

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE  
MODIFICADO POR POLÍMERO EVA E RESÍDUO DA  
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA AS VIAS URBANAS DE  
MANAUS**

DANIELA MUNIZ D'ANTONA GUIMARÃES

MANAUS  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIELA MUNIZ D'ANTONA GUIMARÃES

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE  
MODIFICADO POR POLÍMERO EVA E RESÍDUO DA  
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA AS VIAS URBANAS DE  
MANAUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Consuelo Alves da Frota

MANAUS  
2009

DANIELA MUNIZ D'ANTONA GUIMARÃES

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTE  
MODIFICADO POR POLÍMERO EVA E RESÍDUO DA  
CONSTRUÇÃO CIVIL PARA AS VIAS URBANAS DE  
MANAUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de fevereiro de 2009.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Consuelo Alves da Frota, Presidente**  
Universidade Federal do Amazonas

---

**Dr<sup>a</sup>. Leni Figueiredo Mathias Leite, Membro**  
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello -  
PETROBRÁS

---

**Prof. Dr. Francisco dos Santos Rocha, Membro**  
Universidade Federal do Amazonas

DEDICO ESTE TRABALHO A MINHA MÃE,  
MEU ESPOSO, E MEU FILHO. PELO APOIO E  
ESTÍMULO PRESTADOS AO LONGO DESTA  
CAMINHADA.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiro a Deus, pois nada acontece sem Sua vontade.

À minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Consuelo Alves da Frota, por ter me inserido no meio científico, por proporcionar tantas oportunidades de crescimento e conhecimento, além do incentivo, compreensão, conselhos e amizade.

À minha querida e generosa mãe, Vera Muniz, por toda sua dedicação para que eu conseguisse alcançar meus objetivos. Ao meu esposo, Élio Guimarães, pelos estímulos e também a toda família, que sempre me apoiaram e compreenderam a minha ausência em diversos momentos.

À Dr<sup>ª</sup>. Leni Leite, pelo exemplo de ser humano, sempre disposta a ajudar a todos com o seu conhecimento e alegria contagiante. Agradeço também a Dr<sup>ª</sup>. Laura Motta pela sua paciência em transmitir o conhecimento em Mecânica dos pavimentos em suas longas viagens até Manaus e também por apresentar toda a grandeza da área de pavimentação em minha visita a COPPE.

Aos colegas do grupo Geotec: Carmem Alencar, Cleudinei da Silva, Fábio Nunes e Francisco pelo estímulo e companheirismo. Em especial a Graça Ruffino e Diego Meneses, por toda dedicação, execução e exaustivas discussões a respeito dos ensaios laboratoriais compartilhados nesta pesquisa.

Aos colegas do CENPES: Mariana, Margot, Priscila, Diego e Luis Nascimento, pela paciência na realização dos ensaios de caracterização dos ligantes e informações prestadas para esta dissertação. Aos colegas da COPPE: Álvaro Delle e Ana Maria pela grande disposição em ensinar diversos ensaios relacionados a pavimentação.

Por fim agradeço à Capes pela bolsa auxílio, Petrobrás REMAN pelo fornecimento do CAP, Petrobrás CENPES pela realização dos ensaios com ligantes e fornecimento do polímero e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

## RESUMO

Esta dissertação descreve uma pesquisa experimental em laboratório que buscou utilizar materiais alternativos para construir pavimentos urbanos condizentes com as condições de serviço. A capital do Amazonas apresenta características climáticas e geológicas peculiares, com temperaturas elevadas e alto índice pluviométrico, aliadas à escassez de material pétreo. Foi estudado o ligante amplamente empregado nos revestimentos da região, CAP 50/70, e, como alternativa, ao mesmo foi incorporado 4% do polímero EVA. A modificação tem o objetivo de melhorar as propriedades reológicas que possam beneficiar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Como alternativa ao seixo rolado, obtido por dragagem de rios e usualmente empregado nas obras locais, foi utilizado o resíduo da construção civil reciclado, devido a sua superfície irregular e rugosa. Utilizou-se o método de Bailey para a seleção da granulometria dos agregados, com a finalidade de tornar efetivo o contato grão a grão dos materiais empregados. Os ligantes foram caracterizados conforme a especificação da ANP e também segundo a metodologia Superpave. As misturas asfálticas foram avaliadas à luz dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e também pelo ensaio de fluência por compressão axial com carregamento dinâmico em três temperaturas: 25°C, 40°C e 64°C. O agregado reciclado apresentou alta absorção, baixa densidade relativa e também resistência a abrasão no limite especificado pelo DNIT. O ligante modificado com EVA demonstrou melhores propriedades reológicas ou equivalentes ao asfalto convencional, ao longo de todos os ensaios de caracterização. Pela metodologia Superpave, ambos os ligantes foram classificados como PG 70-16, com desempenho superior ao requerido pelo Município de Manaus. Embora as misturas compostas por Seixo e CAP 50/70 tenham obtido a maior resistência à tração, os corpos de prova constituídos por tais misturas não concluíram o ensaio de compressão axial dinâmico a temperatura de 64°C. As misturas formadas pelo agregado reciclado (RCD) apresentaram menor suscetibilidade à deformação permanente. O aumento da temperatura, evidenciou os benefícios do polímero EVA, sugerindo menor suscetibilidade térmica.

Palavras - chave: Ligante modificado. Polímero EVA. Resíduo da construção civil. Método de Bailey. Ensaio de compressão axial dinâmico. Mistura asfáltica. Pavimento.

## ABSTRACT

This dissertation describes an experimental research work that looked for alternative urban pavement materials, which would prove appropriate to the service conditions. The capital of the State of Amazonas (Brazil) features specific climatic and geological characteristics with high temperatures and high precipitation rates combined to a dearth of stony material. CAP 50/70, an asphalt binder highly used in the region was studied, and as an alternative, a 4% of EVA polymer was added to the original binder. The modification has the purpose of improving the rheological properties, which would enhance the mechanical properties of the asphalt mixture. The recycled civil construction waste owing to its rough and irregular surface was used as an alternative to the roller pebbles, which is obtained through river mining, and is widely employed in the local civil construction. The Bailey Method was used to select the aggregate gradation with the goal of enabling the particle-to-particle contact of the used materials. The asphalt binders were characterized in accordance with ANP (National Petroleum Agency) specification and also in accordance with the SUPERPAVE methodology. The asphalt mixtures were characterized by their mechanical properties ascertained through tensile strength tests by diametric compression (RT) and creep dynamics at three temperatures: 25°C, 40°C and 64°C. The recycled aggregate showed high absorption, low relative density and also abrasion resistance at the limit specified by DNIT (the National Department for Transportation Infrastructure). The EVA modified binder has demonstrated either better rheological properties or properties equivalent to the conventional asphalt throughout all the characterization experiments. By the SUPERPAVE methodology, both binders were classified as PG 70-16 with a performance that is superior to the binder that is required by the Municipal District of Manaus. Although the mixtures made up of pebble and CAP 50/70 have obtained the highest strength to traction, the test specimens made up of such mixtures have failed to complete the creep strength by axial compression at 64°C. The mixtures formed by the recycled aggregate (RCD) have shown a lower susceptibility to rutting resistance. The increase in temperature has highlighted the benefits provided by the EVA polymer, thus suggesting lower thermal susceptibility.

Keywords: Modified binder. EVA Polymer. Civil Construction Waste. Bailey Method. Dynamic axial compression test. Asphalt mixture. Pavement.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-1: Exemplos de deformação plástica em trilha de roda e escorregamento do revestimento em Manaus.....	17
Figura 2.3-1:Estágios da curva de fluência (MOHAMMED e YUE, 1994).....	45
Figura 2.3-2 - Estrutura molecular do polímero EVA (LEITE,1999) .....	54
Figura 3.1-1: Amostra do agregado graúdo seixo .....	58
Figura 3.1-2: Seleção do Resíduo de Construção e Demolição .....	59
Figura 3.1-3: Etapa de Britagem.....	60
Figura 3.1-4: Agregado Graúdo RCD após reciclagem.....	60
Figura 3.1-5: Amostra de copolímero de etileno e acetato e vinila .....	61
Figura 3.1-6: Misturador: controlador de temperatura, agitador mecânico e manta. Equipamento utilizado para: (a) ensaios de caracterização de ligante realizado no CENPES e (b) confecção das misturas no Laboratório do Grupo de Geotecnia da UFAM.....	62
Figura 3.2-1: Grau de desempenho requerido para ligantes no Brasil (Leite e Tonial, 1994) .	64
Figura 3.2-2: Amostra de ligante em banho a 25°C no ensaio de Densidade Relativa .....	65
Figura 3.2-3: (a) Penetrômetro (b) Cuba de transferência com amostra (c) Deslocamento após 5 segundos .....	66
Figura 3.2-4: (a) Início do ensaio de Ponto de Amolecimento e (b) Término do ensaio de Ponto de Amolecimento.....	67
Figura 3.2-5: (a) Recipiente com ligante usado (b) na estufa de fino filme rotativo.....	68
Figura 3.2-6: Ensaio de Envelhecimento PAV: (a) amostra sendo colocada no (b) vaso de pressão, (c) vista frontal e (d) amostra após envelhecimento.....	69
Figura 3.2-7: Preparação das amostras para ensaio DSR.....	70
Figura 3.2-8: (a) Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, modelo CSA II e (b) Detalhes: cuba para banho, disco oscilatório e espátula aparando excesso de ligante.....	70

Figura 3.2-9: (a e b) Montagem do molde e (c) Colocação do ligante .....	71
Figura 3.2-10: (a) Calibração e (b) Posicionamento da viga de ligante.....	72
Figura 3.2-11: (a) Cilindro coaxiais (b) Disposição das amostras nos cilindros.....	73
Figura 3.2-12: Viscosímetro rotacional Brookfield.....	73
Figura 3.2-13: (a) amostra de seixo imersa em água destilada, (b) secagem da superfície do agregado .....	77
Figura 3.2-14: (a) amostra de areia imersa em água destilada, (b) secagem da amostra.....	78
Figura 3.2-15: Teste do cone para verificação da condição saturada superfície seca, no agregado fino .....	78
Figura 3.2-16: Pesagem na condição: (a) seca (b) submersa (c) saturada superfície seca.....	79
Figura 3.2-17: Densidade relativa da mistura compactada utilizando-se parafina.....	80
Figura 3.2-18: Ensaio densidade máxima medida, aplicação de vácuo.....	82
Figura 3.2-19: (a) Aquecimento dos agregados, (b) Aquecimento do ligante, (c) mistura dos componentes .....	86
Figura 3.2-20: (a) Despejo da mistura no molde, (b) Compactador Marshall automático .....	87
Figura 3.2-21: Vista geral da câmara de temperatura e do aquisitor de dados da UTM .....	88
Figura 3.2-22: Vista interna da câmara de temperatura, com detalhe da célula de carga e da câmara de ar da UTM.....	89
Figura 3.2-23: (a) Vista geral do ensaio RT (b) Posicionamento do CP (c) Corpo-de-prova após ensaio .....	90
Figura 3.2-24: (a) Vista geral e (b) Detalhes do ensaio compressão uniaxial dinâmico .....	91
Figura 4.3-1: Curva Granulométrica: seixo, areia e cimento <i>Portland</i> – Misturas SMAN e SEVA .....	113
Figura 4.3-2 - Curva Granulométrica: RCD, areia e cimento <i>Portland</i> - Mistura RMAN e REVA.....	113

Figura 4.4-1: Corpo-de-prova com agregado graúdo Seixo após ensaio de RT .....	119
Figura 4.4-2: Corpo-de-prova com agregado graúdo RCD após ensaio de RT .....	119
Figura 4.4-3: Corpo-de-prova da mistura SMAN antes e após ensaio de <i>Creep</i> Dinâmico à 64°C.....	122
Figura 4.4-4: Corpo-de-prova da mistura SEVA após e antes do ensaio <i>Creep</i> dinâmico a 64°C .....	123
Figura 4.4-5: Corpo-de-prova da mistura REVA antes e após ensaio a 64°C .....	126

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.2-1: Viscosidade x Temperatura do ligante REMAN e AMP EVA .....	87
Gráfico 4.1-1: Curva Granulométrica do seixo, RCD e areia .....	94
Gráfico 4.2-1: Resultado do ensaio de Penetração - REMAN e AMP EVA .....	97
Gráfico 4.2-2: Resultado ensaio Ponto de Amolecimento pelo Anel e Bola .....	98
Gráfico 4.2-3: Resultado da perda de massa nos ligantes após ensaio de Envelhecimento em RTFOT .....	99
Gráfico 4.2-4: Comparação dos resultados segundo o ensaio DSR antes e após envelhecimento em RTFOT .....	104
Gráfico 4.2-5: Comportamento elástico e viscoso dos ligantes a 70°C .....	105
Gráfico 4.2-6: Resultado de Fadiga obtida pelo Reômetro de Cisalhamento Dinâmico .....	107
Gráfico 4.2-7: Resultado ensaio reômetro de fluência em viga .....	108
Gráfico 4.2-8: Resultado ensaio de viscosidade dinâmica.....	109
Gráfico 4.2-9: Grau de Desempenho relativo ao REMAN, AMP EVA e o requerido para Manaus .....	111
Gráfico 4.4-1: Resultado do ensaio de Resistência à Tração .....	117
Gráfico 4.4-2: Comparação de resultados da seleção granulométrica convencional x seleção Bailey .....	118
Gráfico 4.4-3: Deformação específica x variação de temperatura para mistura SMAN .....	121
Gráfico 4.4-4: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura SMAN.....	121
Gráfico 4.4-5: Deformação específica x variação de temperatura para mistura SEVA .....	123
Gráfico 4.4-6: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura SEVA.....	124
Gráfico 4.4-7: Deformação específica x variação de temperatura para mistura RMAN.....	125
Gráfico 4.4-8:Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura RMAN .....	125
Gráfico 4.4-9: Deformação específica x temperatura para mistura REVA .....	126

Gráfico 4.4-10:Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura REVA .....	127
Gráfico 4.4-11: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 25°C .....	127
Gráfico 4.4-12: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 40°C .....	128
Gráfico 4.4-13: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 64°C .....	129
Gráfico 4.4-14: Resumo do Ensaio Compressão Uniaxial com carregamento dinâmico em várias temperaturas .....	131
Gráfico 4.4-15: Resultado do ensaio de Compressão Uniaxial Dinâmico pelo GEOTEC ....	133

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-1: Composições de resíduos de novas construções .....	30
Tabela 2.1-2: Composição do RCD, em percentual, Carneiro <i>et al.</i> (2001) (*) Solo, areia e rocha (**) Material misto (cerâmica, concreto e argamassa).....	31
Tabela 2.1-3 - Porcentagem estimada de materiais contaminantes Motta (2005).....	31
Tabela 2.1-4: Valores extremos, médio e coeficiente de variação para absorção de água por imersão 24 horas, em %, Ângulo (1998).....	34
Tabela 3.2-1:Parâmetros das especificações <i>Superpave</i> .....	69
Tabela 3.2-2: Temperatura inicial e incrementos usados nos ensaios DSR.....	70
Tabela 4.1-1: Composição granulométrica dos agregados.....	93
Tabela 4.1-2: Características dos Agregados .....	95
Tabela 4.1-3: Especificação DNIT - Material de enchimento em misturas asfálticas.....	95
Tabela 4.2-1: Resultado do ensaio de Penetração - REMAN e AMP EVA.....	97
Tabela 4.2-2: Características do CAP REMAN x Especificação Brasileira (ANP,2005) .....	101
Tabela 4.2-3: CAP modificado com EVA x Especificação Brasileira (ANP,2005).....	102
Tabela 4.2-4: Resultado DSR - deformação permanente para o ligante REMAN .....	103
Tabela 4.2-5: Resultado DSR - deformação permanente para o ligante AMP EVA.....	103
Tabela 4.2-6: Resultado DSR - fadiga para o ligante REMAN .....	106
Tabela 4.2-7: Resultado DSR - fadiga para o ligante AMP EVA .....	106
Tabela 4.2-8: Resultado ensaio BBR da amostra CAP REMAN .....	107
Tabela 4.2-9: Resultado ensaio BBR da amostra AMP EVA .....	107
Tabela 4.2-10: Resumo critérios Superpave e resultados .....	110
Tabela 4.3-1: Resultado da seleção granulométrica pelo Método de Bailey .....	111
Tabela 4.3-2: Resultado do estudo de dosagem das misturas de CA estudadas.....	115
Tabela 4.3-3: Composição das Misturas de Concreto Asfáltico .....	116

Tabela 4.4-1: Resultado do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral.....	116
Tabela 4.4-2: Ensaio RT pelo GEOTEC (Frota <i>et al.</i> , 2007) .....	118
Tabela 4.4-3: Resultado do <i>Creep</i> Dinâmico para a mistura SMAN .....	120
Tabela 4.4-4: Resultado do <i>Creep</i> Dinâmico para a mistura SEVA .....	122
Tabela 4.4-5: Resultado do <i>Creep</i> Dinâmico para a mistura RMAN .....	124
Tabela 4.4-6: Resultado do <i>Creep</i> Dinâmico para a mistura REVA.....	126
Tabela 4.4-7: Resultado do ensaio Compressão Uniaxial Dinâmico pelo GEOTEC.....	132

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>20</b>
1.1.1 Geral .....	20
1.1.2 Específicos .....	20
<b>1.2 Organização da Dissertação .....</b>	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Resíduo de Construção e Demolição .....</b>	<b>22</b>
2.1.1 Reciclagem e Aplicação .....	23
2.1.2 Processo de reciclagem para uso como agregado .....	25
2.1.3 Usinas de Reciclagem no Brasil.....	26
2.1.4 Pavimentação com agregado reciclado.....	28
2.1.5 Caracterização .....	29
2.1.6 Composição e Variabilidade .....	29
2.1.7 Abrasão .....	31
2.1.8 Absorção e Porosidade .....	33
2.1.9 Índice de Forma.....	34
2.1.10 Contaminação.....	35
<b>2.2 Método de Bailey .....</b>	<b>36</b>
2.2.1 Combinação dos agregados por meio do volume .....	37
2.2.2 Análise da combinação resultante da mistura.....	38
<b>2.3 Revestimento.....</b>	<b>39</b>
2.3.1 Deformação Permanente.....	40
2.3.2 <i>Creep</i> Estático e Dinâmico .....	43



2.3.3	Ligantes .....	45
2.3.3.1	Cimento Asfáltico de Petróleo .....	46
2.3.3.2	Composição química e reologia do CAP .....	47
2.3.4	Polímeros .....	50
2.3.5	Modificação do ligante asfáltico com polímeros .....	51
2.3.5.1	Vantagens do ligante asfáltico modificado com polímeros .....	52
2.3.5.2	Polímero EVA.....	53
2.3.6	Experiências em campo .....	55
2.3.7	Especificações .....	56
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>58</b>
3.1.1	Agregados e Material de Enchimento .....	58
3.1.2	Ligantes asfálticos .....	61
<b>3.2</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>62</b>
3.2.1	Caracterização dos Ligantes .....	62
3.2.1.1	Ensaio Tradicionais.....	64
3.2.1.2	Ensaio <i>Superpave</i> .....	67
3.2.2	Projeto de Mistura .....	74
3.2.2.1	Seleção da Granulometria pelo Método de Bailey .....	75
3.2.2.2	Determinação do Teor de Projeto.....	78
3.2.3	Confecção dos corpos-de-prova.....	86
3.2.4	Ensaio Mecânicos .....	88
3.2.4.1	Ensaio de Resistência à Tração .....	89
3.2.4.2	Ensaio Compressão Axial Dinâmico.....	90
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>	<b>93</b>

<b>4.1 Caracterização dos Agregados .....</b>	<b>93</b>
<b>4.2 Caracterização do Ligante.....</b>	<b>96</b>
4.2.1 Ensaio Tradicionais.....	96
4.2.2 Ensaio Superpave.....	102
<b>4.3 Projeto de Misturas .....</b>	<b>111</b>
4.3.1 Seleção Granulométrica Bailey.....	111
4.3.2 Teor de projeto de ligante .....	114
<b>4.4 Ensaio Mecânico em Misturas.....</b>	<b>116</b>
4.4.1 Resistência à tração .....	116
4.4.2 Fluência por compressão uniaxial dinâmica .....	119
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>134</b>
<b>5.1 Caracterização dos Agregados .....</b>	<b>134</b>
<b>5.2 Caracterização do Ligante.....</b>	<b>134</b>
<b>5.3 Ensaio em Misturas .....</b>	<b>135</b>
<b>5.4 Sugestões para continuação da pesquisa: .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As vias urbanas da capital do Estado do Amazonas mostram prematura deterioração. Diversos fatores contribuem para a redução da vida útil das citadas vias: o crescimento do número de veículos, elevando as cargas impostas ao pavimento; o tráfego intenso e lento canalizado de veículos pesados, como exemplo nos corredores de ônibus; os esforços cisalhantes devido à aceleração e frenagem em paradas de ônibus e semáforos; a falta de um planejamento estratégico de manutenção e, principalmente, um pavimento inadequado tecnicamente.

Diversas patologias são encontradas nos revestimentos locais: afundamento em trilha de roda, desgaste superficial, escorregamento do revestimento, panelas e trincas. Na camada do revestimento destacam-se os defeitos oriundos de deformação plástica e fluência como pode ser visualizados na Figura 1.1-1.



Figura 1.1-1: Exemplos de deformação plástica em trilha de roda e escorregamento do revestimento em Manaus

Como causa principal aludi-se o emprego de misturas betuminosas incompatíveis com as condições de serviço: compostas com excesso de agregados finos e de ligante, ausência de agregados graúdos, baixa aderência e coesão, ligante com viscosidade imprópria para temperatura em campo.

Em geral, as misturas asfálticas são submetidas a pesados e repetidos esforços pelo tráfego. A princípio, tendem a se recuperar elasticamente, mas apresentam uma parcela não

recuperável. Ao acumular deformações residuais, não retornam ao seu estado inicial, gerando, assim, deformação plástica ou permanente. Estas deformações podem ser visualizadas no pavimento por meio dos afundamentos em trilhas-de-roda, podendo, também, serem acompanhadas de escorregamento do revestimento asfáltico para o meio-fio da pista. Esses tipos de defeito no pavimento provocam desconforto e perigo ao rolamento dos veículos.

Manaus apresenta clima quente e úmido, com períodos de chuvas e estiagem alternados em torno de seis meses. Tais intempéries alteram expressivamente o revestimento betuminoso, devido ao comportamento reológico do cimento asfáltico de petróleo. Climas quentes, como ocorre nesta região do presente estudo, tornam as misturas asfálticas mais suscetíveis à deformação permanente, devido à redução da viscosidade do CAP, além de contribuírem para o aceleração do envelhecimento do ligante.

A busca sempre constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos levou ao desenvolvimento e uso de asfaltos modificados, visando ampliar a sua utilização. Por exemplo, a adição de polímeros aos ligantes asfálticos tradicionais é uma forma de melhorar suas características físicas e reológicas, que se traduzem na melhoria nas suas propriedades: maior coesão, maior adesão aos agregados, maior resistência ao envelhecimento e susceptibilidade térmica, mais adequabilidade em toda a faixa de utilização de temperatura do pavimento, refletindo em maior resistência à fadiga e à deformação permanente, (LEITE, 1999).

Pautado no objetivo de aumentar a consistência do ligante sob altas temperaturas, optou-se, neste trabalho, adicionar o polímero EVA ao ligante empregado regionalmente. Devido ao comportamento viscoelástico do cimento asfáltico de petróleo, decidiu-se analisar a suscetibilidade das misturas quanto à deformação permanente sob variação térmica. Para realização do ensaio, a temperatura máxima do pavimento no estado do Amazonas foi

estabelecida, fundamentada nos estudos de Leite e Tonial (1994), em 64°C e as demais, 25°C e 40°C, foram estipuladas com base nos padrões utilizados no meio técnico.

Por outro lado, a região amazônica se revela deficitária em matéria-prima granular, em face das condições desfavoráveis da sua formação geológica. Manaus está assentada sobre sedimentos meso-cenozóicos da formação Alter do Chão, com um subsolo formado por espessa camada de material inconsolidado, proveniente de um intenso processo de intemperismo, sobre um substrato rochoso formado pela alternância de arenitos, siltitos e argilitos, segundo Fernandes Filho (1996).

O substituto regional ao agregado pétreo tem sido o material oriundo do leito dos rios da Amazônia. Todavia, o processo de extração do seixo rolado ocasiona impacto ao ecossistema fluvial, existindo fortes restrições ao seu uso em decorrência dos prejuízos ambientais. Este material aluvionar apresenta superfície lisa e forma arredonda, cujas características são normalmente desfavoráveis para o seu emprego como agregado graúdo em misturas asfálticas.

Vem sendo pesquisado pelo grupo GEOTEC da UFAM, como uma alternativa ao agregado pétreo, o agregado reciclado oriundo dos resíduos da construção civil (FROTA; MENTA; NUNES, 2003; FROTA; ALENCAR; SILVA, 2004; FROTA; MELO; NUNES, 2005a). Também, estudos apontam que nas cidades de médio e grande porte os resíduos sólidos, gerados pela construção civil, atingem uma faixa de 50 a 80% do total em massa de resíduos sólidos urbanos. Mostrando, portanto, a reciclagem como uma solução técnico-econômica adequada para a disposição desse material, favorecendo a preservação de um meio ambiente saudável, em benefício do corpo social (PINTO, 1999).

De acordo com Monteiro *et al.* (2001) e John (2000), os benefícios da reciclagem são:

- a) redução da utilização de aterros;
- b) redução no consumo de recursos naturais não-renováveis;
- c) mitigação dos problemas ambientais urbanos, gerados pela deposição

indiscriminada de entulhos; d) redução dos impactos ambientais das atividades de mineração e) disposição no mercado de materiais de construção a custo mais baixo e f) criação de novos postos de trabalho para mão-de-obra com baixa qualificação.

Na camada do revestimento, objeto desta pesquisa, o agregado é responsável por formar a estrutura de sustentação da mistura asfáltica, cuja função é resistir majoritariamente à compressão oriunda do carregamento do tráfego. Motivada pelas características relacionadas à forma e textura do agregado reciclado, pretende-se, com a sua utilização neste trabalho, aumentar o atrito interno da mistura contribuindo para maior resistência ao carregamento. Visando, ainda, proporcionar maior estabilidade ao esqueleto estrutural da mistura buscou-se, efetuar a seleção granulométrica dos componentes pelo método de Bailey.

Almeja-se, nesta dissertação, proporcionar alternativas visando à pavimentação do sistema viário da capital do Estado do Amazonas, por meio do estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico (CA), quanto à deformação permanente, segundo o ensaio de fluência por compressão axial dinâmico (*creep* dinâmico). Examina-se, também, seu desempenho sob os efeitos da variação de temperatura.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas empregando asfaltos modificados por polímero EVA e material granular, oriundo do resíduo de construção e demolição local, para uso nos pavimentos de Manaus - AM.

### **1.1.2 Específicos**

- a) Caracterizar o ligante asfáltico usual e o modificado por polímero EVA;
- b) Caracterizar o agregado convencional e o resíduo procedente de construção e demolição;
- c) Obter a seleção granulométrica pelo método de Bailey;
- d) Estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas, quanto à suscetibilidade à deformação permanente, por meio do ensaio de *creep* dinâmico;

- e) Avaliar as misturas asfálticas quanto a variações térmicas e a capacidade de resistir a deformações residuais.

## 1.2 Organização da Dissertação

O presente trabalho se encontra assim organizado:

**Capítulo 1:** Apresenta uma perspectiva geral da pesquisa, a necessidade do uso misturas asfálticas mais resistentes, bem como os objetivos e organização da estrutura desta dissertação.

**Capítulo 2:** Expõe os aspectos referentes aos principais estudos relacionados à deformação permanente no revestimento asfáltico. Aborda, também, as características e as propriedades do ligante modificado com o polímero EVA e do agregado reciclado oriundo do resíduo de construção e demolição.

