição à susceptibilidade das misturas asfálticas, visto uma diminuição na variação dos valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) para todas as temperaturas de ensaio.

A susceptibilidade cinética é observada nas temperaturas mais elevadas, ao contrário das temperaturas mais baixas, na qual os valores de módulo não possuem alteração com o aumento da frequência de solicitação.

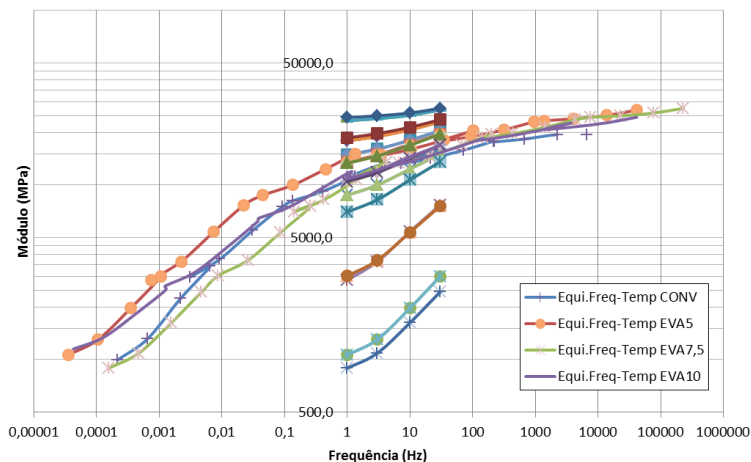
Ao observar o gráfico como um todo, a mistura asfáltica EVA7,5 é a que possui maior variação entre os limites de módulo, obtendo os maiores e menores valores de  $|E^*|$ .

### 4.7.2.2 Equivalência Frequência-Temperatura

As curvas de Equivalência Frequência-Temperatura são obtidas da transladação das curvas Isotérmicas para uma curva de referência, que no caso dessa pesquisa definiu-se a 15°C. A interpretação da curva é realizada através da inclinação de cada mistura asfáltica indicando a suscetibilidade durante as diversas solicitações cinéticas.

As curvas sobrepostas de Equivalência Frequência-Temperatura das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 são ilustradas Figura 100.

Figura 100 - Curvas equivalência frequência-temperatura das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

As curvas de Equivalência Frequência-Temperatura mostram que para 15°C, nas frequências mais baixas, os valores de módulos são crescentes para as misturas EVA7,5, CONV, EVA10 e EVA5, nesta ordem, ou seja, a curva de equivalência da mistura EVA5 está acima das demais misturas o que define os maiores valores de módulo para uma mesma frequência comparativa.

Esse fato não ocorre nas frequências equivalentes mais altas visto que para as quatro misturas os valores de módulo complexo são próximos a 25.000 MPa.

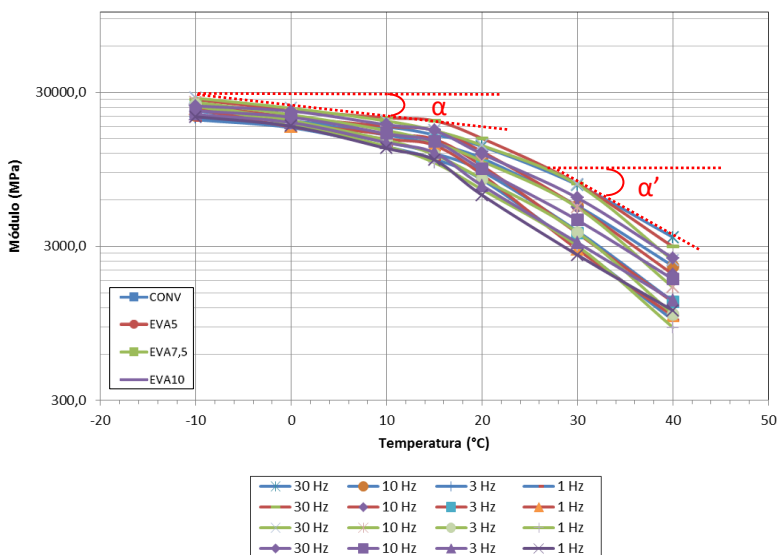


### 4.7.2.3 Isócronas

A inclinação das curvas Isócronas possibilita estimar a susceptibilidade térmica a uma dada frequência de solitação fixa e a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura fixa, ou seja, permite observar a variação do valor de módulo complexo ( $|E^*|$ ) em função da velocidade e frequência de solitação.

As curvas isócronas sobrepostas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 são ilustradas Figura 101.

Figura 101 - Curvas isócronas das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

Nas temperaturas mais baixas (-10°C a 15°C) não se visualizam grandes susceptibilidades cinéticas e nem térmicas indicadas pela baixa inclinação da reta ( $\alpha$ ). Ao contrário da inclinação da reta ( $\alpha'$ ) nas temperaturas mais altas (20°C a 40°C), onde a viscosidade diminui e os valores de módulo complexo ( $|E^*|$ ) possuem as maiores variações tanto

em relação ao aumento da temperatura (para uma mesma frequência) quanto com o aumento da frequência (para uma mesma temperatura).

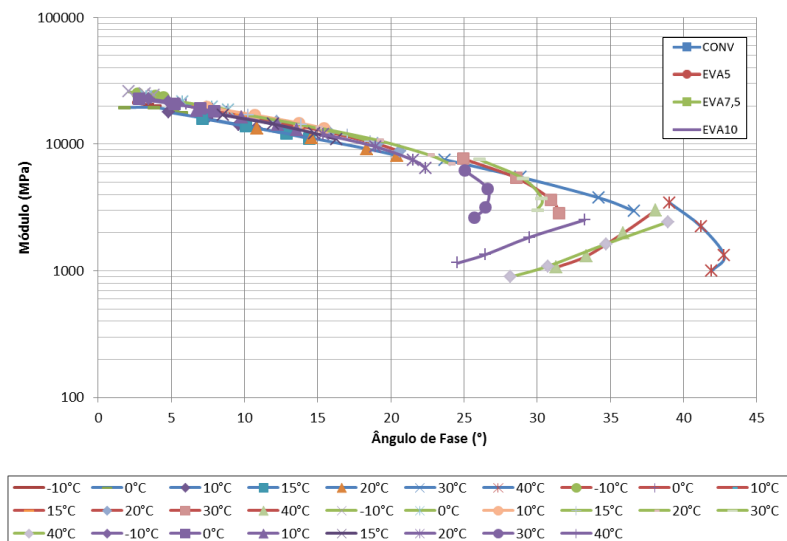
Em relação aos tipos de misturas convencionais e modificadas com o polímero EVA, não se observam grandes alterações no formato das curvas isócronas, o que mostra um comportamento similar quando se trata de valores de módulo  $|E^*|$  em função da temperatura.

#### 4.7.2.4 Espaço de Black

A viscosidade da mistura asfáltica é evidenciada nas curvas do Espaço de Black, na qual a representação do módulo complexo é em função do ângulo de fase ( $\varphi$ ). O módulo infinito ( $E_\infty$ ) que é utilizado no modelo de Huet-Sayegh é obtido também desse gráfico que corresponde ao módulo elástico solicitado a baixas temperaturas e altas frequências de sollicitação.

As curvas sobrepostas do Espaço de Black das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 são ilustradas Figura 102.

Figura 102 - Curvas do Espaço de Black das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

Nos gráficos do Espaço de Black observa-se uma concentração das curvas nas temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$  e  $15^{\circ}\text{C}$  para todos os tipos de misturas, não evidenciando diferenças no comportamento dos materiais com o incremento do polímero EVA. Mostram, nestes casos, baixos valores de ângulo de fase com comportamento próximos ao domínio elástico. Quando há um aumento da elasticidade do material há, por consequência, diminuição dos módulos imaginários, ou seja, menores valores de ângulo de fase. A redução da deterioração por fadiga está justamente associada a esse fator de baixos valores de ângulos de fases, assim como concluído nas pesquisas de Ildefonso (2007), Rodrigues *et al* (2009), Glaoui *et al* (2011), Toraldo e Mariani (2014) e Brovelli *et al* (2014).

Nas temperaturas mais elevadas ( $30^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$ ) as curvas do Espaço de Black dispersam-se e evidencia que a mistura CONV atinge os maiores valores de ângulo de fase ( $42,77^{\circ}$ ), ou seja, mostrou a maior perda de energia durante os ensaios de Módulo Complexo. Esse fato caracteriza-o como mistura mais susceptível à variação da temperatura em relação às misturas modificadas pelo polímero. Nessas temperaturas acima de  $20^{\circ}\text{C}$ , os ângulos de fase estão acima de  $20^{\circ}$ , indicando alta relação de dissipação de energia com comportamento predominantemente viscoelástico, assim como indicado desde os estudos de Rivière (1996). Entre as misturas modificadas, o EVA5 e EVA7,5 também possuem valores elevados de dissipação de energia, seguidos pela mistura EVA10 que é a considerada a mistura menos susceptível termicamente.

Em relação ao valor de módulo infinito ( $E_{\infty}$ ), utilizado no modelo de Huet-Sayegh, é solicitado a baixas temperaturas e altas frequências com um valor próximo a 25.000 MPa para todas as misturas. O ângulo de fase nesse ponto é próximo de zero e indica que o material comporta-se como material elástico e com alta rigidez.

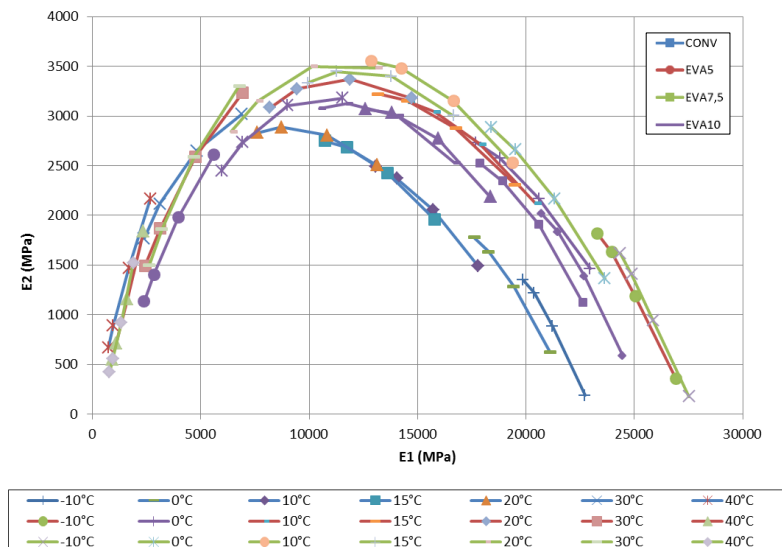
#### 4.7.2.5 Plano Cole-Cole

A representação gráfica do gráfico Cole-Cole é obtida entre as componentes reais e imaginárias do módulo complexo ( $|E^*|$ ) que indica o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10. É nessa representação gráfica que é possível indicar a temperatura crítica de cada uma dessas misturas asfálticas.

A temperatura de comportamento do material está relacionada ao tipo e teor de ligante, material granular e os componentes modificadores

que o compõem. No caso desta pesquisa, todos os materiais granulares são os graníticos, além do teor de ligante de 4,5% para todas as misturas, diferenciando-se no tipo de ligante (convencional ou modificado) e no teor de polímero em cada mistura (5%, 7,5% e 10%). Assim, as curvas sobrepostas do Plano Cole-Cole das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 são ilustradas Figura 103.

Figura 103 - Curvas Cole-Cole das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10



Fonte: autora (2017)

De um modo geral e simplificado, as curvas do Plano Cole-Cole mostram uma crescente, tanto para os valores da parte real (E1) quanto da parte imaginária (E2) das misturas CONV, EVA10, EVA5 e EVA7,5 nesta ordem.

Nas temperaturas mais baixas (à direita do gráfico) há um aumento do módulo imaginário com o aumento da temperatura, invertendo-se esse quadro após passar pela temperatura crítica, ou seja, com o aumento da temperatura (de 30°C para 40°C, por exemplo) há uma diminuição no valor de E2.

Em relação à análise dos diferentes tipos de misturas, observa-se que nas baixas temperaturas, como o exemplo do Quadro 9, os valores

dos módulos imaginários ( $E_2$ ) são próximos com diferença máxima de 509,9 MPa, ao contrário dos valores de módulos reais ( $E_1$ ) que possuem uma maior variação de até 4.629,2 MPa. O ângulo de fase das misturas tende a aumentar com o aumento da consistência, a exceção é da mistura EVA7,5.

Quadro 9 - Exemplo de variação de módulos para baixas temperaturas

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMP<br>(°C) | FREQ<br>(Hz) | E1<br>(MPa) | E2<br>(MPa) | $\phi$ |
|----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------|
| CONV                 | -10          | 10           | 21227,3     | 881,5       | 2,4    |
| EVA5                 | -10          | 10           | 25040,4     | 1186,6      | 2,7    |
| EVA7,5               | -10          | 10           | 25856,5     | 944,1       | 2,1    |
| EVA10                | -10          | 10           | 22707,0     | 1391,4      | 3,5    |

Fonte: autora (2017)

Já nas altas temperaturas, ocorre um cenário inverso, no qual os valores dos módulos imaginários ( $E_2$ ) possuem maiores diferenças de até 637 MPa contra 235 MPa das valores de módulos reais ( $E_1$ ), para o exemplo apresentado no Quadro 10. Os ângulos de fase também sofrem inversão na análise que tendem a diminuir com o aumento da consistência do material, ou seja, com maior porcentagem de polímero EVA.

Quadro 10 - Exemplo de variação de módulos para altas temperaturas

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMP<br>(°C) | FREQ<br>(Hz) | E1<br>(MPa) | E2<br>(MPa) | $\phi$ |
|----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------|
| CONV                 | 30           | 1            | 2382,4      | 1769,7      | 36,6   |
| EVA5                 | 30           | 1            | 2437,4      | 1492,5      | 31,5   |
| EVA7,5               | 30           | 1            | 2616,2      | 1501,6      | 30,0   |
| EVA10                | 30           | 1            | 2381,3      | 1132,9      | 25,7   |

Fonte: autora (2017)

Analisando as temperaturas mais altas (à esquerda do gráfico), observa-se que há o aumento do módulo  $E_2$ , com o aumento da frequência de solicitação, como pode ser constatado no exemplo do Quadro 11. Ocorre, também, mesmo com baixa variação, o aumento de  $E_1$  e o aumento do ângulo de fase com o aumento da frequência de solicitação. Nas temperaturas altas, os valores do módulo real ( $E_1$ ) são baixos indicando baixa elasticidade.

Quadro 11 - Exemplo de variação de E1 e E2 para alta temperatura

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMP<br>(°C) | FREQ ↑<br>(Hz) | E1 ↑<br>(MPa) | E2 ↑<br>(MPa) | $\varphi$ ↑ |
|----------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| EVA5                 | 40           | 1              | 909,0         | 552,1         | 31,3        |
|                      | 40           | 3              | 1088,9        | 715,6         | 33,4        |
|                      | 40           | 10             | 1601,5        | 1155,7        | 35,9        |
|                      | 40           | 30             | 2348,4        | 1839,7        | 38,1        |

Fonte: autora (2017)

No ponto de maior valor de módulo imaginário ocorre a inversão na qual o aumento da frequência faz com que diminua o valor de  $E_2$  e o valor de ângulo de fase para as baixas temperaturas, porém o valor de  $E_1$  ainda aumenta com o aumento da frequência, como apresentada o Quadro 12.

Quadro 12 - Exemplo de variação de E1 e E2 para baixa temperatura

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | TEMP<br>(°C) | FREQ ↑<br>(Hz) | E1 ↑<br>(MPa) | E2 ↓<br>(MPa) | $\varphi$ ↓ |
|----------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| EVA7,5               | 0            | 1              | 18414,1       | 2884,1        | 8,9         |
|                      | 0            | 3              | 19516,6       | 2662,5        | 7,8         |
|                      | 0            | 10             | 21327,4       | 2162,7        | 5,8         |
|                      | 0            | 30             | 23635,4       | 1363,8        | 3,3         |

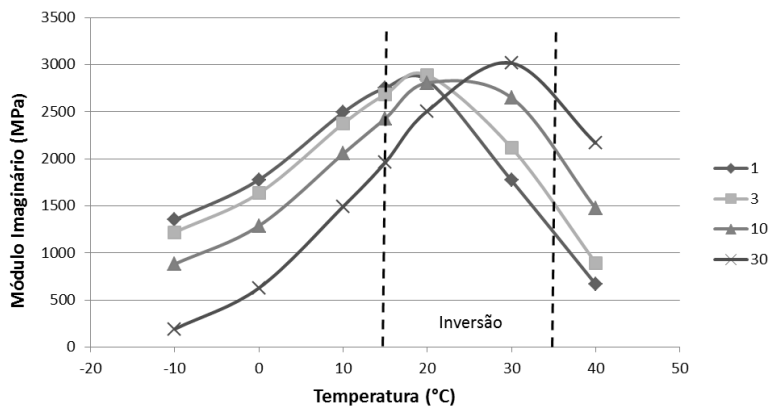
Fonte: autora (2017)

Outra análise em relação à inversão dos valores de módulo imaginário ( $E_2$ ) no plano Cole-Cole pode ser relacionada à energia dissipada que é diretamente proporcional à componente imaginária ( $E_2$ ), tensão, deformação e o seno do ângulo de fase. Esse tipo de análise foi inicialmente elaborado nas pesquisas de Quintero (2016) que observou a variação da energia do módulo complexo com as diversas frequências e temperaturas nas misturas com CAP 10/20 CAP 30/45 e CAP 50/70.

Para a presente pesquisa não será abordado o efeito da energia dissipada, mas a análise da inversão dos valores imaginários para auxílio na definição das temperaturas críticas das misturas modificadas com polímero EVA.

O gráfico para análise das temperaturas de inversão da mistura CONV é ilustrada na Figura 104. A inversão ocorre entre as temperaturas de 15°C e 35°C.

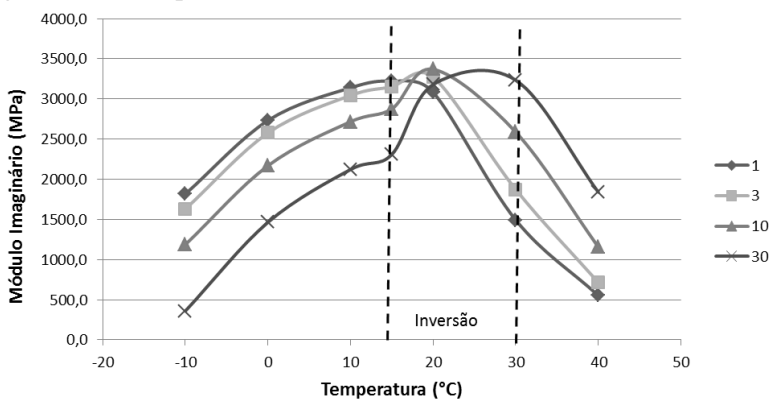
Figura 104 - Temperaturas de inversão das mistura CONV



Fonte: autora (2017)

O gráfico para análise das temperaturas de inversão da mistura EVA5 é ilustrada na Figura 105. A inversão ocorre entre as temperaturas de 15°C e 30°C.

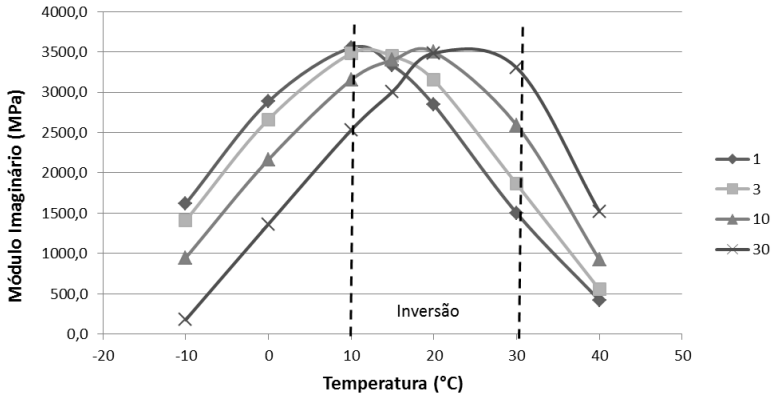
Figura 105 - Temperaturas de inversão das mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

O gráfico para análise das temperaturas de inversão da mistura EVA7,5 é ilustrada na Figura 106. A inversão ocorre entre as temperaturas de 10°C e 30°C.

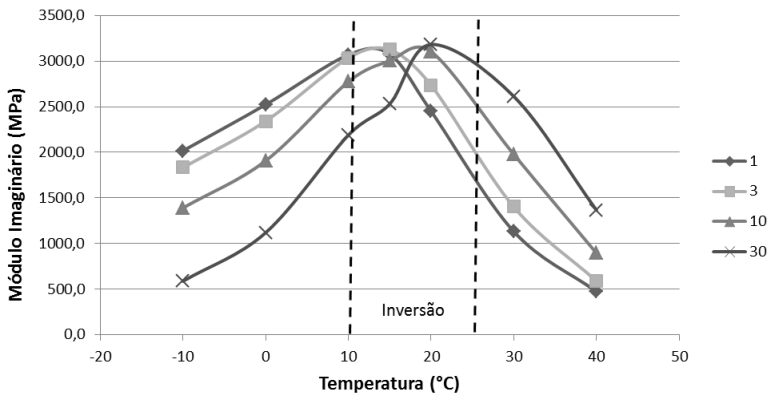
Figura 106 - Temperaturas de inversão das mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

O gráfico para análise das temperaturas de inversão da mistura EVA10 é ilustrada na Figura 107. A inversão ocorre entre as temperaturas de 10°C e 25°C.

Figura 107 - Temperaturas de inversão das mistura EVA10



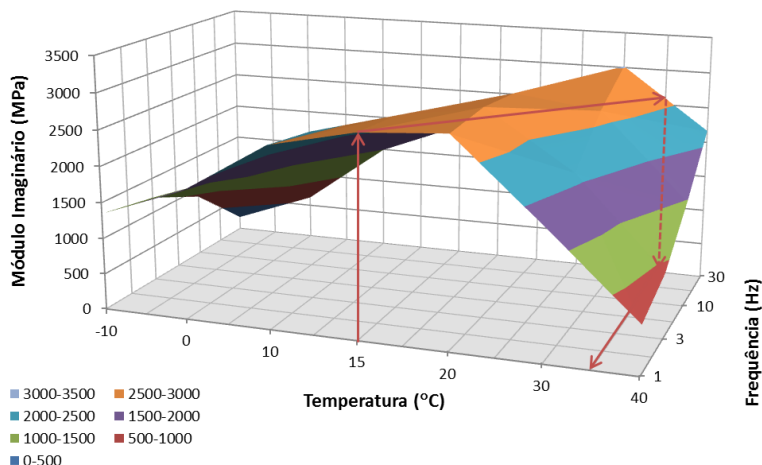
Fonte: autora (2017)

Com a definição dos limites das temperaturas onde ocorre a inversão dos valores de módulo imaginário (E2) com o aumento ou diminuição das frequências é mostrado, a seguir, os gráficos em 3D para melhor visualização.



A variação do módulo imaginário (E2) em função das temperaturas e frequências das mistura CONV pode ser visualizado na Figura 108.

Figura 108 - Variação do módulo imaginário em função das temperaturas e frequências das mistura CONV

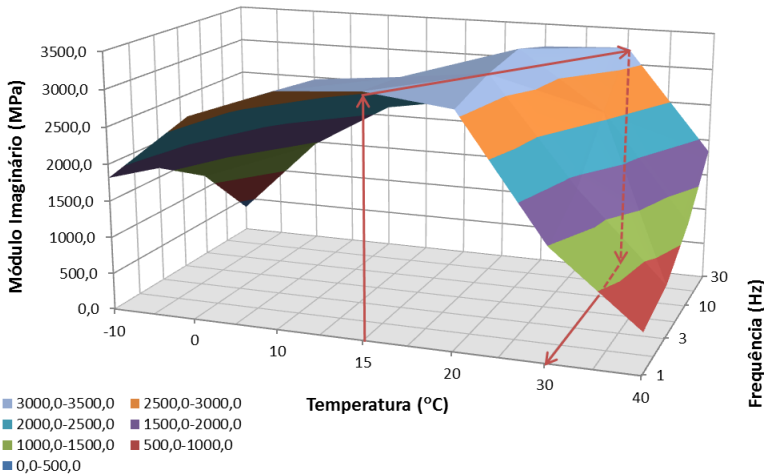


Fonte: autora (2017)

Na mistura CONV ocorre a inversão dos valores de módulo imaginário entre as temperaturas de 15°C e 35°C (Figura 104). Observa-se, assim como concluiu Quintero (2016), que nas temperaturas baixas (-10°C, 0°C e 10°C), o módulo imaginário decresce com o aumento na frequência e nas temperaturas mais altas (20°C, 30°C e 40°C) o módulo imaginário cresce com o aumento da frequência. Visualiza-se nesse intervalo a inversão dessas características, ou seja, o cume do gráfico que também mostra os maiores valores imaginários para cada tipo de mistura. Assim, a temperatura crítica para a mistura CONV deve estar entre 15°C e 35°C.

A seguir, é exposto o gráfico da mistura EVA5 com a variação do módulo imaginário (E2) em função das temperaturas e frequências que pode ser visualizado na Figura 109.

Figura 109 - Variação do módulo imaginário em função das temperaturas e frequências das mistura EVA5

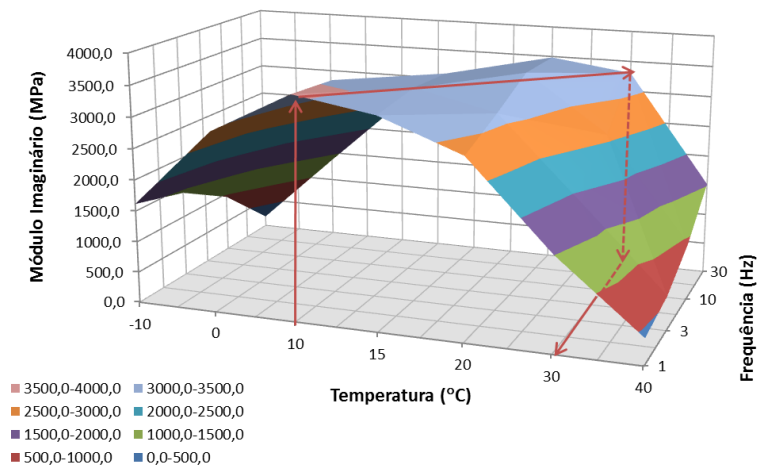


Fonte: autora (2017)

Na mistura EVA5 ocorre a inversão dos valores de módulo imaginário entre as temperaturas de 15°C e 30°C (Figura 105). Observa-se, assim como concluiu Quintero (2016), que nas temperaturas baixas (-10°C, 0°C e 10°C), o módulo imaginário decresce com o aumento na frequência e nas temperaturas mais altas (20°C, 30°C e 40°C) o módulo imaginário cresce com o aumento da frequência. Visualiza-se nesse intervalo a inversão dessas características, ou seja, o cume do gráfico que também mostra os maiores valores imaginários para cada tipo de mistura. Assim, a temperatura crítica para a mistura EVA5 deve estar entre 15°C e 30°C.

Já para a mistura EVA7,5 é exposto o gráfico com a variação do módulo imaginário (E2) em função das temperaturas e frequências que pode ser visualizado na Figura 110.

Figura 110 - Variação do módulo imaginário em função das temperaturas e frequências das mistura EVA7,5

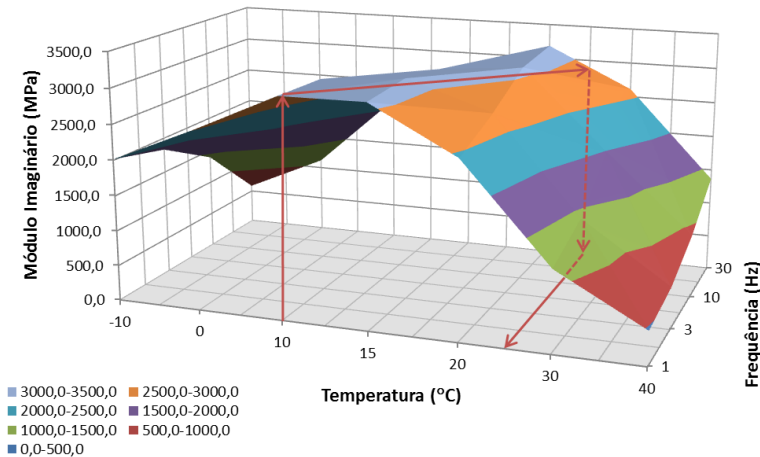


Fonte: autora (2017)

Na mistura EVA7,5 ocorre a inversão dos valores de módulo imaginário entre as temperaturas de 10°C e 30°C (Figura 106). Observa-se, assim como concluiu Quintero (2016), que nas temperaturas baixas (-10°C, 0°C e 10°C), o módulo imaginário decresce com o aumento na frequência e nas temperaturas mais altas (20°C, 30°C e 40°C) o módulo imaginário cresce com o aumento da frequência. Visualiza-se nesse intervalo a inversão dessas características, ou seja, o cume do gráfico que também mostra os maiores valores imaginários para cada tipo de mistura. Assim, a temperatura crítica para a mistura EVA7,5 deve estar entre 10°C e 30°C.

Por fim, para a mistura EVA10 o gráfico da Figura 111 ilustra a variação do módulo imaginário (E2) em função das temperaturas e frequências de solitação.

Figura 111 - Variação do módulo imaginário em função das temperaturas e frequências das mistura EVA10



Fonte: autora (2017)

Na mistura EVA10 ocorre a inversão dos valores de módulo imaginário entre as temperaturas de 10°C e 25°C (Figura 107). Observa-se, assim como concluiu Quintero (2016), que nas temperaturas baixas (-10°C e 0°C), o módulo imaginário decresce com o aumento na frequência e nas temperaturas mais altas (15°C, 20°C, 30°C e 40°C) o módulo imaginário cresce com o aumento da frequência. Visualiza-se nesse intervalo a inversão dessas características, ou seja, o cume do gráfico que também mostra os maiores valores imaginários para cada tipo de mistura. Assim, a temperatura crítica para a mistura EVA10 deve estar entre 10°C e 25°C.

No ponto de maior valor de módulo imaginário ( $E_2$ ), para cada tipo de mistura, são obtidas as temperaturas críticas ( $\theta_{crit}$ ) onde ocorre a maior perda de energia por dissipação de calor. O método escolhido para esta definição foi o maior valor imaginário na frequência de 25 Hz, frequência padronizada do ensaio de fadiga. Quando se analisam os gráficos Cole-Cole das misturas asfálticas notam-se que para todas as frequências de solitação de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz as temperaturas críticas alternam entre 20°C e 30°C.

Assim, o Quadro 13 mostra os valores aproximados através de ponderação dos valores de  $E_2$  para a frequência de 25 Hz.

Quadro 13 - Valores ponderados do módulo imaginário (E2) para 25 Hz

| MISTURA ASFÁLTICA | TEMP (°C) | FREQ (Hz) | E2 (MPa)      | TEMP CRÍT |
|-------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| CONV              | 20        | 30        | 2506,2        | 30°C      |
|                   |           | 25        | <b>2566,0</b> |           |
|                   |           | 10        | 2805,0        |           |
|                   | 30        | 30        | 3017,3        |           |
|                   |           | 25        | <b>2943,5</b> |           |
|                   |           | 10        | 2648,5        |           |
| EVA5              | 20        | 30        | 3180,4        | 20°C      |
|                   |           | 25        | <b>3218,4</b> |           |
|                   |           | 10        | 3370,5        |           |
|                   | 30        | 30        | 3234,7        |           |
|                   |           | 25        | <b>3105,2</b> |           |
|                   |           | 10        | 2587,4        |           |
| EVA7,5            | 20        | 30        | 3484,0        | 20°C      |
|                   |           | 25        | <b>3486,8</b> |           |
|                   |           | 10        | 3497,9        |           |
|                   | 30        | 30        | 3304,2        |           |
|                   |           | 25        | <b>3161,8</b> |           |
|                   |           | 10        | 2592,4        |           |
| EVA10             | 20        | 30        | 3181,6        | 20°C      |
|                   |           | 25        | <b>3166,3</b> |           |
|                   |           | 10        | 3105,0        |           |
|                   | 30        | 30        | 2613,3        |           |
|                   |           | 25        | <b>2486,3</b> |           |
|                   |           | 10        | 1978,2        |           |

Fonte: autora (2017)

Através de uma primeira análise, a temperatura para o maior valor de módulo imaginário é de 30°C, 20°C, 20°C e 20°C para as misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 respectivamente. Porém, para efeitos comparativos e para que não houvesse mais uma variável para as análises dos gráficos de fadiga, optou-se por padronizar a temperatura crítica para todas as misturas em 20°C, visto que as análises deste trabalho concentram-se nos diferentes teores de polímero e não nas diferentes temperaturas críticas.

Com os valores das temperaturas críticas definidas para as misturas é possível realizar a próxima etapa de ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007) para obtenção dos dados das características das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA.

## **4.8 ENSAIO DE FADIGA**

Após a realização dos ensaios de Módulo Complexo (NF 12697-26, 2004), nos quais são obtidas as temperaturas críticas do plano Cole-Cole, são apresentados os resultados do ensaio de Fadiga (NF 12697-24+A1, 2007). Na sequência, é realizado a análise e discussão desses resultados das misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10.

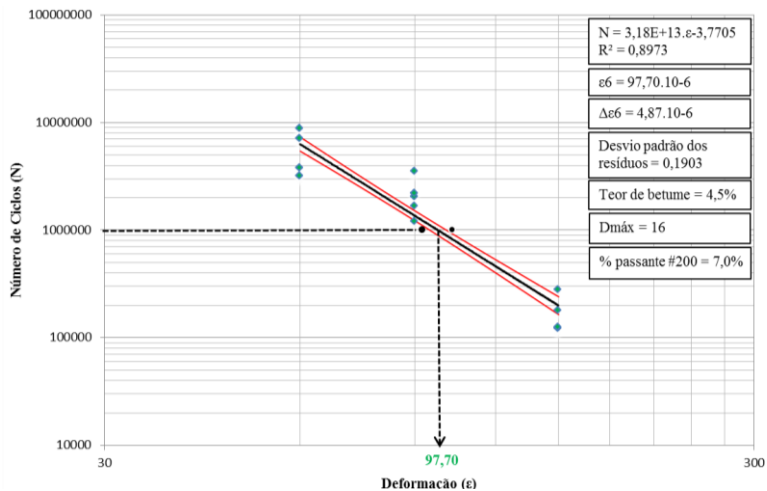
### **4.8.1 Resultados do ensaio de Fadiga**

Os ensaios de Fadiga foram subdivididos em duas etapas para cada tipo de mistura, na qual a primeira os corpos de prova trapezoidais foram submetidos à temperatura normativa de 10°C e na segunda etapa, nas temperaturas críticas de 20°C definidas no ensaio de Módulo Complexo.

As curvas de fadiga são expostas como resultado do ensaio, assim como, informações da equação de N; R quadrado; deformação para 1 milhão de ciclos, variação da deformação; desvio padrão dos resíduos; teor de betume; diâmetro máximo do agregado; % passante na peneira 200 e o teor médio de vazios dos corpos de prova. Os gráficos são organizados por tipo de mistura (CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 nesta ordem), na temperatura normativa de 10°C seguido pelo gráfico da temperatura crítica de 20°C.

A curva do ensaio de Fadiga da mistura convencional CAP 50/70 realizado na temperatura normativa de 10°C (CONV\_NORM) é ilustrada na Figura 112.

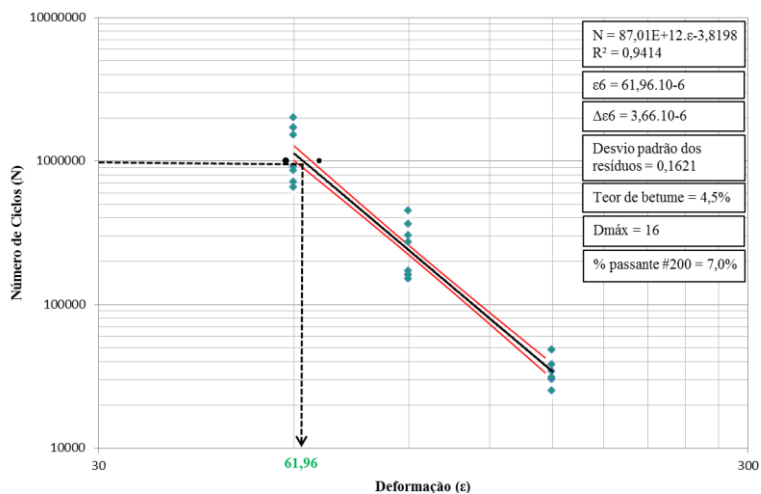
Figura 112 - Curva de Fadiga: CONV\_NORM (10°C, 25Hz)



Fonte: autora (2017)

A curva do ensaio de Fadiga da mistura convencional CAP 50/70 realizado na temperatura crítica de 20°C (CONV\_CRIT) é ilustrada na Figura 113.

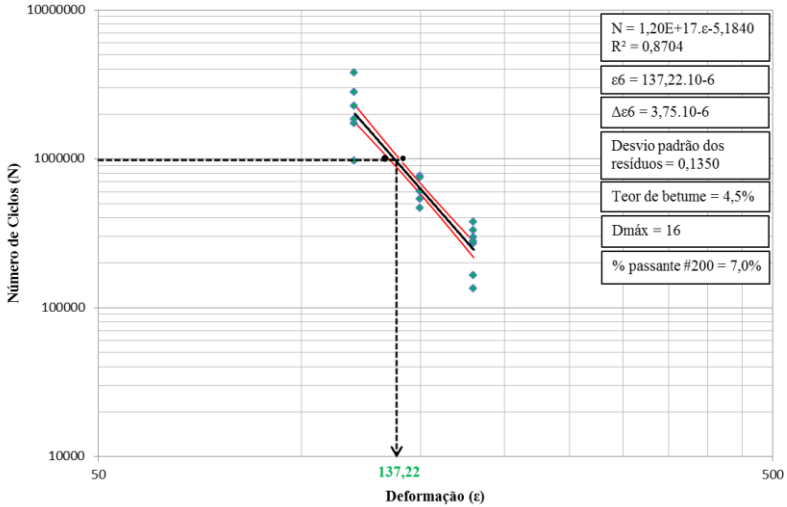
Figura 113 - Curva de Fadiga: CONV\_CRIT (20°C, 25Hz)



Fonte: autora (2017)

A curva do ensaio de Fadiga da mistura modificada com 5% de polímero EVA realizado na temperatura normativa de 10°C (EVA5\_NORM) é ilustrada na Figura 114.