**Capítulo 3:** Discute a metodologia e normas empregadas para caracterização dos materiais, os procedimentos para seleção dos componentes no projeto das misturas asfálticas, assim como os ensaios mecânicos.

**Capítulo 4:** Discute os resultados obtidos na presente dissertação

**Capítulo 5:** São explicitadas as conclusões alcançadas neste trabalho e as sugestões visando à continuação desta pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resíduo de Construção e Demolição

Os resíduos são gerados por meio das diversas atividades humanas. Nas últimas décadas, o intenso processo de urbanização causou uma produção desordenada dos mesmos, suscitando diversos problemas envolvendo saneamento e impactos ambientais, como exemplo, a necessidade de maiores áreas urbanas para sua disposição.

Na década de 90 as questões ambientais foram intensamente mencionadas, motivadas pela Eco-92 e Agenda 21. Um dos temas abordados foi a necessidade do desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil, onde foram discutidos: uso de matéria-prima de fontes renováveis, a reciclagem e implementação de sistema para gestão de resíduos.

O relatório da Agenda 21 — *On Sustainable Construction* afirma que o setor de construção civil suscita, aproximadamente, 40% do total produzido pela sociedade. Diante deste quadro, considera-se que grande parte dos resíduos provenientes de construções e demolições (RCD) podem ser reciclados e re-utilizados. Este processo pode levar mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos e na orientação do desenvolvimento tecnológico.

Pinto (1999) afirma que os países europeus e o Japão, dada as suas densidades demográficas, a escassez de espaços para o alojamento de resíduos sólidos, elevada industrialização e carência de recursos naturais, foram os pioneiros no desenvolvimento de políticas mais elaboradas e na consolidação quanto ao gerenciamento dos resíduos da construção civil. O citado autor relata, ainda, sobre o desconhecimento dos gestores relacionados aos dos resíduos da construção civil: os volumes gerados, impactos causados, custos sociais envolvidos e possibilidades de utilização.

A Resolução 307 do CONAMA, de julho de 2002, vem ao encontro destas mudanças estabelecendo diretrizes para redução dos impactos ambientais oriundos dos resíduos da



construção civil. Esta resolução determina que os geradores são os responsáveis pela destinação e os Municípios devem elaborar um Plano Integrado de Gerenciamento dos mesmos. Além de classificá-los e designar sua possível utilização.

A ABNT publicou, em 2004, algumas normas sobre resíduos:

- a) NBR 10.004/87: Classificação dos resíduos sólidos ;
- b) NBR 15.113/04: Diretrizes de projeto para implantação e operação de aterros;
- c) NBR 15.114/04: Diretrizes de projeto para implantação e operação de áreas de reciclagem;
- d) NBR 15.116: Requisitos para uso de agregados reciclados em pavimentação e preparo de concreto sem fim estrutural;
- e) NBR 15.115/04: Procedimentos para execução de camadas de pavimentação com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

No Brasil existem diversas pesquisas relativas ao uso do resíduo como agregado reciclado. Essas análises envolvem caracterização, gestão, reciclagem e aplicação na construção civil. Ângulo (2000) afirma que os estudos iniciaram com Cincotto (1983) e Pinto (1986). Autores como Levy (1997), Zordan (1997), Miranda (2000) abordam a reciclagem tanto para concretos como para argamassas. John (1996) e Schneider (2003) realizaram pesquisas envolvendo gestão.

### 2.1.1 Reciclagem e Aplicação

A aplicação do material reciclado para usos diversos depende de suas características e propriedades. De forma geral tem-se observado aplicações de sucesso do agregado reciclado em vários produtos, como apresentado em diversos trabalhos: concreto de cimento Portland sem função estrutural, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, fabricação de pré-moldados de concreto, camadas de base e sub-base de pavimentos, camadas drenantes, cobertura de aterros, blocos de vedação, briquetes, meios-fios, calçadas (CARNEIRO *et al.*, 2001b; LEVY, 1997; LIMA, 1999; PINTO, 1999).

John e Agopyan (2001) concluíram que a presença de fases mais porosas e de menor resistência mecânica, como argamassas e produtos de cerâmica vermelha e de revestimento, provocam uma redução na resistência e aumento da absorção de água. Assim, agregado misto tem sua aplicação limitada a concretos de menor resistência.

John; Ângulo; Kahn (2006) abordaram sobre as possibilidades de aplicação do citado material variarem de acordo com a composição. Exemplificam que quase totalidade da fração cerâmica pode ser beneficiada, resultando em agregado com diferentes aplicações. John e Agopyan (2001) citam que as frações compostas predominantemente por concreto estrutural e rochas naturais podem ser recicladas, retornando como agregado para a produção de concreto estrutural e também, para serem utilizados em camadas sujeitas a um maior desgaste na pavimentação.

Ângulo *et al.* (2004) estudou a separação dos componentes do RCD por meio de líquidos densos. Este método permite a segregação pela densidade das partículas constituintes. Verificaram que quase todos os contaminantes presentes (plásticos, papel e madeiras) ficaram concentrados na faixa de densidade acima de  $1,9 \text{ kg/dm}^3$ . Assim como os elementos com predominância de rocha coberta com pasta de cimento endurecida tiveram densidades acima de  $2,5 \text{ kg/dm}^3$ , no intervalo entre  $1,9$  e  $2,5 \text{ kg/dm}^3$ , prevalecendo o material cerâmico.

Produtos de gesso são indesejáveis, pois são solúveis em água e reagem com o cimento Portland causando expansão. Entretanto, John e Agopyan (2001) afirmam ainda que a reciclagem do gesso é bastante simples e está ao alcance das grandes empresas multinacionais. Por outro lado, segundo tais autores, a fração metálica é facilmente vendida à indústria da sucata, entretanto frações como a madeira, ainda, não apresentam tecnologia para reciclagem.

### 2.1.2 Processo de reciclagem para uso como agregado

O processo de beneficiamento dos resíduos da construção e demolição, como agregado reciclado, inicia com a coleta, seguida pelo transporte, triagem, britagem, peneiramento, e termina na estocagem.

As fases citadas acima que sucedem a etapa do transporte, em geral, acontecem em uma unidade recicladora. Costa (2003) relata que a localização das centrais de reciclagem tem importância estratégica num programa de gerenciamento de resíduos, devendo ser levadas em conta as distâncias dos centros geradores e do mercado consumidor.

Barros (2005) afirma que outro fator de grande relevância na implantação da unidade recicladora é o impacto ambiental que a mesma pode causar. Para evitar danos ao meio ambiente e às populações que porventura habitarem no entorno, faz-se necessário adoção de medidas que reduzam os sons causados pelos britadores bem como a emissão de poeiras. Algumas soluções geralmente empregadas consistem no uso de barreiras vegetais para diminuir a propagação de ruído e a realização de molhagem no material por sistemas nebulizadores, visando diminuir o pó levantado.

Conforme Lima (1999), os equipamentos utilizados no beneficiamento do RCD são provenientes do setor de mineração, sofrendo as devidas adaptações para uso em centrais de reciclagem. São agrupados em três tipos principais: transportadores, redução ou britagem e esteiras de separação.

Esses equipamentos podem ser fixos ou móveis. Segundo Wilburn e Goonan (1998) *apud* Costa (2003) alguns aspectos devem ser considerados para a escolha adequada: espaço necessário, potencial de passagens de grãos finos, área de descarga para britagem, mecanismos efetivos de separação magnética, remoção de impurezas e controle da poeira.

O modelo móvel tem dimensões menores, empregado, na maioria dos casos, no próprio local da obra e durante a execução da construção. O tipo fixo, mais robusto, é mais utilizado em centrais de reciclagem e indicado para processamento de quantidades grandes.

Para realização de redução ou britagem, são utilizados os trituradores, essenciais na linha de produção dos agregados reciclados. Podem ser classificados em três grupos:

- a) britadores de mandíbula: fratura o resíduo por esmagamento das partículas. Segundo Lima (1999), é utilizado como britador primário, pois não reduz muito o tamanho das partículas. Desta forma produz agregados graúdos em grande quantidade. Relata, também, suas desvantagens: não é recomendável para britagem de peças de madeira ou de maiores dimensões, pois geralmente quebram o seu eixo; apresenta alta emissão de ruídos. Hansem (1992) relaciona as suas vantagens: proporciona distribuição granulométrica mais adequada para o uso em concreto; produz apenas 20% de finos abaixo de 4,8 mm;
- b) britador de impacto: pode ser utilizado em britagem primária e secundária. Possui uma câmara de impacto na qual o material é britado por meio do choque de martelos maciços fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas. Lima (1999) aborda as vantagens do equipamento: é robusto e processa tanto peças de concreto armado quanto vigas de madeira, promove alta redução das peças britadas, produz uma quantidade de finos razoável, gera grãos de forma cúbica, detentoras de boas características mecânicas, apresenta baixa emissão de ruídos. Hansem (1992) versa, também, sobre suas desvantagens: alto custo de manutenção devido ao grande desgaste;
- c) moinho de martelo: a quebra acontece por impacto e por atrito. Segundo Chaves; Peres (2003) *apud* Motta (2005) este tipo produz grãos cúbicos e grande quantidade de finos. Não é indicado para materiais abrasivos.

### 2.1.3 Usinas de Reciclagem no Brasil

Diversos municípios brasileiros vêm operando com sucesso a reciclagem. Em 2002, tinha-se 11 usinas de reciclagem municipais (LEVY, 2002). Esse número cresceu e hoje existem usinas privadas. As escalas de produção das usinas nacionais são pequenas, tipicamente menos que 100 toneladas de RCD processado/dia (ÂNGULO, 2005).

Em Belo Horizonte, desde 1993, os resíduos gerados se transformam em minério de ferro, areia e dois tipos de brita para executar meio-fio e blocos. Destacam-se, igualmente, unidades de reciclagem nas cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo.

A prefeitura de São Paulo implantou, em 1991, uma usina de reciclagem com capacidade para 100 t/h, produzindo material para sub-base de vias secundárias.

Fundada em 1997, em São José dos Campos, a Usina de Reciclagem de Entulhos chegou a receber até 60 toneladas de resíduo misto. A taxa de processamento do entulho chegou a 30%. Sua utilização foi destinada às vias sem pavimentação, localizadas em áreas rurais. Apenas uma pequena parcela era adequada para produção de tijolos e blocos. Entretanto, foi desativada após um ano.

No ano de 1994, em Londrina-PR, foi inaugurada a Central de Moagem de Entulhos. Iniciou sua produção com 1.000 tijolos/dia objetivando a construção de casas populares. Sua produção atingiu 300 toneladas em média, com 10 a 15% do montante reciclado e utilizado como agregado. O restante é reaproveitado e empregado em pavimentações diversas, como calçamento de praças e logradouros públicos. Outro benefício dessa usina foi a extinção aproximada de 4 mil pontos de despejos clandestinos de entulho no município.

Ribeirão Preto, em média, gera 900 toneladas de resíduos por dia, sendo 25% deste material operado na Usina de Reciclagem de Entulhos da Construção Civil e utilizado na recuperação de estradas municipais sem pavimentação. O seu gerenciamento é feito pelo Dermurb.

Na cidade de Manaus, segundo o jornal “A Crítica” de 7/07/2002, a indústria da construção civil produz 185.000 t/ano de resíduos e apenas 10% desse material seria destinado ao aterro controlado da cidade, que por normalização da Prefeitura Municipal de Manaus não pode recebê-lo. Portanto, 166.000 t/ano devem ser encontrados em “bota-fora”, aterros clandestinos e lixões pela cidade, deixando de serem reutilizados na indústria da construção civil. Atualmente está em funcionamento uma unidade recicladora. Entretanto, esta atua sem parcerias com os órgãos gestores como acontece nas demais cidades brasileiras.

#### 2.1.4 Pavimentação com agregado reciclado

Carneiro *et al.* (2001b) estudaram a estabilização de solo laterítico e saprolítico com agregado reciclado, para utilização em base e sub-base na cidade de Salvador. Relatou que a produção de RCD pode chegar a atingir valores entre 50% a 80% do total dos resíduos sólidos urbanos em massa nas cidades de grande a médio porte.

Bodi *et al.* (1995) realizaram, no município de São Paulo-SP, um dos primeiros trabalhos em pavimentação no Brasil empregando agregado reciclado de RCD, servindo inclusive de referência para diversas pesquisas. Verificaram que: o comportamento de misturas com várias dosagens, os grãos de RCD britado apresentavam boa resistência à compressão e ao embricamento (quando comparados ao entulho bruto), durante o processo de britagem ocorre a fragmentação no plano de menor resistência do material, quando em serviço é necessária uma tensão maior para que ocorra uma nova quebra. Também constataram que as frações menos resistentes são praticamente reduzidas às granulometrias de areias ou solos, sendo empregadas como material de enchimento, e o resultado obtido foi uma curva com capacidade de suporte crescente, em função do aumento da porcentagem de RCD na mistura.

Segundo Fernandes (2004), a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte vem produzindo agregados reciclados de RCD nas Estações de Reciclagem de Entulho da Construção Civil dos bairros Estoril e Pampulha, distinguindo-os em tipo A (compostos basicamente de concreto e argamassas) e tipo B (material misto: cerâmica, concreto, argamassa e outros). Desde 1996, vem sendo executadas com esses materiais bases e sub-bases de pavimentos, com projeto dimensionado pelo método do ISC e segundo a experiência dos engenheiros desse Município. Vias como a Av. Mário Werneck, o trecho executado com esse material (existem trechos com agregado convencional e minério de ferro) em meados da década de 90, apresentam condições de tráfego semelhantes àqueles trechos confeccionados com agregado convencional. Contudo, não se pode afirmar se houve, ou não, um superdimensionamento das

camadas do pavimento, uma vez que, como citado antes, contou-se com a experiência laboratorial e executiva dos engenheiros da Prefeitura de Belo Horizonte, realizadas empiricamente.

### 2.1.5 Caracterização

Os agregados reciclados apresentam grande variação em suas propriedades, dependendo: da composição do resíduo processado, dos equipamentos usados, do teor de impurezas, da granulometria etc. Segundo UTS (1999) e Lima (1999) as principais diferenças com relação aos agregados convencionais são:

- a) forma e textura superficial são mais irregulares;
- b) heterogeneidade na composição;
- c) densidade é geralmente inferior devido à alta porosidade;
- d) alta absorção de água;
- e) menor resistência mecânica dos grãos.

### 2.1.6 Composição e Variabilidade

A resolução N.º 307 do CONAMA classifica os materiais que compõem os RCD em:

- a) classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
  - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
  - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- b) classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- c) classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- d) classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Características como composição e quantidade produzida dependem diretamente do estágio de desenvolvimento da indústria da construção local, da qualidade da mão-de-obra, adoção de programas de qualidade e outros. Dessa forma, a caracterização desse resíduo está condicionada a parâmetros específicos da região geradora do RCD analisado (ZORDAN, 1997).

As tabelas abaixo mostram a variabilidade no percentual de componentes dos resíduos da construção civil em alguns países (tabela 2.-1) e nas cidades brasileiras (Tabela 2.1-2) pesquisadas. Destaca-se no Brasil e, conseqüentemente, na maioria das citadas cidades que são registradas a maior presença dos componentes: concreto e argamassa.

<b>Material</b>	<b>Resíduo de construção, em massa (%)</b>		
	<b>Holanda<sup>1</sup></b>	<b>Japão<sup>2</sup></b>	<b>Brasil<sup>3</sup></b>
<b>Cerâmica</b>	39	12	29
<b>Madeira</b>	17	19	-
<b>Concreto</b>	13	17	4
<b>Tijolos e elementos sílico-calcáreos</b>	14	1	-
<b>Argamassa</b>	8	-	64
<b>Outros</b> (plásticos, solos, papel, mat. orgânico)	9	51	3

Tabela 2.1-1: Composições de resíduos de novas construções

Fonte: <sup>1</sup> Bossink; Brouwers (1996) *apud* Ângulo (2000), <sup>2</sup> Hong Kong Polytechnic (1993) *apud* Levy (1997), <sup>3</sup> Pinto (1986)

Motta (2005) afirma que materiais indesejáveis presentes como gesso, madeira, ferro, vidro entre outros classificados pelo NBR 15116, quando encontrados de forma significativa, podem provocar problemas no pavimento como, por exemplo, recalques diferenciais e reduzir seu desempenho. Na Tabela 2.1-3, os resultados obtidos são visualizados.



Material	Origem					
	São Carlos <sup>1</sup>	São Paulo <sup>2</sup>	São Paulo <sup>3</sup>	Ribeirão Preto <sup>4</sup>	Salvador <sup>5</sup>	Rio de Janeiro <sup>6</sup>
<b>Concreto e Argamassa</b>	69	12	33	59	53	66
<b>Solo e Areia</b>	-	82 *	32	-	22	-
<b>Cerâmica</b>	29	3	30	23	14	12
<b>Rochas</b>	1	-	-	18	5	14
<b>Outros</b>	1	3	5	-	6	8 **

Tabela 2.1-2: Composição do RCD, em percentual, Carneiro *et al.* (2001) (\*) Solo, areia e rocha (\*\*) Material misto (cerâmica, concreto e argamassa)

Fonte: <sup>1</sup> Pinto (1989), <sup>2</sup> Castro (1998), <sup>3</sup> Brito Filho (1999) *apud* John (2000), <sup>4</sup> Zordan (1997), <sup>5</sup> Carneiro (2000), <sup>6</sup> Afonso (2004)

Material indesejado	Classe (Resolução CONAMA Nº 307)	% encontrado em relação ao montante coletado em massa
Gesso	C	0.2
Madeira	B	0.1
Plástico	B	< 0.1
Outros	B e C	< 0.1
<b>TOTAL</b>	<b>B e C</b>	<b>0.4</b>

Tabela 2.1-3 - Porcentagem estimada de materiais contaminantes Motta (2005)

### 2.1.7 Abrasão

A ação do tráfego e a execução do pavimento provocam quebras e abrasão nos agregados. Este efeito é maior nas camadas superiores. Existem diversos ensaios para avaliar a tenacidade e a resistência abrasiva, tais como: índice de degradação Washington (IDW), abrasão Los Angeles (LA), perda ao choque no aparelho TRETON, entre outros.

Dentre os ensaios mencionados, é geralmente realizado o ensaio de abrasão Los Angeles. Em revestimentos asfálticos, é desejável alta resistência ao desgaste, indicada por baixos valores de abrasão LA. As especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados

em camadas de base e revestimento limitam os valores entre 40 e 55%, (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Destaca-se que na norma NBR 15116 não consta especificação quanto ao ensaio de abrasão Los Angeles, dentre os requisitos para a utilização de agregado reciclado na pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Roberts *et al.* (1996) relataram que as observações de campo não mostram uma boa relação entre a perda oriunda do abrasão *Los Angeles* e o desempenho. Afirmaram, ainda, que este ensaio não é satisfatório para uso com escórias, cinzas vulcânicas ou outros agregados leves, pois a experiência mostra que muitos destes agregados produzem excelente desempenho mesmo com alto valor de abrasão *Los Angeles*.

Buttler (2003) comparou o desempenho de amostras de material granular natural com agregado reciclado de concreto. Variou a idade de britagem do resíduo em 1, 7, e 28 dias. O agregado natural obteve valor de 20% enquanto os resultados para os RCD variaram de 42% (1 dia) a 30% (28 dias) quanto à abrasão *Los Angeles*.

Carneiro (2001) pesquisou a viabilidade técnica do emprego de agregados reciclados em camadas de base e sub-base de pavimentos, na cidade de Salvador. No seu estudo o RCD apresentou 45% de desgaste no ensaio de abrasão *Los Angeles*, atendendo às especificações do DNIT.

Motta (2005) também analisou laboratorialmente aspectos físicos e mecânicos do agregado reciclado de São Paulo para uso na pavimentação (base e sub-base). Nos ensaios de abrasão *Los Angeles*, a amostra alcançou valores muito próximos ao limite imposto pelo DNIT. Além disso, constatou que a compactação provocou alterações na granulometria, mostrando que as quebras destes agregados foram mais significativas nos primeiros estágios, e que com o aumento da energia de compactação as alterações eram pouco expressivas.

Frota; Melo; Nunes (2005a, 2005b, 2006) realizaram a caracterização mecânica de misturas asfáltica com material granular (seixo e RCD) e com cimento asfáltico de petróleo oriundo da Refinaria Isaac Sabbá. Os valores de abrasão Los Angeles encontrados foram em torno de 40% para o RCD e 35% para o material aluvionar. Os estudos mostraram, também, que o RCD apresenta maior suscetibilidade ao desgaste comparado ao agregado convencional pesquisado. Contudo, os resultados obtidos pelo Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas (GEOTEC) vêm demonstrando que o mesmo produz misturas asfálticas detentoras de bom desempenho mecânico (FROTA; MENTA; NUNES, 2003; FROTA; ALENCAR; SILVA, 2004).

#### 2.1.8 Absorção e Porosidade

A absorção e porosidade são características que afetam a adesividade nas misturas asfálticas. A absorção do asfalto pelo agregado pode influenciar positivamente, melhorando o intertravamento mecânico da mistura. Entretanto, em excesso, há diminuição da espessura da película de asfalto sobre o mesmo, tornando a mistura mais suscetível à ação deletéria da água (GOUVEIA *et al.*, 2004).

Agregados reciclados, provenientes de concreto ou argamassa, possuem uma porosidade maior que os naturais, ocasionando uma maior absorção de água. Motta em seu estudo de 2005 relatou que os agregados reciclados absorveram em média 8%, necessitando de uma maior quantidade de água na ocasião da compactação comparado aos materiais pétreos convencionais.

Ângulo (1998) concluiu que resíduos de concretos absorvem em média menos água que argamassas. Porém, algumas exceções, tais como concretos de contrapiso, que possuem alta absorção de água, e argamassas colantes que possuem baixa absorção de água (CARNEIRO, 1999). A tabela 2.1-4 ilustra a variação da absorção de diferentes componentes do resíduo da construção civil, sendo apresentados os valores máximos, mínimos, médios, assim como o coeficiente de variação (ÂNGULO, 1998).

	Fase das amostras				
	Concreto/ Argamassa	Rochas	Cerâmica	Materiais Betuminosos	Outros
<b>Máximo</b>	11.70	3.01	27.91	20.00	23.01
<b>Médio</b>	7.84	1.52	15.36	4.71	15.41
<b>Mínimo</b>	5.11	0.61	7.54	0.00	6.87
<b>CV (%)</b>	17.73	35.92	23.05	100.00	25.64

Tabela 2.1-4: Valores extremos, médio e coeficiente de variação para absorção de água por imersão 24 horas, em %, Ângulo (1998)

A densidade influi na absorção de água pelos agregados. Quanto maior a densidade menor a absorção, devido a menores índices de porosidade. (KREIJGER, 1983 *apud* HANSEN, 1992). A resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a absorção de água dos concretos são influenciados pela massa específica aparente do grão (ou porosidade) do agregado. Deste modo, a massa específica aparente é um parâmetro de controle de qualidade, podendo ser facilmente empregada para caracterizar RCD reciclados, direcionando-os para aplicações adequadas (JOHN; ÂNGULO; KAHN, 2006).

### 2.1.9 Índice de Forma

“A forma das partículas influencia na trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas, alterando a energia de compactação para se alcançar certa densidade”, segundo Bernucci *et al.* (2007)

Pinto (1999) conclui que nos tratamentos superficiais é importante trabalhar com agregados mais cúbicos ou menos lamelares, pois estes últimos são facilmente quebrados pela ação do tráfego, dando origem à formação acelerada de buracos na pista da rodovia.

A norma NBR 15116 que aborda requisitos gerais para utilização do resíduo da construção civil como material granular e destinado a uso em pavimentos, indica para o índice de forma do agregado graúdo valor inferior a três.

Carneiro *et al.* (2001a) obtiveram o valor de 2,6 para o índice de forma do agregado graúdo reciclado (dimensão máxima característica superior a 9,5 mm), apresentando-se não lamelar e dentro do que está preconizado na norma NBR 15116 referida.

Fernandes (2004) observou que a cubicidade dos agregados reciclados, verificada principalmente no tipo Misto (constituído com menos de 90% em massa de cimento Portland e rocha, NBR 15116), decorre em parte da suscetibilidade ao desgaste superficial das partículas, podendo ser observada no próprio ensaio de peneiramento. Embora não seja evidente na avaliação do Índice de Forma, a suscetibilidade à fragmentação contribui para a redução do índice citado.

### 2.1.10 Contaminação

O ensaio de lixiviação tem como objetivo identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação. Em contrapartida, o teste de solubilização identifica a concentração de substâncias solúveis em água presentes no material. Eles são preconizados pelas normas NBR 10004 e NBR 10005 respectivamente, podendo-se classificar o material em inerte, não-inerte ou perigoso.

Carneiro *et al.* (2001a) verificaram a possibilidade de risco de contaminação ambiental por metais pesados para os agregados reciclados de Salvador (Bahia). A determinação foi realizada por espectrometria de emissão atômica, espectrometria de absorção atômica em chama, geração de hidretos e vapor a frio. Os resultados se apresentaram de acordo com os limites máximos permitidos para resíduos sólidos, ou seja, não apresentaram riscos à saúde pública nem ao meio ambiente.

Motta (2005), por meio de ensaios, encontrou componentes contaminantes na sua amostra estudada, entretanto em quantidades inferiores ao estipulado pela NBR 15155. Fernandes (2004) realizou ensaios de solubilização, onde os resultados mostraram concentrações superiores de alumínio e fenóis para agregados oriundos do município do Rio de Janeiro, e de alumínio e selênio para aqueles oriundos de Belo Horizonte. Nos ensaios de lixiviação as amostras de ambas as cidades passaram nos limites normalizados. A autora

classificou os materiais estudados como Resíduo Classe II (Resíduo Não-Inerte) viáveis para utilização como agregado.

## 2.2 Método de Bailey

Originalmente desenvolvido por Robert Bailey do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT), o chamado Método de Bailey visa à seleção da graduação de misturas asfálticas. Fundamenta-se num esqueleto de agregados objetivando resistir à deformação permanente e proporcionar durabilidade, baseado em um adequado volume de vazios (Vv) e volume de agregado mineral (VMA). Foi usado pelo 5º Distrito do IDOT a partir dos anos 80, e na década de 90 se expandiu ao longo do estado de Illinois. Pode ser utilizado com qualquer método de dosagem, seja *Superpave*, Marshall ou Hveem (VAVRIK *et al.*, 2002).

Internacionalmente, o citado método foi utilizado em um programa de pesquisa laboratorial de asfalto em Dubai, Emirados Árabes, para melhorar o desempenho quanto à deformação permanente, e em experiências de campo em Dubai, França, Canadá, e ao longo dos Estados Unidos.

No Brasil destacam-se alguns estudos como o de Cunha (2004), onde se confrontaram misturas com uma composição granulométrica convencional, e segundo o Método de Bailey, variando-se os agregados oriundos das rochas basalto e gabro. O mencionado trabalho mostrou que as misturas Bailey com agregado-basalto possuíam maior VMA, resultando numa maior resistência à deformação permanente e a trincamento por fadiga. Entretanto, o desempenho da mistura Bailey com agregado-gabro não foi superior ao da mistura convencional, associou-se tal comportamento a sua graduação ter a mistura passando pela zona de restrição da faixa *Superpave*.

Gouveia (2006) enfatizou a capacidade do método Bailey em considerar as propriedades de superfície das partículas para a obtenção de curvas granulométricas. Utilizou

misturas com características volumétricas semelhantes ao trabalho anterior, apesar das diferentes características de forma e angularidade das mesmas.

O Método de Bailey considera as características de compactação de cada fração dos agregados, consistindo de uma aproximação sistemática que mistura os componentes pelo volume, de forma a garantir o intertravamento dos agregados como sustentação da estrutura. Provê ainda, ferramentas que permitem a avaliação das misturas, a relação entre a graduação e vazios nas mesmas, sendo baseada em:

- a) compactação do agregado: depende da angularidade, textura superficial, graduação e dureza do agregado e, ainda, do tipo e quantidade de energia de compactação;
- b) definição de agregado graúdo e fino: agregados graúdos criam vazios quando acondicionados em um volume, e os agregados finos são partículas capazes de preencher tais vazios.