Figura 114 - Curva de Fadiga: EVA5\_NORM (10°C, 25Hz)

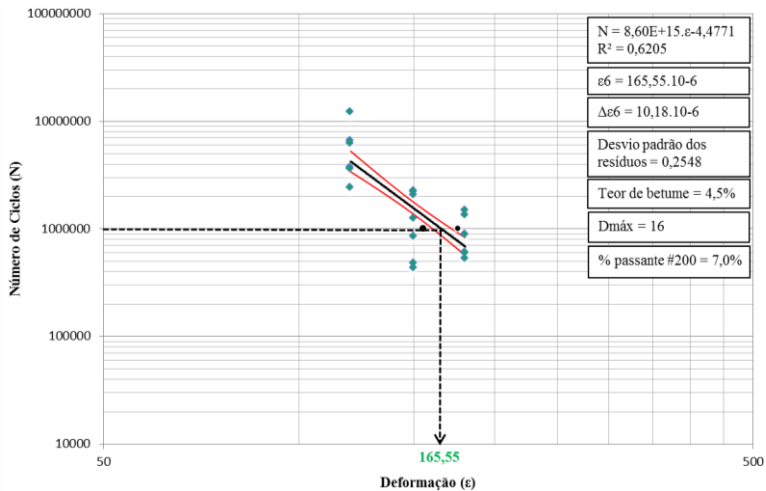


Fonte: autora (2017)

A curva do ensaio de Fadiga da mistura modificada com 5% de polímero EVA realizado na temperatura crítica de 20°C (EVA5\_CRIT) é ilustrada na Figura 115.



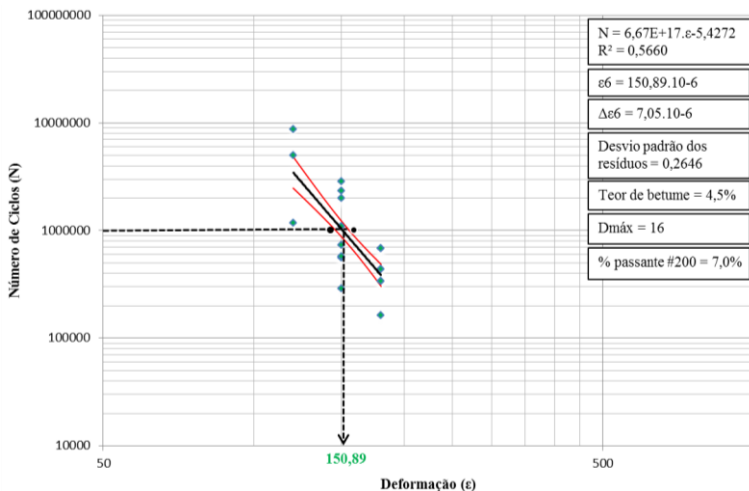
Figura 115 - Curva de Fadiga: EVA5\_CRIT (20°C, 25Hz)



Fonte: autora (2017)

A curva do ensaio de Fadiga da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA realizado na temperatura normativa de 10°C (EVA7,5\_NORM) é ilustrada na Figura 116.

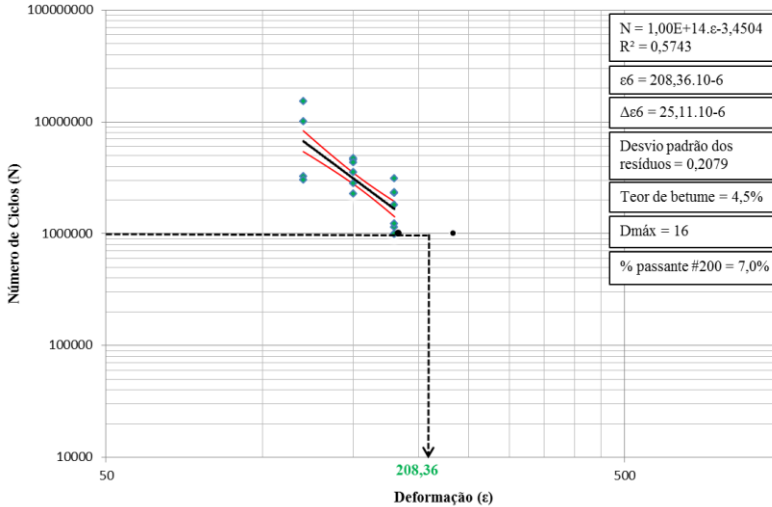
Figura 116 - Curva de Fadiga: EVA7,5\_NORM (10°C, 25Hz)



Fonte: autora (2017)

A curva do ensaio de Fadiga da mistura modificada com 7,5% de polímero EVA realizado na temperatura crítica de 20°C (EVA7,5\_CRIT) é ilustrada na Figura 117.

Figura 117 - Curva de Fadiga: EVA7,5\_CRIT (20°C, 25Hz)



Fonte: autora (2017)

Os ensaios de Fadiga da mistura modificada com 10% de polímero EVA na temperatura normativa de 10°C (EVA10\_NORM) e na temperatura crítica de 20°C (EVA10\_CRIT) foram realizados durante a pesquisa, porém as curvas não serão expostas neste trabalho, pois os resultados não cumpriram com os requisitos mínimos estatísticos. Segundo o normativo NF 12697-24+A1, 2007, são necessários no mínimo 18 corpos de prova com resultados válidos para que a curva de fadiga tenha a confiabilidade de 95%. Alguns corpos de prova romperam-se além do terço médio permitido pela norma, invalidando os dados, e outros sofreram oscilações durante o ensaio devido a problemas na máquina de ensaio.

Também, a decisão de não utilizar os dados do ensaio de Fadiga das misturas asfálticas EVA10 é devido aos valores nos ensaios de Módulo Complexo serem muito próximos aos valores obtidos na mistura asfáltica modificada EVA7,5.

Assim, são analisados e discutidos os resultados do ensaio de Fadiga das misturas asfálticas CONV, EVA5 e EVA7,5, e eliminando os dados de Fadiga da mistura EVA10.

#### 4.8.2 Análises e discussão dos resultados do ensaio de Fadiga

O valor da deformação obtida com a passagem de 1 milhão de ciclos ( $10^6$ ), representado pelo épsilon 6 ( $\epsilon_6$ ), é uma das principais informações da característica do material asfáltico e que será utilizado no dimensionamento do pavimento. As deformações  $\epsilon_6$  das misturas asfálticas CONV\_NORM, CONV\_CRIT, EVA5\_NORM, EVA5\_CRIT, EVA7,5\_NORM e EVA7,5\_CRIT realizadas nessa pesquisa são listadas na Tabela 30.

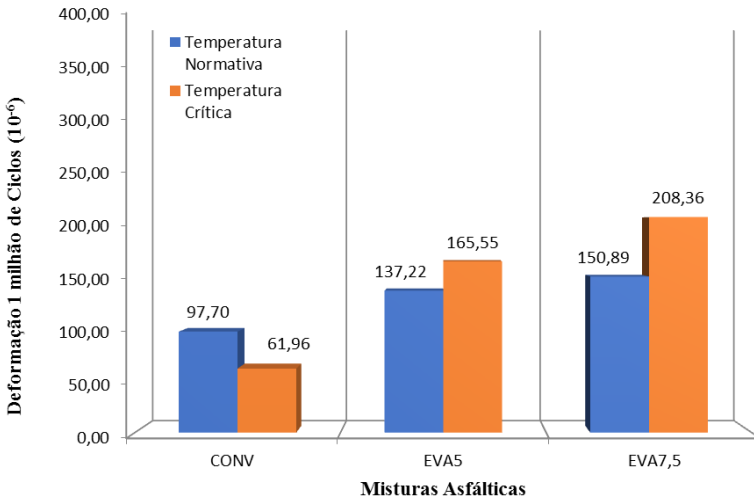
Tabela 30 - Deformações  $\epsilon_6$  das misturas asfálticas para 1 milhão de ciclos

| <b>TIPO DE MISTURA</b> | <b>DEFORMAÇÃO <math>\epsilon_6</math></b> |
|------------------------|---|
| CONV_NORM              | 97,70.10-6                                |
| CONV_CRIT              | 61,96.10-6                                |
| EVA5_NORM              | 137,22.10-6                               |
| EVA5_CRIT              | 165,55.10-6                               |
| EVA7_NORM              | 150,89.10-6                               |
| EVA7_CRIT              | 208,36.10-6                               |

Fonte: autora (2017)

Os valores listados na Tabela 30 são apresentados graficamente na Figura 118.

Figura 118 - Deformações  $\epsilon_6$  das misturas asfálticas para 1 milhão de ciclos



Fonte: autora (2017)

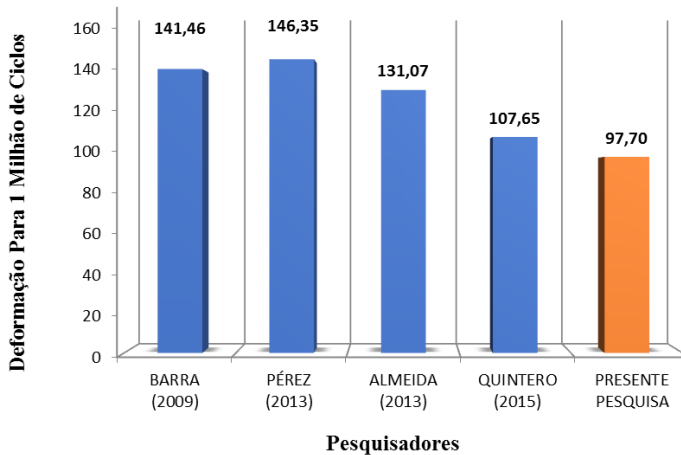
As misturas asfálticas EVA5 e EVA7,5 resultaram em valores maiores de deformação na temperatura crítica em relação à temperatura normativa, ao contrário da mistura convencional (CONV). O fato dos corpos de prova ensaiados à temperatura crítica suportarem deformações maiores, comprova que a temperatura normativa de  $10^{\circ}\text{C}$ , realmente, é a temperatura que o corpo de prova sofre maiores influências das temperaturas e frequências de sollicitação. Em outras palavras, é na temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$  que o material rompe-se e está mais susceptível aos danos por fadiga, ao invés de uma temperatura mais alta, como se imaginava. A tendência é que a rigidez seja enfraquecida devido à menor viscosidade nas temperaturas mais altas dos ligantes asfálticos.

No caso específico da mistura CONV, a temperatura alta de  $20^{\circ}\text{C}$  diminui a viscosidade e prejudicou a rigidez do material não suportando as cargas sollicitantes. A deformação de  $61,96 \mu\text{def}$  foi um valor abaixo da média para os materiais convencionais CAP 50/70, como será visto adiante. Nos estudos de Quintero (2016) também indicaram, para as misturas convencionais ensaiadas nas temperaturas críticas, que as deformações para 1 milhão de ciclos resultaram em valores menores do que os ensaios normatizados  $10^{\circ}\text{C}$ .

As misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA podem ter ocasionado menor susceptibilidade à temperatura durante os ensaios. Além disso, nota-se o valor crescente das deformações suportadas em razão do aumento do teor de polímero na mistura realizadas à temperatura normativa (NORM) com os valores crescentes de  $137,22.10^{-6}$  e  $150,89.10^{-6}$  das misturas EVA5 e EVA7,5 respectivamente, assim como os valores dos ensaios realizados à temperatura crítica (CRIT) de  $165,55.10^{-6}$  e  $208,36.10^{-6}$  respectivamente.

As misturas asfálticas convencionais não atingiram um milhão de ciclos para a deformação de 150  $\mu$ def, o que já era o esperado, visto que o mesmo ocorreu nos estudos de Barra (2009), Pérez (2013), Almeida (2013) e Quintero (2016) em que a deformação para 1 milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ) foi de 141,46  $\mu$ def, 146,35  $\mu$ def; 131,07  $\mu$ def; e 107,65  $\mu$ def, respectivamente, como ilustra o gráfico comparativo da Figura 119. Todos os ensaios de fadiga dessa comparação foram realizados com CAP 50/70, seguindo o normativo NF 12697-24+A1 (2007) nas temperaturas de 10°C e frequência de 25 Hz.

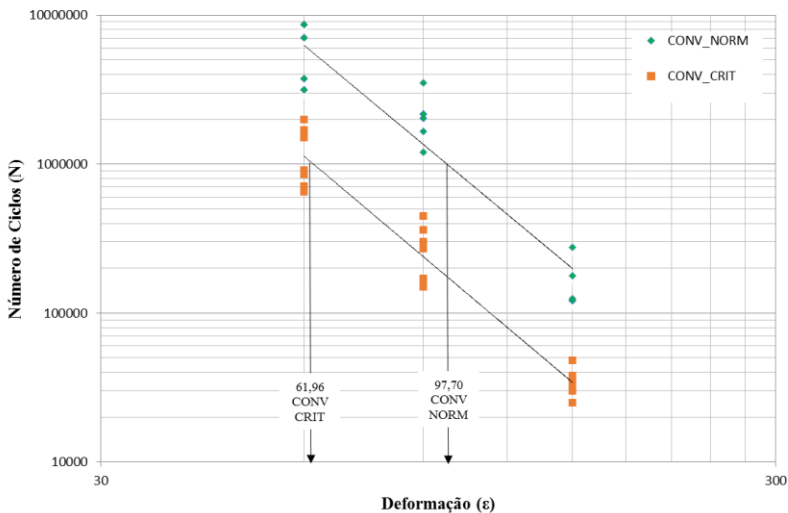
Figura 119 - Deformação ( $\mu$ def) para misturas CAP 50/70 convencional em ensaios de fadiga realizados a 10°C e 25 Hz



Fonte: autora (2017)

Em relação à inclinação da reta da fadiga, a mistura asfáltica convencional na temperatura de 10°C (CONV\_NORM) e na temperatura de 20°C (CONV\_CRIT) comportaram-se como nos estudos de Moutier (1991), Domec (2005) e Quintero (2016), que também realizaram ensaios à flexão de dois pontos sob flexão alternada em diversas temperaturas, e observaram que a resistência à fadiga nem sempre é crescente com o aumento da temperatura, como ilustrado no gráfico da Figura 120.

Figura 120 - Inclinação da reta de fadiga das misturas convencionais

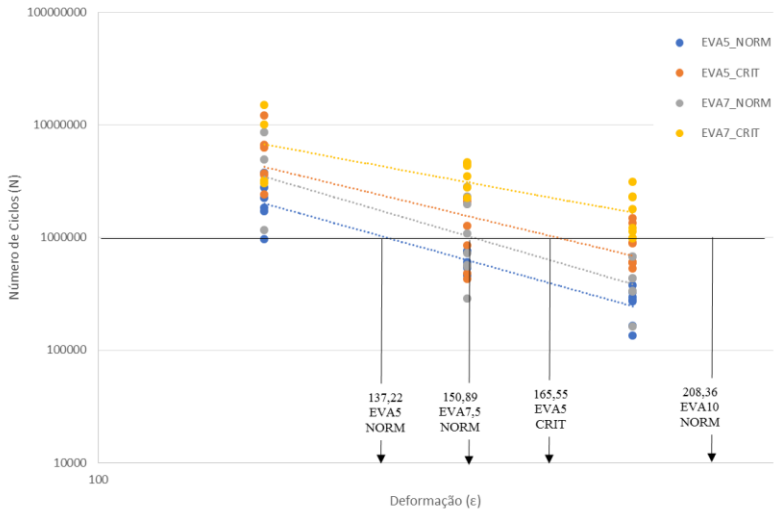


Fonte: autora (2017)

A deformação  $\epsilon_6$  61,96  $\mu\text{def}$  (20°C) é menor que 97,70  $\mu\text{def}$  da menor temperatura (10°C), devido em parte à maior dissipação de energia (à alta temperatura), ao contrário das baixas temperaturas na qual o comportamento do material aproxima-se do elástico.

Já em relação à inclinação da reta da fadiga das misturas asfálticas modificadas na temperatura de 10°C (EVA5\_NORM e EVA7,5\_NORM) e na temperatura de 20°C (EVA5\_CRIT e EVA7,5\_CRIT), o efeito é ao contrário. Com o aumento da temperatura, a resistência tende a crescer, como é visualizado na Figura 121.

Figura 121 - Inclinação da reta de fadiga das misturas modificadas



Fonte: autora (2017)

Entende-se que esse fato é devido à modificação do ligante asfáltico que, além de aumentar à resistência do material, torna-o menos susceptível à variação de temperatura. A relação entre misturas asfálticas mais viscosas e menor susceptibilidade à temperatura são citadas desde os estudos de Rivière (1996); De La Roche (1996) e Momm (1998).

O aumento da viscosidade é uma característica herdada pela modificação com polímero EVA e, conseqüentemente, há uma ocorrência de aumento à resistência à fadiga com o aumento do teor de polímero.

#### 4.9 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO

Os dados de módulo complexo e deformações de fadiga obtidos dos ensaios são essenciais para o dimensionamento do pavimento utilizando-se juntamente os parâmetros viscoelásticos do modelo de

Huet-Sayegh. A seguir, são apresentados os resultados e a discussão desses resultados.

#### 4.9.1 Cálculo da deformação admissível ( $\epsilon_{x,adm}$ e $\epsilon_{z,adm}$ )

As variáveis adotadas para essa pesquisa em relação à classe de veículos, eixo-padrão, taxa de crescimento anual, período de projeto inicial, coeficiente agressividade, coeficiente de risco e número equivalente de passagens do eixo padrão (130 kN) utilizadas para o dimensionamento são listados na Tabela 31.

Tabela 31 - Parâmetros para o dimensionamento

| PARÂMETROS                        | VALORES  |
|-----------------------------------|----------|
| Classe de veículos (T1+)          | 750      |
| Eixo-padrão (kN)                  | 130      |
| Taxa de crescimento anual         | 3,5%     |
| Período de projeto inicial (anos) | 15       |
| Coeficiente agressividade (CAM)   | 1        |
| Coeficiente de risco (%)          | 20       |
| Número equivalente (NE)           | 5,28E+06 |

Fonte: autora (2017)

A classe de tráfego T1+ é considerada tráfego médio, segundo a subdivisão do Quadro 6 (SETRA, 1997) com 500 a 700 veículos pesados por dia.

O projeto inicial considerado é de 15 anos para um tráfego médio (T1+).

O coeficiente de agressividade (CAM) para classe de tráfego T1+ é definida como 1,0.

O número equivalente de passagens do eixo padrão de 130 kN é calculado utilizando-se as Equações 2.25, 2.26 e 2.27 (do capítulo 2) que resultou no valor de NE de  $5,28 \cdot 10^6$ , como mostra a sequência de cálculo a seguir.

$$C = \frac{(1 + 0,035)^{15} - 1}{0,035} = 19,30$$



$$N = 365.750.19,30 = 5,28.10^6$$

$$NE = 5,28.10^6.1,0 = 5,28.10^6$$

A deformação admissível no topo das camadas do subleito ( $\epsilon_{z,adm}$ ) é em função apenas do número de eixos equivalentes, como mostrou a Equação 2.28 (do capítulo 2). Assim, o valor de  $\epsilon_{z,adm}$  é o mesmo para todas as misturas asfálticas, que resultou em  $386,11.10^{-6}$ .

$$\epsilon_{z,adm} = 0,012 \cdot (4,6.10^7)^{-0,222} = 386,11.10^{-6}$$

O cálculo da deformação admissível abaixo da camada de concreto asfáltico ( $\epsilon_{x,adm}$ ) é obtido em função da deformação  $\epsilon_6$ , inclinação da reta “b” e do desvio padrão dos resíduos “SN” do ensaio de Fadiga, assim como os valores de módulo na temperatura crítica (10°C ou 20°C) e na temperatura equivalente (15°C), ambos a 10 Hz. As variáveis para cálculo de  $\epsilon_{x,adm}$  encontram-se listadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Dados dos ensaios de Fadiga e Módulo Complexo para o dimensionamento do pavimento

| MISTURA ASFÁLTICA | FADIGA                         |         |         |        | MÓDULO COMPLEXO      |                 |
|-------------------|--------------------------------|---------|---------|--------|----------------------|-----------------|
|                   | $\epsilon_6$ 25Hz<br>10°C/20°C | b       | 1/b     | SN     | E* 10Hz<br>10°C/20°C | E* 10Hz<br>15°C |
| CONV_NORM         | 97,70                          | -3,7705 | -0,2652 | 0,1903 | 15855,2              | 13825,3         |
| CONV_CRIT         | 61,96                          | -3,8198 | -0,2618 | 0,1621 | 11175,7              | 13825,3         |
| EVA5_NORM         | 137,22                         | -5,1840 | -0,1929 | 0,1350 | 18080,5              | 17001,8         |
| EVA5_CRIT         | 165,55                         | -4,4771 | -0,2234 | 0,2548 | 12355,9              | 17001,8         |
| EVA7,5_NORM       | 150,89                         | -5,4272 | -0,1843 | 0,2646 | 16949,5              | 14206,0         |
| EVA7,5_CRIT       | 208,36                         | -3,4504 | -0,2898 | 0,2079 | 10714,0              | 14206,0         |

Fonte: autora (2017)

O valor de sigma ( $\sigma$ ), dado pela Equação 2.23 (capítulo 2), necessário para o cálculo do coeficiente kr para cada tipo de mistura é mostrada na Tabela 33.

Tabela 33 - Valores de sigma ( $\sigma$ ) para cada tipo de mistura

| <b>MISTURA<br/>ASFÁLTICA</b> | <b><math>\sigma</math> (sigma)</b> |
|------------------------------|------------------------------------|
| CONV_NORM                    | 0,2047                             |
| CONV_CRIT                    | 0,1792                             |
| EVA5_NORM                    | 0,1702                             |
| EVA5_CRIT                    | 0,2701                             |
| EVA7,5_NORM                  | 0,2860                             |
| EVA7,5_CRIT                  | 0,2191                             |

Fonte: autora (2017)

Assim, os valores dos coeficientes de ajustes  $k_r$ ,  $k_c$  e  $k_s$  e as deformações admissíveis das camadas do topo do subleito ( $\epsilon_{z,adm}$ ) e do concreto asfáltico ( $\epsilon_{x,adm}$ ) (obtido pela Equação 2.29 do capítulo 2), são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores dos coeficientes e as deformações admissíveis

| <b>MISTURA<br/>ASFÁLTICA</b> | <b><math>K_r</math></b> | <b><math>K_c</math></b> | <b><math>K_s</math></b> | <b><math>\epsilon</math><br/>(<math>z,adm</math>)</b> | <b><math>\epsilon</math><br/>(<math>x,adm</math>)</b> |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|
| CONV_NORM                    | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 67,29   |
| CONV_CRIT                    | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 36,03   |
| EVA5_NORM                    | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 102,65  |
| EVA5_CRIT                    | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 97,31   |
| EVA7,5_NORM                  | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 121,29  |
| EVA7,5_CRIT                  | 0,9                     | 1,0                     | 1,0                     | 386,11  | 111,70  |

Fonte: autora (2017)

Com os dados dos coeficientes e as deformações admissíveis, segue-se para o cálculo das deformações calculadas para definição das espessuras do pavimento.

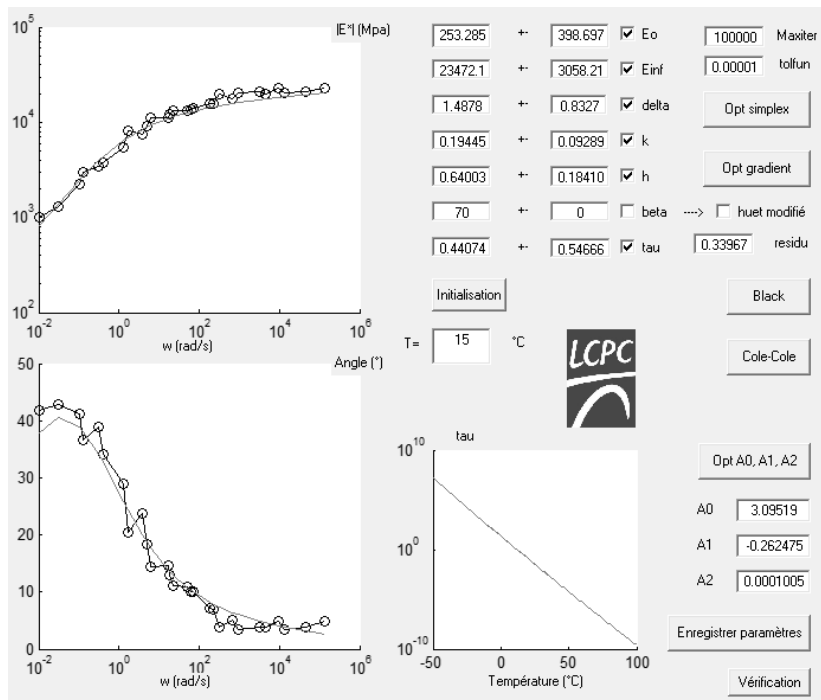
#### 4.9.2 Cálculo dos parâmetros Huet-Sayegh - Viscoanalyse

Os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh são obtidos através do *software* Viscoanalyse desenvolvido pelo LCPC. Os dados de entrada são os valores de módulo complexo e o ângulo de fase das sete temperaturas (-10°C a 40°C) e nas quatro frequências de solitação (1 Hz a 30 Hz).

Para aceitação dos parâmetros fornecidos após a modelação, os itens que podem ser verificados são os valores residuais (devem ser próximas de zero) e o valor de  $k$  e  $h$  ( $k < h$ ).

Para a mistura CONV os parâmetros de Huet-Sayegh obtidos são apresentados na interface da Figura 122. Os valores de módulo complexo e ângulo de fase necessários para modelação encontram-se no Apêndice G.

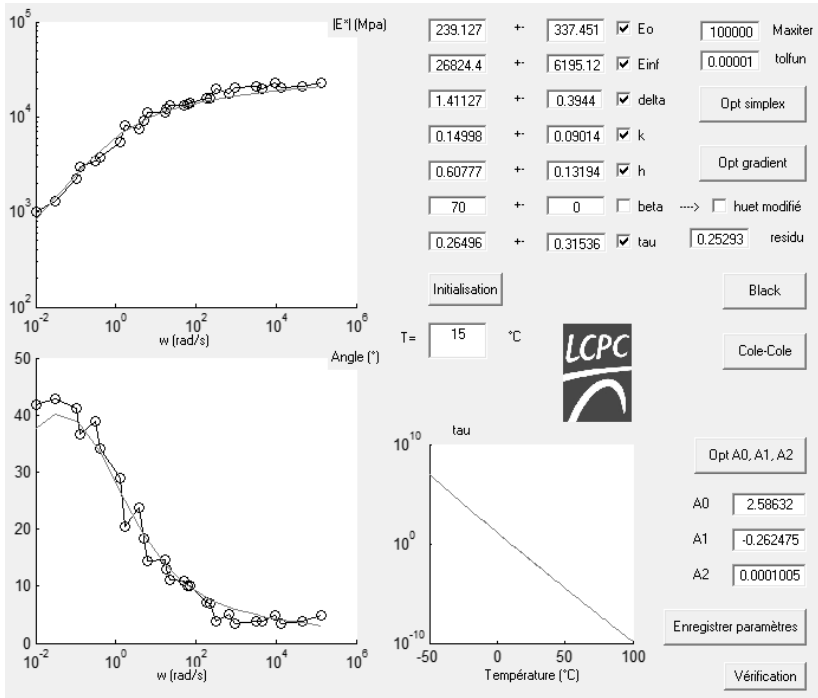
Figura 122 - Parâmetros de Huet-Sayegh CONV



Fonte: autora (2017)

Para a mistura EVA5 os parâmetros de Huet-Sayegh obtidos são apresentados na interface da Figura 123. Os valores de módulo complexo e ângulo de fase necessários para modelação encontram-se no Apêndice H.

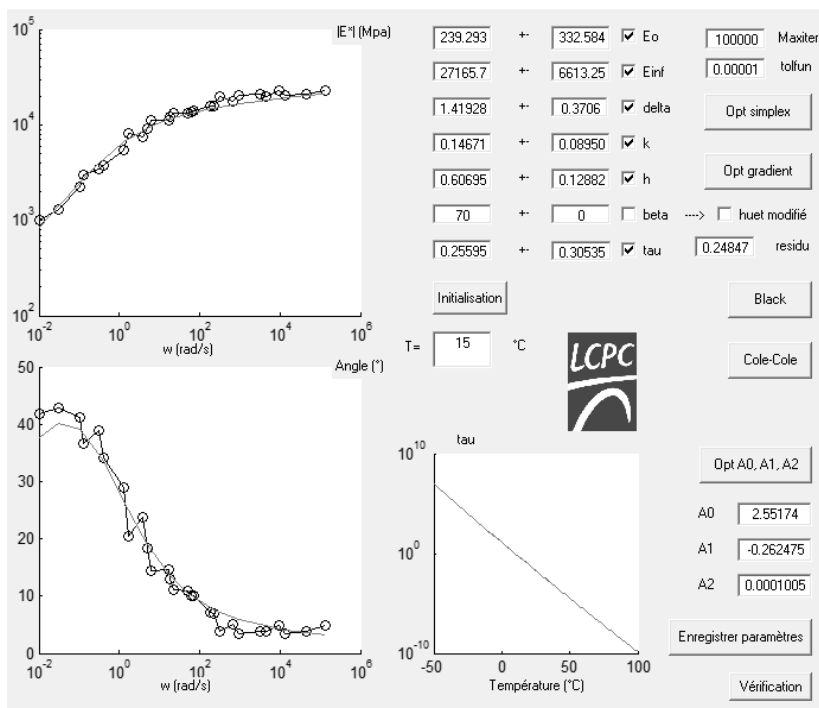
Figura 123 - Parâmetros de Huet-Sayegh EVA5



Fonte: autora (2017)

Para a mistura EVA7,5 os parâmetros de Huet-Sayegh obtidos são apresentados na interface da Figura 124. Os valores de módulo complexo e ângulo de fase necessários para modelação encontram-se no Apêndice I.

Figura 124 - Parâmetros de Huet-Sayegh EVA7,5



Fonte: autora (2017)

Assim, são dispostos resumidamente na Tabela 35 todos os parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh ( $E_{\infty}$ ,  $E_0$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $\delta$ ,  $\tau$ ,  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$ ), correspondentes a cada tipo de mistura, necessários para o dimensionamento de pavimento.

Tabela 35 - Parâmetros de Huet-Sayegh

| MISTURA ASFÁLTICA | $E_{\infty}$ | $E_0$   | $k$     | $h$     | $\delta$ | $\tau$  |
|-------------------|--------------|---------|---------|---------|----------|---------|
| CONV              | 23472,1      | 253,285 | 0,19445 | 0,64003 | 1,48780  | 0,44074 |
| EVA5              | 26824,4      | 239,127 | 0,14998 | 0,60777 | 1,41127  | 0,26496 |
| EVA7,5            | 27165,7      | 239,293 | 0,14671 | 0,60695 | 1,41928  | 0,25595 |

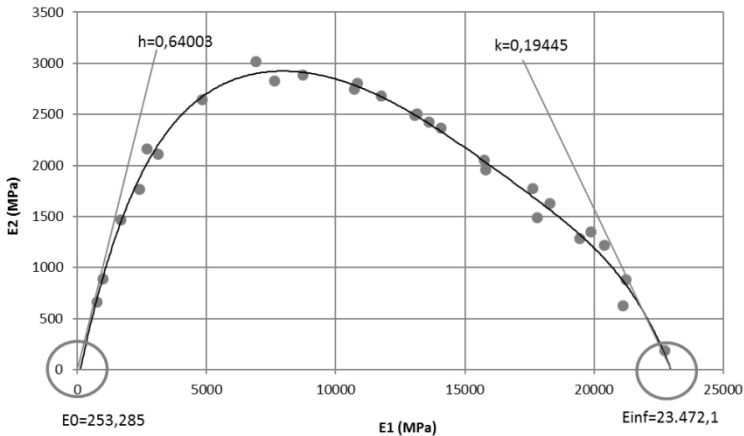
| MISTURA ASFÁLTICA | A0      | A1       | A2       |
|-------------------|---------|----------|----------|
| CONV              | 3,09519 | -0,26248 | 0,000101 |
| EVA5              | 2,58632 | -0,26248 | 0,000101 |
| EVA7,5            | 2,55174 | -0,26248 | 0,000101 |

Fonte: autora (2017)

Os valores modelados aproximam-se dos valores experimentais mostrados no Plano Cole-Cole das misturas asfálticas.

O gráfico Cole-Cole com os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh da mistura CONV encontra-se na Figura 125.

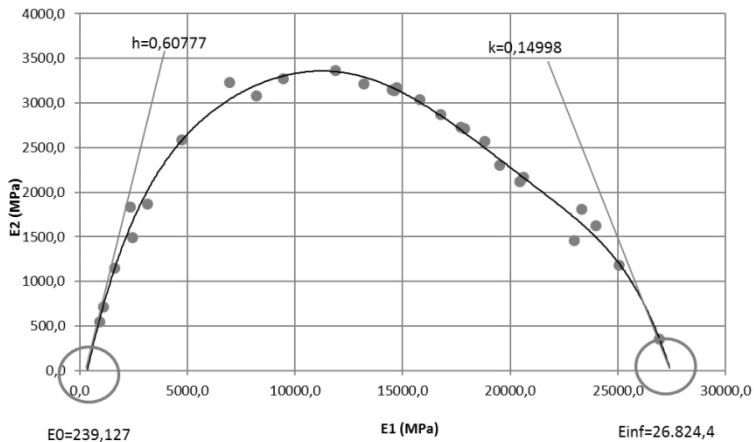
Figura 125 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura CONV



Fonte: autora (2017)

O gráfico Cole-Cole com os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA5 encontra-se na Figura 126.

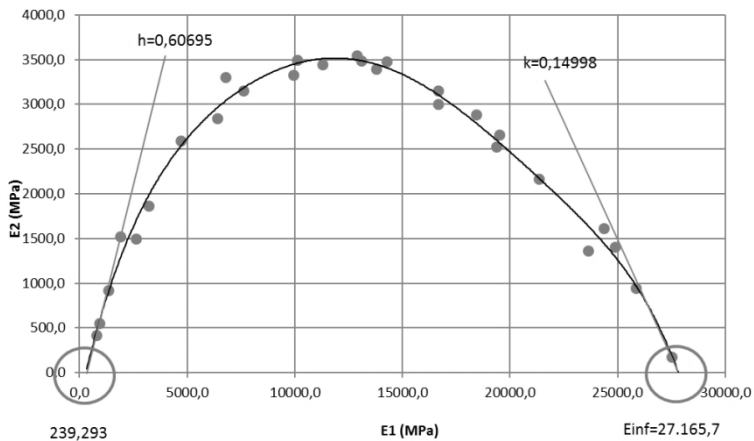
Figura 126 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA5



Fonte: autora (2017)

O gráfico Cole-Cole com os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA7,5 encontra-se na Figura 127.

Figura 127 - Modelo de Huet-Sayegh da mistura EVA7,5



Fonte: autora (2017)

Com os dados das deformações admissíveis e os parâmetros de Huet-Sayegh, segue-se para a definição das espessuras do pavimento através do dimensionamento simulado.

### 4.9.3 Dimensionamento das misturas asfálticas CONV, EVA5 e EVA7,5

Obtidos os valores de deformações admissíveis no topo da camada do subleito ( $\epsilon_{z,adm}$ ), deformações admissíveis abaixo da camada de concreto asfáltico ( $\epsilon_{x,adm}$ ) e os parâmetros de Huet-Sayegh, é possível realizar o dimensionamento das espessuras das misturas asfálticas convencional (CONV) e modificada pelo polímero EVA (EVA5 e EVA7,5), tanto nas temperaturas normativas quanto nas temperaturas críticas. Os valores da deformação calculada ( $\epsilon_{cal}$ ), obtidos pelo software Viscoroute, devem ser menores que os valores da deformação admissível ( $\epsilon_{adm}$ ).

Assim, as camadas serão assentadas em um subleito PF2 com módulo de 60 MPa, seguidos pela camada de módulo elevado da presente pesquisa e, acima, as camadas de *Béton Bitumineux Module Elevé* (BBME) e *Béton Bitumineux Mince* (BBM) dos estudos de Almeida (2013). Os valores de módulo complexo e ângulo de fase necessários para modelação com os parâmetros de Huet-Sayegh das misturas BBME e BBM, encontram-se no Apêndice J e K, respectivamente.

Outra variável definida para o dimensionamento é o coeficiente de *Poisson* considerando o valor de 0,35 segundo a SETRA (1997).

#### 4.9.3.1 Dimensionamento da mistura CONV\_NORM

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica convencional (CONV) na temperatura normativa de 10°C (NORM) resultou nas espessuras listadas na

Tabela 36, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).



Tabela 36 - Dimensionamento do pavimento da mistura CONV\_NORM

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 5              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 7              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| CONV_NORM           | 15             | -                                 | -                                | 65,14                             | 67,29                            |
| Subleito            | -              | 253,95                            | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

#### 4.9.3.2 Dimensionamento da mistura CONV\_CRIT

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica convencional (CONV), na temperatura crítica de 20°C (CRIT) resultou nas espessuras listadas na Tabela 37 - Dimensionamento do pavimento da mistura CONV\_CRIT Tabela 37, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).