Fundamentada nesses princípios, as etapas básicas do Método de Bailey consistem em:

- a) combinação dos agregados por meio do volume;
- b) análise da combinação resultante da mistura.

### 2.2.1 Combinação dos agregados por meio do volume

Os processos de combinação são diferentes para misturas de graduação densa (graúda e fina). Inicialmente é necessário estabelecer o grau de compactação desejado para o projeto, este parâmetro depende do tipo de graduação densa desejada. Define-se por tipo de mistura densa:

- a) graduação graúda: o agregado graúdo é o esqueleto da estrutura, responsável por resistir ao carregamento;
- b) graduação fina: não possui agregado graúdo suficiente, sua estrutura é sustentada pelo contato grão a grão do agregado fino.

Segundo o procedimento para a graduação graúda, o grau de compactação da mistura é dado pela massa específica escolhida (MEE) do agregado graúdo, o qual é função da massa específica solta (MES), tendo como limite a massa específica compactada (MEC).

Para misturas de graduação densa graúda determina-se o volume de vazios criado pelo agregado graúdo, a partir da definição de massa específica escolhida (MEE). Para que o esqueleto estrutural formado esteja o mais próximo possível de sua estabilidade máxima, esses vazios serão preenchidos com um volume igual de agregado fino na condição compactada.

O desenvolvimento da seleção prossegue com ajustes de volumes convertendo ao final em peso. Um exemplo detalhado sobre a utilização do Método Bailey, como ferramenta para seleção granulométrica em misturas asfálticas densas, pode ser encontrado nos anexos da dissertação de mestrado de Cunha (2004).

### 2.2.2 Análise da combinação resultante da mistura

O método em pauta utiliza parâmetros para avaliar a compactação e o volume de vazios. A mistura é dividida em três porções distintas, sendo cada uma analisada individualmente:

- a) proporção de Agregados Graúdos (CA): A porção graúda engloba desde a maior partícula até a Peneira de Controle Primária (PCP), indicando o comportamento da mistura quanto à compactação das partículas de agregado graúdo e como a porção fina está preenchendo os seus vazios;
- b) proporção graúda do Agregado Fino (FA<sub>C</sub>): A Peneira de Controle Secundária (PCS) divide o agregado fino em duas novas porções: fração grossa e fração fina. Mostra o comportamento da mistura quanto à compactação das partículas graúdas do agregado fino e como a porção fina deste material está preenchendo os seus vazios;
- c) proporção fina de agregado fino (FA<sub>F</sub>): é dividida pela Peneira de Controle Terciário (PCT). Avalia o desempenho da mistura quanto à compactação das partículas finas e ao preenchimento dos vazios que restaram na porção fina de agregado.



## 2.3 Revestimento

O pavimento é uma estrutura composta por camadas finitas, sujeito à ação das cargas gerada pelos veículos e às variações climáticas do ambiente ao qual está inserido. Sua finalidade é garantir conforto e segurança quanto ao rolamento.

O revestimento é uma das camadas que compõem o pavimento. Devido a sua posição superior, tem como função receber diretamente a ação do tráfego, resistir às forças e transmiti-las às demais camadas (MEDINA e MOTTA, 2005). Segundo o Instituto do Asfalto (2002), deve oferecer uma superfície lisa e resistente à derrapagem. Precisa ser impermeável e ter declividade para o devido escoamento da água, protegendo toda sua estrutura e o subleito do efeito da umidade, além de resistir ao desgaste causado pelo tráfego.

Um dos tipos de revestimento mais utilizados no Brasil e também objeto desta pesquisa é o concreto asfáltico, conhecido também por concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Esta camada consiste na combinação de agregados com graduação densa, uniformemente misturados e recobertos com ligante asfáltico pré-misturado a quente, em usina.

O concreto asfáltico é considerado uma mistura muito resistente, embora o ligante betuminoso, presente em sua composição, possa ocasionar problemas de deformação permanente, por fluência ou exsudação. Segundo Bernucci *et al.* (2007) tem-se formas de reduzir essa sensibilidade, como por exemplo substituindo o asfalto convencional pelo ligante modificado por polímeros.

Os processos de rupturas associados ao revestimento asfáltico são, em geral: por fadiga, deformação plástica e trincas térmicas a baixas temperaturas. O Instituto do Asfalto (2002) declara, ainda, que a mistura deve possuir as seguintes propriedades: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem, impermeabilidade e trabalhabilidade.

Visando caracterizar as misturas asfálticas os seguintes ensaios mecânicos são empregados (BERNUCCI *et al.*, 2007):

- a) ensaios convencionais: Estabilidade e Fluência Marshall;
- b) ensaios de ruptura: resistência à tração indireta, vida de fadiga;
- c) ensaios de módulo: resiliência e complexo;
- d) ensaios de deformação permanente;
- e) ensaios complementares: adesividade, cântabro, dano por umidade induzida.

São diversas as patologias que acometem os pavimentos em nossa região, ressalta-se a ação do clima o qual alterna temperaturas elevadas e altos índices pluviométricos. Os defeitos que mais se destacam são: afundamento plástico em trilha de roda (deformação permanente), escorregamento no revestimento, remendo superficial, desgaste, panela, depressão e trincas. No entanto não há problemas com trincas devido a temperaturas baixas.

### 2.3.1 Deformação Permanente

Os materiais constituintes do revestimento apresentam propriedades visco-plásticas, ou seja, ao cessar a ação da carga, a recuperação da deformação depende do tempo, intensidade de aplicação da mesma, além da temperatura do ambiente. A deformação apresenta duas componentes: elástica (reversível, pode ainda ter duas fases instantânea e retardada) e outra plástica (permanente).

A deformação permanente pode ocorrer:

- a) na camada de revestimento: quando a mesma não é adequada ao tráfego e às condições climáticas do pavimento;
- b) no conjunto das diversas camadas: a ocorrência está associada a problema estrutural, pois elas afundam por excesso de carga. Há formação de trincas de tração na parte inferior do revestimento.

Segundo Balbo (1997), o afundamento é uma ocorrência de deformação permanente na superfície do pavimento. Têm-se, em geral, duas situações distintas: a) quando é causado

por consolidação, devido a densificação, diminuição do volume; b) quando ocorre elevação lateral e não há variação de volume, sendo conhecido como afundamento plástico. É, também, classificado quanto a sua extensão, quando superior a seis metros é dito afundamento de trilha de roda, caso inferior é referido como afundamento local.

Greco (2004) cita a ocorrência de elevação lateral devido à ação de forças cisalhantes e a consolidação em função dos esforços de compressão. Em pavimentos os esforços cisalhantes estão relacionados a mudanças de velocidade, tais como frenagem e partidas (MEDINA e MOTTA, 2005).

Anani *et al.* (1990) *apud* Greco (2004) associam o volume de um tráfego pesado, a pressão de enchimento dos pneus, a temperatura de serviço e as práticas construtivas como fatores de grande interferência nesse tipo de patologia.

Sá e Motta (1996) concluem que a granulometria e o tipo de ligante têm grande influência quanto à suscetibilidade à deformação permanente do revestimento. Quanto maior a dimensão do agregado e mais viscoso o ligante, a mistura será menos suscetível.

Segundo Coelho (1996), são diversos os fatores que influenciam a deformação permanente no concreto asfáltico, destacando-se: formato, textura e tamanho dos agregados, rigidez do ligante, volume de vazios, teor de ligante, método de compactação da mistura, temperatura, estado de tensões, e número de repetições de carga nas condições de campo ou de ensaio.

Souza *et al.* (1991) *apud* Greco (2004), afirma que a mistura com vazios inferiores a 4% estão sujeitas deformações plásticas, porquanto a redução do volume de vazios devido o alto teor de ligante, faz com que o material asfáltico passe a agir como um lubrificante, reduzindo o atrito entre as partículas. A suscetibilidade a deformação nestas condições se agrava em temperaturas elevadas, pois o mesmo passa a facilitar ainda mais as deformações

por cisalhamento. Entretanto, no caso do volume de vazios ter um valor superior a 8%, o revestimento se mostra mais suscetível à deformação devido consolidação.

Os métodos de avaliações tradicionais, como Marshall, têm seu emprego restrito, porquanto seus resultados confrontam com as deformações que ocorrem em trechos experimentais, conforme Souza *et al.* (1991) *apud* Greco (2004), e Coelho (1996). Atualmente existem diversos ensaios, para avaliar o efeito da deformação permanente em revestimentos asfálticos:

- a) ensaio triaxial com carregamento repetitivo – reproduz um estado multiaxial, próxima da condição existente no campo. Contudo a sua execução é complexa;
- b) compressão uniaxial não confinada, *Creep* – podendo ser estático ou dinâmico, são ensaios de menor dificuldade operacional, por isso mais empregados em pesquisas;
- c) *Superpave Shear Test*, SST – realiza ensaios de variação volumétrica e deformação axial sob várias condições: cisalhamento simples de altura constante, cisalhamento repetido a tensão constante e varredura de frequência a altura constante. No Brasil ainda não existe esse equipamento;
- d) simuladores – podendo ser laboratoriais ou em verdadeira grandeza. São equipamentos que permitem uma investigação mais próxima da realidade. O carregamento se faz por rolagem de uma carga móvel sobre corpos-de-prova prismáticos ou trechos experimentais, ao final do número de ciclos a deformação é comparada com um valor de referência estabelecido. No Brasil, existem poucos equipamentos: o LCPC francês da Escola Politécnica da USP, o APA (Analisador de Afundamento de Pavimento), modelo norte-americano pertencente à BR Distribuidora, o equipamento existente na Universidade Federal do Ceará, outro pertencente ao Centro de Pesquisa da Petrobrás (Cenpes), e também um simulador do tipo linear da UFRGS/ DAER-RS. A empresa Cifali desenvolveu um modelo de tráfego móvel tipo HVS (Hércules Veículo Simulador) avaliado por Fritzen (2005).

Segundo Medina e Motta (2005) apesar da medida da deformação permanente em campo ser de simples execução, a sua previsão no dimensionamento do pavimento é bastante complexa por depender de alguns fatores:

- a) avaliação do impacto das condições ambientais no material;
- b) cálculo das tensões durante toda a vida de serviço, variável com envelhecimento do ligante.

O novo guia de dimensionamento da AASTHO 2002 usa um modelo de previsão de deformação permanente, baseado em dados de ensaios triaxiais de carga repetida, utilizando-

se relações constitutivas e calibradas com observações de campo por meio de análises estatísticas.

No Brasil, os modelos para previsão de deformação permanente no revestimento, tem sido objeto de diversas pesquisas: Franco (2000), Nunes (2006), Souza *et al.* (2002), e Theisen (2006).

### 2.3.2 *Creep* Estático e Dinâmico

*Creep*, ou fluência, de um material é a deformação lenta e progressiva que o material sofre, quando sujeito a tensão constante. O ensaio de fluência por compressão uniaxial, conhecido como *Creep* estático, foi desenvolvido pela Shell (HILL, 1973 *apud* BERNUCCI, 2007) na década de 70, com o objetivo de avaliar a suscetibilidade de misturas quanto a deformação permanente. Este ensaio tem execução simples e baixo custo.

Kenis (1976), Mahboub (1990), Perl *et al.* (1983) *apud* Greco (2004), Van de Loo (1974) direcionaram seus estudos de modo a estabelecer modelos de deformação permanente nas trilha de roda, determinados em função da rigidez do asfalto, por meio do ensaio de *Creep*.

A função fluência (*creep compliance*) representa o histórico de deformações em função do tempo e concernente à tensão aplicada. Está relacionada à propriedade viscoelástica dos materiais (SOUZA e SOARES, 2003 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007).

Van de Lo (1974) concluiu que apenas a baixas tensões os resultados dos ensaios de *Creep* estático apresentam compatibilidade com os ensaios de trilha de roda. Embora, este seja realizado com altas tensões, possuem curto tempo de aplicação, por isso comporta-se linearmente, com taxa de deformação constante. Portanto, os ensaios de *creep* estático devem ser realizados com tensões baixas para estar dentro do regime linear.

Para Valkering *et al.* (1990) o ensaio de fluência uniaxial não mostra misturas com melhor desempenho, quando adicionado polímeros ao ligante. Segundo o autor o citado

experimento não detecta a capacidade de recuperação, após a retirada do carregamento. Segundo Tayebali *et al.* (1992), os ensaios com aplicação de carga dinâmica parecem representar melhor o potencial de deformação permanente.

Ensaio estáticos não detectam variações reológicas no ligante pela adição de polímero, pois não permitem que os materiais se comportem elasticamente, subestimando a resistência às deformações plásticas dos ligantes modificados (Instituto Brasileiro de Asfalto, 1996).

O ensaio de *creep*, em geral, é essencialmente realizado com solicitações estáticas. O ensaio conhecido como *creep* dinâmico, na verdade reproduz ensaios de *creep* e recuperação, onde os pulsos de cargas são aplicados repetidas vezes.

No Brasil tem-se vários estudos sobre ensaios de *creep*, estático ou dinâmico, em misturas asfálticas, tais como: AMARAL, 2000; COELHO, 1996; MOTTA *et al.*, 1996; MERIGHI, 1999; SÁ e MOTTA, 1996; VIANNA, 2004. Estes trabalhos apresentaram curvas com as deformações em função do tempo, tendo a deformação máxima como parâmetro comparativo entre as várias misturas e, também, como um indicador do potencial a deformação permanente.

De acordo com Mohammed e Yue (1994), a curva obtida no ensaio de *Creep* (Figura 2.3-1) mostra: altas taxas da deformação inicial, devidas à concentração de tensões nos pontos elevados da superfície do corpo de prova, onde geralmente é irregular, e quando a taxa decai rapidamente, devido à densificação por redução dos vazios, ocorrem mudanças na microestrutura tornando-a mais rígida.

O estágio secundário do gráfico, quando esta tende a uma taxa de deformação constante, os agregados encontram-se acomodados na microestrutura e a deformação se dá por cisalhamento dos mesmos. Quanto maior a inclinação do gráfico, nesta fase, maior a susceptibilidade da mistura às deformações permanentes, segundo os autores citados acima.

Os mesmos ainda discutem sobre o estágio final da citada curva, cuja fase é de ruptura do corpo-de-prova. No caso dos ensaios dinâmicos, acontece por conta da fadiga do material. Para os ensaios estáticos pode vir a ocorrer devido a utilização de misturas não homogêneas, excentricidade da placa de carregamento, corpos de prova com superfícies inclinadas.

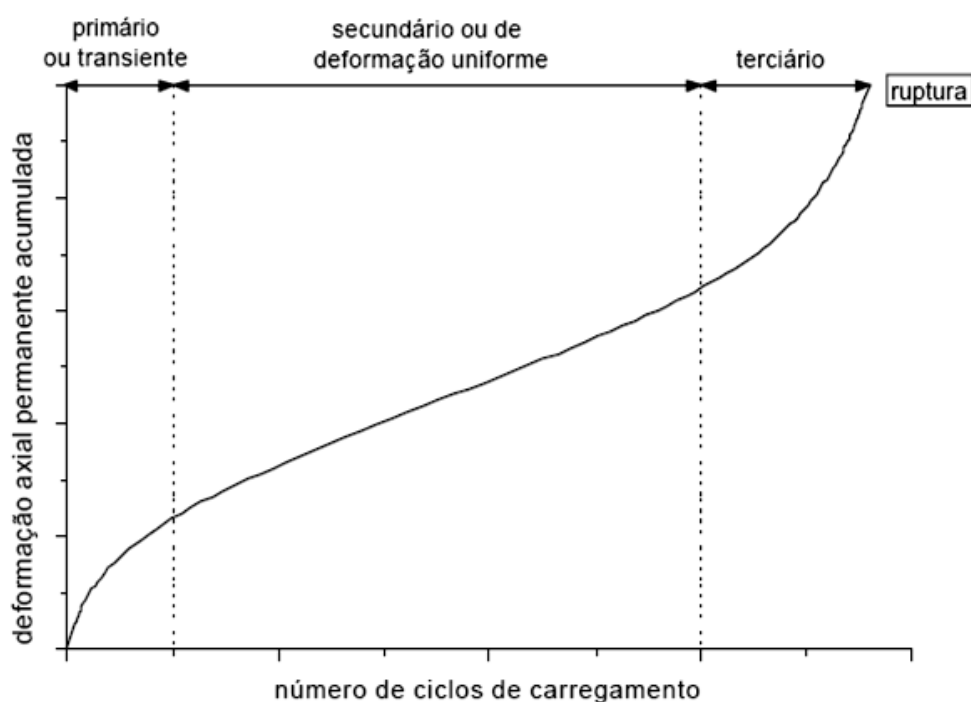


Figura 2.3-1:Estágios da curva de fluência (MOHAMMED e YUE, 1994)

O número de ciclos onde começa o estágio terciário é referido como *Flow Number*, oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida, segundo o *Report 465* (WITCZAK *et al.*, 2002 *apud* NASCIMENTO, 2008), é o parâmetro que melhor se correlaciona com a deformação permanente.

### 2.3.3 Ligantes

O ligante tem o papel cimentante na mistura betuminosa, promovendo uma forte ligação entre os agregados. Desde a antiguidade, existem relatos do asfalto empregado na pavimentação de estradas. Resultante da evaporação de frações leves de petróleo e aflorado à superfície em épocas remotas, como argamassa mole (conhecido como Asfalto Natural). No início do século XX, com o avanço da indústria automobilística e a descoberta da sua

obtenção a partir do processo de destilação do petróleo, passou a ser amplamente usado nas vias.

Existem diversos tipos de asfalto utilizados na pavimentação, dentre os citados o cimento asfáltico de petróleo é matéria-prima para obtenção dos demais:

- a) cimentos asfálticos de petróleo;
- b) asfaltos modificados;
- c) asfaltos diluídos;
- d) emulsões asfálticas;
- e) agentes rejuvenescedores.

### 2.3.3.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

O asfalto, denominado cimento asfáltico de petróleo (CAP), utilizado na pavimentação é obtido a partir do processamento de petróleo, por isso não possui matéria orgânica e minerais estranhos.

As características que fazem este material ser adequado para o uso em misturas usadas como ligante são, segundo o Instituto do Asfalto (2002):

- a) cimento forte, com alto poder de aderência;
- b) permite uma flexibilidade controlável nas misturas com agregado mineral, com amplas combinações de graduação;
- c) altamente impermeável à água, evitando penetração da água de chuva, permitindo escoamento superficial;
- d) pouco reativo quimicamente, por isso resistente à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais. Apesar da baixa reatividade, sofre um envelhecimento lento por oxidação a qual pode ser acelerado com o aumento da temperatura e frente à radiação UV, conferindo maior rigidez (SILVA, L.S., 2005);
- e) comportamento termoviscoplastico, sendo dependente da temperatura e tempo, velocidade e intensidade do carregamento. Quando aquecido é fluído como um líquido, podendo ser misturado ao agregado, e quando resfriado, tem consistência sólida ou semi-sólida.

No Brasil, especificam-se, quatro tipos de CAP, classificados por penetração, conforme a atual resolução ANP n° 19, de 13 de julho de 2005, oriundos de petróleos



brasileiros, a exceção da REDUC que emprega na maior parte de suas campanhas os petróleos árabes: 30/45, 50/70, 85/100 e 150/200.

### 2.3.3.2 Composição química e reologia do CAP

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática (BERNUCCI *et al.*, 2007). Por isso a composição química do asfalto depende da origem e do tipo de processamento do petróleo, influenciando diretamente o desempenho mecânico nas misturas asfálticas.

Goodrich (1986) *apud* Leite (1999) alega que os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais - vanádio, níquel e ferro) por meio de ligações covalentes. Os cimentos asfálticos brasileiros tem baixo teores de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio (LEITE, 1999).

Devido à complexa estrutura química foram desenvolvidas várias formas de fracionamento do asfalto, sendo este outro influenciador na sua composição. Atualmente a metodologia mais empregada, descrita na norma ASTM D 4124, reparte o CAP em compostos saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos (insolúveis em n-heptano). Os asfaltenos separam-se primeiro, por precipitação, com a adição de n-heptano. Os outros constituintes, denominados maltenos, solúveis em n-heptano, são divididos por cromatografia de adsorção.

Na Europa é utilizado o método denominado SARA (separa em compostos chamados: Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos), semelhante ao ASTM D 4124, diferindo na divisão dos maltenos, que é realizada por cromatografia de camada fina e a detecção dos teores dos componentes por ionização de chama, (LEITE, 1999).

Corbett (1978) apud Leite (1999) constatou que os asfaltenos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis, formados associações intermoleculares, constituídas de hidrocarbonetos aromáticos e naftênicos condensados e de cadeias curtas de saturados. São considerados responsáveis pelo comportamento reológico do CAP: quanto maior o seu percentual mais duro e viscoso será o ligante.

Todavia, o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – Strategic Highway Research Program (SHRP) – não considera válido o conceito de asfaltenos, classificando os compostos constituintes em polares e não-polares. Por meio de técnicas de análise de espectroscopia infravermelha e cromatografia de troca de íons, propõe que forças intra e intermoleculares (pontes de hidrogênio, ligações  $\pi$ - $\pi$ , forças de Van der Waals e atrações polares) são as responsáveis pela formação de redes tridimensionais resultantes nas características elásticas e viscosas. Por aumento do calor ou por ação de forças cisalhantes, ocorre destruição de tais redes tridimensionais, com conseqüente redução da elasticidade e aumento das características viscosas (LEITE, 1999).

As propriedades reológicas dos ligantes são determinadas pelas interações moleculares, que por sua vez dependem da composição química, podendo influenciar significativamente no desempenho das misturas asfálticas durante a mistura, compactação e em serviço. Por estas razões, vários testes reológicos são incluídos nas especificações (LU *et al.*, 1999 *apud* AMARAL, 2000).

A resposta do ligante asfáltico ao esforço é, por conseqüência, dependente de ambos: temperatura e tempo de aplicação da carga. Conseqüentemente, a reologia do ligante asfáltico é definida pela sua resposta à tensão, deformação, tempo e temperatura (AIREY & BROWN, 1998 *apud* MORILHA, 2004).

Em temperaturas suficientemente baixas e/ ou em altas taxas de carregamento, o material betuminoso reage essencialmente como um sólido elástico. Quando a temperatura

umenta e/ ou quando a taxa de carregamento reduz, a propriedade de viscosidade torna-se mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ ou longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto comporta-se como um líquido Newtoniano e pode ser descrito pela viscosidade independente da taxa de aplicação da carga (LU *et al.*, 1999 *apud* AMARAL, 2000).

O CAP comporta-se como fluido newtoniano a temperaturas próximas a 100°C. A temperaturas de serviço, o citado material apresenta comportamento não-newtoniano. Contudo em determinada faixa (incluindo 25°C, esta muito utilizada nos ensaios), a curva  $\log(t)$  versus  $\log(\dot{\gamma})$  exibe uma região aproximadamente linear, onde a lei da potência, proposta por Ostwald de Waele, pode ser considerada válida. Segundo Leite (1999), a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de deformação, elevada a uma exponencial.

Leite & Tonial (1994) verificaram que o cimento asfáltico de petróleo se apresenta pseudoplástico na faixa de 25 a 60°C. A tensão cisalhante neste tipo de fluido destrói as associações moleculares existentes e produz uma nova ordenação orientada no sentido do cisalhamento, reduzindo a viscosidade.

Por esses motivos, os pavimentos asfálticos têm sido abordados como materiais elasto-viscoplástico, sendo aceitável a aplicação da hipótese elástico-linear, quando o tempo de duração do carregamento for relativamente baixo e temperatura de serviço inferior a 25°C. No entanto, quando for relativamente alta, a parcela elástica das deformações se torna desprezível, principalmente sob ação de cargas estáticas ou de alta duração afirma Chameck *apud* Coelho & Sória (1995).

Embora a composição química e a estrutura coloidal somente auxiliem a explicação de alguns fenômenos do comportamento de CAP como ligante rodoviário, os parâmetros reológicos, obtidos por meio de equipamentos tais como: viscosímetros e reômetros de cisalhamento dinâmico, apresentaram correlação com ensaios de desempenho de misturas

betuminosas. A importância da reologia no estudo dos CAP foi comprovada com o estabelecimento das especificações SUPERPAVE (LEITE, 1999).

#### 2.3.4 Polímeros

Mano (1985,1991) *apud* Bernucci *et al.* (2007) apresenta as seguintes definições referente aos polímeros:

- a) macromoléculas: moléculas gigantescas que resultam do encadeamento de dez mil átomos de carbono, unidos por ligações covalentes, podendo ser naturais ou sintéticas;
- b) polímeros: do grego muitas partes, são macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, formadas por unidades repetidas em sua longa cadeia, denominadas monômeros. Os homopolímeros são constituídos por apenas um monômero, e os copolímeros apresentam, pelo menos, dois monômeros.

Os polímeros podem ser classificados em diversas formas, de acordo com a finalidade:

- a) estrutura molecular: linear, ramificada, em rede;
- b) peso molecular;
- c) polimerização: poliadição, policondensação, modificação química de outro polímero.

A forma de classificação, mais empregada em pavimentação, é em função da resposta mecânica frente às variações de temperatura (MANO, 1985 e 1991 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2007):

- a) termoplásticos: amolecem e tornam-se maleáveis quando são aquecidos e endurecem ao serem resfriados. Esses processos são reversíveis e podem ser repetidos. Consistem em cadeias lineares, podendo ser ramificadas. Exemplo: PVC, polietileno, polipropileno;
- b) termofixos: não se fundem, tornam-se irreversivelmente duros, sofrem degradação quando submetidos à aplicação de calor. Apresenta-se em cadeia tridimensional resistente a qualquer mobilidade térmica. Exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- c) elastômeros: quando são aquecidos se decompõem antes de amolecer com propriedades elásticas. Exemplo: SBR;
- d) elastômeros termoplásticos: apresentam comportamento elástico a baixa temperatura e com o aumento da mesma passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

### 2.3.5 Modificação do ligante asfáltico com polímeros

“Os requisitos impostos ao cimento asfáltico de petróleo para uso em rodovias permitem traçar um perfil ideal, o qual deveria ser pouco suscetível à temperatura em toda faixa de utilização (10°C a 80°C) e muito suscetível ao longo da faixa de aplicação (130°C a 170°C). As resistências à deformação permanente, à ruptura, à fadiga e ao envelhecimento devem ser elevadas. Em paralelo, necessita ainda manter boas propriedades de adesão. A dificuldade em se conseguir todas essas qualidades em um mesmo asfalto puro tem conduzido ao desenvolvimento dos ligantes modificados” (LEITE, 1999).

“Em princípio as propriedades reológicas desejadas para o asfalto podem ser conseguidas mudando a composição química do asfalto usando um aditivo ou uma modificação por meio de uma reação química. A adição de polímeros é um jeito versátil de modificar a reologia dos asfaltos” (LU *et al.*, 1999 *apud* AMARAL, 2000).

“As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego podem ser modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto para várias faixas de temperatura” (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Zanzotto e Kennepohl (1996) *apud* Amaral (2000) confirmam que o polímero adicionado ao asfalto: previne avarias prematuras e desse modo aumenta a vida em serviço do pavimento, reduz a consistência e susceptibilidade térmica e por conseqüência aumenta a resistência à deformação permanente em altas temperaturas, impedem fissuras nas baixas temperaturas, assim como melhora o comportamento elástico e contribui para a resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. Segundo, ainda, o citado trabalho o polímero pode ainda contribuir para uma melhor adesão entre o agregado e o ligante, minimizando a abrasão e melhorando a resistência à oxidação.

O CAP ao ser modificado com polímero deve ser resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização, melhorar as características de fluidez em altas temperaturas, sem que fique muito viscoso na temperatura de mistura e de compactação e nem muito rígido ou quebradiço nas baixas temperaturas. Também deve apresentar compatibilidade, mantendo suas propriedades durante estocagem, aplicação e em serviço, ou seja, estabilidade física e química. (BERNUCCI *et al.*, 2007).