Tabela 37 - Dimensionamento do pavimento da mistura CONV\_CRIT

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 12             | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 14             | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| CONV_CRIT           | 15             | -                                 | -                                | 35,20                             | 36,03                            |
| Subleito            | -              | 36,07                             | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

#### 4.9.3.3 Dimensionamento da mistura EVA5\_NORM

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica modificada com 5% de polímero EVA na temperatura normativa de 10°C (NORM) resultou nas espessuras listadas na Tabela 38, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).

Tabela 38 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA5\_NORM

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 3              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 5              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| EVA5_NORM           | 12             | -                                 | -                                | 99,25                             | 102,65                           |
| Subleito            | -              | 378,62                            | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

#### 4.9.3.4 Dimensionamento da mistura EVA5\_CRIT

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica modificada com 5% de polímero EVA na temperatura crítica de 20°C (CRIT) resultou nas espessuras listadas na Tabela 39, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).

Tabela 39 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA5\_CRIT

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 4              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 5              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| EVA5_CRIT           | 12             | -                                 | -                                | 92,80                             | 97,31                            |
| Subleito            | -              | 83,92                             | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

#### 4.9.3.5 Dimensionamento da mistura EVA7,5\_NORM

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica modificada com 7,5% de polímero EVA na temperatura normativa de 10°C (NORM) resultou nas espessuras listadas na Tabela 40, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).

Tabela 40 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA7,5\_NORM

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 3              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 5              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| EVA7,5_NORM         | 10             | -                                 | -                                | 115,51                            | 121,29                           |
| Subleito            | -              | 99,72                             | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

#### 4.9.3.6 Dimensionamento da mistura EVA7,5\_CRIT

O dimensionamento do pavimento de mistura asfáltica modificada com 7,5% de polímero EVA na temperatura crítica de 20°C (CRIT) resultou nas espessuras listadas na Tabela 38, assim como, as deformações ( $\epsilon$ ) calculadas e admissíveis no topo da plataforma (z) e abaixo da camada asfáltica (x).

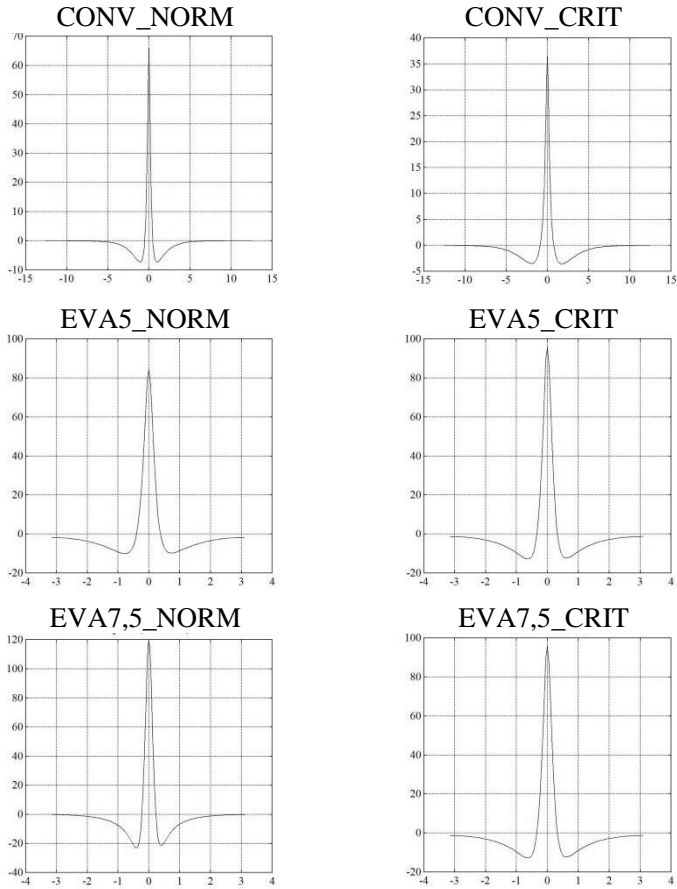
Tabela 41 - Dimensionamento do pavimento da mistura EVA7,5\_CRIT

| CAMADA DO PAVIMENTO | ESPESSURA (cm) | $\epsilon$ (z,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (z,adm) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,calc) ( $10^{-6}$ ) | $\epsilon$ (x,adm) ( $10^{-6}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| BBM                 | 3              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| BBME                | 5              | -                                 | -                                | -                                 | -                                |
| EVA7,5_CRIT         | 11             | -                                 | -                                | 106,73                            | 111,70                           |
| Subleito            | -              | 94,12                             | 386,11                           | -                                 | -                                |

Fonte: autora (2017)

Os sinais de deformações abaixo da camada asfáltica (x) das misturas CONV\_NORM, CONV\_CRIT, EVA5\_NORM, EVA5\_CRIT, EVA7,5\_NORM e EVA7,5\_CRIT são ilustradas na Figura 128.

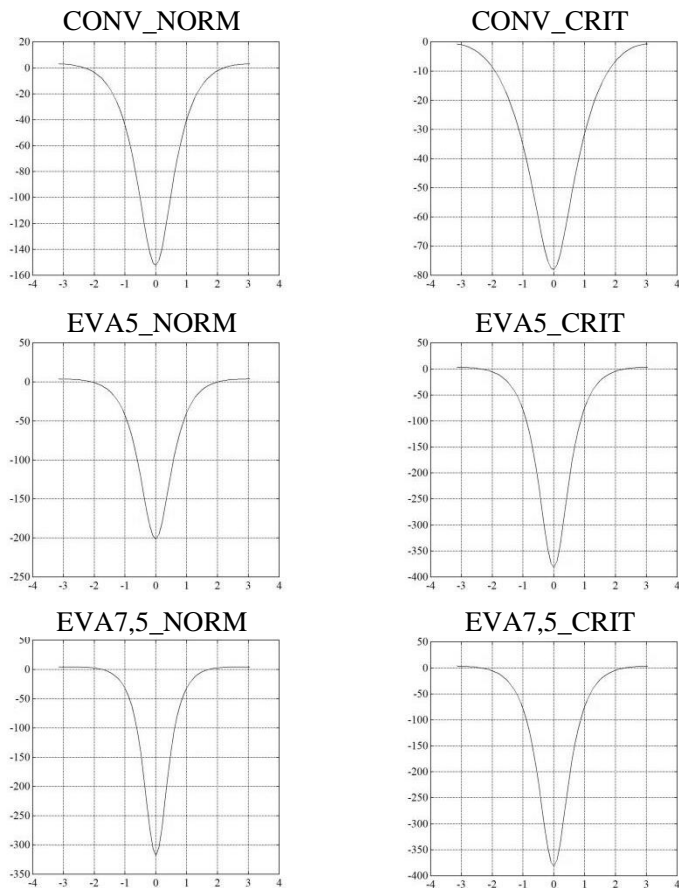
Figura 128 - Sinal de deformação abaixo da camada asfáltica (x)



Fonte: autora (2017)

Já, os sinais de deformações no topo da plataforma (z) das misturas CONV\_NORM, CONV\_CRIT, EVA5\_NORM, EVA5\_CRIT, EVA7,5\_NORM e EVA7,5\_CRIT são ilustradas na Figura 129.

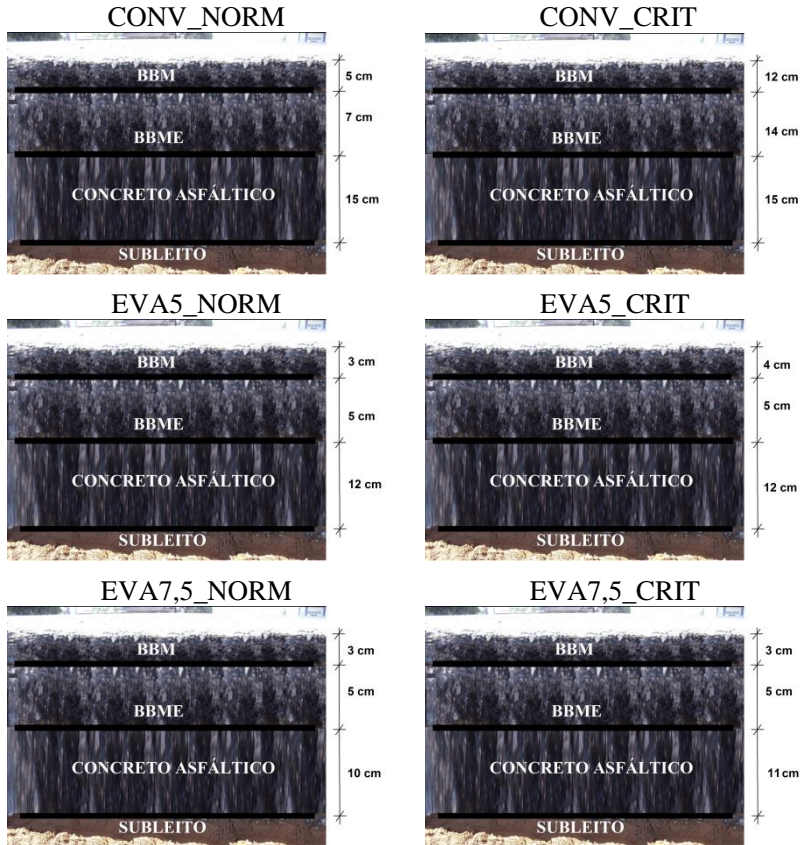
Figura 129 - Sinal de deformação no topo do subleito (z)



Fonte: autora (2017)

Por fim, são ilustradas as espessuras dos pavimentos convencional e modificados pelos polímeros EVA, considerando as temperaturas normativas e críticas diferenciadas no ensaio de Fadiga. O perfil final das camadas dos pavimentos das misturas asfálticas pesquisadas nesse trabalho são ilustradas na Figura 130.

Figura 130 - Espessuras finais dos pavimentos



Fonte: autora (2017)

Para obtenção dessas espessuras, foram modelados diversos cenários para as espessuras de rolamento (BBM), binder (BBME) e para o concreto asfáltico (CA) referente aos materiais pesquisados neste trabalho (CONV, EVA5 e EVA7,5).

Observa-se que as misturas asfálticas convencionais necessitam de uma espessura maior, para um mesmo volume de tráfego, do que as misturas modificadas, além de maiores espessuras das camadas de BBM e BBME. A espessura definida é de 15 cm para a mistura na temperatura normativa e crítica, ou seja, como os baixos valores de módulo e deformações admissíveis demonstrados nos ensaios de Módulo

Complexo e de Fadiga, a tendência era uma espessura elevada para esse tipo de mistura.

O fato de que as temperaturas críticas necessitam de pavimentos mais espessos foi verificada nos resultados obtidos, visto que em todas as misturas, a espessura na temperatura crítica é maior do que na temperatura a 10°C.

As espessuras totais de misturas asfálticas (BBM, BBME e CA) totalizam em 27 cm, 41 cm, 20 cm, 21 cm, 18 cm e 19 cm para as misturas CONV\_NORM, CONV\_CRIT, EVA5\_NORM, EVA5\_CRIT, EVA7,5\_NORM e EVA7,5\_CRIT respectivamente. Assim, de um modo geral, considerando os fatores citados anteriormente é possível afirmar a eficácia do polímero EVA (18 cm), diminuindo em até 56% a espessura total da mistura asfáltica, se comparada com as misturas convencionais (41 cm).

A relação  $\epsilon_{calculada} < \epsilon_{admissível}$  para um correto dimensionamento é seguida nesta pesquisa e um resumo dos valores adotados para cada uma das misturas asfálticas (CONV, EVA5 e EVA7,5) nas temperaturas normativa e crítica são apresentadas na Tabela 42.

Tabela 42 - Deformações calculadas e admissíveis das misturas CONV, EVA5 e EVA7,5

| MISTURA<br>ASFÁLTICA | $\epsilon_{calculada} < \epsilon_{admissível}$ |          |                                     |          |
|----------------------|--|----------|-------------------------------------|----------|
|                      | DEFORMAÇÃO<br>TOPO PLATAFORMA (zz)             |          | DEFORMAÇÃO<br>CAMADA ASFÁLTICA (xx) |          |
| CONV_NORM            | 253,95   | < 386,11 | 65,14                               | < 67,29  |
| CONV_CRIT            | 36,07  | < 386,11 | 35,2                                | < 36,03  |
| EVA5_NORM            | 378,62   | < 386,11 | 99,25                               | < 102,65 |
| EVA5_CRIT            | 83,92  | < 386,11 | 92,8                                | < 97,31  |
| EVA7,5_NORM          | 99,72  | < 386,11 | 115,51                              | < 121,29 |
| EVA7,5_CRIT          | 94,12  | < 386,11 | 106,73                              | < 111,70 |

Fonte: autora (2017)

Assim, como todos os valores de deformações calculadas são menores que as deformações admissíveis, o pavimento suportará as solicitações de cargas definidas no projeto, validando o dimensionamento simulado.





## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Finaliza-se esta tese com as conclusões do trabalho com base nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e recomendações para trabalhos futuros para continuidade dos estudos sobre modificação de cimentos asfálticos por polímeros.

#### 5.1 CONCLUSÕES

A análise de misturas asfálticas modificadas com três teores de polímero EVA (5%, 7,5% e 10%) em relação às misturas asfálticas de referência, com o uso de CAP 50/70 convencional, é realizada a partir dos ensaios da metodologia francesa de formulação que abrangem os ensaios da PCG, Deformação Permanente, Módulo Complexo e Fadiga, além dos ensaios de caracterização dos agregados, caracterização do ligante e o ensaio de Lottman Modificado. A susceptibilidade à temperatura e frequência de solitação, assim como a viscosidade do material, são variáveis que alteram o comportamento da mistura asfáltica e, conseqüentemente, fornecem parâmetros viscoelásticos que refletem na modelação do dimensionamento proposto desta pesquisa.

O objetivo geral desta pesquisa foi alcançado em estudar o comportamento das misturas asfálticas em relação às propriedades mecânicas de módulo de rigidez e deformações admissíveis das misturas modificadas pelo polímero EVA. Obteve-se um melhor desempenho das misturas modificadas em relação às misturas convencionais.

A modificação do CAP 50/70 convencional (CONV) foi realizada com 5% de polímero EVA (EVA5), 7,5% (EVA7,5) e 10% (EVA10), na qual foram caracterizadas nos ensaios de Ductilidade, Massa Específica, Penetração, Ponto de Amolecimento, Ponto de Fulgor, Recuperação Elástica, Solubilidade em Tricloroetileno e Viscosidade Brookfield. Os resultados foram satisfatórios, com exceção aos limites estabelecidos na viscosidade. Com os resultados da caracterização foi possível classificar os ligantes EVA5, EVA7,5 e EVA10 no Grau Flexpave 55/75, 60/85 e 65/90 da ANP, respectivamente. Também, foi realizada a caracterização do material granular nos ensaios de Adesividade, Densidade, Durabilidade e abrasão Los Angeles que se encontraram dentro dos limites estabelecidos.

No ensaio da PCG foram testados três teores de ligantes por tipo de mistura, sendo de 4,25%, 4,5% e 4,75% para as misturas convencionais e 4,5%, 4,75% e 5% para as misturas modificadas pelo polímero EVA. O teor ótimo definido foi de 4,5% para todas as misturas que se enquadraram como módulo elevado no ensaio da PCG, ou seja, aos 80 giros atingiram entre 4% e 6% de volume de vazios.

Na sequência, as misturas asfálticas foram ensaiadas em relação à resistência à água seguindo os normativos do ensaio Lottman Modificado e comparados aos ensaios de Duriez. A relação entre corpos de prova imersos e não imersos obteve uma média alta de 0,95, quando o limite normativo é de 0,70.

Com os teores ótimos definidos e validados no ensaio Lottman Modificado verificou-se a resistência quanto ao afundamento nas trilhas de roda nas misturas CONV, EVA5, EVA7,5 e EVA10 através do ensaio de Deformação Permanente na qual o afundamento médio após 30.000 ciclos atingiu 9,3%, 5,2%, 5,85% e 4,90% respectivamente.

As propriedades mecânicas de módulo de rigidez foram analisadas no ensaio de Módulo Complexo e o comportamento do material foi explanado através dos gráficos Isotérmicas, Equivalência Frequência-Temperatura, Isócronas, Espaço de Black, função *Damping*, além do plano Cole-Cole, que definiu a temperatura crítica de 20°C para todas as misturas asfálticas.

Dando sequência aos ensaios fundamentais definiu-se os valores de  $\epsilon_6$  no ensaio de Fadiga, no qual o material suporta 1 milhão de ciclos ( $10^6$ ), nas deformações controladas entre 90 e 180  $\mu$ def, a fim de definir as deformações admissíveis para o dimensionamento. Nessa ocasião foram testadas as temperaturas normativas e a temperatura crítica.

Os parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh foram obtidos com os dados de módulo complexo ( $|E^*|$ ) e os ângulos de fase nas sete temperaturas (-10°C, 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C e 40°C) e nas quatro frequências de solitação (1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz) para cada tipo de mistura. Esses parâmetros foram inseridos em um *software* de dimensionamento para obtenção da deformação calculada juntamente com as capacidades de suporte das camadas subjacentes ao pavimento. As espessuras das camadas necessárias para um mesmo volume de tráfego mostrou um decréscimo com o aumento do teor de polímero. Assim, a eficiência da mistura asfáltica modificada pelo polímero EVA frente à mistura asfáltica convencional atingiu 56%.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, algumas recomendações e sugestões para a continuidade da pesquisa com o intuito de contribuir para abertura de discussões na comunidade científica rodoviária.

Recomenda-se os ensaios de fadiga nas temperaturas diferentes de 10°C e 20°C para um melhor entendimento do comportamento das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA.

Sugere-se avaliar em campo o comportamento das misturas asfálticas modificadas pelo polímero EVA em relação às deformações no topo da plataforma e abaixo das camadas de concreto asfáltico através do uso de sensores de deformações (*strain gauges*) afim de estabelecer uma relação campo-laboratório das misturas modificadas.

O estudo sobre o comportamento dos materiais é de extrema importância para o conhecimento e, conseqüentemente, para a eficiência dos dados utilizados para tomada de decisão em projetos. Assim, recomenda-se também um estudo, na mesma linha desta pesquisa, porém com ligantes asfálticos de diferentes consistências, como por exemplo, o CAP 30/45 e diferentes tipos de polímeros, como por exemplo, o SBS.



## REFERÊNCIAS

AASHTO - Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO T-283**: Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 13<sup>th</sup> Edition. Washington, D.C, 1989.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11341**: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 14855**: Ligantes asfálticos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15086**: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 15184**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 17094**: Máquinas elétricas girantes. Parte 2: Motores de indução monofásicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6293**: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6296**: Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560**: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AFNOR - Association Française de Normalisation. **AFNOR NF 12697-24+A1**: Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Résistance à la fatigue - Partie 24, 2007.

\_\_\_\_\_. **NF 12697-26**: Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Module de rigidité - Partie 26. 2004.

\_\_\_\_\_. **NF 98-130 a NF 98-140**: Enrobés Bitumineux: BBSG, BBA, BBM, BBS, GB, EME, BBME. 1993.

\_\_\_\_\_. **NF 98-250-2**: Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Compactage des plaques - Partie 2. 1991.

\_\_\_\_\_. **NF 98-250-3**: Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Confection d'éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné - Partie 3. 1993.

\_\_\_\_\_. **NF 98-251-1**: Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Essai Duriez. 1995.

\_\_\_\_\_. **NF 98-252**: Essais relatifs aux chaussées: Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire. PCG. 1999.

\_\_\_\_\_. **NF 98-253-1**: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Essai d'Orniérage - Partie 1. 1993.

\_\_\_\_\_. **NF 98-261-1**: Essais relatifs aux chaussées: Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés - Partie 1: Essai par Flexion à Flèche Constante. 1993.

ALENCAR, A. E. V. *et al.* **Estudo da estabilidade a estocagem de ligante asfáltico modificado com resíduo de copolímero EVA descartado pela indústria calçadista**. In: 32<sup>a</sup> Reunião anual da sociedade brasileira de química, 2009. Fortaleza, 2009.

ALLEN, N. S. *et al.* **Aspects of the thermal oxidation of ethylene vinyl acetate copolymer**. The Manchester Metropolitan University, Madri. Polymer degradation and stability, v. 68, n. 3, p. 363-371, 2000.

ALMEIDA, A. J. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com aplicação dos aditivos PR PLAST e PR FLEX 20 no módulo**

**complexo e na fadiga.** 2013. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2013.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **ANP Resolução nº32:** FLEXPAVE - Asfalto Modificado por Polímero Elastoméricos. Rio de Janeiro: ANP, 2010.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D 4123-82:** Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous. USA, 1982.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5976-00:** Specification for **Type I** Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5840-00:** Specification for **Type II** Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5841-00:** Specification for Type III Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. USA, 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5892-00:** Specification for Type IV Polymer-Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. USA, 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2041-91:** Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. USA. 1991.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2872-88:** Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). USA. 1988.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4402-13:** Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. USA. 2013.

BAHIA, H. U. *et al.* **Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design.** National Cooperative Highway Research

Program - NCHRP. Report 459. Washington National Academic Press, 2001. 95p.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BRASKEM. **Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila HM728**. Folha de dados, revisão 4, 2010.

BRINGEL, R. M. **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) - Centro de ciências do departamento de química orgânica e inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Propriedades químicas e reológicas de asfalto modificado por copolímero EVA**. III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, 2005.

BROVELLI, C. CRISPINO, M. PAIS, J. PEREIRA, P. Assessment of fatigue resistance of additivated asphalt concrete incorporating fibers and polymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n.3, p. 554-558, March 2014.

BROVELLI, C. CRISPINO, M. PAIS, J. PEREIRA, P. Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 117-123, 2015.

BRULÉ, B. **RGRA 763**. 46-51, 1998.

CASTAÑEDA, E. (2004), **Contribution de Methodes Non Destructives a l'Evaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux**. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.



CEN - European Committee for Standardization. **EN 12697-22:** Melanges bitumineux. Methodes d'essai pour melange hydrocarbone a chaud. Essai d'ornierage. 2003.

CEZARO, T. C. **Estudo das propriedades mecânicas asfálticas convencionais e modificadas.** 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DE LA ROCHE, C. **Module de rigidité et comportement em fatigue des enrobés bitumineux.** 1996. 185 f. Thèse de docteur (Tese em Engenharia Civil). École Central de Paris, Paris, 1996.

DE MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas.** 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 035:** Agregados - Determinação da abrasão *Los Angeles*. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 078:** Agregado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081:** Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089.** Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Norma rodoviária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031-ES.** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT 095-EM.** Cimentos asfálticos de petróleo. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT 128-EM.** Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT 129-EM.** Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico. Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **DNIT: Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT: Quadro de Fabricantes de Veículos - QFV.** Rio de Janeiro, 2012, 166p.

\_\_\_\_\_. **DNIT: SICRO 2 - Sistema de Custos Referenciais de Obras.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **DNIT: Normas e Manuais.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Acesso em 01/02/2017 <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/coletanea-de-normas>

\_\_\_\_\_. **DNIT: SNV - Sistema Nacional de Viação, Versão 2015.** DNIT/DPP/CGPLAN/Coordenação de Planejamento, 2015. Acesso em 20/12/2016 <https://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>

DOMEC V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température.** Thèse de doctorat, L'Universite Bordeaux I. 2005.

DUHAMEL, D.; CHABOT, A.; TAMAGNY, P.; HARFOUCHE, L. **ViscoRoute: Viscoelastic modeling for asphalt pavements.** Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, p. 258–259, 89–103. 2005

FREITAS, F. J. S. **Asfalto modificado com EVA.** Anais da 30ª reunião anual de pavimentação, v.1, p. 61-74, 1996.

FROTA, C. A.; D'ANTONA, D. M. G. **Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos**

**urbanos de Manaus - AM.** Polímeros, São Carlos, ISSN 0104-1428, 2011.

FÜLLER, W. B.; THOMPSON, S. E. *The law of proportioning concrete.* *Transport American Society of Civil Engineers.* Vol. 23, n° 9, march, 1907.

GLAOU, B. MERBOUH, M, VEN, M. V. CHAILLEUX, E. YOUCEFI, A. Thermal fatigue of polymer modified bitumen. **Journal Thermoplastic Composite Material**, v. 25, n.4, p. 469-478, 2011. Doi: 10.1177/0892705711412645.

GORKEM, C. SENGOZ, B. A. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2227-2236, 2009.

HAMEAU, G., DRUON, M. **Influence de copolymères, statiques et séquencés, élastothermoplastiques sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux.** Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – BLCPC 81, 135139 (1976).

HARTMAN, A. M., GILCHRIST, M. D., WALSH, G. *Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue.* *Journal of Transportation Engineering.* ASCE, v.127, n.5, p.370-378, 2001.

HUSSEIN, I. A., WAHHAB, H. A., IQBAL, M. H. A. Influence of Polymer Type and Structure on Polymer Modified Asphalt Concrete Mix. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 84, p. 480-487, 2006.

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

ISACSSON, U.; LU, X. **Properties of bitumen modified with elastomers and plastomers.** 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona, Espanha, 2000.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LÉTOFFÉ, J. M. *et al* **Analyse thermique de bitumes routiers modifiés par des polymères**. Bulletin des Laboratoires des Ponts e Chaussées, v.229, p.13-20, 2000.

LPC - Laboratoire des Ponts et Chaussées. **LPC: Identification et dosage par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier des copolymères SBS et EVA dans les liants bitumineux**. Méthode d'essai. Paris, 2009. ISBN : 978-2-7208-2541-7.

\_\_\_\_\_. **LPC: Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de travail RST "Formulation des enrobés". Paris, 2007.

\_\_\_\_\_. **LPC: SETRA - French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique**. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). 1997.

LUNDSTROM, R., DI BENEDETTO, H., ISACSSON, U. Influence of asphalt mixture stiffness on fatigue failure. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.16, n.6, p.516-525, 2004.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. 2004. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial da mistura asfáltica e seu comportamento mecânico**. 1998. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MORILHA, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOUTIER, F. **Etude statistique de l'effet de la composition des enrobes bitumineux sur leur comportement en fatigue complexe.** Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. v. 172. 1991.

NASKAR, M.; REDDY, K. S.; CHAKI, T. K.; DIVYA, M. K.; DESHPANDE, A. P. Effect of ageing on different modified bituminous binders: comparison between RTFOT and radiation ageing. **Materials and Structures**, v. 46, p.1227-1241, 2013.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do potencial anti oxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento.** 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

OTTO G G, MOMM, L, VALENTE A M. **Estudo do Dano ao Pavimento Devido a Carga Dinâmica.** In *1st International Seminar of Weigh in Motion*. Florianopolis. 2011.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

PÉREZ, Y. A. G. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas.** 2013. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2013.

PERRET, J. **Déformation des Couches Bitumineuses au Passage d'Une Charge de Trafic.** 2003. Thèse de Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL, Lausanne, France, 2003.

PIARC - Permanent International Association of Road Congresses. **PIARC: Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications.** Technical

Committee Flexible Roads. International workshop modified bitumens. Roma, 1998.

\_\_\_\_\_. **PIARC: Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements.** LCPC, 1999.

QUINTERO, C. F. Q. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas.** 2016. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2016.

QUINTERO, C. F. Q. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada - Formulação e comportamento mecânico.** 2011. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

RIVIÈRE, N. **Comportement em fatigue des enrobés bitumineux.** 1996. Tese (Doutorado) Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1996.

RODRIGUES, F. O. *et al.* **Investigação das propriedades reológicas de ligante asfáltico modificado por SBS e EVA com adição de LCC.** ABPv, Fortaleza, 2009.

SANTOS, A. O. J.; MARTINS, R. F. B. **Avaliação de ligantes asfálticos modificados por resíduos poliméricos da indústria calçadista (EVA).** Pesquisa de iniciação científica. Universidade de São Paulo, 2007.

SAOULA, S.; HADDADI, S.; MOKHTAR, K. A. **Comparison of the Performances of Several Modified Bituminous Mix Formulas.** In: 2nd International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, 2012. AIP - American Institute of Physics, 2012. p.261-264. Doi: 10.1063/1.4751607.

SHINOHARA, K. J. **Estudo do comportamento do concreto asfáltico modificado pelo polímero EVA no Módulo Complexo e na Fadiga.** 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

**SHRP - Strategic Highway Research Program. SHRP A-379:** The Superpave mix design system manual of specifications, test methods, and practices. National Research Council: Washington, 1994.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** 2005. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

TORALDO, E. MARIANI, E. Effects of polymers additives on bituminous mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 38-42, 2014.

VAN ROMPU; DI BENEDETTO, H.; BUANNIC, M.; GALLET T.; RUOT, C. New fatigue test on bituminous binders: Experimental results and modeling. **Construction and Building Materials**, v.37, p.197-208, 2012.

VONK, W. C., PHILLIPS, M. C., ROELE, M. **Ageing resistance of bituminous road binders: Benefits of SBS modification.** Shell Chemicals Paper. TPE 6.3.8, 1994. TRB.

ZATTERA, A. J. *et al.* **Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno acetato de vinila - EVA.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 15, n. 1, p. 73-78, 2005.





# ANEXOS

## ANEXO I

## Rede rodoviária no Brasil (SNV, 2015).

| REGIÃO       | UF        | PLANEJADA | REDE DO SNV - TOTAL |                   |                   |                    |             |               |                  |             |           |  | TOTAL |
|--------------|-----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------|---------------|------------------|-------------|-----------|--|-------|
|              |           |           | LEITO NATURAL       | EM OBRAS IMPLANT. | EM OBRAS IMPLANT. | EM OBRAS PAVIMENT. | SUB-TOTAL   | PISTA SIMPLES | EM OBRAS DUPLIC. | PISTA DUPLA | SUB-TOTAL |  |       |
| Norte        | RO        | 4.243,6   | 0,0                 | 12.641,5          | 265,2             | 19.965,2           | 3.170,9     | 0,0           | 50,3             | 3.221,2     | 27.430,0  |  |       |
|              | AC        | 443,7     | 4.673,5             | 328,2             | 2.027,6           | 291,4              | 7.318,7     | 1.460,3       | 0,0              | 37,9        | 9.280,6   |  |       |
|              | AM        | 8.405,4   | 3.116,0             | 0,0               | 3.370,9           | 151,8              | 3.834,3     | 2.154,2       | 0,0              | 2,8         | 14.396,7  |  |       |
|              | RR        | 778,7     | 0,0                 | 5.986,6           | 61,5              | 6.082,3            | 1.444,5     | 0,0           | 17,2             | 1.461,7     | 8.322,7   |  |       |
|              | PA        | 6.210,7   | 19.057,1            | 3.957,3           | 6.138,1           | 1.770,0            | 30.977,1    | 5.665,1       | 0,0              | 70,6        | 42.886,5  |  |       |
|              | AP        | 4.937,0   | 146,0               | 128,5             | 1.481,0           | 13,8               | 1.769,3     | 528,1         | 0,0              | 0,0         | 528,1     |  |       |
|              | TO        | 4.337,0   | 22.502,9            | 0,0               | 102,4             | 979,0              | 23.584,3    | 7.209,1       | 0,0              | 70,9        | 38.302,1  |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 32.456,9  | 54.285,8            | 4.404,0           | 31.248,1          | 3.533,3            | 93.471,2    | 21.635,2      | 0,0              | 249,7       | 21.884,9  |  |       |
|              | MA        | 3.370,8   | 35.144,0            | 0,0               | 12.989,4          | 398,0              | 47.941,4    | 6.708,4       | 40,3             | 84,6        | 6.831,3   |  |       |
|              | PI        | 4.531,2   | 43.060,8            | 65,0              | 6.042,2           | 871,2              | 50.039,2    | 7.453,3       | 16,0             | 48,5        | 7.571,8   |  |       |
| Nordeste     | CE        | 2.409,6   | 97.598,7            | 80,9              | 8.077,3           | 405,0              | 42.886,9    | 8.263,5       | 151,5            | 230,3       | 6.645,3   |  |       |
|              | RN        | 618,8     | 21.928,4            | 12,1              | 671,6             | 78,9               | 22.682,0    | 4.394,5       | 152,1            | 4.570,1     | 28.080,9  |  |       |
|              | PB        | 401,6     | 29.831,2            | 0,0               | 536,6             | 694,7              | 31.122,5    | 3.503,9       | 2,9              | 280,8       | 35.311,7  |  |       |
|              | PE        | 851,8     | 34.626,0            | 0,0               | 2.388,0           | 1.683,4            | 37.083,4    | 6.395,8       | 123,4            | 485,3       | 44.929,7  |  |       |
|              | AL        | 1.845,7   | 10.633,2            | 0,0               | 8,0               | 103,4              | 10.744,6    | 2.387,4       | 193,0            | 109,1       | 14.973,0  |  |       |
|              | SE        | 380,4     | 2.936,0             | 0,0               | 0,0               | 75,4               | 3.011,4     | 2.011,4       | 77,6             | 187,0       | 2.276,0   |  |       |
|              | BA        | 14.491,9  | 95.270,0            | 0,0               | 15.288,7          | 1.121,8            | 111.680,5   | 16.038,4      | 69,8             | 176,3       | 16.284,5  |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 28.901,8  | 311.023,3           | 158,0             | 42.282,8          | 3.917,8            | 357.361,9   | 56.848,6      | 698,0            | 1.764,0     | 59.310,6  |  |       |
|              | MG        | 8.195,6   | 230.849,7           | 0,0               | 12.528,9          | 1.711,7            | 245.088,3   | 24.394,6      | 2.119,1          | 1.244,0     | 25.880,5  |  |       |
|              | ES        | 1.186,8   | 26.281,6            | 28,4              | 135,0             | 315,1              | 28.760,1    | 3.903,1       | 0,0              | 132,2       | 3.993,3   |  |       |
| Sudeste      | ES        | 2.749,5   | 14.456,4            | 0,0               | 923,8             | 9,3                | 15.389,5    | 6.600,5       | 0,0              | 777,4       | 7.377,9   |  |       |
|              | RJ        | 16.740,0  | 88,0                | 0,0               | 895,8             | 88,4               | 164.718,2   | 21.837,2      | 61,6             | 3.076,7     | 24.977,5  |  |       |
|              | SF        | 6.354,5   | 183.734,0           | 0,0               | 0,0               | 0,0                | 183.734,0   | 0,0           | 0,0              | 0,0         | 183.734,0 |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 19.486,4  | 435.321,7           | 28,4              | 14.481,5          | 1.214,5            | 451.956,1   | 56.835,4      | 273,5            | 5.232,3     | 62.141,2  |  |       |
|              | PR        | 5.672,7   | 4,8                 | 41,2              | 96.555,4          | 1.441,7            | 98.043,1    | 18.375,2      | 26,8             | 1.176,6     | 19.581,4  |  |       |
|              | SC        | 46.740,5  | 53.938,8            | 0,0               | 711,2             | 268,3              | 54.279,3    | 6.557,0       | 108,6            | 389,5       | 7.096,1   |  |       |
|              | RS        | 5.732,2   | 116.945,0           | 0,0               | 21.693,2          | 1.125,4            | 139.763,6   | 10.501,6      | 300,6            | 55,1        | 11.357,3  |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 58.145,4  | 170.888,6           | 41,2              | 118.319,8         | 2.836,4            | 292.086,0   | 35.433,8      | 438,8            | 2.121,2     | 37.994,8  |  |       |
|              | MT        | 5.490,3   | 26.456,4            | 48,0              | 576,0             | 898,4              | 28.066,8    | 8.239,1       | 99,6             | 147,8       | 8.496,5   |  |       |
|              | MS        | 2.619,3   | 46.521,7            | 0,0               | 7.371,7           | 739,4              | 54.632,8    | 7.845,1       | 11,5             | 125,1       | 7.981,7   |  |       |
| Centro-Oeste | GO        | 9.988,3   | 69.557,0            | 0,0               | 3.184,0           | 1.144,0            | 73.885,0    | 11.553,7      | 57,8             | 1.149,1     | 12.780,6  |  |       |
|              | DF        | 220,9     | 0,0                 | 0,0               | 498,3             | 0,0                | 498,3       | 554,5         | 0,0              | 353,5       | 908,0     |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 10.209,2  | 69.557,0            | 0,0               | 3.682,3           | 1.144,0            | 74.383,3    | 12.108,2      | 57,8             | 1.502,6     | 13.688,6  |  |       |
| Sul          | PR        | 18.318,8  | 142.535,1           | 48,0              | 11.630,0          | 2.868,8            | 157.082,9   | 28.192,4      | 1.689,9          | 1.775,5     | 30.136,8  |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 18.318,8  | 142.535,1           | 48,0              | 11.630,0          | 2.868,8            | 157.082,9   | 28.192,4      | 1.689,9          | 1.775,5     | 30.136,8  |  |       |
| BRASIL       | RS        | 157.309,3 | 1.114.054,5         | 4.679,8           | 217.862,2         | 15.281,8           | 1.351.978,1 | 198.745,4     | 1.590,2          | 11.142,7    | 211.468,3 |  |       |
|              | SUB-TOTAL | 157.309,3 | 1.114.054,5         | 4.679,8           | 217.862,2         | 15.281,8           | 1.351.978,1 | 198.745,4     | 1.590,2          | 11.142,7    | 211.468,3 |  |       |