#### 2.3.5.1 Vantagens do ligante asfáltico modificado com polímeros

O uso do asfalto com polímero está associado a vias de tráfego canalizado ou aquelas sujeitas a altas cargas, locais de difícil acesso, que a interrupção gere custos elevados e, ainda, em ambiente com condições climáticas severas.

Segundo Rowe *et al.* (1995) *apud* Amaral (2000) um asfalto modificado por polímero apresenta características diferentes em relação ao asfalto convencional, particularmente com relação à recuperação elástica a elevadas temperaturas. A introdução de polímeros aumenta a proporção de deformação que é recuperável depois do carregamento (deformação elástica) e reduz aquela associada com o elemento viscoso (deformação permanente).

Existem diversos polímeros com características distintas, no entanto, somente, alguns apresentam propriedades que conferem à modificação do ligante asfáltico melhorias de desempenho. Segundo Freitas (1996), uma ou mais propriedades podem ser aprimoradas, dentre elas:

- a) na suscetibilidade térmica (variação da consistência em função da temperatura), amplia a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente;
- b) na coesão (energia necessária para romper uma película de ligante), o seu acréscimo produz uma consistência satisfatória na faixa de temperatura de serviço do pavimento;
- c) na elasticidade (propriedade de responder à deformação de forma reversível), ocorre um aumento do comportamento elástico na faixa de temperatura de serviço.

Reis (1995) *apud* Silva (2005) concorda sobre as vantagens dos ligantes com polímeros, relacionadas às propriedades reológicas, em comparação aos convencionais:

- a) menor suscetibilidade à oxidação;
- b) aumento do ponto de amolecimento;
- c) aumento da viscosidade;
- d) aumento do retorno elástico e redução do fluxo viscoso;
- e) aumento da ductilidade e do ponto de ruptura FRAAS a baixas temperaturas.

O referido trabalho afirma, além disso, que estas características implicam diretamente em benefícios nas misturas asfálticas, tais como:

- a) redução da suscetibilidade térmica;
- b) aumento da flexibilidade e elasticidade a baixas temperaturas;
- c) maior resistência à fluência, trincas e deformações permanentes quando submetidas a altas temperaturas;
- d) aumento da vida de fadiga;
- e) aumento das forças de adesão e coesão do sistema agregado-ligante;
- f) maior resistência ao desgaste;
- g) maior resistência ao envelhecimento.

Leite *et al.* *apud* Silva (2005) corrobora que as propriedades dos asfaltos convencionais podem ser aperfeiçoadas com a modificação do ligante por incorporação de polímeros, dentre estas cita: formação de trilha de rodas, trincas por fadiga, fissuras térmicas, adesividade ligante/ agregado e coesão.

Amaral (2000) conclui que há vantagens nas misturas com CAP modificado com polímeros SBS, quanto à resistência à tração, estabilidade Marshall. A relação MR/RT sugere melhor comportamento em relação ao módulo de resiliência. Também constatou no ensaio de fluência por compressão diametral, ampliação da fase elástica. Santos (2005) verificou, com adição do polímero SBS, ganho expressivo na resistência à tração, assim como maiores módulos resilientes. A vida de fadiga cresceu em 668% em comparação a mistura constituída com CAP convencional.

#### 2.3.5.2 Polímero EVA

EVA - Copolímero de etileno e acetato de vinila - cuja composição pode variar de uns poucos por cento de acetato até cerca de 50%. De acordo com

esta proporção, as propriedades variam de um termoplástico muito semelhante ao polietileno de baixa densidade até um elastômero. Quanto maior o teor de acetato, maior o caráter amorfo e as propriedades se aproximam às de um elastômero. A redução do teor de acetato, acarreta em maior cristalinidade e, portanto no comportamento plastomérico. Suas maiores vantagens são a resistência à flexão e estabilidade térmica, aliadas a um custo razoável, segundo Leite (1999, p.56).

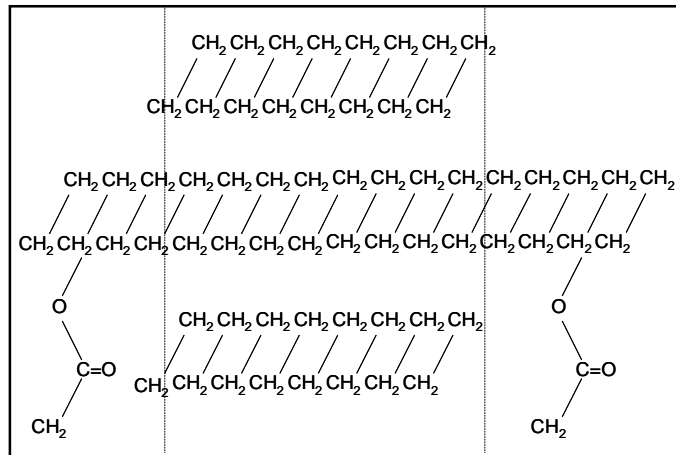


Figura 2.3-2 - Estrutura molecular do polímero EVA (LEITE,1999)

Hunter (1994) *apud* Homem (2002) cita que o efeito da adição desse polímero é o aumento da viscosidade do ligante, sem que ocorram mudanças significativas nas propriedades elásticas do mesmo. Para teores baixos de acetato de vinila e em temperaturas baixas, a sua presença enrijece a mistura, mas não modifica as propriedades elásticas. À medida que o teor aumenta (até 50%), o polímero torna-se mais flexível, embora continue não possuindo propriedades elásticas (HUNTER, 1994 *apud* HOMEM, 2002).

Algumas vantagens de se utilizar um plastômero como modificador são: baixa viscosidade na temperatura de usinagem, boa compatibilidade entre ligante e agregados, boa adesividade, mistura homogênea e não toxicidade do polímero e de seus produtos de decomposição (LEITE,1999).

A modificação do ligante com EVA promove, segundo Corté (1998) *apud* Homem (2002), a redução da penetração, aumento da temperatura do anel e bola e redução da suscetibilidade térmica. A magnitude dessas mudanças está vinculada ao percentual



adicionado de polímero. O aumento do teor acarreta aumento na consistência em altas temperaturas.

Leite (1999) conclui que o teor e o tipo de polímero requerido na modificação do ligante irá depender do clima, do tráfego e do tipo de pavimento. Tendo em vista o alto grau de insolação no Brasil, menciona:

- a) em CBUQ a seleção pode ser efetuada a partir do critério SUPERPAVE. Os resultados mostraram que o emprego de 3 a 7% de polímero EVA obtém-se grau de desempenho de PG 70 a PG 82;
- b) o polímero EVA apresenta alta compatibilidade com a maioria dos ligantes e não requer alto cisalhamento na sua incorporação;
- c) o preço do citado polímero é um dos mais baratos perdendo, somente, para a borracha moída de pneu;
- d) os asfaltos modificados por EVA por serem muito menos susceptíveis ao envelhecimento do que os modificados por SBS, parecem ser os mais indicados para clima quente. Entretanto quando se necessita de uma maior elasticidade, por exemplo, pela utilização de base granular flexível, pode-se empregar CAP modificado com uma mistura de EVA e SBS, resultando num produto com maior elasticidade que o ligante modificado por EVA e com maior resistência ao envelhecimento comparado ao asfalto modificado por SBS.

Idelfonso (2007) incorporou EVA, descartado pela indústria de calçados, pelo processo seco em misturas asfálticas e obteve bons resultados quanto à resistência a fadiga e desgaste. No entanto, as misturas se tornaram mais suscetíveis a deformação permanente.

### 2.3.6 Experiências em campo

A primeira experiência brasileira ocorreu em 1974, na BR-116 com o uso de CAP modificado com resina epóxi. Em seguida, foi feita uma aplicação sobre o tabuleiro metálico da ponte Rio-Niterói, utilizando asfalto modificado com 15% de resina epóxi líquida e 40% de extrato aromático. Houve também experiências no Aeroporto Santos Dumont, trechos da Avenida Atlântica e da Avenida Brasil, com látex introduzido no tambor misturador da usina de concreto asfáltico, resultando numa heterogeneidade no final. E ainda no autódromo de Jacarepaguá foi feita aplicação de mistura asfáltica com polímero SBS entre 1996 e 1997, (BERNUCCI *et al.*, 2007, p.64).

Em 1990, no Rio de Janeiro, o DNER conjuntamente com IPR recobriu um trecho de 300m utilizando asfalto modificado com SBS e mais 300m com asfalto modificado com EVA, na Rua Leopoldo Bulhões, (RAMOS *et al.*, 1996).

DNER (1998) *apud* Amaral (2000) menciona a falta de monitoramento adequado de alguns trechos experimentais executados com asfalto-polímero, tais como: o RJ-104 com látex na Rodovia Bandeirantes com SBS (Betuflex) e o PE-74 e PE-75 com SBS, entre outros.

Vinha (2000) *apud* Mourão (2003) aludi a mistura asfáltica SMA utilizada nos serviços de recapeamento do autódromo de Interlagos em São Paulo, no ano de 2000, usando ligante modificado AMP (6,0% SBS). Em 2001, também, foi executado um trecho experimental na via Anchieta, usando mistura SMA constituída de asfalto modificado com SBS, cujo resultado funcional e estrutural foram satisfatórios (SILVA, 2005).

### 2.3.7 Especificações

Devido a reologia ser vinculada a temperatura, as especificações americanas (ASTM), européias (EN 12591) e as brasileiras dos cimentos asfáltico são referentes a penetração a 25°C ou a viscosidade absoluta a 60°C, e os ensaios tradicionais, avaliadores das propriedades físicas, são: efeito do calor e do ar, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, ponto de ruptura Frass, ductilidade, solubilidade em tricloroetileno, viscosidade Saybolt-Furol a 135°C, 150°C e 177°C, e suscetibilidade térmica.

Em 1987 foi estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – Strategic Highway Research Program – SHRP, cujo financiamento pelo governo alcançou o valor de US\$ 150 milhões. Concentrou-se em pesquisas sobre ligantes e misturas betuminosas, com o objetivo de evitar problemas de deformação permanente nos pavimentos, trincas a baixas temperaturas, envelhecimento, fadiga e descolamento por suscetibilidade à umidade. Concluído em março de 1993, resultou nas especificações SUPERPAVE com base nas temperaturas do pavimento em serviço.

Os pesquisadores do SHRP, não conformados com o empirismo das especificações, desenvolveram novos requisitos, fundamentados em ensaios reológicos e critérios relacionados ao desempenho em serviço. Tal análise visa constatar se o CAP consiste no mais adequado para as regiões ao qual o revestimento será construído, levando-se em consideração a temperatura local do pavimento e o volume de tráfego das vias.

As análises realizadas, segundo as especificações Superpave, são: *rotational viscometer* (viscosidade dinâmica, RV), *dynamic shear rheometer* (cisalhamento dinâmico, DSR), *bending beam rheometer* (BBR) e *direct tension teste* (DTT). O ligante é ensaiado na condição original e após duas formas diferentes de envelhecimento: o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT, ASTM D2872), simula os efeitos durante a usinagem e compactação, e o *Pressure Aging Vessel* (PAV ASTM D454/D572), do pavimento em serviço, ao longo de sua vida útil. Os ligantes são classificados em graus de temperaturas máxima e mínima, estabelecidas como grau de desempenho (PG), por exemplo o PG 76+10, significa temperatura máxima 76°C e mínima 10°C.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Agregados e Material de Enchimento

Selecionou-se seixo rolado, resíduo de construção e demolição (RCD), areia de origem residual e cimento portland, para confecção das misturas asfálticas deste trabalho.

O material graúdo foi caracterizado através dos ensaios de granulometria, densidades real e aparente, absorção de água e desgaste por abrasão “Los Angeles”, e o agregado miúdo quanto a granulometria e densidades real e aparente. Realizaram-se os ensaios nos laboratórios do Grupo de Geotecnia e de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Amazonas

O seixo proveniente do leito dos rios amazônicos obtém-se, em geral, por dragagem, causando impacto ambiental aos ecossistemas fluviais da região. Apresenta superfície lisa e forma arredondada (Figura 3.1-1), sendo tais características responsáveis por menor intertravamento das partículas na mistura asfáltica, reduzindo, assim, a resistência ao cisalhamento, segundo Nunes (2006).



Figura 3.1-1: Amostra do agregado graúdo seixo

Como alternativa ao citado material, utilizou-se um agregado proveniente da reciclagem de resíduo de construção e demolição (RCD). Na obtenção desse material

alternativo três etapas foram realizadas. A primeira constitui em uma seleção dos materiais (Figura 3.1-2), onde foram priorizados aqueles oriundos de concreto estrutural, sendo descartados os resíduos de natureza cerâmica como azulejos, telhas, gesso e ferragens. Segundo Frota; Menta; Nunes (2003) os resíduos de natureza cerâmica não geram resultados satisfatórios nas misturas asfálticas. A etapa seguinte referiu-se à reciclagem, por meio de uma unidade recicladora com dois britadores tipo mandíbula, pertencente à empresa Araújo Lima e Cia LTDA, localizada no bairro Colônia Oliveira Machado em Manaus (Figura 3.1-3). Na última etapa o material foi separado segundo os tamanhos de brita comercial, resultando em um agregado graúdo com forma irregular e superfície rugosa (Figura 3.1-4).



Figura 3.1-2: Seleção do Resíduo de Construção e Demolição



Figura 3.1-3: Etapa de Britagem



Figura 3.1-4: Agregado Graúdo RCD após reciclagem

O fíler, que tem a finalidade de preencher os vazios existentes na mistura asfáltica, possui uma graduação mínima segundo a norma DNIT EM-367/97. Visando tal objetivo, são utilizados, normalmente, nesses tipos de misturas o cimento portland, a cal hidratada, o pó de pedra, a cinza volante, dentre outros. Nesta pesquisa empregou-se o cimento Portland.

### 3.1.2 Ligantes asfálticos

Na composição das misturas asfálticas do presente trabalho, utilizaram-se dois tipos de ligantes: a) cimento asfáltico de petróleo — CAP 50/70, empregado na construção das vias públicas manauaras e fornecido pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN) da empresa Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás); e b) CAP 50/70 modificado com o polímero EVA, denominado nesta pesquisa como AMP EVA.

Os citados ligantes foram caracterizados pelos métodos tradicionais, assim como pelo *Strategic Highway Research Program*, constantes nas especificações *Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave)*. Os experimentos constantes em tais especificações realizaram-se no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello (CENPES) da Petrobrás, na cidade do Rio de Janeiro.



Figura 3.1-5: Amostra de copolímero de etileno e acetato e vinila

A Figura 3.1-5 apresenta uma foto referente a amostra do copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), nome comercial EVAX<sup>®</sup>, fabricado pela DuPont. Na obtenção do CAP 50/70 modificado com EVA foram incorporados 4% do copolímero de etileno e acetato de vinila, utilizando-se um misturador composto por um agitador mecânico, uma manta capaz de comportar um béquer de 5 litros e um controlador de temperatura (Figura 3.1-6). A

homogeneização da mistura ocorreu durante duas horas, na temperatura de 150°C e de acordo com uma rotação de 300 rpm.



Figura 3.1-6: Misturador: controlador de temperatura, agitador mecânico e manta. Equipamento utilizado para: (a) ensaios de caracterização de ligante realizado no CENPES e (b) confecção das misturas no Laboratório do Grupo de Geotecnia da UFAM

As misturas pesquisadas foram do tipo concreto asfáltico (CA), diferindo pelo tipo de agregado graúdo (seixo ou RCD), pelo asfalto (CAP REMAN ou CAP modificado com EVA) e, ainda, pelo teor de ligante obtido pelo procedimento de dosagem. A seleção da granulometria seguiu o método de Bailey, objetivando favorecer um efetivo contato entre os grãos maiores de cada material no esqueleto da mistura.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização dos Ligantes

Os ligantes asfálticos foram caracterizados: a) de forma tradicional, por meio da Densidade Relativa, Penetração, Ponto de Amolecimento e Ponto de Fulgor, requeridos pela especificação brasileira — ANP 2005; e b) conforme o programa SHRP, onde foram



avaliados em ampla faixa de temperatura, englobando todas as fases de sua utilização: usinagem, bombeamento, transporte, espalhamento, compactação, e ao longo da vida útil.

O referido programa estabelece ensaios baseados nas propriedades reológicas, tendo como meta relacionar os parâmetros a serem obtidos com o desempenho das misturas em serviço. Os experimentos são realizados em temperaturas baixas, médias e altas, onde são avaliadas as propriedades viscoelásticas do ligante e a sua rigidez. As propriedades físicas do material betuminoso são determinadas pelo: Ponto de Fulgor (garante segurança no manuseio), Viscosímetro Rotacional (assegura adequado bombeamento, transporte e usinagem), Reômetro de cisalhamento dinâmico (tem-se os parâmetros viscoelásticos), Reômetro de fluência em viga e Prensa de tração direta (verifica a rigidez), além da Estufa de Filme Fino Rotativo e Vaso de Envelhecimento pressurizado (assinala o envelhecer). A mencionada especificação (*Superpave*) define valores fixos para os parâmetros resultantes dos ensaios, como também estabelece limites para o enquadramento do material em função de temperaturas, classificando-o pelo grau de desempenho PG (*performance grade*). Por exemplo, a classificação PG 64 -10, significa que o ligante é apropriado para temperatura máxima de 64°C e mínima de -10°C.

Leite e Tonial (1994) realizaram estudos para adaptação das especificações SUPERPAVE às condições brasileiras. Efetuaram um levantamento das temperaturas do ar mínimas e máximas absolutas, baseado nas Normas Climatológicas de 1961 a 1990 que continham dados de 209 estações climatológicas brasileiras e, determinaram os graus de desempenho para as diversas regiões do Brasil. O resultado do aludido trabalho está apresentado no mapa da Figura 3.2-1.

A especificação SUPERPAVE sugere, além disso, que a velocidade de carregamento e o volume de tráfego sejam considerados na seleção do ligante. Os ensaios supõem carregamentos de caminhões a altas velocidades e na frequência de 10rad/s, adequados para a

velocidade de 90 km/h. No caso de parada de ônibus, estacionamento, entre outros, é recomendado aumentar 1 ou 2 PG no grau quente (6°C ou 12°C). Também, o volume do tráfego é considerado — expresso pelo número N, quando exceder a  $10^6$  repetições do eixo padrão, o grau quente deve ser majorado de 1 PG (6°C) ou, no caso de exceder  $10^7$  repetições do eixo padrão, acrescido de 2 PG (12°C).

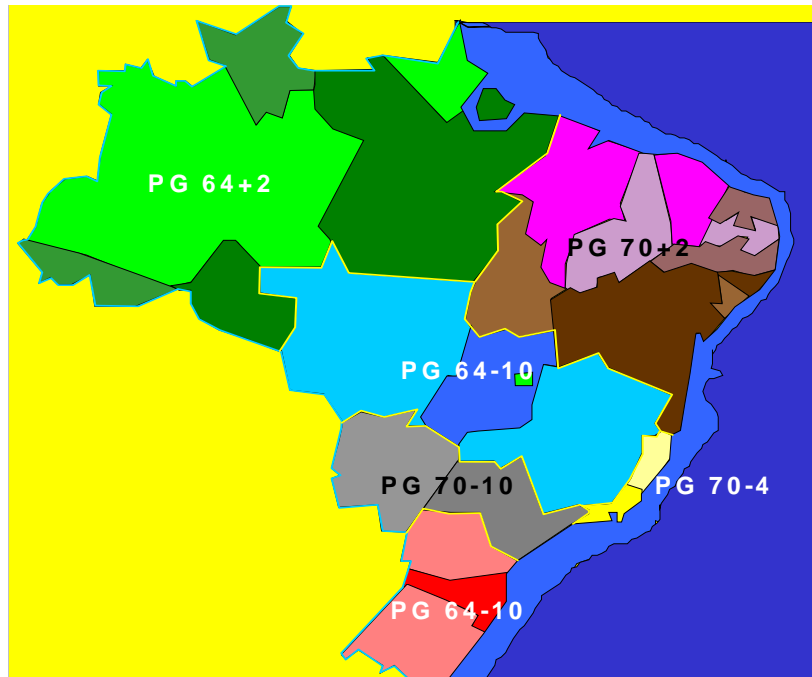


Figura 3.2-1: Grau de desempenho requerido para ligantes no Brasil (Leite e Tonial, 1994)

### 3.2.1.1 Ensaios Tradicionais

O ensaio usado para medir a Densidade Relativa do CAP a 25°C foi realizado de acordo com NBR 6296/2004 e ASTM D 70. O ligante foi colocado em um picnômetro até preencher  $\frac{3}{4}$  do volume total e em seguida resfriado até atingir a temperatura de 25°C, completando-se, então, com água destilada, sendo em seguida, pesado o conjunto (Figura 3.2-2). Este parâmetro converte massa em volume, sendo, igualmente, utilizado nos cálculos do teor de ligante de projeto de misturas asfálticas, é determinado de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Massa específica} = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]} \quad (1)$$

Onde,

A = massa do picnômetro;

B = massa do picnômetro preenchido com água destilada a 25°C;

C = massa do picnômetro preenchido  $\frac{3}{4}$  com amostra;

D = massa do picnômetro preenchido com amostra e água;

Densidade Relativa = Massa Específica x 0,9971.

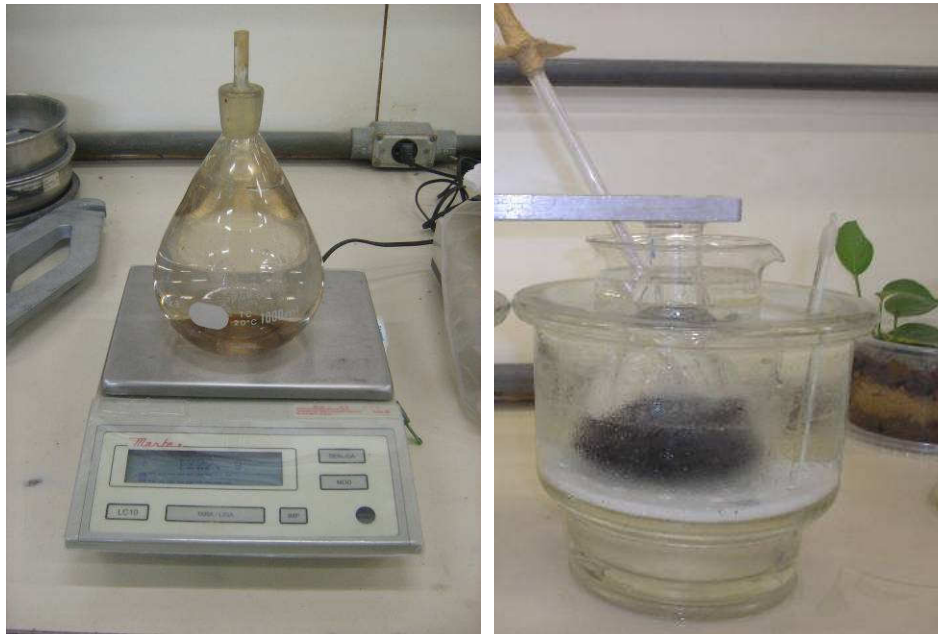


Figura 3.2-2: Amostra de ligante em banho a 25°C no ensaio de Densidade Relativa

O ensaio de Penetração seguiu os procedimentos da ABNT 6576/ 98. Após estabilização na temperatura de 25°C, o ligante foi colocado no prato do penetrômetro (fabricante HUMBOLDT). A agulha, carregada com 100g, foi posicionada na superfície da amostra, logo após 5 segundos da sua liberação foi anotada a penetração (Figura 3.2-3). Foram realizadas três determinações, sendo o resultado considerado como a média destes valores. Desconsideram-se os valores com diferença superior a 0,4 mm. O presente experimento mede a consistência do CAP, podendo, assim, caracterizar a dureza do ligante, pois quanto menor a penetração, maior a sua dureza. Com o aumento da profundidade de penetração, o asfalto altera seu comportamento de rígido e frágil para flexível e dúctil.

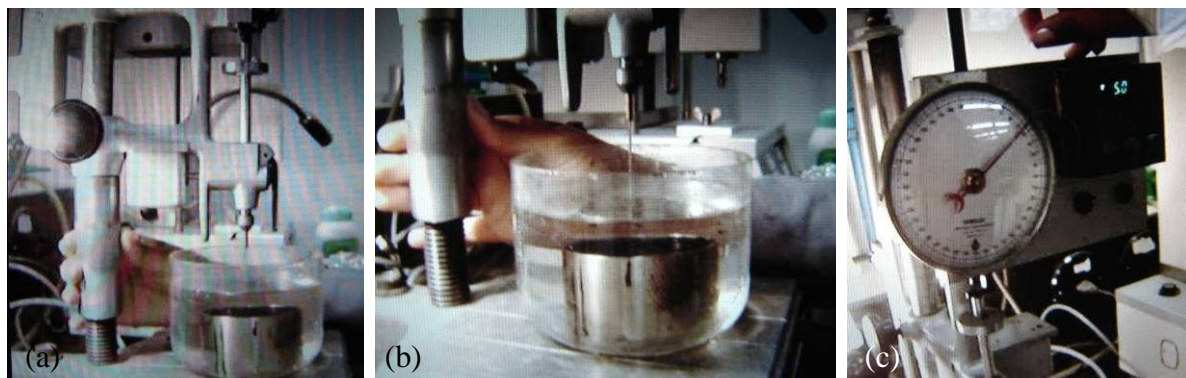


Figura 3.2-3: (a) Penetrômetro (b) Cuba de transferência com amostra (c) Deslocamento após 5 segundos

O ensaio de Ponto de Fulgor, por outro lado, relaciona-se a segurança ao manuseio do asfalto durante transporte, usinagem e estocagem. Por definição, é a menor temperatura à qual os compostos do ligante, emanados durante o seu aquecimento, se inflamam na presença de uma fonte externa de chama. No trabalho em pauta foi realizada pela NBR 11341/ 2004, em vaso aberto de Cleveland. Adicionou-se ligante a cuba de ensaio, fazendo-se com que a temperatura da amostra fosse acrescida. Em intervalos de 2°C, foi passada a chama sobre a cuba. O Ponto de Fulgor consiste na menor temperatura, na qual a aplicação da chama inflama, causada pela ignição dos vapores oriundos da amostra ensaiada.

Outro ensaio realizado foi o do Ponto de Amolecimento, também conhecido como método Anel e Bola. É uma medida empírica da dureza e da trabalhabilidade, considerando um ponto de transição aproximado, pois os cimentos asfálticos não possuem ponto de fusão definido, amolecem gradativamente, e à proporção que a temperatura aumenta. Nesta pesquisa esse experimento seguiu a NBR 6560/2000. Uma esfera de aço foi centralizada sob a amostra, contido em anel metálico padronizado, dentro de um béquer em banho de água, onde se aplicou aquecimento, amolecendo o asfalto. O Ponto de Amolecimento indica a temperatura na qual a bola atravessou o anel e deslocou-se para o fundo do béquer (Figura 3.2-4).