## ANEXO 2

### Descrição, aplicações e as propriedades do polímero EVA.

|    |                | <b>Folha de Dados</b><br>Revisão 4 (Maio/10)  |         |
|---|----------------|---|---------|
|   |                | Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila HM728 |         |
| <b>Descrição:</b><br>Resina semi-amorfa com alto teor de Acetato de Vinila, médio peso molecular e boa compatibilidade com outras resinas e em blendas com termoplásticos, para melhorar a resistência à quebra sob tensão ambiental, resistência ao impacto e à fragilidade a baixas temperaturas. Aditivado com antioxidante.   |                |   |         |
| <b>Aplicações:</b><br>Adesivos <i>Hot-Melt</i> , <i>coating</i> , placas expandidas e produtos injetados e extrusados, onde a flexibilidade, a resiliência e a resistência à quebra sob tensão ambiental são necessárias à aplicação. Nas formulações de adesivos <i>Hot-Melt</i> apresentam ótima compatibilidade com ceras, parafinas, agentes de pega etc., promovendo flexibilidade e adesão. |                |   |         |
| <b>Propriedades de Controle:</b>  |                |   |         |
|   | Método ASTM    | Unidades                                      | Valores |
| Índice de fluidez (190/2,16)  | D 1238         | g/10 min                                      | 6,0     |
| Teor de Acetato de Vinila   | Braskem (1)    | %   | 28,0    |
| <b>Propriedades Típicas:</b><br>Propriedades de Placa <sup>3</sup>  |                |   |         |
|   | Método ASTM    | Unidades                                      | Valores |
| Densidade   | D 1505 / D 792 | g/cm <sup>3</sup>                             | 0,950   |
| Resistência à Quebra sob Tensão Ambiental <sup>b</sup>  | D 1693         | h/F50   | >300    |
| Dureza  | D 2240         | Shore A / D                                   | 80 / 25 |
| Ponto de Fusão  | D 3418         | °C  | 77      |
| Ponto de Amolecimento Vicat   | D 1525         | °C  | 49      |
| (1) Método Braskem – Disponível na Gerência de Desenvolvimento e Assistência Técnica<br>(a) Placa moldada por compressão pelo Método ASTM D 4703.<br>(b) Ensaio realizado em placa de 2 mm, 100% Igepal, 50°C.  |                |   |         |

## ANEXO 3

Certificado de análise dos ensaios de caracterização CAP 50-70.

| ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE |                                    | CARACTERÍSTICAS            |              | UNIDADE   | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES |        |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------|-----------|------------------|------------|---------|--------|
|                                      |                                    |                            |              |           |                  |            | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| 1                                    | Ponto de Amolecimento              |                            | °C           | NBR 6560  | 46,8             | 46         | -       |        |
| 2                                    | Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm | 0,1 mm                     |              | NBR 6576  | 64               | 50         | 70      |        |
| 3                                    | Viscosidade Saybolt Furol          | 135°C                      | cP           |           | 149              | 141        | -       |        |
|                                      |                                    | 150°C                      | cP           | NBR 14950 | 77               | 50         | -       |        |
| 4                                    | Viscosidade Brookfield             | 177°C                      | cP           |           | 31               | 30         | 150     |        |
|                                      |                                    | 135°C – spindle 21, 20 rpm | cP           |           | 288              | 274        | -       |        |
|                                      |                                    | 150°C – spindle 21, 50 rpm | cP           | NBR 15529 | 146              | 112        | -       |        |
| 5                                    | 177°C – spindle 21, 100 rpm        | cP                         |              |           | 57               | 57         | 285     |        |
| 5                                    | Ponto de Fulgor                    |                            | °C           | NBR 11341 | 326              | 235        | -       |        |
| 6                                    | Índice de Susceptibilidade Térmica |                            | adimensional | -         | -1,5             | -1,5       | 0,7     |        |
| 8                                    | Ductilidade a 25°C, 5 cm/min       |                            | cm           | NBR 6293  | >100             | 60         | -       |        |
| 9                                    | Solubilidade em Tricloroetileno    |                            | % (em massa) | NBR 14855 | 100              | 99,5       | -       |        |
| 10                                   | Massa específica a 25°C            |                            | kg/m³        | NBR 6296  | 1,008            | -          | -       |        |

## ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT

| ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT |  | CARACTERÍSTICAS |    | UNIDADE   | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES |        |
|--|--|-----------------|----|-----------|------------------|------------|---------|--------|
|  |  |                 |    |           |                  |            | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| 11   | Varição de massa                         |                 | %  | NBR 15235 | -0,006           | -0,5       | 0,5     |        |
| 12   | Varição do Ponto de Amolecimento         |                 | °C | NBR 6560  | 2,8              | -          | +8      |        |
| 13   | Ductilidade a 25°C, 5 cm/min             |                 | cm | NBR 6293  | >100             | 20         | -       |        |
| 14   | Percentagem de Penetração Original, 25°C |                 | %  | NBR 6576  | 69               | 55         | -       |        |

## ANEXO 4

Certificado de análise dos ensaios de caracterização EVA5.

| ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE |                        | CARACTERÍSTICAS                    | UNIDADE      | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES |        |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------|------------------|------------|---------|--------|
|                                      |                        |                                    |              |                  |            | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| 1                                    |                        | Ponto de Amolecimento              | °C           | NBR 6560         | 57         | -       | -      |
| 2                                    |                        | Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm | 0,1 mm       | NBR 6576         | 66         | -       | -      |
| 3                                    |                        | Recuperação Elástica, 20cm, 25°C   | %            | NBR 15086        | 54         | -       | -      |
| 4                                    | Viscosidade Brookfield | 135°C – spindle 21, 20 rpm         | cP           |                  | 1452       | -       | -      |
|                                      |                        | 150°C – spindle 21, 50 rpm         | cP           | NBR 15529        | 508        | -       | -      |
|                                      |                        | 177°C – spindle 21, 100 rpm        | cP           |                  | 191        | -       | -      |
| 5                                    |                        | Ponto de Fulgor                    | °C           | NBR 11341        | 336        | -       | -      |
| 6                                    |                        | Ensaio de Separação de Fase        | Δ P.A. (°C)  | NBR 15166        | -          | -       | -      |
| 7                                    |                        | Ductilidade a 25°C, 5 cm/min       | cm           | NBR 6293         | >100       | -       | -      |
| 8                                    |                        | Solubilidade em Tricloroetileno    | % (em massa) | NBR 14855        | 99,9       | -       | -      |
| 9                                    |                        | Massa específica a 25°C            | kg/m³        | NBR 6296         | 0,9963     | -       | -      |

## ANEXO 5

Certificado de análise dos ensaios de caracterização EVA7,5.

| CARACTERÍSTICAS |                                    | UNIDADE                     | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES |        |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|------------|---------|--------|
|                 |                                    |                             |                  |            | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| 1               | Ponto de Amolecimento              | °C                          | NBR 6560         | 61,4       | -       | -      |
| 2               | Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm | 0,1 mm                      | NBR 6576         | 61         | -       | -      |
| 3               | Recuperação Elástica, 20cm, 25°C   | %                           | NBR 15086        | 58         | -       | -      |
| 4               | Viscosidade Brookfield             | 135°C – spindle 21, 20 rpm  | NBR 15529        | 1827       | -       | -      |
|                 |                                    | 150°C – spindle 21, 50 rpm  |                  | 755        | -       | -      |
|                 |                                    | 177°C – spindle 21, 100 rpm |                  | 342        | -       | -      |
| 5               | Ponto de Fulgor                    | °C                          | NBR 11341        | 326        | -       | -      |
| 6               | Ensaio de Separação de Fase        | Δ P.A. (°C)                 | NBR 15166        | -          | -       | -      |
| 7               | Ductilidade a 25°C, 5 cm/min       | cm                          | NBR 6293         | >100       | -       | -      |
| 8               | Solubilidade em Tricloroetileno    | % (em massa)                | NBR 14855        | 99,9       | -       | -      |
| 9               | Massa específica a 25°C            | kg/m³                       | NBR 6296         | 1,005      | -       | -      |

## ANEXO 6

Certificado de análise dos ensaios de caracterização EVA10.

| ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE |                        | CARACTERÍSTICAS                    | UNIDADE           | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES |        |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------|------------|---------|--------|
|                                      |                        |                                    |                   |                  |            | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| 1                                    |                        | Ponto de Amolecimento              | °C                | NBR 6560         | 65,1       | -       | -      |
| 2                                    |                        | Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm | 0,1 mm            | NBR 6576         | 51         | -       | -      |
| 3                                    |                        | Recuperação Elástica, 20cm, 25°C   | %                 | NBR 15086        | 64         | -       | -      |
| 4                                    | Viscosidade Brookfield | 135°C – spindle 21, 10 rpm         | cP                | NBR 15529        | 3130       | -       | -      |
|                                      |                        | 150°C – spindle 21, 30 rpm         | cP                |                  | 1580       | -       | -      |
|                                      |                        | 177°C – spindle 21, 100 rpm        | cP                |                  | 580        | -       | -      |
| 5                                    |                        | Ponto de Fulgor                    | °C                | NBR 11341        | 308        | -       | -      |
| 6                                    |                        | Ensaio de Separação de Fase        | Δ P.A. (°C)       | NBR 15166        | -          | -       | -      |
| 7                                    |                        | Ductilidade a 25°C, 5 cm/min       | cm                | NBR 6293         | 33,8       | -       | -      |
| 8                                    |                        | Solubilidade em Tricloroetileno    | % (em massa)      | NBR 14855        | 100%       | -       | -      |
| 9                                    |                        | Massa específica a 25°C            | kg/m <sup>3</sup> | NBR 6296         | 1,014      | -       | -      |





# APÊNDICES

## APÊNDICE A

Dados e resultados do ensaio de caracterização de agregado:  
Abrasão Los Angeles

| <b>AMOSTRA BRITA (19,1 mm - 9,5 mm)</b> | <b>PESO</b>         |
|---|---------------------|
| Passante #19,1 e retido #12,5:          | 2498,7 g            |
| Passante #12,5 e retido #9,5:           | 2499,7 g            |
| TOTAL:                                  | 4998,4 g            |
| <b>APÓS ENSAIO:</b>                     |                     |
| Passante #19,1 e retido #12,5:          | 980,9 g             |
| Passante #12,5 e retido #9,5:           | 938,9 g             |
| Retido #1,7:                            | 2035,7 g            |
| TOTAL:                                  | 3955,4 g            |
| <b>% DE DESGASTE:</b>                   | <b>20,87      %</b> |

**APÊNDICE B**

Dados e resultados do ensaio de caracterização de agregado:  
Adesividade

| <b>AMOSTRA BRITA (19,1mm - 12,5mm)</b> |                  |   |
|--|------------------|---|
| <b>DOPE</b>                            | <b>RESULTADO</b> | <b>INFORMAÇÕES</b>  |
| 0%                                     | Insatisfatório   | Apresentou descolamento parcial entre agregado e ligante. |
| 0,5%                                   | Satisfatório     | Não apresentou descolamento em nenhum ponto do agregado.  |
| 1%                                     | Satisfatório     | Não apresentou descolamento em nenhum ponto do agregado.  |
| 1,5%                                   | Satisfatório     | Não apresentou descolamento em nenhum ponto do agregado.  |

## APÊNDICE C

Dados e resultados do ensaio de caracterização de agregado:  
Durabilidade

| <b>AMOSTRA BRITA (19,1 mm - 9,5 mm)</b> | <b>PESO</b>   |
|---|---------------|
| Passante #19,1 e retido #12,5:          | 671,0 g       |
| Passante #12,5 e retido #9,5:           | 330,8 g       |
| TOTAL:                                  | 1001,7 g      |
| <b>APÓS 5 CICLOS DE ENSAIO:</b>         |               |
| Material total                          | 964,98 g      |
| % correspondente                        | 96,33 %       |
| <b>% DE PERDA:</b>                      | <b>3,67 %</b> |

## APÊNDICE D

Dados e resultados do ensaio de caracterização de agregado:  
Índice de forma

| ABERTURA | 19,1 mm - 12,75 mm |                 |      | 12,75 mm - 9,50 mm |                 |      |
|----------|--------------------|-----------------|------|--------------------|-----------------|------|
|          | MAIOR<br>a (mm)    | MENOR<br>b (mm) | a/b  | MAIOR<br>a (mm)    | MENOR<br>b (mm) | a/b  |
| 1        | 36,18              | 17,20           | 2,10 | 25,31              | 15,72           | 1,61 |
| 2        | 23,21              | 17,10           | 1,36 | 19,43              | 13,09           | 1,48 |
| 3        | 19,89              | 16,95           | 1,17 | 21,35              | 10,20           | 2,09 |
| 4        | 35,24              | 13,87           | 2,54 | 15,41              | 13,48           | 1,14 |
| 5        | 27,23              | 14,41           | 1,89 | 21,94              | 14,38           | 1,53 |
| 6        | 22,97              | 21,67           | 1,06 | 25,91              | 12,16           | 2,13 |
| 7        | 22,85              | 18,77           | 1,22 | 23,75              | 12,64           | 1,88 |
| 8        | 23,56              | 18,66           | 1,26 | 20,51              | 15,60           | 1,31 |
| 9        | 20,96              | 16,92           | 1,24 | 14,33              | 13,74           | 1,04 |
| 10       | 23,90              | 15,85           | 1,51 | 33,78              | 12,53           | 2,70 |
| 11       | 35,30              | 14,63           | 2,41 | 18,20              | 17,59           | 1,03 |
| 12       | 19,56              | 15,15           | 1,29 | 22,37              | 13,97           | 1,60 |
| 13       | 23,36              | 19,49           | 1,20 | 20,40              | 17,10           | 1,19 |
| 14       | 26,47              | 16,98           | 1,56 | 17,05              | 13,25           | 1,29 |
| 15       | 22,59              | 17,92           | 1,26 | 15,47              | 13,70           | 1,13 |
| 16       | 26,45              | 15,96           | 1,66 | 34,69              | 13,38           | 2,59 |
| 17       | 21,81              | 15,10           | 1,44 | 19,65              | 12,67           | 1,55 |
| 18       | 24,71              | 18,41           | 1,34 | 20,45              | 13,12           | 1,56 |
| 19       | 21,44              | 17,88           | 1,20 | 19,57              | 10,01           | 1,96 |
| 20       | 20,25              | 14,99           | 1,35 | 17,91              | 13,94           | 1,79 |
| 21       | 24,93              | 18,38           | 1,36 | 24,30              | 13,75           | 1,77 |
| 22       | 22,45              | 18,77           | 1,20 | 18,31              | 10,94           | 1,67 |
| 23       | 18,97              | 14,89           | 1,27 | 20,45              | 15,53           | 1,32 |
| 24       | 23,12              | 17,36           | 1,33 | 32,34              | 14,13           | 2,29 |
| 25       | 30,61              | 18,22           | 1,68 | 23,16              | 15,95           | 1,45 |
| 26       | 28,71              | 20,81           | 1,38 | 21,90              | 13,17           | 1,66 |
| 27       | 25,72              | 15,18           | 1,69 | 17,77              | 13,53           | 1,31 |
| 28       | 20,96              | 15,58           | 1,35 | 22,34              | 14,59           | 1,53 |
| 29       | 20,03              | 15,02           | 1,33 | 25,29              | 11,77           | 2,15 |
| 30       | 38,51              | 14,95           | 2,58 | 28,5               | 16,83           | 1,69 |

| ABERTURA | 19,1 mm - 12,75 mm |                 |      | 12,75 mm - 9,50 mm |                 |      |
|----------|--------------------|-----------------|------|--------------------|-----------------|------|
|          | MAIOR<br>a (mm)    | MENOR<br>b (mm) | a/b  | MAIOR<br>a (mm)    | MENOR<br>b (mm) | a/b  |
| 31       | 25,60              | 18,18           | 1,41 | 26,68              | 14,27           | 1,87 |
| 32       | 19,68              | 15,55           | 1,27 | 21,56              | 13,13           | 1,64 |
| 33       | 27,94              | 20,26           | 1,38 | 18,54              | 13,1            | 1,42 |
| 34       | 21,86              | 15,39           | 1,42 | 28,88              | 17,12           | 1,69 |
| 35       | 19,47              | 16,00           | 1,22 | 19,22              | 14,1            | 1,36 |
| 36       | 26,15              | 17,27           | 1,51 | 16,9               | 10,61           | 1,59 |
| 37       | 21,88              | 13,38           | 1,64 | 18,97              | 16,91           | 1,12 |
| 38       | 23,17              | 19,59           | 1,18 | 22,79              | 13,24           | 1,72 |
| 39       | 19,67              | 18,18           | 1,08 | 15,32              | 12,6            | 1,22 |
| 40       | 24,46              | 18,11           | 1,35 | 24,88              | 14,61           | 1,70 |
| 41       | 21,49              | 15,84           | 1,36 | 12,46              | 11,46           | 1,09 |
| 42       | 24,30              | 17,78           | 1,37 | 16,86              | 10,28           | 1,64 |
| 43       | 24,20              | 19,39           | 1,25 | 22,43              | 10,55           | 2,13 |
| 44       | 21,92              | 19,72           | 1,11 | 15,50              | 12,19           | 1,27 |
| 45       | 22,88              | 19,35           | 1,18 | 23,73              | 14,03           | 1,69 |
| 46       | 21,73              | 17,85           | 1,22 | 22,62              | 12,52           | 1,81 |
| 47       | 21,68              | 16,23           | 1,34 | 25,03              | 15,09           | 1,66 |
| 48       | 24,75              | 20,32           | 1,22 | 23,98              | 14,25           | 1,68 |
| 49       | 20,00              | 17,01           | 1,18 | 23,05              | 12,09           | 1,91 |
| 50       | 19,60              | 17,07           | 1,15 | 15,32              | 10,35           | 1,48 |
| 51       | 22,43              | 18,88           | 1,19 | 31,07              | 13,73           | 2,26 |
| 52       | 25,32              | 18,46           | 1,37 | 17,44              | 12              | 1,45 |
| 53       | 28,61              | 13,14           | 2,18 | 18,8               | 12,71           | 1,48 |
| 54       | 24,58              | 18,34           | 1,34 | 27,13              | 12,68           | 2,14 |
| 55       | 20,54              | 14,90           | 1,38 | 16,65              | 13,79           | 1,21 |
| 56       | 23,65              | 14,59           | 1,62 | 23,45              | 12,64           | 1,86 |
| 57       | 24,41              | 16,83           | 1,45 | 24,75              | 12,59           | 1,97 |
| 58       | 21,99              | 17,66           | 1,25 | 23,25              | 12              | 1,94 |
| 59       | 19,57              | 19,39           | 1,01 | 18,03              | 15,2            | 1,19 |
| 60       | 22,12              | 15,58           | 1,42 | 30,14              | 13,33           | 2,26 |
| 61       | 19,40              | 17,35           | 1,12 | 33,04              | 11,85           | 2,79 |
| 62       | 23,16              | 19,43           | 1,19 | 23,64              | 14,21           | 1,66 |
| 63       | 23,59              | 14,53           | 1,62 | 21,43              | 12,17           | 1,76 |
| 64       | 19,48              | 17,40           | 1,12 | 23,12              | 18,73           | 1,23 |
| 65       | 25,70              | 16,60           | 1,55 | 24,03              | 13,41           | 1,79 |
| 66       | 21,83              | 13,16           | 1,66 | 17,4               | 13,49           | 1,29 |
| 67       | 34,63              | 13,57           | 2,55 | 14,15              | 9,17            | 1,54 |
| 68       | 21,25              | 18,25           | 1,16 | 20,22              | 14,21           | 1,42 |
| 69       | 36,68              | 17,21           | 2,13 | 17,03              | 14,64           | 1,16 |
| 70       | 24,14              | 15,35           | 1,57 | 23,70              | 13,1            | 1,81 |