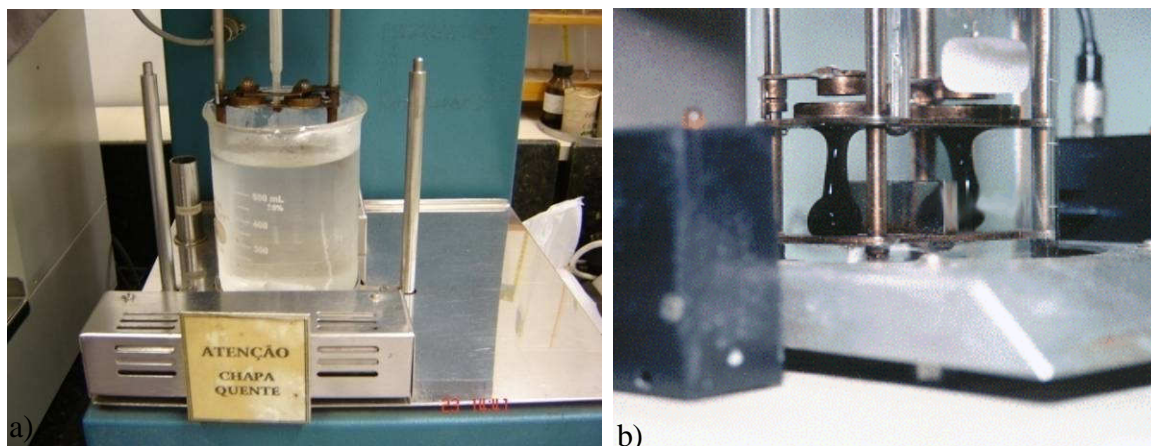


Figura 3.2-4: (a) Início do ensaio de Ponto de Amolecimento e (b) Término do ensaio de Ponto de Amolecimento

### 3.2.1.2 Ensaio *Superpave*

O processo de envelhecimento do asfalto é afetado pela presença de oxigênio, pela radiação ultravioleta e por variações de temperatura. Causa, em geral, um aumento da consistência do ligante e, conseqüentemente, maior rigidez da mistura betuminosa, podendo ocasionar fissuras e desagregação nestes compósitos. Têm-se ensaios acelerados de laboratório que identificam os CAPs voláteis ou muito suscetíveis à oxidação (LEITE, 1999).

Durante a usinagem os efeitos de evaporação e oxidação, denominado envelhecimento a curto prazo, ocorrem em função da volatilidade e da resistência à oxidação, sendo dependes da natureza química do ligante. A especificação *Superpave* indica o ensaio ASTM D 2872, *Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT*, impondo uma ação semelhante aquela que o material sofrerá num processo de usinagem.

Uma fina película de ligante, aproximadamente 35g, foi colocada em cada recipiente de vidro aberto. Os mesmos giraram continuamente dentro de uma estufa a 163°C, durante 85 minutos (Figura 3.2-5). As amostras sofriram modificações devido ação da referida temperatura e pela injeção de ar a cada 4 segundos. Após o envelhecimento, observaram-se as variações no peso das amostras. Posteriormente, foram executados os ensaios de Penetração conforme descrito no item 3.2.1.1



Figura 3.2-5: (a) Recipiente com ligante usado (b) na estufa de fino filme rotativo

A especificação Superpave recomenda, ainda, o Vaso de Envelhecimento Pressurizado (*pressure aging vessel* - PAV), que simula o endurecimento oxidativo do ligante ao longo da vida útil do pavimento (envelhecimento a longo prazo), com valores aproximados em torno de 10 anos.

As amostras previamente envelhecidas segundo o RTFOT, foram colocadas em placas rasas de aço inox e inseridas num vaso sob pressão constante de 2,1MPa, na temperatura 95°C e durante 20 horas. Devido ao confinamento apresentaram bolhas de ar, e para retirá-las foram submetidas a uma estufa a vácuo durante 30 minutos (Figura 3.2-6). Após envelhecimento, tais amostras foram ensaiadas nos equipamentos DSR e BBR.

Visando caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante empregou-se o Reômetro de Cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* - DSR). Mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), submetendo-se uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias. Sob altas temperaturas,  $\delta$  tende a 90°, e a baixas temperaturas  $\delta$  aproxima-se de 0°. Controlando a rigidez a altas temperaturas, assegura-se que o asfalto forneça resistência ao cisalhamento (associada ao parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ ) global a mistura, em termos de elasticidade nas citadas temperaturas. Da mesma forma, o ligante não contribuirá para o trincamento por fadiga (associada ao parâmetro  $G^*.\text{sen}\delta$ ) se controlado sua rigidez em temperaturas intermediárias (Tabela 3.2-1).



Figura 3.2-6: Ensaio de Envelhecimento PAV: (a) amostra sendo colocada no (b) vaso de pressão, (c) vista frontal e (d) amostra após envelhecimento

Parâmetro	Temperatura	Ligante	Mínimo
$G^*/\text{sen}\delta$	$>46^\circ\text{C}$	Virgem	1 kPa
$G^*/\text{sen}\delta$	$>46^\circ\text{C}$	Pós RTFOT	2,2 kPa
$G^* \cdot \text{sen}\delta = G''$	Intervalo de $7^\circ\text{C}$ a $34^\circ\text{C}$	Pós RTFOT Pós PAV	5 MPa

Tabela 3.2-1: Parâmetros das especificações *Superpave*

O aludido experimento realizou-se conforme ASTM D 7175/2002, com um reômetro modelo CSA II (Figura 3.2-8), e na frequência de oscilação em 10rad/s. Os dados relativos à tensão, a deformação e ao deslocamentos foram lidos e gravados por meio de um computador. A temperatura do ensaio foi incrementada, segundo a Tabela 3.2-1, até atingir o mínimo especificado na mesma.

Ligante	Temperatura Inicial	Incremento
Virgem	58	+6
Pós RTFOT	64	+6
Pós RTFOT; Pós PAV	31	-3

Tabela 3.2-2: Temperatura inicial e incrementos usados nos ensaios DSR

Durante o citado experimento verteu-se o ligante em um molde (placa de borracha de silicone com um orifício no centro), sendo resfriado a temperatura ambiente (Figura 3.2-7). Em seguida, retirou-se a amostra do molde e levou-a a um dos discos pré-aquecido. Aguardou-se a estabilização na temperatura especificada, de acordo com a Tabela 3.2-2, e então era iniciado o ensaio.

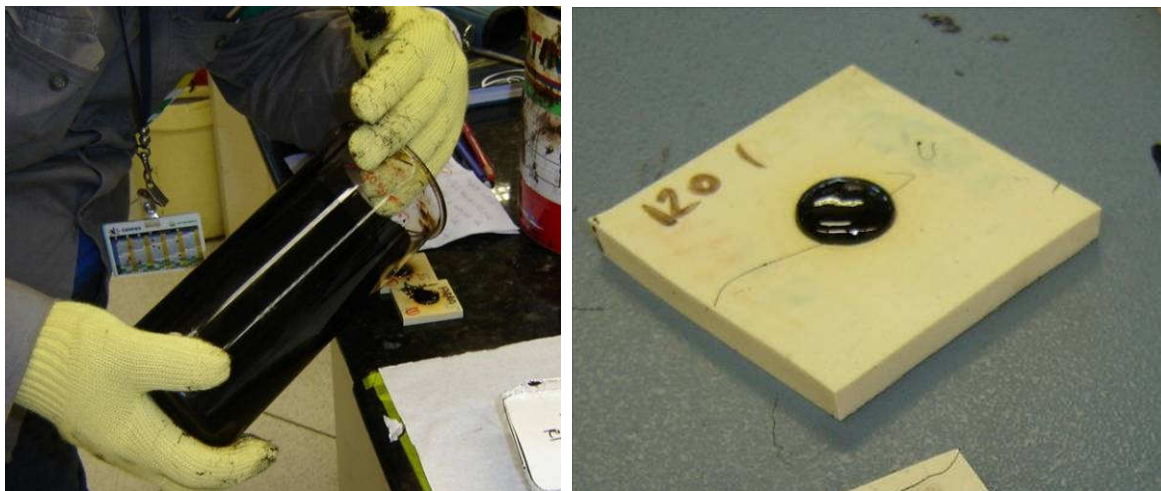


Figura 3.2-7: Preparação das amostras para ensaio DSR

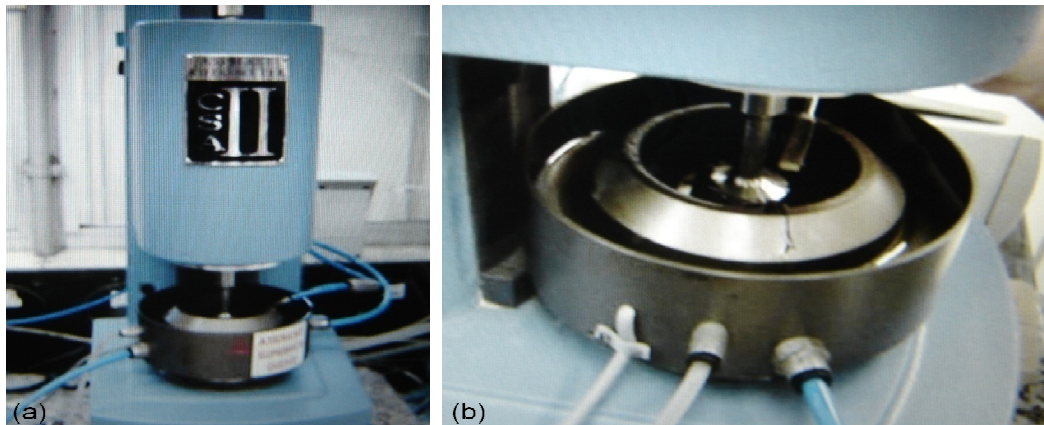


Figura 3.2-8: (a) Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, modelo CSA II e (b) Detalhes: cuba para banho, disco oscilatório e espátula aparando excesso de ligante.



Outro aparelho indicado pela metodologia Superpave é o Reômetro de Fluência em Viga, (*bending beam rheometer* – BBR) utilizado para caracterização da rigidez do ligante à baixa temperatura (intervalo de  $-36^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ ). Aplica-se um carregamento estático (*creep*) sobre uma vigota desse material betuminoso, medindo-se a rigidez estática ( $S$ ) e o logaritmo do módulo de relaxação ( $m$ ). Tais parâmetros se correlacionam com trincas térmicas.

Ligantes que possuam baixa rigidez estática não trincarão em clima frio. E, ainda, aqueles que possuam altos valores de “ $m$ ” são mais eficientes na dissipação das tensões desenvolvidas durante a contração, quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de trincas e fissuras térmicas. De acordo com as especificações Superpave, a rigidez  $S$  deve ser inferior a 300 MPa e o parâmetro de relaxação  $m$  deve ser superior a 0,300. A execução do ensaio seguiu a norma ASTM D 6648/2001, onde placas de aço foram encaixadas perfazendo uma forma para viga. As amostras ensaiadas foram vertidas na forma (Figura 3.2-9), cuidando para evitar formação de bolhas, sendo então o conjunto resfriado a temperatura ambiente (Figura 3.2-10).



Figura 3.2-9: (a e b) Montagem do molde e (c) Colocação do ligante

Após endurecimento do ligante, a viga foi retirada do molde e colocada em banho para estabilização na temperatura inicial. Em seguida ao equilíbrio da temperatura, aplicou-se uma carga estática durante 10 segundos e mediu-se a deflexão sofrida pela viga. Repetiu-se este procedimento com incremento da temperatura em  $-6^{\circ}\text{C}$ , até atingir os limites especificados.

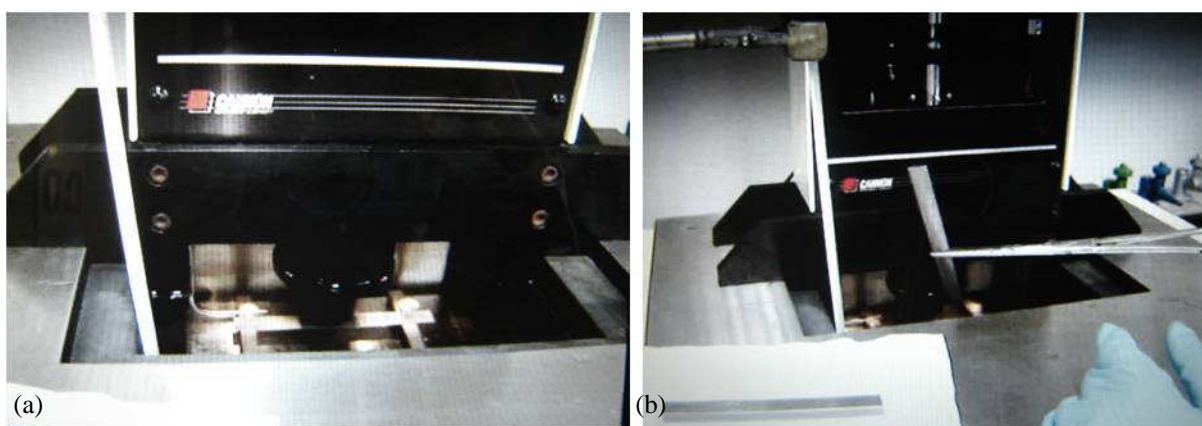


Figura 3.2-10: (a) Calibração e (b) Posicionamento da viga de ligante

Partindo dos fundamentos da mecânica e os dados obtidos ao longo do ensaio, obtém-se a rigidez e o parâmetro de relaxação:

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2) \quad e$$

$$m = S \times t \quad (3)$$

Onde,

$S$  = módulo de rigidez;

$\sigma$  = tensão aplicada;

$\varepsilon$  = deformação resultante;

$m$  = parâmetro de relaxação, coeficiente angular a 60s;

$t$  = 60 segundos.

Para assegurar que o ligante pode ser bombeado e facilmente usinado, é preconizado, pela Superpave, medir a viscosidade aparente do asfalto em temperaturas elevadas, para tal é recomendado o uso do Viscosímetro Brookfield. A viscosidade é dada pelo torque necessário para rodar um *spindle* (haste de prova) imerso na amostra de asfalto quente, a velocidade constante. A especificação requer que o citado material betuminoso tenha uma viscosidade inferior a 3 Pa.s (3000 cP) a 135°C. Executou-se o ensaio conforme a ASTM D 4402. Na Figura 3.2-11, visualiza-se os detalhes do cilindro coaxiais e viscosímetro utilizados.

Colocou-se a amostra no cilindro coaxial, de forma que o *spindle* 21 ficasse totalmente submerso no asfalto e, também, não houvesse transbordamento (Figura 3.2-11). O cilindro foi assentado numa manta e, então, seleccionou-se a temperatura de ensaio (120°C, 135°C, 150°C, 175°C). Depois de estabelecido o equilíbrio, iniciou-se a rotação do motor numa determinada velocidade, de forma que desenvolvesse resistência ao torque, variando-se de 10% a 98% da capacidade total do equipamento (Figura 3.2-12).

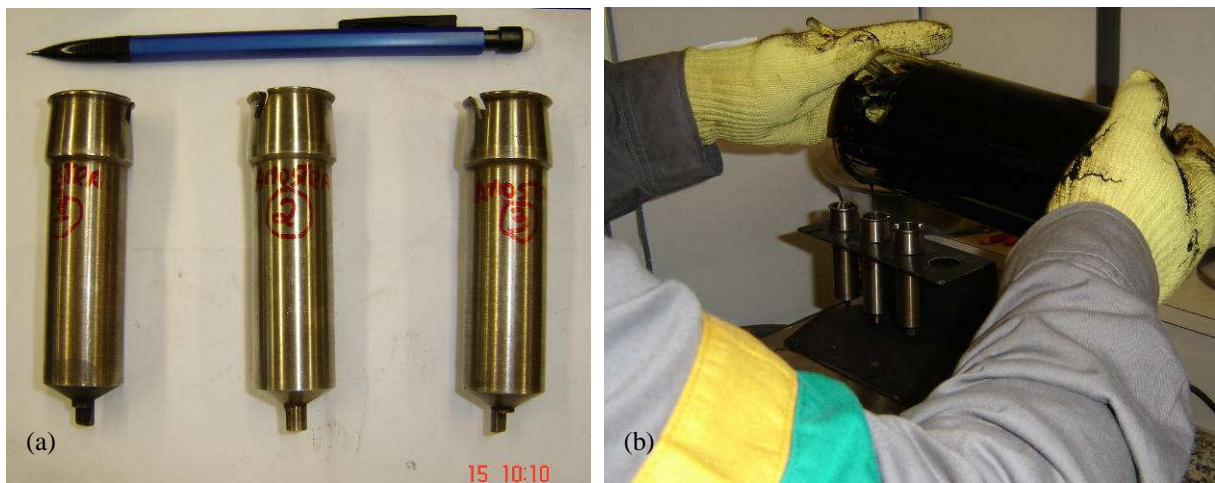


Figura 3.2-11: (a) Cilindro coaxiais (b) Disposição das amostras nos cilindros



Figura 3.2-12: Viscosímetro rotacional Brookfield

### 3.2.2 Projeto de Mistura

A mistura asfáltica a quente consiste na combinação de agregados uniformemente misturados e recobertos com asfalto. Visando boa mistura e trabalhabilidade, além de conseguir fluidez suficiente do cimento asfáltico, o agregado e o asfalto devem ser aquecidos previamente à mistura.

O concreto asfáltico (CA), usado nesta pesquisa, é uma mistura a quente, de alta qualidade e cuidadosamente controlada, composta de cimento asfáltico e agregados bem graduados (graúdo, miúdo e filer), perfeitamente compactada até obter-se uma massa densa e uniforme (INSTITUTO DO ASFALTO, 2002).

Em síntese, os objetivos a serem alcançados pelo projeto de mistura são: asfalto suficiente para assegurar durabilidade ao pavimento, estabilidade apropriada ao tráfego, quantidade de vazios satisfatória para as devidas alterações climáticas e trabalhabilidade adequada para sua aplicação.

A escolha adequada da graduação dos agregados, de acordo com as faixas constantes em especificações (Superpave, DNIT), reside no fato da sua grande influência no desempenho da mistura. Na pesquisa em tela a seleção da graduação adotou as proposições do método de Bailey, o qual está fundamentado, principalmente, num esqueleto forte proporcionando grande estabilidade à mistura.

O teor de ligante de projeto (“teor ótimo”) foi determinado seguindo os critérios *Superpave* do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), e para moldar dos corpos-de-prova utilizou-se a Metodologia Marshall.

O comportamento mecânico foi determinado pelo ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica, visando avaliar as misturas asfálticas estudadas quanto à suscetibilidade à deformação permanente.

### 3.2.2.1 Seleção da Granulometria pelo Método de Bailey

Neste método, para as misturas chamadas de graduação densa grossa, o esqueleto é formado pelo contato grão a grão do agregado graúdo. Para desenvolver o projeto da mistura, segundo o referido método, é necessário:

- a) que as densidades relativa real e aparente dos agregados finos sigam a norma ASTM C127 e os agregados graúdos de acordo com a ASTM C128;
- b) determinar a quantidade de fíler;
- c) determinar a massa específica solta (MES) do agregado graúdo;
- d) determinar a massa específica compactada (MEC) do agregado fino;
- e) determinar a massa específica escolhida (MEE) para o agregado graúdo, a qual estabelece o grau de compactação do mesmo. É recomendado que o MEE esteja entre os valores 95% a 105% da massa específica solta (MES).

O volume de vazios, obtido pela massa específica escolhida (MEE) do agregado graúdo, foi calculado a partir da densidade aparente. Este volume foi preenchido pelo agregado fino na condição compactada, utilizando-se para tal a massa específica compactada (MEC) do agregado fino.

Os cálculos se iniciaram pela densidade de cada agregado, somando-se a massa total e, transformou-a em percentuais individuais de cada agregado. As etapas subseqüentes consistiram em ajustes quanto: à fração fina que existe no agregado graúdo, a fração graúda presente no agregado fino, além da contribuição do fíler para a fração fina. Enfim, converteram-se os percentuais individuais em peso, para uso no projeto da mistura desejada.

Determinou-se a massa específica solta (MES) do agregado graúdo de acordo com o método da ASTM C29. Representa a massa por unidade de volume que o agregado possui sem qualquer esforço de compactação. Esse procedimento foi realizado com os agregados graúdos — seixo e resíduo (RCD). Calculou-se pela razão entre a massa da amostra pelo volume do cilindro, considerou-se a média de três determinações:

$$MES = \frac{M_{am+cil} - M_{cil}}{V_{cil}} \quad (4)$$

Onde,

$M_{am+cil}$  = massa do cilindro com a amostra solta;

$M_{cil}$  = massa do cilindro;

$V_{cil}$  = volume do cilindro.

A massa específica compactada (MEC) consiste na massa por unidade de volume, quando existe máximo contato entre as partículas. Neste trabalho determinou-se tal parâmetro para o agregado graúdo (seixo e RCD) e miúdo (areia). Obtiveram-se os resultados de acordo com a seguinte fórmula e considerando-se a média de três determinações:

$$MEC = \frac{M_{am+cil} - M_{cil}}{V_{cil}} \quad (5)$$

Onde,

$M_{am+cil}$  = massa do cilindro com a amostra compactada;

$M_{cil}$  = massa do cilindro;

$V_{cil}$  = volume do cilindro.

A densidade relativa real e aparente do agregado graúdo foi determinada seguindo a norma ASTM C 127. O procedimento consistiu em colocar o agregado imerso em água destilada. Em seguida, enxugou-se com pano absorvente, sendo posteriormente pesado imerso em água (Figura 3.2-13). Finalmente, o agregado foi seco em estufa. As densidades foram calculadas a partir das fórmulas:

$$\text{Bulk specific gravity ou densidade aparente} = \frac{A}{(B - C)} \quad (6)$$

$$\text{Apparent specific gravity ou densidade real} = \frac{A}{(A - C)} \quad (7)$$

$$\text{Absorção} = \frac{(B - A)}{A} \quad (8)$$

Onde,

A = massa da amostra seca em estufa

B = massa da amostra saturada com a superfície seca

C = massa da amostra imersa



Figura 3.2-13: (a) amostra de seixo imersa em água destilada, (b) secagem da superfície do agregado

Na obtenção da densidade real e aparente do agregado fino utilizou-se a norma ASTM C 128. Inicialmente, a areia foi imersa em água destilada. Em seguida, com auxílio de um secador (Figura 3.2-14), enxugou-se a amostra até atingir a condição saturada com a superfície seca (verificou-se pelo teste do cone - Figura 3.2-15). Por último, o agregado foi seco em estufa. Determinaram-se as densidades pelas seguintes formulas:

$$\text{Bulk specific gravity ou densidade aparente} = \frac{A}{(B + S - C)} \quad (9)$$

$$\text{Apparent specific gravity ou densidade real} = \frac{A}{(B + A - C)} \quad (10)$$

$$\text{Absorção} = \frac{(S - A)}{A} \quad (11)$$

Onde,

A = massa da amostra seca em estufa;

B = massa do picnômetro preenchido com água;

C = massa do conjunto: picnômetro, amostra saturada superfície seca e água;

S = massa da amostra saturada com a superfície seca.



Figura 3.2-14: (a) amostra de areia imersa em água destilada, (b) secagem da amostra



Figura 3.2-15: Teste do cone para verificação da condição saturada superfície seca, no agregado fino

### 3.2.2.2 Determinação do Teor de Projeto

Para o estudo do teor de ligante seguiu-se algumas premissas da Especificação Superpave: a) utilização do Método Rice, visando considerar a absorção do ligante pelos agregados, contribuindo, desta forma, para cálculos mais precisos das propriedades volumétricas; b) o volume de vazios igual a 4% para o teor de projeto de ligante; c) as



composições granulométricas abaixo da linha de densidade máxima e fora da zona de restrição.

É necessário conhecer as densidades relativas dos materiais (agregados miúdo e graúdo, cimento Portland e Cimento Asfáltico de Petróleo) que irão compor a mistura, assim como, as densidades relativas na condição compactada e na condição não compactada. As avaliações das propriedades volumétricas das misturas realizaram-se conforme designado pelo Instituto do Asfalto (2002). As densidades relativas real e aparentes dos componentes das misturas foram determinadas conforme as normas ASTM C 127, ASTM C 128, ASTM D 70, e descrito nos itens anteriores.

Fundamentado em estudos anteriores do Grupo de Geotecnia e concernentes as dosagens com os agregados utilizados nesta pesquisa, estimou-se o teor inicial de ligante de projeto (FROTA *et al.*, 2006; 2007). Moldaram-se três corpos de prova (conforme será descrito no item 3.2.3) com o objetivo de medir a densidade relativa da mistura compactada, segundo ASTM D 2726 para misturas com seixo e ASTM D 1188 para as misturas com RCD (usada em misturas absorvas).

Após moldagem, aguardou-se até resfriamento do corpo-de-prova em temperatura ambiente, aproximadamente 27°C, durante no mínimo 15 horas. Em seguida foi pesado nas condições seca, submersa e saturado superfície seca (Figura 3.2-16).



Figura 3.2-16: Pesagem na condição: (a) seca (b) submersa (c) saturada superfície seca

A densidade da mistura compactada e a absorção foram obtidas pelas fórmulas:

$$G_{MB} = \frac{A}{(B - C)} \quad (12)$$

$$\text{Abs} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (13)$$

$$\text{Densidade} = 0,997 \times G_{MB} \quad (14)$$

Onde,

$G_{MB}$  – massa específica da mistura compactada;

Abs – absorção;

D – densidade relativa da mistura compactada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) a  $25^\circ\text{C}$ ;

A – massa da amostra seca ao ar;

B – massa da amostra submersa a  $25^\circ\text{C}$ ;

C – massa da amostra saturada superfície seca ao ar.

As amostras moldadas com RCD fizeram-se necessário usar selante nos corpos-de-prova, pois absorviam mais que 2% de água. Portanto, pesaram-se os corpos-de-prova ao ar, coberto com parafina e, também, na condição submersa (Figura 3.2-17).



Figura 3.2-17: Densidade relativa da mistura compactada utilizando-se parafina

A massa específica e a densidade foram determinadas segundo:

$$G_{MB} = \frac{A}{\left( C - B - \left( \frac{C - A}{D_P} \right) \right)} \quad (15)$$

$$\text{Densidade} = 0,997 \times G_{MB} \quad (16)$$

Onde,

$G_{MB}$  – massa específica do corpo de prova;

$D$  – densidade relativa da mistura compactada ( $\text{g/cm}^3$ ) a  $25^\circ\text{C}$ ;

$A$  – massa do corpo-de-prova seca ao ar;

$B$  – massa do corpo-de-prova coberto com parafina na condição submersa;

$C$  – massa do corpo-de-prova coberto com parafina;

$D_P$  – densidade da parafina.

Para o cálculo do volume de vazios na mistura compactada e, do mesmo modo, da absorção do asfalto pelos agregados foi imprescindível medir a densidade relativa máxima da mistura na condição não compactada. Os procedimentos seguiram em conformidade com ASTM D 2041.

A amostra de aproximadamente 1500 gramas foi preparada conforme o item 4.2.3 e no teor de projeto estimado, excluindo-se a etapa de compactação. A mistura foi revolvida com auxílio de uma pá, até resfriamento a temperatura ambiente, sendo em seguida colocada num cilindro metálico e pesada. Adicionou-se água destilada, e o conjunto foi a colocado em agitador mecânico onde, aplicou-se, imediatamente, vácuo de 30mmHg, durante 15 minutos (Figura 3.2-18). Após a retirada das bolhas, o conjunto foi completado com água destilada. Posteriormente a estabilização da temperatura a  $25^\circ\text{C}$  efetuou-se, novamente, a pesagem.

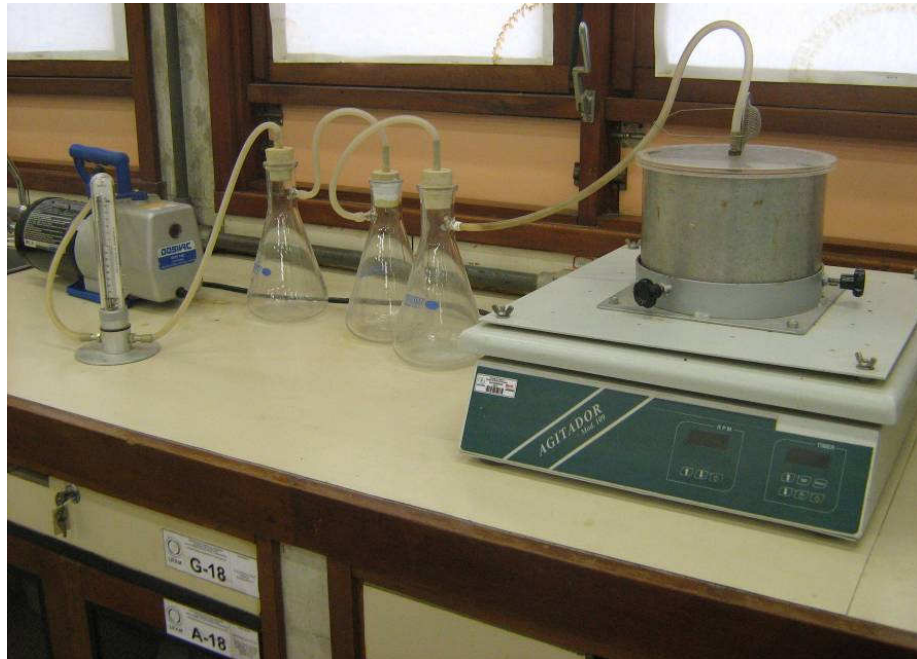


Figura 3.2-18: Ensaio densidade máxima medida, aplicação de vácuo

A massa específica máxima medida foi determinada pela fórmula:

$$G_{MM} = \frac{A}{(C + A - B)} \quad (17)$$

$$D_{MM} = G_{MM} \times 0,997 \quad (18)$$

Onde,

$G_{MM}$  – massa específica máxima medida;

$D_{MM}$  – densidade máxima medida;

A – massa da amostra após resfriamento;

B – massa do kitassato com amostra e completo com água destilada;

C – massa do kitassato cheio de água destilada.

Após de execução dos ensaios com o teor inicial estimado de ligante, efetuaram-se os cálculos das propriedades volumétricas, conforme:

a) A densidade relativa aparente para a composição de agregados, obtida pelo método Bailey:

$$G_{SB} = \frac{P1 + P2 + P3}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3}} \quad (19)$$

Onde,

$G_{SB}$  – densidade relativa aparente dos agregados;

$P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  – porcentagem do agregado graúdo, miúdo e fíler;

$G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$  – densidade relativa aparente do agregado graúdo, miúdo e fíler.

b) A densidade relativa efetiva dos agregados:

$$G_{SE} = \frac{(100 - P_B)}{\left( \frac{100}{G_{MM}} - \frac{P_B}{G_B} \right)} \quad (20)$$

Onde,

$G_{SE}$  – massa específica efetiva dos agregados;

$G_{MM}$  – massa específica máxima medida;

$P_B$  – teor inicial de projeto estimado do ligante em percentual;

$G_B$  – densidade do ligante.

c) A absorção de asfalto pelo agregado:

$$P_{BA} = 100 \times G_B \left[ \frac{(G_{SE} - G_{SB})}{(G_{SE} \times G_{SB})} \right] \quad (21)$$

Onde,

$P_{BA}$  – asfalto absorvido, percentual em peso de agregado;

$G_B$  – densidade do ligante;

$G_{SE}$  – massa específica efetiva dos agregados;

$G_{SB}$  – densidade relativa aparente dos agregados.

d) O teor de asfalto efetivo na mistura:

$$P_{BE} = P_B - \frac{P_{BA} \times P_S}{100} \quad (22)$$

Onde,

$P_{BE}$  – teor de asfalto efetivo na mistura, em percentual;

$P_B$  – teor de projeto estimado do ligante, em percentual;

$P_{BA}$  – asfalto absorvido, percentual em peso de agregado;

$P_S$  – porcentagem de agregados do peso total.

e) Percentual de vazios com ar na mistura compactada:

$$V_V = 100 \times \frac{(G_{MM} - G_{MB})}{G_{MM}} \quad (23)$$

Onde,

$V_V$  – volume de vazios com ar na mistura compactada em percentual;

$G_{MM}$  – massa específica máxima medida;

$G_{MB}$  – massa específica do corpo de prova.

f) Percentual de vazios preenchidos pelo asfalto na mistura compactada:

$$VCA = \frac{(G_{MB} \cdot P_B)}{G_B} \quad (24)$$

Onde,

$VCA$  – vazios cheios de asfalto, em percentual;

$G_{MB}$  – massa específica do corpo de prova;

$P_B$  – teor de projeto estimado do ligante, em percentual;

$G_B$  – densidade do ligante.

g) Percentual de vazios no agregado mineral:

$$VAM = V_V + VCA \quad (25)$$

Onde,

$VAM$  – vazios no agregado mineral, em percentual

$V_V$  – volume de vazios com ar na mistura compactada, em percentual

$VCA$  – vazios cheios de asfalto, em percentual

h) Relação entre os vazios cheios com asfalto e os vazios no agregado mineral

$$RBV = \frac{VCA}{VAM} \quad (26)$$

Onde,

RBV – Relação Betume Vazios

VCA – vazios cheios de asfalto, em percentual

VAM – vazios no agregado mineral, em percentual

Após os cálculos das propriedades volumétricas, para o teor de ligante estimado inicialmente, avaliou-se se o ponto atendia ao requisito ditado pelo volume de vazios próximo a 4%. Caso estivesse divergindo em mais que 0,5%, o procedimento era realizado novamente alterando-se o teor de ligante estimado.

Quando atendido o requisito, moldaram-se mais quatro grupos, contendo três corpos de prova, variando: -0,5%, -1,0%, +0,5% e +1,0%, em relação ao percentual do teor de ligante estimado. Determinou-se a densidade relativa da mistura compactada como descrito acima e seguindo a ASTM D 2726 e ASTM D 1188, para as misturas compostas com seixo e agregado reciclado. A massa específica efetiva dos agregados ( $G_{SE}$ ) foi calculada para o teor de ligante estimado e assumida como constante para os demais teores. Portanto, calculou-se a densidade máxima medida de acordo com:

$$G_{MM} = \frac{100}{\left( \frac{P_S}{G_{SE}} + \frac{P_B}{G_B} \right)} \quad (27)$$

Onde,

$G_{MM}$  – massa específica máxima medida;

$P_S$  – porcentagem de agregados do peso total;

$P_B$  – teor de ligante em percentual;

$G_{SE}$  – Massa específica efetiva dos agregados;

$G_B$  – densidade do ligante.

Para cada corpo-de-prova determinaram-se as seguintes propriedades volumétricas: volume de vazios ( $V_v$ ), vazios no agregado mineral ( $VAM$ ), vazios cheios com asfalto ( $VCA$ ) e Relação Betume-Vazios ( $RBV$ ). Em seguida, plotaram-se em um gráfico o valor de  $V_v$  e  $RBV$ , referente à média de cada grupo, em função do teor de ligante, totalizando cinco pontos. Posteriormente, adicionaram-se ao citado gráfico as respectivas linhas de tendência. Por fim, calculava-se o teor de ligante para um volume de vazios igual a 4%.

### 3.2.3 Confeção dos corpos-de-prova

Moldaram-se os corpos de prova de conformidade com o preconizado pelo método Marshall (DNER-ME 043/95), quanto à temperatura da mistura e a energia de compactação (Figura 3.2-19 e Figura 3.2-20).

A determinação da temperatura de mistura e da compactação é função da curva viscosidade-temperatura do ligante usado. A viscosidade de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s é especificada para mistura e o valor de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s para a compactação, quando se utiliza o viscosímetro rotacional. Conforme o Gráfico 3.2-1, as temperaturas selecionadas foram  $165^\circ\text{C}$  e  $155^\circ\text{C}$  de mistura e compactação, respectivamente, para o ligante REMAN. O asfalto modificado com polímero EVA obteve  $185^\circ\text{C}$  e  $175^\circ\text{C}$  para as temperaturas de mistura e compactação, respectivamente. Os agregados foram aquecidos  $+10^\circ\text{C}$  da temperatura de mistura, conforme indicado pelo método.



Figura 3.2-19: (a) Aquecimento dos agregados, (b) Aquecimento do ligante, (c) mistura dos componentes



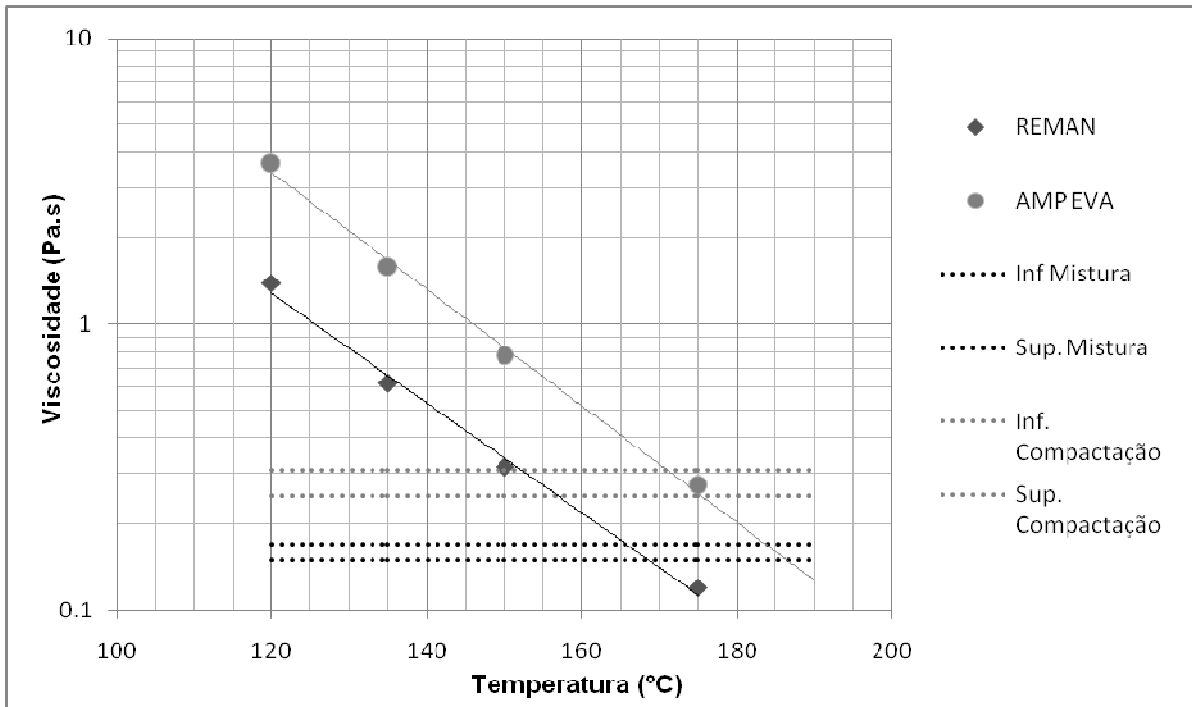


Gráfico 3.2-1: Viscosidade x Temperatura do ligante REMAN e AMP EVA



Figura 3.2-20: (a) Despejo da mistura no molde, (b) Compactador Marshall automático

### 3.2.4 Ensaios Mecânicos

Realizaram-se os ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral (RT) e por compressão axial dinâmico ou *creep* dinâmico, visando avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas, variando-se o agregado graúdo — material natural (seixo) e material alternativo (resíduo de construção e demolição), bem como o ligante (CAP 50/70 e CAP 50/70 com EVA)

Os experimentos foram realizados no laboratório do Grupo de Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas, onde se utilizou uma prensa multifuncional do tipo *Universal Testing Materials* (UTM) ou Máquina Universal de Testes da marca IPC Global (Figura 3.2-22). O citado equipamento possui mecanismos pneumáticos que possibilitam a aplicação de cargas dinâmicas, podendo-se variar os tipos de pulsos, frequências e condições de confinamento. Apresenta interface computacional possibilitando-se a utilização de programas para aquisição de dados. A UTM está inserida numa câmara de temperatura, com capacidade para alterar a temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$  até  $85^{\circ}\text{C}$ , para realização dos ensaios à temperatura controlada (Figura 3.2-21).



Figura 3.2-21: Vista geral da câmara de temperatura e do aquisitor de dados da UTM



Figura 3.2-22: Vista interna da câmara de temperatura, com detalhe da célula de carga e da câmara de ar da UTM

### 3.2.4.1 Ensaio de Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração, por compressão diametral (RT) seguiu o método ME 138/94 do DNER (Figura 3.2-23). Aplicou-se uma carga de compressão com o pistão atuando numa velocidade de  $0,8 \pm 1$  mm/s até a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. A carga de ruptura foi, então, anotada e determinou-se a resistência à tração por compressão diametral pela equação:

$$\sigma_r = \frac{2F}{100\pi Dh} \quad (28)$$

Onde,

$\sigma_r$  – resistência a tração, MPa;

$F$  – carga de ruptura, N;

$D$  – diâmetro do corpo de prova, cm;

$h$  – altura do corpo de prova, cm;



Figura 3.2-23: (a) Vista geral do ensaio RT (b) Posicionamento do CP (c) Corpo-de-prova após ensaio

### 3.2.4.2 Ensaio Compressão Axial Dinâmico

Utilizaram-se nos ensaios de *Creep* Dinâmico carregamentos correspondente à tensão axial ( $\sigma_{axial}$ ) de 100kPa (1kgf/cm<sup>2</sup>) para temperatura de 25°C, 45°C e 64°C. Mediram-se as deformações por meio de LVDT's colocados na face superior dos corpos de prova, por meio de uma placa de carregamento posicionada no topo do corpo de prova, possibilitando uma distribuição uniforme da carga.

Inicialmente determinaram-se as dimensões dos corpos de provas e, em seguida foram levados à câmara de temperatura para estabilização da temperatura, segundo a condição definida. Posteriormente, eram posicionados na máquina e fixados aos LVDT's, conforme mostra a Figura 3.2-24.

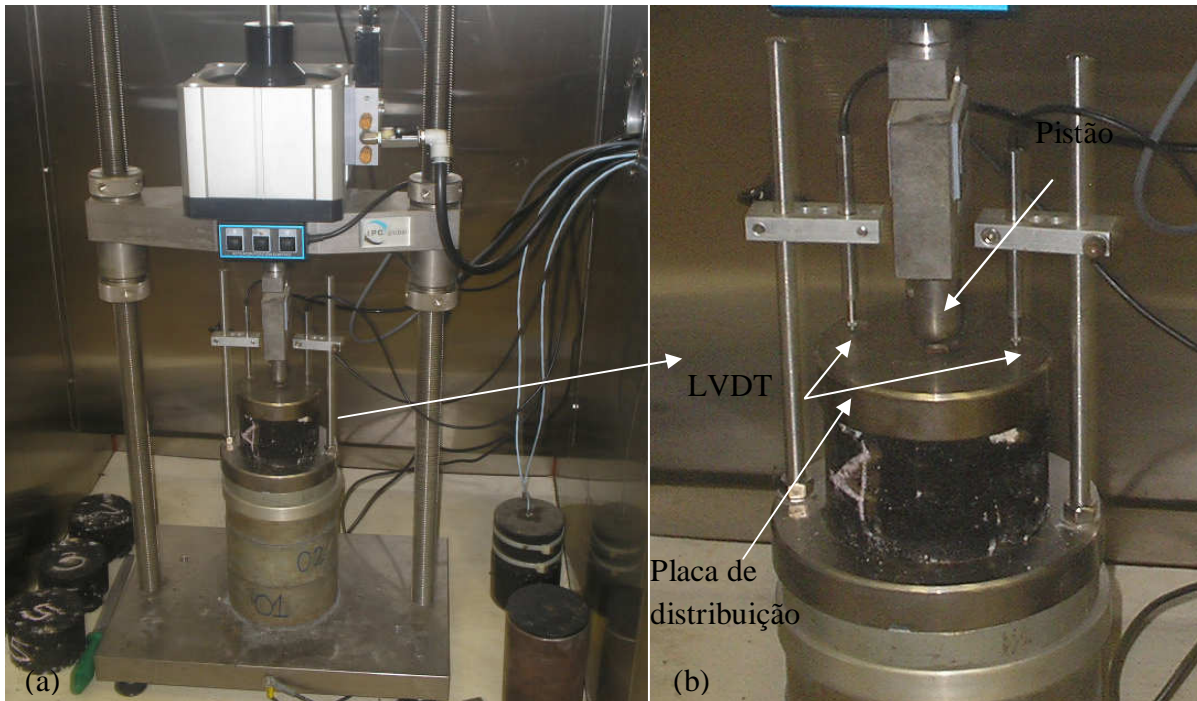


Figura 3.2-24: (a) Vista geral e (b) Detalhes do ensaio compressão uniaxial dinâmico

Esse ensaio consistiu na aplicação de cargas de compressão axial cíclicas, em pulsos de forma haversine, nos corpos de prova cilíndricos durante 1 hora, equivalendo a 3600 ciclos de carregamento, sendo 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento. Inicialmente era aplicada uma carga pré-condicionante de 20 kPa por 10 minutos (600 ciclos). Em seguida, aplicados 3600 ciclos de carga a 100 kPa. Ao final a carregamento era removido, sendo a deformação observada ao fim deste período como a deformação permanente. Visando assegurar boas condições do equipamento, foi estipulado como condição de parada, a deformação máxima específica igual a 5%. Os resultados foram obtidos a partir das formulas:

$$\varepsilon_{esp} = \frac{\varepsilon_{abs}}{h_R} \quad (29)$$

$$E_C = \frac{\sigma_{axial}}{\varepsilon_{esp}} \quad (30)$$

Onde:

$\varepsilon_{esp}$  – deformação específica, mm/mm;

$\varepsilon_{abs}$  – deformação permanente absoluta, mm;

$h_R$  – altura de referência inicial, mm;

$\sigma_{axial}$  – tensão axial aplicada no corpo de prova, kPa

$E_C$  – módulo de fluência dinâmico, kPa.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 Caracterização dos Agregados

A Tabela 4.1-1 mostra o resultado do ensaio de granulometria por peneiramento para os agregados miúdos e graúdos (areia, seixo e RCD). O Gráfico 4.1-1 apresenta a curva granulométrica no modelo indicado pela metodologia Superpave, onde o eixo x indica a abertura da peneira elevado a potência de 0,45 e no eixo y tem-se o percentual que passa em determinada peneira.

<b>Peneira (mm)</b>	<b>RCD</b>	<b>SEIXO</b>	<b>AREIA</b>
37,5	100,0%	100,0%	100,0%
25,0	100,0%	99,5%	100,0%
19,05	99,8%	99,5%	100,0%
12,5	57,7%	87,9%	100,0%
9,5	42,4%	64,0%	100,0%
6,3	19,2%	44,1%	99,8%
4,75	8,4%	34,9%	99,8%
2,36	3,7%	23,3%	98,8%
1,18	3,1%	14,2%	94,6%
0,600	2,7%	6,8%	77,9%
0,300	1,8%	2,1%	35,6%
0,150	0,9%	0,6%	8,7%
0,075	0,5%	0,2%	2,6%

Tabela 4.1-1: Composição granulométrica dos agregados

Observa-se que o resíduo de construção e demolição (RCD) pode ser classificado granulometricamente como pedregulho, concentrando maior percentual de partículas entre as peneiras com aberturas de 6,30mm e 19,05mm, detém, também, menos de 4% de finos em sua composição. O seixo, classificado quanto à textura como pedregulho arenoso, possui granulometria com menores diâmetros, relativo ao agregado alternativo, compreendendo a faixa entre as peneiras 19,05mm e 1,18mm e apresenta cerca de 20% da porção fina.

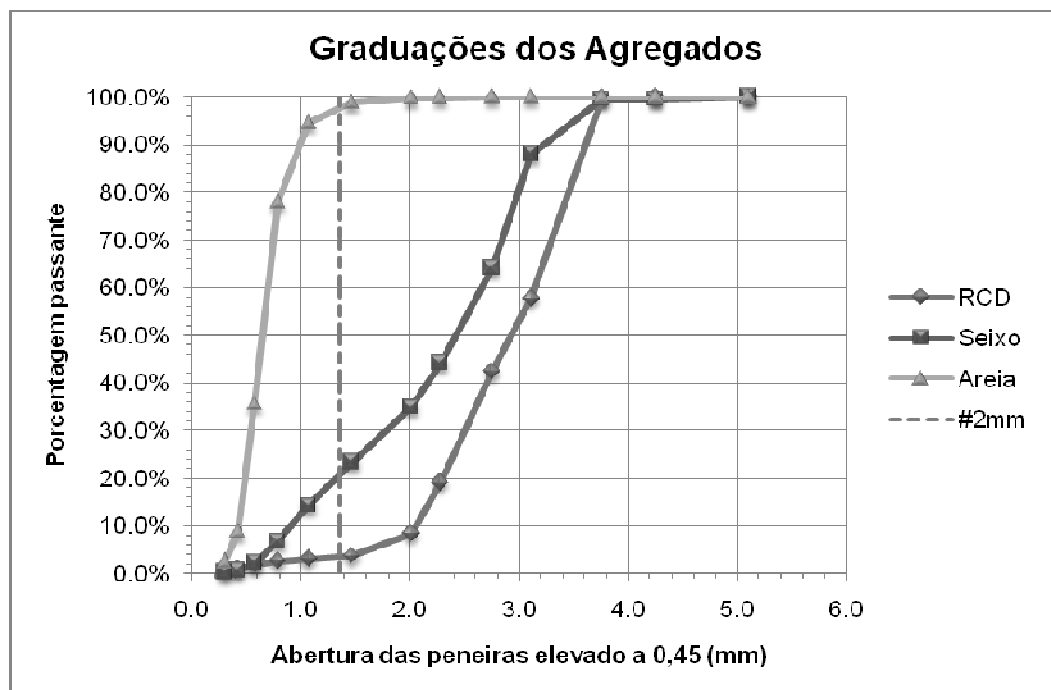


Gráfico 4.1-1: Curva Granulométrica do seixo, RCD e areia

A Tabela 4.1-2 indica os demais resultados dos ensaios de caracterização dos mencionados materiais, destacando-se para o agregado reciclado: baixa densidade relativa aparente e alta absorção. Ambos os valores evidenciam material com alta porosidade, proporcionando pesos unitários soltos e compactados inferiores comparados ao agregado aluvionar.

Roberts *et al.* (1996) relatou que as observações de campo não evidenciam uma boa correlação entre a perda verificada no ensaio de abrasão *Los Angeles* e o desempenho. Afirmou, igualmente, que este ensaio não é satisfatório para uso com escórias, cinzas vulcânicas ou outros agregados leves, pois a experiência mostrou que muitos destes agregados produzem excelente desempenho mesmo com alto valor de abrasão *Los Angeles*.

A normalização brasileira vigente (DNIT ES 031/2004) especifica que o material a ser utilizado como agregado graúdo deve apresentar valor máximo de 40%, quanto ao desgaste à abrasão “Los Angeles”. Embora, o resultado referente ao agregado de RCD tenha indicado o desgaste em torno desse valor limite (40%), as pesquisas realizadas pelo Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas mostraram que as misturas asfálticas testadas com esse



material apresentaram bom comportamento mecânico (FROTA; MELO; NUNES, 2005a; FROTA *et al.*, 2007; FROTA; MELO; D'ANTONA, 2007).

Característica	Método	Materiais		
		Seixo	RCD	Areia
Densidade relativa real	ASTM C128 e C127	2,647	2,513	2,677
Densidade relativa aparente		2,629	2,060	2,648
Absorção (%)		0,3%	8,75%	0,4%
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	NBR 6465	35	40	-
Massa unitária solta (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C29	1595,0	1150,0	-
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )		1787,0	1279,0	1733,0

Tabela 4.1-2: Características dos Agregados

Os valores das densidades real e aparente, absorção e abrasão *Los Angeles* obtidos na caracterização do agregado reciclado oriundo da construção civil, ratificam os dados publicados na literatura pesquisada (ÂNGULO, 1998; CARNEIRO *et al.*, 2001 e MOTTA, 2005).

Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando	
		Especificação DNIT	Resultado
Nº 40	0,42	100	100
Nº 80	0,18	95-100	100
Nº 200	0,075	65-100	96

Tabela 4.1-3: Especificação DNIT - Material de enchimento em misturas asfálticas

Na pesquisa em tela utilizou-se o cimento Portland como fíler ou material de enchimento, com a finalidade de preencher os vazios existentes na mistura asfáltica. Segundo a norma EM-367/97 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes — DNIT (extinto DNER), o citado material apresentou a graduação mínima, conforme indica a Tabela 4.1-3.

## 4.2 Caracterização do Ligante

Nesta dissertação foram empregados como ligantes nas misturas asfálticas estudadas: a) CAP 50/70, fornecido pela Refinaria da Petrobrás em Manaus (REMAM), e b) modificação deste com 4% do polímero EVA (AMP EVA) doado pelo CENPES – Petrobrás. As seguintes características do copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), nome comercial EVAX<sup>®</sup>, foram fornecidas pela DuPont: 28% de teor de acetato de vinila, 0,951 g/cm<sup>3</sup> de densidade (ASTM D 1505), 82°C de Ponto de Amolecimento (ASTM E 28) e 2,6MPa de Resistência à tração (ASTM D 1708).

### 4.2.1 Ensaio Tradicionais

O ensaio de Penetração consiste em uma medida indireta da consistência do ligante. O Gráfico 4.2-1 apresenta os resultados relativos a este experimento, nas amostras do ligante convencional (REMAN) e modificado com 4% do polímero EVA (AMP EVA), na situação virgem, ou seja, sem envelhecimento e, também, após simulação de envelhecimento em estufa RTFOT. Conforme esperado, devido à oxidação e perda de voláteis, observa-se que o envelhecimento acarretou endurecimento nas duas amostras, ou seja, ambas mostraram redução da penetração. Os resultados presentes no citado gráfico mostram, igualmente, que AMP EVA é mais consistente comparado ao REMAN, não obstante, tenha apresentado maior redução da penetração posteriormente ao envelhecimento. Os citados resultados indicam bom desempenho relacionado à resistência à deformação permanente.

Ainda, com relação ao referido experimento, ambos os ligantes atenderam aos limites especificados pela classificação que designa o CAP REMAM como CAP 50/70: 50 a 70 décimos de milímetro para penetração, como mostra a Tabela 4.2-1, e o mínimo de 55% para a penetração retida. A ASTM D 5841-95 estabelece valores de referência para cimento asfáltico modificado por polímero tipo III, onde se enquadra o polímero EVA, para uso em

construção de pavimentos. Cabe ressaltar que amostra AMP EVA apresentou penetração dentro do limite especificado (30 a 150 dmm) pela citada norma.

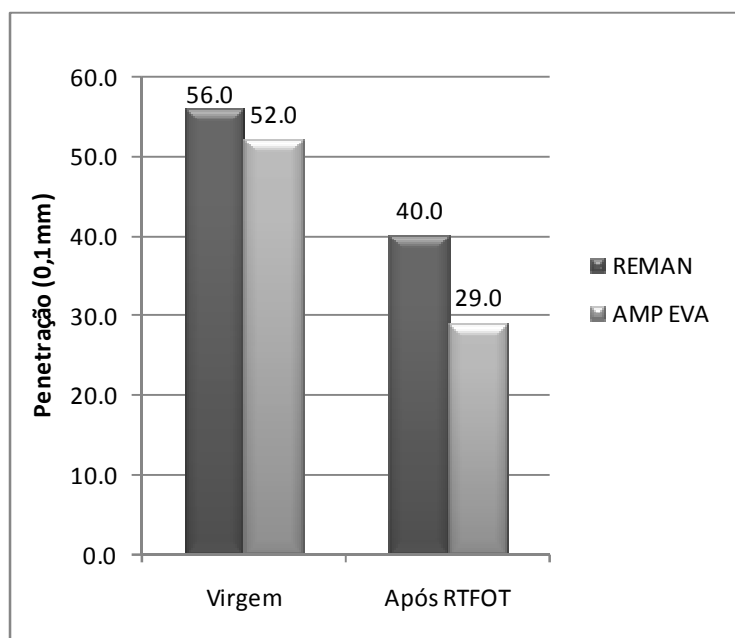


Gráfico 4.2-1: Resultado do ensaio de Penetração - REMAN e AMP EVA

Ligante	Penetração (0,1mm)				
	Virgem	Após RTFOT	Mínimo	Máximo	Retida
REMAN	56,0	40,0	50	70	71%
AMP EVA	52,0	29,0	-	-	56%

Tabela 4.2-1: Resultado do ensaio de Penetração - REMAN e AMP EVA

Morilha (2004) constatou em seu trabalho grande redução da penetração nos diversos asfaltos envelhecidos em estufa RTFOT, verificando que a maioria das amostras não atendia às especificações internacionais e brasileiras. Dentre os ligantes por ele estudados, a amostra de cimento asfáltico modificado com 5% de polímero EVA alcançou valor próximo a 32% para a penetração retida. Leite (1999) concernente a um CAP 20 de origem brasileira misturado com 5% EVA, obteve penetração igual a 55 décimos de milímetro, valor próximo ao obtido nesta dissertação. No trabalho de Magalhães (2004) com uma amostra tendo 7,8% de EVA adicionada a um CAP 20, resultou: 55 décimos de milímetro e 36 décimos de milímetro de penetração para o CAP 20 e ligante modificado, respectivamente. Após

envelhecimento em estufa de fino filme rotativo, a penetração resultou em 25 décimos de milímetro para o CAP modificado. Nota-se, nesse estudo, ampla redução da penetração com adição do polímero, indicativo de grande ganho de consistência.