| ABERTURA | 19,1 mm - 12,75 mm   |                 |             | 12,75 mm - 9,50 mm   |                 |             |
|----------|----------------------|-----------------|-------------|----------------------|-----------------|-------------|
|          | MAIOR<br>a (mm)      | MENOR<br>b (mm) | a/b         | MAIOR<br>a (mm)      | MENOR<br>b (mm) | a/b         |
| 71       | 29,93                | 15,32           | 1,95        | 32,98                | 12,28           | 2,69        |
| 72       | 20,69                | 17,66           | 1,17        | 16,75                | 13,88           | 1,21        |
| 73       | 19,73                | 15,60           | 1,26        | 23,88                | 16,02           | 1,49        |
| 74       | 29,59                | 17,49           | 1,69        | 23,32                | 12,05           | 1,94        |
| 75       | 29,55                | 13,48           | 2,19        | 24,32                | 15,94           | 1,53        |
| 76       | 20,52                | 14,82           | 1,38        | 19,24                | 9,38            | 2,05        |
| 77       | 23,22                | 18,32           | 1,27        | 20,27                | 11,36           | 1,78        |
| 78       | 18,81                | 15,84           | 1,19        | 21,42                | 12,31           | 1,74        |
| 79       | 22,60                | 15,65           | 1,44        | 18,71                | 15,23           | 1,23        |
| 80       | 19,78                | 13,65           | 1,45        | 25,57                | 12,53           | 2,04        |
| 81       | 23,57                | 15,11           | 1,56        | 18,55                | 14,65           | 1,27        |
| 82       | 20,42                | 15,02           | 1,36        | 26,69                | 13,12           | 2,03        |
| 83       | 21,62                | 16,86           | 1,28        | 21,43                | 13,04           | 1,64        |
| 84       | 23,90                | 20,20           | 1,18        | 18,55                | 12,34           | 1,50        |
| 85       | 25,07                | 17,18           | 1,46        | 21,64                | 12,26           | 1,77        |
| 86       | 21,10                | 20,55           | 1,03        | 19,93                | 11,06           | 1,80        |
| 87       | 19,26                | 15,89           | 1,21        | 29,37                | 11,67           | 2,52        |
| 88       | 30,07                | 15,59           | 1,93        | 17,1                 | 12,67           | 1,35        |
| 89       | 21,60                | 20,09           | 1,08        | 15,77                | 11,86           | 1,33        |
| 90       | 24,41                | 16,76           | 1,46        | 22,57                | 14,12           | 1,60        |
| 91       | 23,39                | 19,79           | 1,18        | 16,75                | 13,16           | 1,27        |
| 92       | 23,27                | 16,39           | 1,42        | 27,9                 | 13,02           | 2,14        |
| 93       | 22,56                | 15,40           | 1,46        | 18,48                | 12,12           | 1,52        |
| 94       | 28,59                | 19,17           | 1,49        | 26,31                | 13,49           | 1,95        |
| 95       | 25,12                | 16,13           | 1,56        | 21,08                | 14,77           | 1,43        |
| 96       | 25,48                | 18,98           | 1,34        | 25,42                | 10,5            | 2,42        |
| 97       | 21,70                | 18,61           | 1,17        | 17,34                | 12,09           | 1,43        |
| 98       | 27,85                | 16,92           | 1,65        | 28,13                | 9,16            | 3,07        |
| 99       | 27,96                | 18,85           | 1,48        | 15,75                | 12,1            | 1,30        |
| 100      | 19,52                | 14,34           | 1,36        | 15,91                | 11,69           | 1,36        |
|          | <b>MÉDIA</b>         |                 | <b>1,44</b> | <b>MÉDIA</b>         |                 | <b>1,68</b> |
|          | <b>DESVIO PADRÃO</b> |                 | <b>0,33</b> | <b>DESVIO PADRÃO</b> |                 | <b>0,41</b> |

## APÊNDICE E

Quantitativo teste do material asfáltico e granular para o ensaio Lottman Modificado.

|  |          |          |          |                                   |
|--|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| volume (cm <sup>3</sup> )                | 498,73   |          |          |                                   |
| Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )* | 10%      | 9%       | 11%      | *MVRteorótico*(100-teorteste)/100 |
|  | 2,272    | 2,298    | 2,248    |                                   |
| Peso (g)                                 | 1.132,91 | 1.146,14 | 1.120,95 |                                   |

| Diâmetro (mm) | % Passante | Mistura      | CONV 10% | EVA5 9%  | EVA5 11% |
|---------------|------------|--------------|----------|----------|----------|
|               |            | Ligante (%)  | 4,50     | 4,50     | 4,50     |
|               |            | Ligante (g)  | 50,98    | 51,58    | 50,44    |
|               |            | Agregado (g) | 1.081,93 | 1.094,57 | 1.070,51 |
| 16            | 100,00000  | 0,00000      | -        | -        | -        |
| 12,75         | 89,35168   | 10,64832     | 115,21   | 116,55   | 113,99   |
| 9,52          | 77,30197   | 12,04971     | 130,37   | 131,89   | 128,99   |
| 6,45          | 63,73101   | 13,57095     | 146,83   | 148,54   | 145,28   |
| 4,76          | 54,81758   | 8,91343      | 96,44    | 97,56    | 95,42    |
| 2,38          | 38,87310   | 15,94448     | 172,51   | 174,52   | 170,69   |
| 1,20          | 27,68093   | 11,19217     | 121,09   | 122,51   | 119,81   |
| 0,59          | 19,46662   | 8,21431      | 88,87    | 89,91    | 87,93    |
| 0,30          | 13,92000   | 5,54662      | 60,01    | 60,71    | 59,38    |
| 0,15          | 9,87117    | 4,04883      | 43,81    | 44,32    | 43,34    |
| 0,075         | 7,00000    | 2,87117      | 31,06    | 31,43    | 30,74    |
| F             | 0,00000    | 7,00000      | 75,74    | 76,62    | 74,94    |

Resultado teste do material asfáltico e granular para o ensaio Lottman Modificado.

| TESTE | Nº      | Massa seco (g) | Msub (g) | Msss (g) | Gmb (g/cm <sup>3</sup> ) | Vv (%) | Limites 6 - 8% |
|-------|---------|----------------|----------|----------|--------------------------|--------|----------------|
|       | CONV10% | 1125,50        | 657,10   | 1132,63  | 2,360                    | 6,5%   | ok             |
|       | EVA9%   | 1134,70        | 665,50   | 1140,27  | 2,383                    | 5,6%   | não            |
|       | EVA11%  | 1120,60        | 654,40   | 1129,67  | 2,351                    | 6,9%   | ok             |



## APÊNDICE F

Quantitativo do material asfáltico e granular para o ensaio Rice.

| Diâmetro (mm) | % Passante | MISTURA   |                | CONC   |        |        | EVA5   |        |        | EVA7,5 |        |        | EVA10  |        |        |
|---------------|------------|-----------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |            | % ligante | massa ligante  | 4,25   | 4,50   | 4,75   | 4,50   | 4,75   | 5,00   | 4,50   | 4,75   | 5,00   | 4,50   | 4,75   | 5,00   |
|               |            |           |                | 25,50  | 27,00  | 28,50  | 27,00  | 28,50  | 30,00  | 27,00  | 28,50  | 30,00  | 27,00  | 28,50  | 30,00  |
|               |            |           | massa agregado | 574,50 | 573,00 | 571,50 | 573,00 | 571,50 | 570,00 | 573,00 | 571,50 | 570,00 | 573,00 | 571,50 | 570,00 |
| 16            | 100,0      | 0,0       | 0,00           | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| 12,75         | 89,4       | 10,6      | 61,17          | 61,17  | 61,01  | 60,86  | 61,01  | 60,86  | 60,70  | 61,01  | 60,86  | 60,70  | 61,01  | 60,86  | 60,70  |
| 9,52          | 77,3       | 12,0      | 69,23          | 69,23  | 69,04  | 68,86  | 69,04  | 68,86  | 68,68  | 69,04  | 68,86  | 68,68  | 69,04  | 68,86  | 68,68  |
| 6,45          | 63,7       | 13,6      | 71,97          | 71,97  | 71,76  | 71,56  | 71,76  | 71,56  | 71,35  | 71,76  | 71,56  | 71,35  | 71,76  | 71,56  | 71,35  |
| 4,76          | 54,8       | 8,9       | 51,21          | 51,21  | 51,07  | 50,94  | 51,07  | 50,94  | 50,81  | 51,07  | 50,94  | 50,81  | 51,07  | 50,94  | 50,81  |
| 2,38          | 38,9       | 15,9      | 91,60          | 91,60  | 91,36  | 91,12  | 91,36  | 91,12  | 90,88  | 91,36  | 91,12  | 90,88  | 91,36  | 91,12  | 90,88  |
| 1,20          | 27,7       | 11,2      | 64,30          | 64,30  | 64,13  | 63,96  | 64,13  | 63,96  | 63,80  | 64,13  | 63,96  | 63,80  | 64,13  | 63,96  | 63,80  |
| 0,59          | 19,5       | 8,2       | 47,19          | 47,19  | 47,07  | 46,94  | 47,07  | 46,94  | 46,82  | 47,07  | 46,94  | 46,82  | 47,07  | 46,94  | 46,82  |
| 0,30          | 13,9       | 5,5       | 31,87          | 31,87  | 31,78  | 31,70  | 31,78  | 31,70  | 31,62  | 31,78  | 31,70  | 31,62  | 31,78  | 31,70  | 31,62  |
| 0,15          | 9,9        | 4,0       | 23,26          | 23,26  | 23,20  | 23,14  | 23,20  | 23,14  | 23,08  | 23,20  | 23,14  | 23,08  | 23,20  | 23,14  | 23,08  |
| 0,075         | 7,0        | 2,9       | 16,49          | 16,49  | 16,45  | 16,41  | 16,45  | 16,41  | 16,37  | 16,45  | 16,41  | 16,37  | 16,45  | 16,41  | 16,37  |
| F             | 0,0        | 7,0       | 40,22          | 40,11  | 40,01  | 40,01  | 40,11  | 40,01  | 39,90  | 40,11  | 40,01  | 39,90  | 40,11  | 40,01  | 39,90  |

## APÊNDICE G

Dados de módulo complexo e ângulo de fase da mistura CONV para cálculos dos parâmetros de Huet-Sayegh através do software Viscoanalyse.

|     |    |             |      |
|-----|----|-------------|------|
| 7   | 4  |             |      |
| -10 | 1  | 19913210000 | 3.9  |
| -10 | 3  | 20407480000 | 3.4  |
| -10 | 10 | 21245770000 | 3.9  |
| -10 | 30 | 22718250000 | 4.9  |
| 0   | 1  | 19913210000 | 3.9  |
| 0   | 3  | 20407480000 | 3.4  |
| 0   | 10 | 21245770000 | 3.9  |
| 0   | 30 | 22718250000 | 4.9  |
| 10  | 1  | 13300000000 | 11.0 |
| 10  | 3  | 14200000000 | 10.0 |
| 10  | 10 | 15900000000 | 7.0  |
| 10  | 30 | 17800000000 | 5.0  |
| 15  | 1  | 11062960000 | 14.4 |
| 15  | 3  | 12052720000 | 12.9 |
| 15  | 10 | 13825320000 | 10.1 |
| 15  | 30 | 15899860000 | 7.1  |
| 20  | 1  | 8124558453  | 20.4 |
| 20  | 3  | 9189864270  | 18.3 |
| 20  | 10 | 11175690000 | 14.6 |
| 20  | 30 | 13366860000 | 10.8 |
| 30  | 1  | 2967895591  | 36.6 |
| 30  | 3  | 3762946603  | 34.2 |
| 30  | 10 | 5489706539  | 28.9 |
| 30  | 30 | 7521046718  | 23.7 |
| 40  | 1  | 997268931   | 41.9 |
| 40  | 3  | 1316360413  | 42.8 |
| 40  | 10 | 2234456787  | 41.2 |
| 40  | 30 | 3439277003  | 39.0 |

## APÊNDICE H

Dados de módulo complexo e ângulo de fase da mistura EVA5 para cálculos dos parâmetros de Huet-Sayegh através do software Viscoanalyse.

|     |    |             |      |
|-----|----|-------------|------|
| 7   | 4  |             |      |
| -10 | 1  | 23365591277 | 4.5  |
| -10 | 3  | 24010142657 | 3.9  |
| -10 | 10 | 25068935702 | 2.7  |
| -10 | 30 | 26910093320 | 0.8  |
| 0   | 1  | 17906392462 | 8.8  |
| 0   | 3  | 18976846055 | 7.8  |
| 0   | 10 | 20710855489 | 6.0  |
| 0   | 30 | 23008766440 | 3.7  |
| 10  | 1  | 14942088841 | 12.1 |
| 10  | 3  | 16065553999 | 10.9 |
| 10  | 10 | 18080482653 | 8.6  |
| 10  | 30 | 20530277669 | 6.0  |
| 15  | 1  | 13567226743 | 13.7 |
| 15  | 3  | 14857734559 | 12.2 |
| 15  | 10 | 17001835104 | 9.7  |
| 15  | 30 | 19632531388 | 6.8  |
| 20  | 1  | 8754265826  | 20.6 |
| 20  | 3  | 9998627749  | 19.1 |
| 20  | 10 | 12355948715 | 15.8 |
| 20  | 30 | 15061586526 | 12.2 |
| 30  | 1  | 2859391419  | 31.5 |
| 30  | 3  | 3644464636  | 31.0 |
| 30  | 10 | 5407618218  | 28.6 |
| 30  | 30 | 7658471562  | 25.0 |
| 40  | 1  | 1063623082  | 31.3 |
| 40  | 3  | 1303197563  | 33.4 |
| 40  | 10 | 1975668477  | 35.9 |
| 40  | 30 | 2984685391  | 38.1 |

## APÊNDICE I

Dados de módulo complexo e ângulo de fase da mistura EVA7,5 para cálculos dos parâmetros de Huet-Sayegh através do software Viscoanalyse.

|     |    |             |      |
|-----|----|-------------|------|
| 7   | 4  |             |      |
| -10 | 1  | 24406653375 | 3.8  |
| -10 | 3  | 24916727939 | 3.2  |
| -10 | 10 | 25873997697 | 2.1  |
| -10 | 30 | 27519230607 | 0.4  |
| 0   | 1  | 18639279652 | 8.9  |
| 0   | 3  | 19697900132 | 7.8  |
| 0   | 10 | 21437152245 | 5.8  |
| 0   | 30 | 23675498331 | 3.3  |
| 10  | 1  | 13355982688 | 15.4 |
| 10  | 3  | 14676423411 | 13.7 |
| 10  | 10 | 16949524306 | 10.7 |
| 10  | 30 | 19539609788 | 7.4  |
| 15  | 1  | 10482072464 | 18.6 |
| 15  | 3  | 11800305190 | 17.0 |
| 15  | 10 | 14205979092 | 13.9 |
| 15  | 30 | 16928317727 | 10.2 |
| 20  | 1  | 7014258487  | 24   |
| 20  | 3  | 8234593134  | 22.6 |
| 20  | 10 | 10714011873 | 19.1 |
| 20  | 30 | 13562776767 | 14.9 |
| 30  | 1  | 3017676870  | 30.0 |
| 30  | 3  | 3707423274  | 30.3 |
| 30  | 10 | 5367446736  | 29.0 |
| 30  | 30 | 7551140383  | 26.1 |
| 40  | 1  | 893171775   | 28.2 |
| 40  | 3  | 1088222173  | 30.7 |
| 40  | 10 | 1628108435  | 34.7 |
| 40  | 30 | 2435030712  | 39.0 |

## APÊNDICE J

Dados de módulo complexo e ângulo de fase da mistura BBME para cálculos dos parâmetros de Huet-Sayegh através do software Viscoanalyse.

|     |    |             |      |
|-----|----|-------------|------|
| 7   | 4  |             |      |
| -10 | 1  | 12070000000 | 4.4  |
| -10 | 3  | 12743000000 | 2.9  |
| -10 | 10 | 13065000000 | 2.6  |
| -10 | 30 | 13704000000 | 1.5  |
| 0   | 1  | 10846000000 | 6.9  |
| 0   | 3  | 11538000000 | 6.2  |
| 0   | 10 | 12305000000 | 4.4  |
| 0   | 30 | 13012000000 | 2.5  |
| 10  | 1  | 7637000000  | 15.5 |
| 10  | 3  | 8853000000  | 11.5 |
| 10  | 10 | 9861000000  | 8.6  |
| 10  | 30 | 11542000000 | 4.9  |
| 15  | 1  | 5707000000  | 23.2 |
| 15  | 3  | 7129000000  | 17.4 |
| 15  | 10 | 8421000000  | 12.7 |
| 15  | 30 | 9150000000  | 7.3  |
| 20  | 1  | 3880000000  | 31.8 |
| 20  | 3  | 5316000000  | 24.4 |
| 20  | 10 | 6764000000  | 18.8 |
| 20  | 30 | 7761000000  | 11.5 |
| 30  | 1  | 1788000000  | 44.3 |
| 30  | 3  | 2362000000  | 40.9 |
| 30  | 10 | 3594000000  | 33.7 |
| 30  | 30 | 4290000000  | 26.0 |
| 40  | 1  | 997000000   | 37.6 |
| 40  | 3  | 1257000000  | 45.2 |
| 40  | 10 | 1682000000  | 45.2 |
| 40  | 30 | 2194000000  | 42.0 |

## APÊNDICE K

Dados de módulo complexo e ângulo de fase da mistura BBM para cálculos dos parâmetros de Huet-Sayegh através do software Viscoanalyse.

|     |    |             |      |
|-----|----|-------------|------|
| 6   | 4  |             |      |
| -10 |    |             |      |
| -10 |    |             |      |
| -10 |    |             |      |
| -10 |    |             |      |
| 0   | 1  | 9215000000  | 7.8  |
| 0   | 3  | 9572000000  | 6.8  |
| 0   | 10 | 10570000000 | 4.2  |
| 0   | 30 | 11059000000 | 3.4  |
| 10  | 1  | 6715000000  | 15.1 |
| 10  | 3  | 7714000000  | 11,6 |
| 10  | 10 | 8681000000  | 9.0  |
| 10  | 30 | 9563000000  | 5.0  |
| 15  | 1  | 5219000000  | 21.5 |
| 15  | 3  | 6570000000  | 16.3 |
| 15  | 10 | 7512000000  | 12.8 |
| 15  | 30 | 8149000000  | 7.8  |
| 20  | 1  | 3814000000  | 29.0 |
| 20  | 3  | 5013000000  | 23.0 |
| 20  | 10 | 6262000000  | 17.6 |
| 20  | 30 | 6758000000  | 11.5 |
| 30  | 1  | 1659000000  | 43.3 |
| 30  | 3  | 2135000000  | 41.0 |
| 30  | 10 | 3197000000  | 33.7 |
| 30  | 30 | 3765000000  | 25.8 |
| 40  | 1  | 967000000   | 39.0 |
| 40  | 3  | 1185000000  | 43.9 |
| 40  | 10 | 1618000000  | 44.8 |
| 40  | 30 | 1935000000  | 43.2 |