Outro experimento realizado nesta dissertação diz respeito ao Ponto de Amolecimento, pelo método Anel e Bola, que indica: quanto menor a temperatura maior é suscetibilidade do ligante ao afundamento de trilha de roda (SPECHT, 2004).

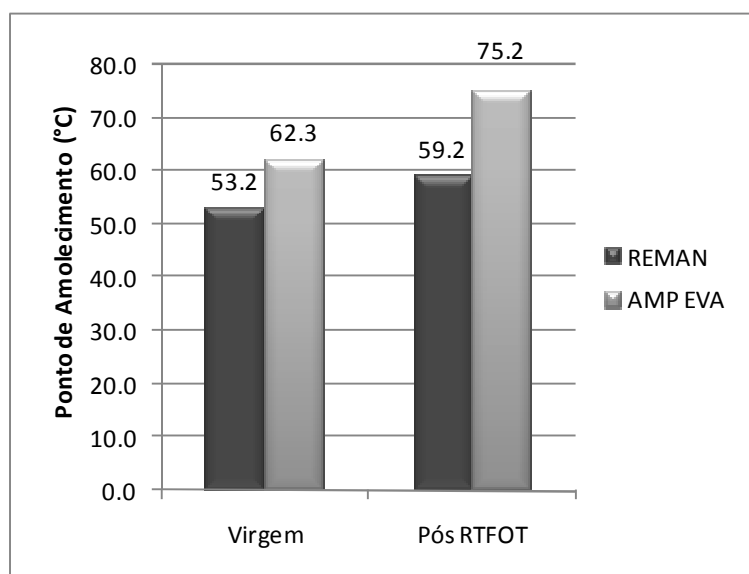


Gráfico 4.2-2: Resultado ensaio Ponto de Amolecimento pelo Anel e Bola

Segundo o Gráfico 4.2-2, a amostra AMP EVA apresentou maior grau de temperatura quando na condição virgem e após o envelhecimento na RTFOT, portanto menos susceptível a deformações permanentes. Relativo a esse parâmetro a ANP específica um valor mínimo de 46°C, para a classificação CAP50/70 na condição virgem, e aumento máximo de 8°C após envelhecimento, ambos ligantes pesquisados atenderam a temperatura mínima. O cimento asfáltico modificado foi superior, também, ao valor mínimo especificado (51,7°C) pela ASTM D5841-95. O aumento do PA, posteriormente ao envelhecimento, foi constatado de forma inequívoca em ambos os ligantes estudados.

Leite (1999) encontrou, para o Ponto de Amolecimento, em uma amostra modificada por EVA e na condição após RTFOT, o valor de 74,4°C semelhante ao alcançado nesta

dissertação. Morilha (2004), por outro lado, constatou, também, aumento de temperatura posterior ao envelhecimento de um ligante modificado com EVA. Em seu trabalho o autor não encontrou problemas para enquadrá-lo nas especificações nacionais e internacionais. Os valores verificados pelo citado autor foram 53°C e 58°C na condição virgem e após RTFOT, respectivamente. Estas temperaturas são inferiores aos resultados auferidos nesta pesquisa com o ligante modificado com EVA, e semelhantes aos valores obtidos na amostra com ligante convencional. Enquanto Magalhães (2004) obteve 74,9°C e 77,4°C antes e após envelhecimento para um asfalto modificado com EVA. Embora, o aumento do Ponto de Amolecimento seja pequeno após o envelhecimento, a amostra virgem apresentou valor alto, na mesma ordem do ligante AMP EVA, condicionado em RTFOT, aqui pesquisado.

Objetivando-se o envelhecimento, visando proporcionar reações semelhantes aos procedimentos de usinagem, transporte e compactação, submeteram-se as amostras estudadas em estufa de filme delgado rotativo (RTFOT). A perda de massa ocorrida neste experimento, segundo a literatura, determina a perda de voláteis durante o processo de mistura e aplicação, embora alguns ligantes possam ganhar massa devido ao efeito da oxidação do asfalto.

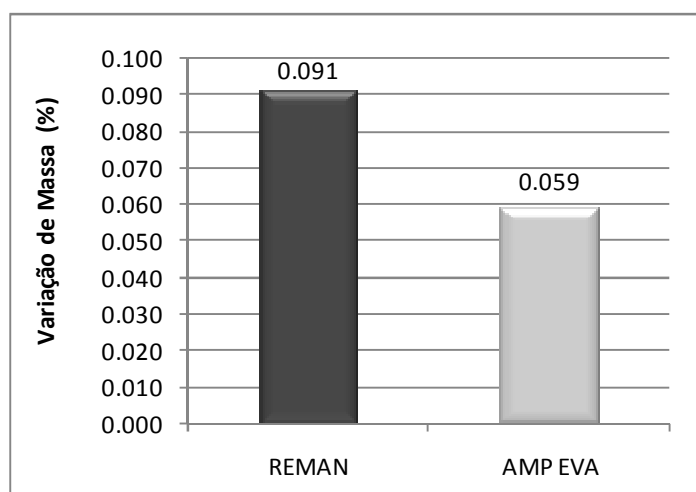


Gráfico 4.2-3: Resultado da perda de massa nos ligantes após ensaio de Envelhecimento em RTFOT

No estudo em pauta, o ligante REMAN revelou maior ganho de massa quando comparado a amostra AMP EVA, atendendo ao limite máximo de 0,5% especificado para o

CAP 50/70 (Gráfico 4.2-3). Morilha (2004) conferiu, por outro lado, maior variação de massa para os ligantes modificados, porém, a mesma é justificada pelo uso de compatibilizante em suas formulações, pois óleos aromáticos deixam os ligantes mais suscetíveis aos efeitos do envelhecimento.

Ao se analisar conjuntamente aos ensaios de Penetração e Ponto de Amolecimento percebe-se ganho de consistência para o ligante AMP EVA, após envelhecimento em RTFOT, possivelmente devido ocorrência de oxidação. Morilha (2004) verificou que o asfalto modificado com o polímero EVA apresentou resultados sugestivos de boa resistência ao envelhecimento, indicando ganho na recuperação elástica mesmo aumentando sua consistência. Leite (1999), também, constatou em um ligante modificado com EVA boa resistência ao envelhecimento, devido a não existência de ligação dupla em suas moléculas. É conveniente lembrar que o aumento da consistência é favorável às propriedades mecânicas estudadas, pois quanto mais duro o ligante, maior será resistência à deformação plástica. Entretanto deve-se averiguar esses efeitos quanto à vida de fadiga.

Para o Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) a amostra AMP EVA apresentou valor igual a +1,52, mostrando-se fora do limite especificado (-1,5 a +0,7). Todavia, este resultado indica comportamento de asfalto oxidado, ou seja, pouco sensível e quebradiço, a elevadas e a baixas temperaturas, respectivamente. Portanto, esse índice não inviabiliza seu uso, visto que há predominância de altas temperaturas durante o ano todo em Manaus. O ligante REMAN, por outro lado, enquadrou-se nas especificações.

Segundo o conjunto dos resultados expostos e de acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP, 2005), o material asfáltico da REMAM comprovou sua classificação como CAP 50/70, conforme pode ser observado no resumo constante na Tabela 4.2-2.

Para a amostra AMP EVA, excetuando-se os resultados oriundos do Ponto de Amolecimento e da Suscetibilidade Térmica, também pode ser classificada como 50/70, segundo a citada agência. As suas características estão apresentadas na Tabela 4.2-3.

Característica	Unidade	Métodos		CAP 50/70	CAP REMAN
		ABNT	ASTM		
Penetração	0,1mm	NBR 6576	D 5	50-70	56
Ponto de Amolecimento, mín	°C	NBR 6560	D 36	46	53,2
Viscosidade Saybolt Furol					
a 135°C, mín	S	NBR 14950	E 102	141	-
a 150°C, mín	S			50	-
a 177°C	S			30-150	-
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	274	620
a 150°C, mín	cP			112	317,5
a 177°C, mín. SP 21	cP			57-285	120
Índice de Suscetibilidade Térmica		-	-	(-1,5) a (+0,7)	-0,15
Ponto de Fulgor, mín	°C	NBR 11341	D 92	235	301
Solubilidade em tricloroetileno, min	% massa	NBR14985	D 2042	99,5	-
Dutilidade a 25°C, mín	Cm	NBR 6293	D 113	60	-
Efeito do calor e ar a 163°C por 85 minutos					
Varição em Massa, Max	% massa	-	-	0,5	0,091
Dutilidade a 25°C, mín	Cm	NBR 6293	D 113	20	-
Aumento do Ponto de Amolecimento, Max	°C	NBR 6560	D 36	8	6
Penetração Retida, mín	%	NBR 6576	D 5	55	71,4

Tabela 4.2-2: Características do CAP REMAN x Especificação Brasileira (ANP,2005)

Característica	Unidade	Métodos		CAP 50/70	CAP +EVA
		ABNT	ASTM		
Penetração	0,1mm	NBR 6576	D 5	50-70	52
Ponto de Amolecimento, mín	°C	NBR 6560	D 36	46	62
Viscosidade Saybolt Furol					
a 135°C, mín	S	NBR 14950	E 102	141	-
a 150°C, mín	S			50	-
a 177°C	S			30-150	-
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	274	1600
a 150°C, mín	cP			112	780
a 177°C, mín.	cP			57-285	270
Índice de Suscetibilidade Térmica		-	-	(-1,5) a (+0,7)	1.53
Ponto de Fulgor, mín	°C	NBR 11341	D 92	235	-
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	NBR14985	D 2042	99,5	-
Ductilidade a 25°C, mín	Cm	NBR 6293	D 113	60	-
Efeito do calor e ar a 163°C por 85 minutos					
Varição em Massa, máx.	% massa	-	-	0,5	0,059
Ductilidade a 25°C, mín.	Cm	NBR 6293	D 113	20	-
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR 6560	D 36	8	13
Penetração Retida, mín.	%	NBR 6576	D 5	55	55.8

Tabela 4.2-3: CAP modificado com EVA x Especificação Brasileira (ANP,2005)

#### 4.2.2 Ensaios Superpave

O ensaio realizado no Reômetro de cisalhamento dinâmico visa medir as propriedades viscoelásticas do asfalto em temperaturas altas e médias, correlacionando-se o seu comportamento quanto à deformação permanente e fadiga. O experimento fornece valores de:

- módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ), como a medida da resistência total a deformação permanente;

- ângulo de fase ( $\delta$ ), consistindo na defasagem no tempo da deformação relativo à tensão aplicada, indicando a fase elástica e viscosa.



A especificação Superpave requer para o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , relacionado a deformação plástica, o mínimo igual a 1,1 kPa para amostras virgens e 2,2 kPa para amostras envelhecidas em RTFOT. Os resultados atinentes aos ligantes REMAM e AMP EVA constam nas Tabelas 4.2-4 e 4.4-5.

<b>Amostra virgem</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (Pa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*/sen (<math>\delta</math>) KPa</b>
58	7083	74,11	7,364
64	3318	77,48	3,399
70	1600	80,59	1,622
76	801	83,41	0,806
<b>Amostra após RTFOT</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (Pa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*/sen (<math>\delta</math>) KPa</b>
64	7242	66,64	7,889
70	3852	69,62	4,110
76	1994	72,76	2,088

Tabela 4.2-4: Resultado DSR - deformação permanente para o ligante REMAN

<b>Amostra virgem</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (Pa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*/sen (<math>\delta</math>) KPa</b>
58	4412	67,46	4,777
64	2133	72,28	2,240
70	1079	76,97	1,108
76	605	79,67	0,615
<b>Amostra após RTFOT</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (Pa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*/sen (<math>\delta</math>) KPa</b>
70	12500	60,31	14,390
76	7387	62,51	8,328
82	4232	65,27	4,659

Tabela 4.2-5: Resultado DSR - deformação permanente para o ligante AMP EVA

Visualiza-se nas mencionadas tabelas que o ligante AMP EVA apresentou ao longo de todo ensaio, ângulo de fase menor que o ligante convencional, sugerindo superioridade quanto

à elasticidade. Na condição envelhecida em RTFOT esta amostra não transpôs o limite especificado, tendo o ensaio sido finalizado a temperatura de 82°C e seu parâmetro apresentado o valor igual a 4,659 kPa, ainda muito superior. Ao comparar, o ângulo de fase, na mesma faixa de temperatura, antes e após envelhecimento em RTFOT, nota-se diminuição do mesmo. Revelando, conseqüentemente, ganho de elasticidade após envelhecimento em ambos os ligantes.

Leite (1999) encontrou quanto à citada propriedade, ao comparar o parâmetro  $G^*/\sin\delta$ , que nos asfaltos modificados por EVA, a temperatura alta permanece constante ou aumenta de 1 a 2 PG, à semelhança do que ocorre com CAP comuns. Esta característica não foi verificada nos asfaltos modificados por SBS, pois a temperatura diminui de 1 a 2 PG, segundo a referida autora. Nesse trabalho Leite associou o ganho de elasticidade, após envelhecimento, à não existência de duplas ligações butadiênicas no ligante modificado com polímero EVA. Tais ligações, embora se apresentam em ligantes modificados por SBS, se oxidam e/ou quebram ao ar e pelo aquecimento.

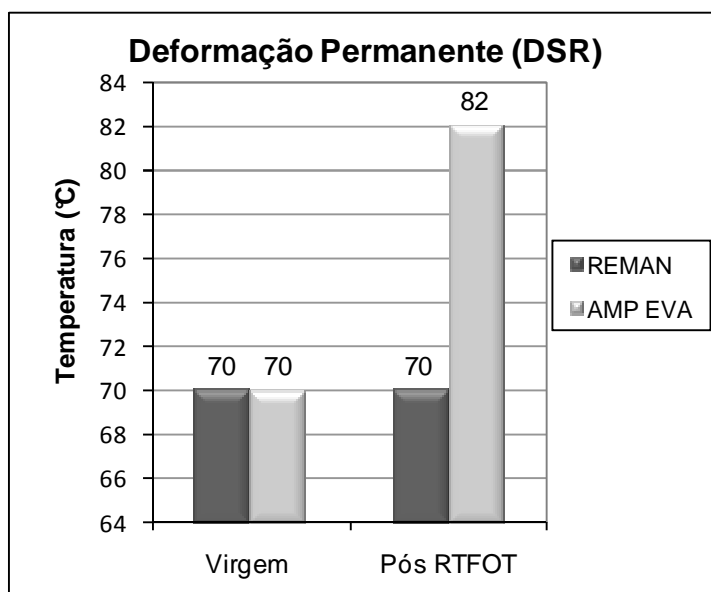


Gráfico 4.2-4: Comparação dos resultados segundo o ensaio DSR antes e após envelhecimento em RTFOT

O Gráfico 4.2-4 compara as máximas temperaturas para o parâmetro  $G^*/\sin\delta$ . Na condição virgem e para as duas amostras obtiveram-se valor igual a 70°C, entretanto, após

envelhecimento, o ligante modificado com EVA melhorou seu desempenho, apresentando ganho em 12°C ou 2 PG.

Os dados alcançados, na pesquisa em tela, são próximos aos resultados obtidos por Leite (1999). A temperatura encontrada pela citada autora correspondeu a 76°C para o ligante virgem e 88°C para a amostra condicionada em RTFOT, ou seja, 1 PG acima do atingido para amostra AMP EVA dessa pesquisa. Já Magalhães (2004) alcançou a temperatura de 88°C e 76°C para as amostras na condição virgem e envelhecida, respectivamente. Nota-se, neste resultado, que após o envelhecimento ocorreu redução em 1 PG, inversamente ao constatado nesta dissertação e no referido trabalho de Leite.

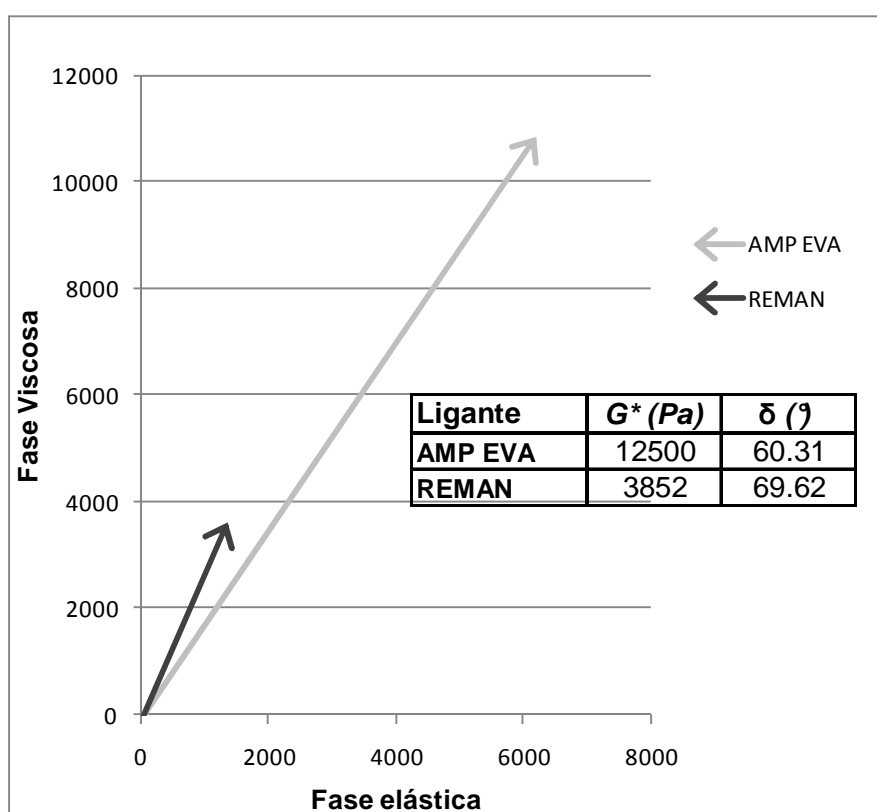


Gráfico 4.2-5: Comportamento elástico e viscoso dos ligantes a 70°C

O comportamento viscoelástico do ligante pode ser analisado pelo ângulo de fase ( $\delta$ ), pois quanto maior o seu valor tem-se a predominância da fase viscosa. O Gráfico 4.2-5 compara o ângulo de fase e o módulo complexo como vetores num plano XY e na temperatura de 70°C. Tal resultado mostrou que amostra AMP EVA possui maior módulo

complexo, indicando maior resistência à deformação permanente e, também, maior fase elástica, relativo ao ligante convencional.

O parâmetro  $G^* \cdot \text{sen} \delta$ , oriundo do Reômetro de cisalhamento dinâmico, utiliza-se, em geral, para a avaliação do desempenho quanto à fadiga, sendo o valor mínimo requerido igual a 5,0 MPa. As tabelas 4.2-6 e 4.2-7 apresentam os resultados na condição após envelhecimento em RTFOT e PAV.

<b>Amostra após RTFOT e PAV</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (kPa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*.sen (<math>\delta</math>) MPa</b>
31	1644	41,15	1,082
28	2566	39,67	1,638
25	3957	38,07	2,440
22	6001	38,07	3,562
19	9102	34,61	5,169

Tabela 4.2-6: Resultado DSR - fadiga para o ligante REMAN

<b>Amostra após RTFOT e PAV</b>			
<b>Temp. (°C)</b>	<b>G* (kPa)</b>	<b><math>\delta</math> (°)</b>	<b>G*.sen (<math>\delta</math>) MPa</b>
25	3104	33,7	1,722
22	4511	32,54	2,426
19	6459	31,35	3,361
16	9167	30,12	4,600
13	12910	28,67	6,193

Tabela 4.2-7: Resultado DSR - fadiga para o ligante AMP EVA

Constata-se, igualmente, que amostra AMP EVA apresentou menores ângulos de fase. No Gráfico 4.2-6 os resultados exibem que as temperaturas determinadas são as menores que atendem ao limite especificado. O ligante modificado mostrou-se, outra vez, com melhor desempenho, apresentando temperatura de 16°C e para o REMAN igual a 19°C.

Novamente os dados de Leite (1999) corroboram os resultados desta pesquisa: a temperatura encontrada pela mesma foi 19°C para amostra modificada com polímero EVA.

Entretanto, Magalhães (2004) encontrou temperatura mais elevada (31°C), provavelmente devido ao elevado teor de polímero EVA (7,8%) utilizado em sua mistura.

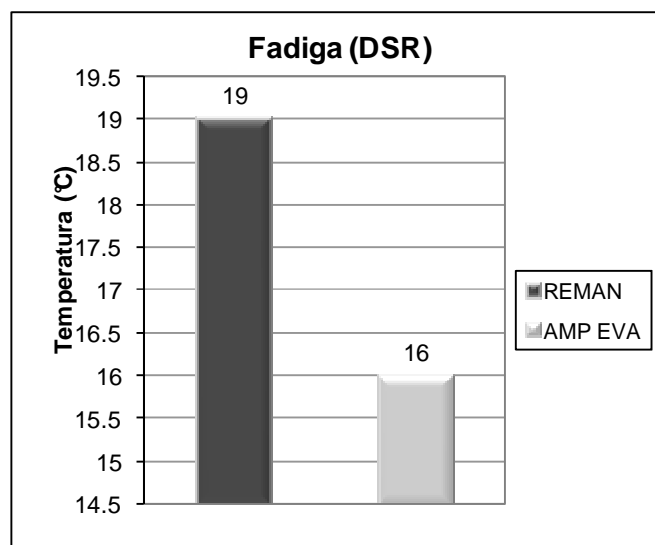


Gráfico 4.2-6: Resultado de Fadiga obtida pelo Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

No ensaio com o Reômetro de fluência em viga avalia-se a rigidez do ligante em temperaturas baixas, tendo como finalidade analisar a suscetibilidade a trincas térmicas. Realizou-se este experimento para fins de caracterização, pois tais patologias inexitem em Manaus. A metodologia Superpave especifica que a rigidez em fluência ou *creep stiffness* (S) não deve exceder 300MPa com 60 segundos de carregamento. Outro parâmetro avaliado nesse ensaio diz respeito ao parâmetro de relaxação (m), que representa a taxa de variação da rigidez com o tempo, devendo ser superior 0,300 para o tempo de 60 segundos. As Tabelas 4.2-8 e 4.2-9 apresentam os valores após envelhecimento em RTFOT e PAV.

Temperatura	Tempo (s)	S (MPa)	Diferença (%)	m
-6	60	71,1	0,141	0,301

Tabela 4.2-8: Resultado ensaio BBR da amostra CAP REMAN

Temperatura	Tempo (s)	S (MPa)	Diferença (%)	m
-12	60	133	0	0,265
-6	60	54,3	0,184	0,304

Tabela 4.2-9: Resultado ensaio BBR da amostra AMP EVA

O ensaio é realizado com duração de 60 segundos. A partir da relação tempo/temperatura reduz-se 10°C para obter o valor da rigidez durante 2 horas, condição utilizada para a classificação do ligante. O Gráfico 4.2-7 mostra que as duas amostras estudadas (REMAM e AMP EVA) tiveram o mesmo comportamento. Ambos ligantes apresentaram desempenho satisfatório indicando uma temperatura de -16°C, a qual é muito inferior à média das baixas temperaturas locais.

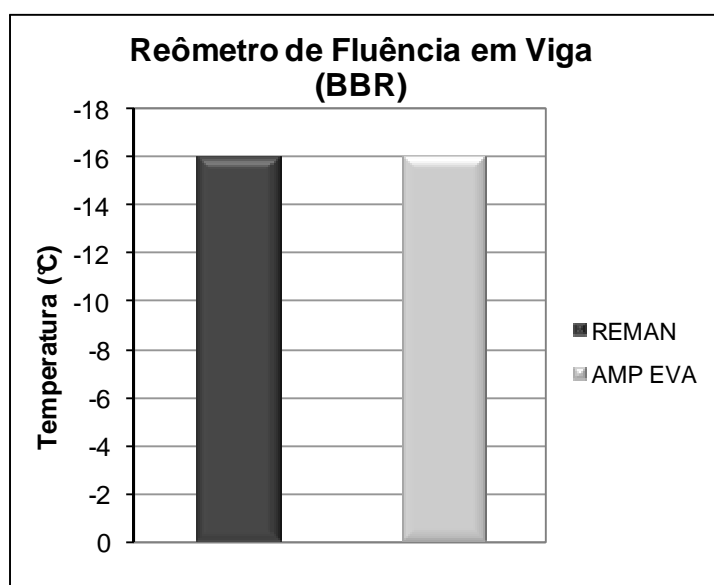


Gráfico 4.2-7: Resultado ensaio reômetro de fluência em viga

Outro parâmetro determinado referiu-se a viscosidade dinâmica. Esta é definida como a resistência ao fluxo desenvolvida por um material quando submetido a tensões, Specht (2004). Tem como finalidade garantir as condições adequadas de consistência do asfalto nas fases de usinagem, transporte e aplicação. O ensaio foi realizado nas temperaturas 120°C, 135°C, 150°C e 175°C.

O Gráfico 4.2-8 ilustra os resultados para as duas amostras empregando o viscosímetro rotacional, e as respectivas linhas de tendência. Nota-se, que o ligante AMP EVA possui maior viscosidade, ou seja, maior resistência ao fluxo para as mesmas temperaturas, comparado ao REMAN. Ambas as amostras estão dentro do limite especificado pela Superpave: a viscosidade a 135° deve ser inferior a 3,0 Pa.s.

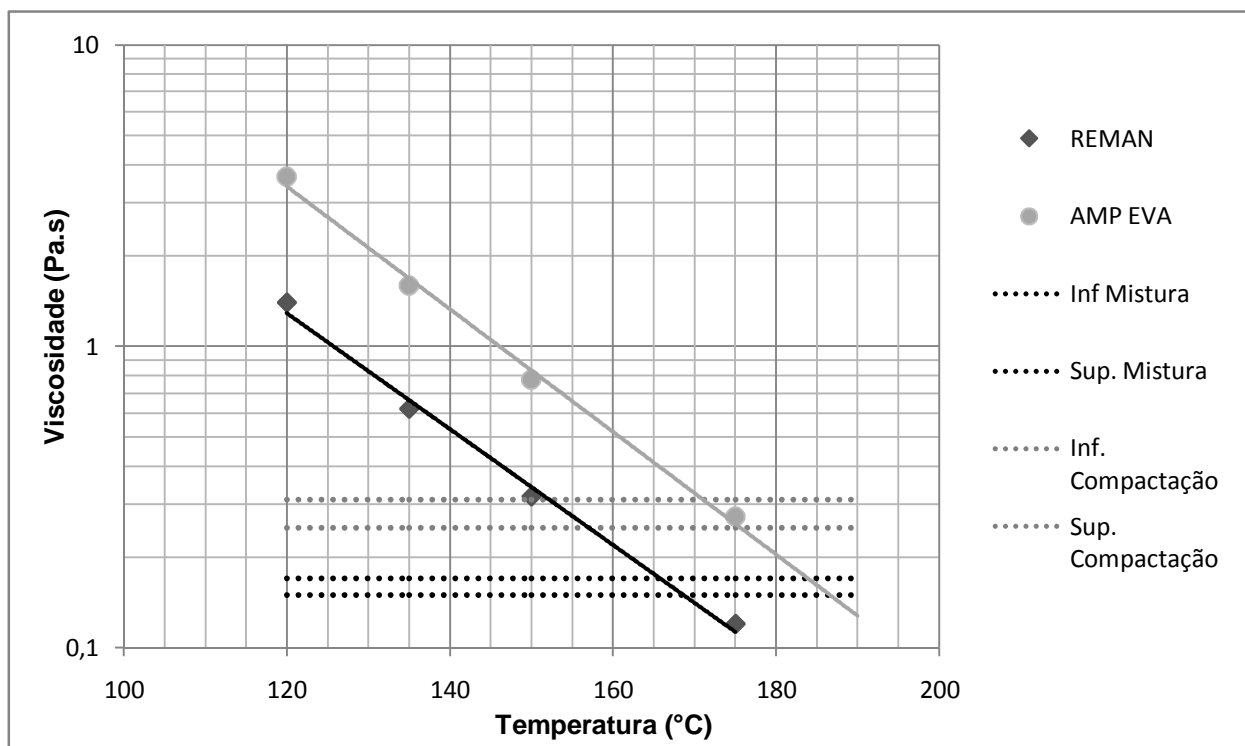


Gráfico 4.2-8: Resultado ensaio de viscosidade dinâmica

Magalhães (2004) verificou em seu trabalho que o cimento asfáltico modificado com EVA apresentou viscosidade excessivamente alta (4.154 cP), muito maior do que o limite tolerável de 3.000 cP, segundo as especificações Superpave.

A especificação Superpave classifica o ligante pelo seu grau de desempenho (PG), definindo o seu adequado comportamento nas temperaturas limites, quanto à fadiga, deformação permanente e trincas térmicas. Visando essa classificação é necessário o conhecimento das temperaturas, máxima e mínima, as quais o pavimento será submetido. Manaus requer um grau de desempenho PG 64+2, conforme mapeamento realizado por Leite e Tonial (1994, 1995), considerando um N de  $3 \times 10^6$  e velocidade média de 90km/h.

A Tabela 4.2-10 apresenta os resultados obtidos para os dois ligantes estudados e os valores requeridos para Manaus, segundo a metodologia Superpave. Os limites impostos pelos requisitos de segurança, manuseio e perda ao aquecimento, foram satisfeitos pelos dois ligantes.

Os critérios de desempenho também foram alcançados para ambos os materiais asfálticos. A amostra AMP EVA demonstrou superioridade quanto ao comportamento a deformação permanente, após envelhecimento em RTFOT, e quanto a fadiga, em seguida ao envelhecimento — RTFOT e PAV.

<b>Resumo dos Critérios Superpave</b>		<b>Manaus</b>	<b>REMAN</b>	<b>AMP EVA</b>
<b>Segurança, Manuseio e Perda ao aquecimento</b>				
Ponto de Fulgor	≥ 230°C	≥ 230°C	301	301
Viscosidade a 135°C	≤ 3 Pa.s	≤ 3 Pa.s	0,6	1,6
Varição em massa, %	≤ 1%	≤ 1%	+0,091	+0,059
<b>Critérios de Desempenho</b>				
<b>Altas Temperaturas</b>				
G*/sen δ (virgem)	≥ 1,0 kPa	64	70	70
G*/sen δ (pós RTFOT)	≥ 2,2 kPa	64	70	82
<b>Intermediárias Temperaturas</b>				
G*.sen δ (pós PAV)	≥ 5,0 MPa	-	22	16
<b>Baixas Temperaturas</b>				
S(60s) e m(60s) (pós PAV)	≤ 300 Mpa e ≥ 0,300	12	-6	-6
<b>Classificação</b>	-	PG 64+2	PG 70-16	PG 70-16

Tabela 4.2-10: Resumo critérios Superpave e resultados

O ligante AMP EVA mostrou melhores resultados em todos os ensaios tradicionais, indicando maior consistência, assim como, nos ensaios Superpave, sugerindo superioridade em seu comportamento. Exceção ocorreu, apenas, no ensaio quanto à deformação permanente com amostra não envelhecida, onde apresentou valor similar ao asfalto convencional. A classificação Superpave apontou mesmo grau de desempenho (PG 70-16) para os ligantes pesquisados e, ambos superaram o requerido para Manaus (PG 64+2), conforme pode ser visualizado no Gráfico 4.2-9.



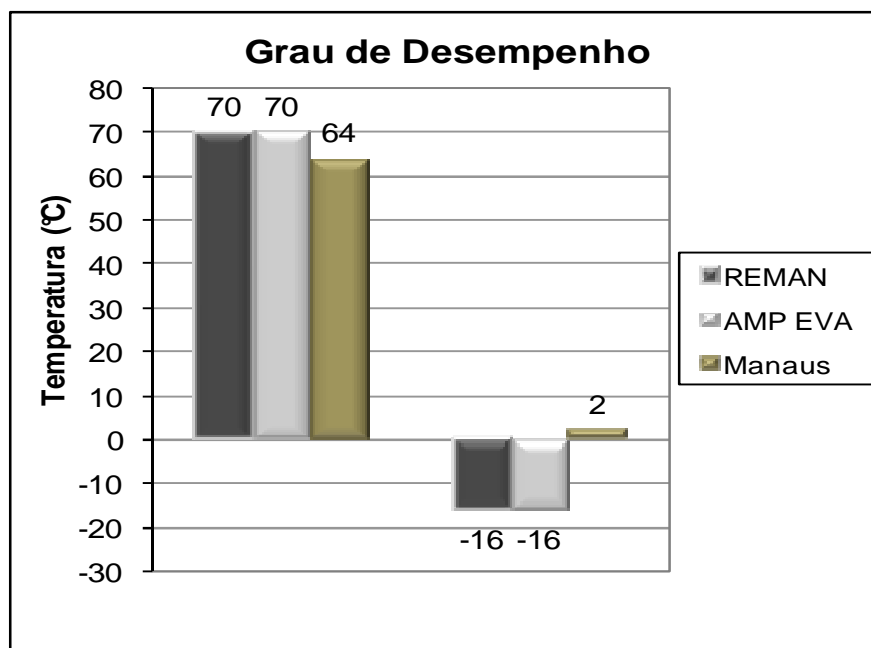


Gráfico 4.2-9: Grau de Desempenho relativo ao REMAN, AMP EVA e o requerido para Manaus

## 4.3 Projeto de Misturas

### 4.3.1 Seleção Granulométrica Bailey

A seleção dos componentes, apresentada na Tabela 4.3-1, foi realizada conforme preconiza o Método de Bailey, que fundamenta-se nas características de cada agregado para o cálculo da granulometria adequada. Foram necessários inicialmente os valores das densidades e a composição granulométrica de cada componente, e posteriormente, foram definidos a massa específica escolhida (MEE) e o percentual de fíler desejado (% Fíler), de modo atender os parâmetros que qualificam a mistura —  $CA$ ,  $FA_C$  e  $FA_F$ .

Mistura	Graúdo	Miúdo	Fíler	MEE	Fíler	$CA$ 0,60-0,75	$FA_C$ 0,35-0,50	$FA_F$ 0,35-0,50
S	67,3% Seixo	29,6% Areia	3,1% Cimento	0,95	4%	0,69	0,95	0,44
R	62,0% RCD	35,3% Areia	2,7% Cimento	0,95	4%	0,59	0,88	0,43

Tabela 4.3-1: Resultado da seleção granulométrica pelo Método de Bailey

O parâmetro CA descreve a graduação do agregado grosso, indicativo de tendência à segregação e da trabalhabilidade. O  $FA_F$ , por outro lado, refere-se à relação da parte fina do agregado fino, influenciando os vazios que permanecerão na porção de agregado fino da mistura, porque representa as partículas que devem preencher os menores vazios criados. As duas misturas apresentaram valores dentro do limite especificado. Para atendimento a estes requisitos foi necessário desprezar as partículas que passam na peneira #4,75mm do agregado seixo. Quanto ao filer, cimento Portland, usou-se para todas as misturas, somente a fração passando na peneira de abertura 0,075 mm.

A relação da parte grossa do agregado fino, definida pelo parâmetro  $FA_C$ , é geralmente desejável que seja menor que 0,50 pois, valores mais altos, geralmente indicam uma quantidade excessiva da porção fina do agregado fino na mistura. Este tipo de mistura mostra regularmente uma “corcunda”, na porção de areia da curva de graduação, num gráfico elevado à potência de 0,45. Embora várias tentativas tenham sido realizadas, variando a massa específica escolhida e a quantidade de filer desejada, não foi possível enquadrá-las neste parâmetro. As misturas estudadas delinearam a “corcunda” supracitada, perfazendo um desvio da zona de restrição Superpave, situando acima da mesma.

As misturas compostas com agregado graúdo seixo, tipo concreto betuminoso usinado à quente – CBUQ, ilustrada na Figura 4.3-1, enquadraram-se na faixa *Superpave* de diâmetro nominal máximo igual a 19mm. Esta graduação respeitou os pontos de controle, entretanto, cruzou levemente o final da zona de restrição. As misturas que atravessam a referida zona, são tidas, pelo citado método, como tendo esqueleto fraco pelo excesso de areia natural.

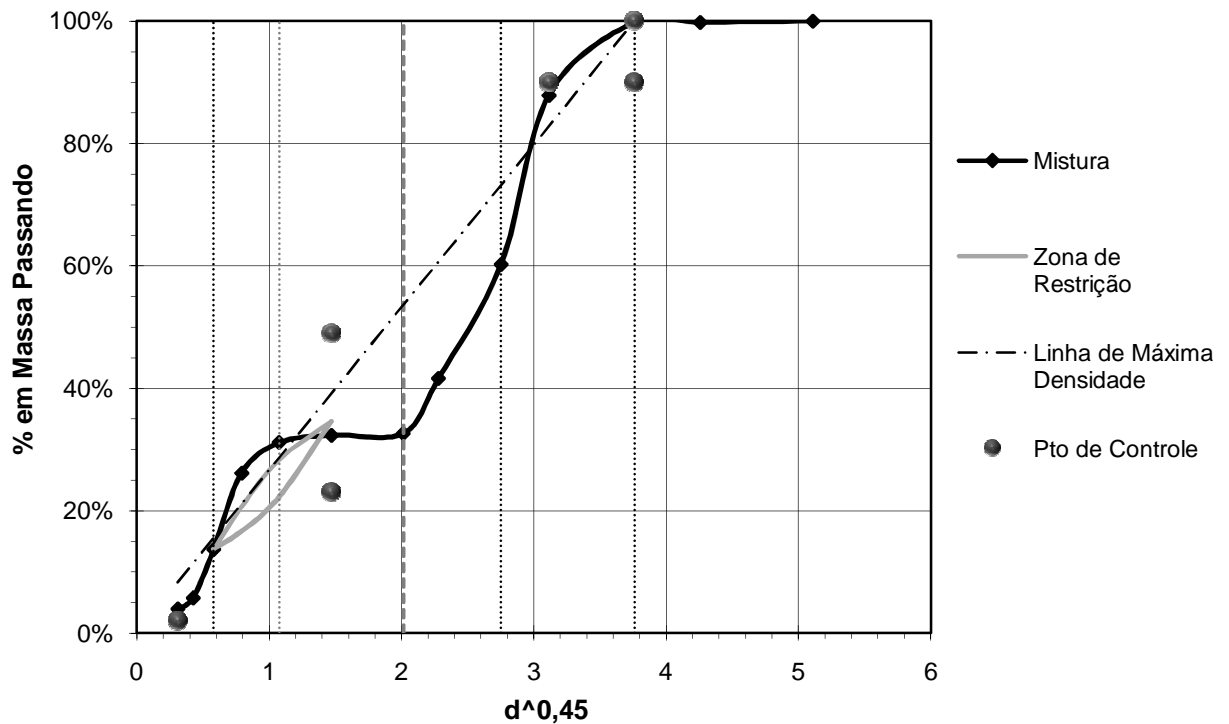


Figura 4.3-1: Curva Granulométrica: seixo, areia e cimento *Portland* – Misturas SMAN e SEVA

Conforme indicado na Figura 4.3-2, são misturas, também do tipo CBUQ, que possuem como agregado graúdo o RCD, e enquadraram-se na faixa *Superpave* de diâmetro nominal máximo igual a 19mm. Observa-se que esta graduação escolhida respeitou os pontos de controle e a zona de restrição.

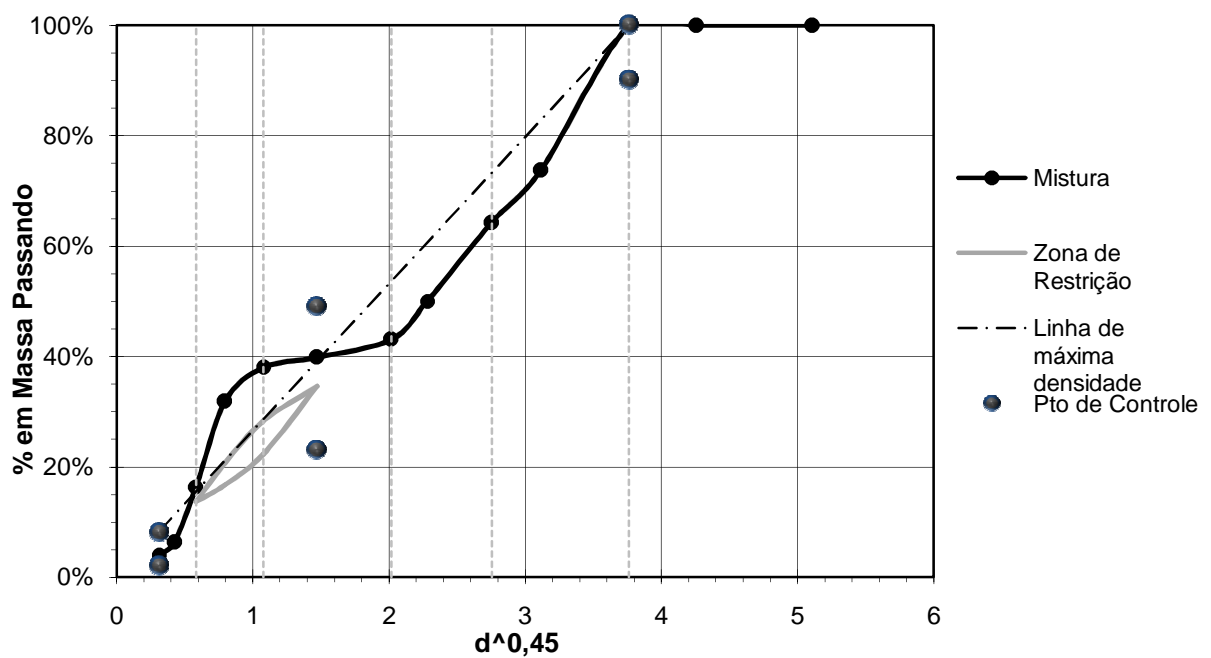


Figura 4.3-2 - Curva Granulométrica: RCD, areia e cimento *Portland* - Mistura RMAN e REVA

A curva granulométrica das misturas com ambos os agregados graúdos estudados (seixo e RCD), ficou situada acima da zona de restrição, apesar de ser recomendado (não é exigido) pela Superpave que se localize abaixo. Também é indicado que a granulometria repouse abaixo da linha de máxima densidade, para adequada incorporação de ligante, sendo atendido por ambas as misturas pesquisadas.

#### 4.3.2 Teor de projeto de ligante

Avaliaram-se as propriedades volumétricas das misturas conforme designado pelo Instituto do Asfalto (2002), sendo o teor de projeto admitido para um volume de vazios igual a 4%. As misturas selecionadas obedeceram ao tamanho máximo nominal de 19mm, com a especificação Superpave impondo limites tanto para os vazios no agregado mineral ( $VAM \geq 13\%$ ) como para a relação betumes-vazios ( $65 \leq RBV \leq 75$ ). À exceção da mistura SEVA, todas as misturas estudadas atenderam os requisitos. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.3-2. O método de Bailey preconiza que quando se aumenta o parâmetro CA, igualmente se aumenta o índice VAM. Embora as misturas constituídas pelo agregado graúdo seixo tenham obtido maior parâmetro CA, a mesma alcançou menores valores do VAM relativo às misturas com RCD.

As misturas compostas pelo agregado reciclado obtiveram maiores teores de ligante. Tal situação está associada à alta porosidade deste material, possuindo portanto, mais vazios para serem preenchidos por asfalto, característico de agregado absorvente. Segundo Gouveia *et al.* (2004) a absorção de asfalto pelo agregado pode influenciar positivamente no fenômeno da adesividade, melhorando o intertravamento mecânico da mistura.

<b>Mistura</b>	<b>Teor</b>	<b>DMM</b>	<b>Dap</b>	<b>Vv</b>	<b>VAM</b>	<b>RBV</b>
SMAN	4,5%	2,472	2,373	4%	14,8%	72,6%
SEVA	3,1%	2,415	2,319	4%	11,3%	65,5%
RMAN	6,0%	2,136	2,051	4%	16,5%	75,8%
REVA	5,5%	2,130	2,045	4%	15,4%	73,8%

Tabela 4.3-2: Resultado do estudo de dosagem das misturas de CA estudadas

A modificação do ligante pelo polímero EVA proporcionou uma redução no teor de ligante na mistura: 0,5% na amostra com RCD e 1,4% na amostra com Seixo, relativo às amostras com ligante REMAN. Essa redução pode estar associada à polaridade das carbonilas do ligante modificado com EVA detentoras de maior atração com o agregado, proporcionando melhor envolvimento ao mesmo. Pode, ainda, ser atribuída ao aumento da massa específica do ligante modificado, de  $0,991\text{g/cm}^3$  para  $0,995\text{g/cm}^3$ , dificultando a sua entrada nos poros. Esta constatação contrasta com o relatado por Santana & Gotinjo (1984), onde afirmam que o teor ótimo de uma mistura cresce com o aumento da consistência do ligante.

Embora tenham um longo tempo de aceitabilidade e uso, os procedimentos tradicionais de dosagem são considerados empíricos. Quanto à metodologia Marshall, sabe-se que a forma na compactação, relativa às condições operacionais, gera grandes dispersões nos resultados. Francken *et al.* (1997) relatou uma variação entre 5,4% a 6,8% no teor de projeto para uma mesma mistura ensaiada em diversos laboratórios. Aldigueri *et al.* (2001) estudou a variação na frequência de compactação e obteve diferença absoluta em 1,43% no volume de vazios.

Ainda que empregando os mesmos procedimentos das demais misturas, o estudo de dosagem da mistura SEVA apresentou, para o teor de projeto, valor abaixo do usual, entre 4% e 7%, assim como valor de vazios no agregado mineral abaixo do requerido, além de uma relação betume vazio próxima do limite inferior da especificação. É importante esclarecer que não se optou por alterar a granulometria, porque se desejava manter o mesmo esqueleto da mistura SMAN para fins de comparação. Destaca-se, também, que a quantidade de ligante

usada no *Rice Test* concernente a esta mistura foi suficiente para cobrir totalmente a superfície dos agregados. A Tabela 4.3-3 apresenta o resumo dos resultados atinentes à seleção dos componentes e do teor de ligante.

<b>Mistura</b>	<b>Graúdo</b>	<b>Fino</b>	<b>Fíler</b>	<b>Ligante</b>
SMAN	67,3% Seixo	29,6% Areia	3,1% Cimento	4,5% CAP 50/70
SEVA	67,3% Seixo	29,6% Areia	3,1% Cimento	3,1% CAP 50/70+EVA
RMAN	62,0% RCD	35,3% Areia	2,7% Cimento	6,0% CAP 50/70
REVA	62,0% RCD	35,3% Areia	2,7% Cimento	5,5% CAP 50/70+EVA

Tabela 4.3-3: Composição das Misturas de Concreto Asfáltico

## 4.4 Ensaios Mecânicos em Misturas

### 4.4.1 Resistência à tração

Na Tabela 4.4-1 constam os resultados concernentes ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a temperatura controlada em 25°C, realizado em três corpos de prova para cada mistura asfáltica estudada.

<b>Mistura</b>	<b>Nº CP</b>	<b>F (N)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\sigma_{rt}</math> (Mpa)</b>	<b>Média</b>
<b>RMAN</b>	CP01	5310,2	10,15	7,20	0,463	0,462
	CP02	5398,3	10,15	7,23	0,468	
	CP03	5237,0	10,15	7,22	0,455	
<b>REVA</b>	CP01	6653,1	10,15	7,80	0,535	0,552
	CP02	6564,2	10,15	7,76	0,531	
	CP03	7275,5	10,15	7,72	0,591	
<b>SMAN</b>	CP01	5911,3	10,15	6,37	0,582	0,591
	CP03	6083,3	10,15	6,34	0,602	
	CP06	5965,6	10,15	6,35	0,589	
<b>SEVA</b>	CP02	5888,4	10,15	7,53	0,490	0,507
	CP11	5242,4	10,15	6,51	0,505	
	CP12	5490,2	10,15	6,54	0,527	

Tabela 4.4-1: Resultado do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral

Ao comparar as misturas com ligante REMAN, percebe-se que aquelas compostas com agregado seixo mostraram melhor desempenho. Por outro lado, ao se confrontar as misturas com ligante AMP EVA, aquelas confeccionadas com o agregado de RCD

apresentaram maiores valores. Não houve similaridade no desempenho dos agregados frente a variação do ligante.

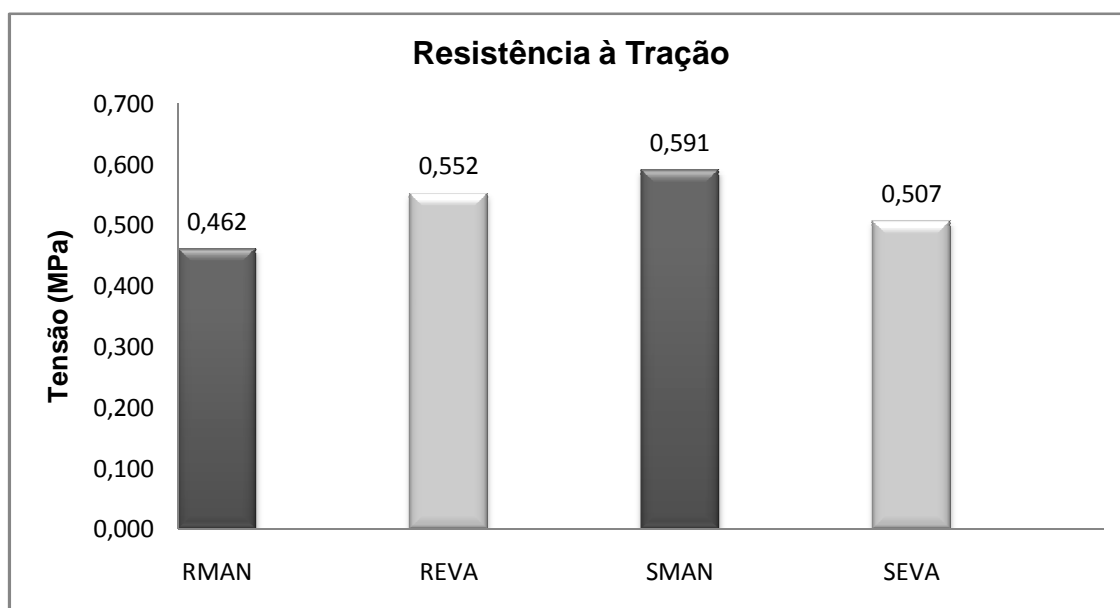


Gráfico 4.4-1: Resultado do ensaio de Resistência à Tração

A resistência à tração por compressão diametral (RT) faz parte da especificação do DNIT pela ES-031/2004, exigindo o mínimo de 0,6 MPa para concreto asfálticos. Nenhuma das misturas estudadas atingiu este valor estipulado, porém situaram-se na faixa entre 0,5 MPa e 2,0 MPa, referente a misturas asfálticas a quente recém-moldadas ou logo após a construção em pista (Bernucci *et al.*, 2007).

Da mesma forma, comparando-se as misturas constituídas por RCD, observam-se maiores valores para a mistura com ligante AMP EVA, entretanto no caso das misturas com agregado seixo, nota-se um melhor desempenho com o ligante convencional. Da mesma forma, não houve similaridade no desempenho dos ligantes frente à variação dos agregados. A mistura SMAN, confeccionadas com agregado seixo e asfalto convencional, apresentou o maior resultado, seguido pela mistura REVA que utilizou agregado RCD e ligante modificado (Gráfico 4.4-1).

Os resultados, segundo o ensaio de RT, sugerem uma melhor interação do agregado RCD com ligante modificado. Esta pode ser atribuída à alta absorção do agregado RCD e à

presença de maior quantidade de ligante, realçando a influência do uso de um asfalto mais consistente.

Como forma de avaliar a eficácia da seleção granulométrica pelo método de Bailey nos valores de RT, confrontaram-se os resultados desta dissertação relativos aos obtidos pelo Grupo de Geotecnia (GEOTEC), utilizando a seleção granulométrica tradicional e ligante REMAN (Tabela 4.4-2). Nestes estudos realizados pelo GEOTEC as misturas asfálticas com RCD mostraram resultados adequados para uso na construção de pavimentos comparativamente as misturas com seixo, cuja resistência à tração foram sempre inferiores.

Mistura	Composição	Faixa	Teor (%)	Vv (%)	RT (MPa)
M1	50% RCD; 45% AREIA; 5% CIMENTO	DNIT C	7,0	4,1	0,24
M2	50% SEIXO; 45% AREIA; 5% CIMENTO	DNIT C	5,5	4,2	0,21
M3	65% RCD; 30% AREIA; 5% CIMENTO	Superpave 12,5	7,5	4,9	0,24
M4	60% SEIXO; 35% AREIA; 5% CIMENTO	Superpave 12,5	5,5	3,9	0,17

Tabela 4.4-2: Ensaios RT pelo GEOTEC (Frota *et al.*, 2007)

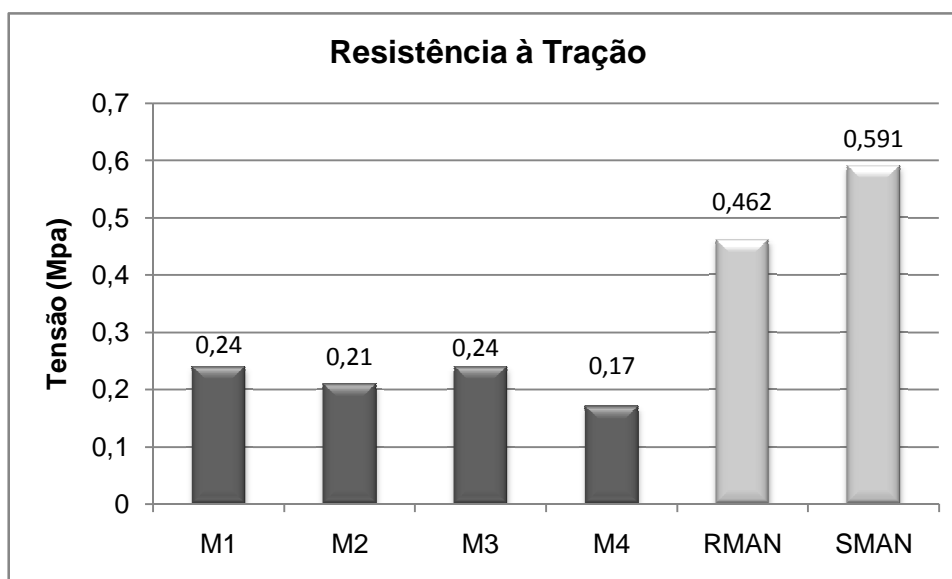


Gráfico 4.4-2: Comparação de resultados da seleção granulométrica convencional x seleção Bailey

No Gráfico 4.4-2 as misturas selecionadas pelo método de Bailey (RMAN e SMAN) conseguiram valores de resistência próximo ao dobro das demais, provavelmente devido à maior quantidade do agregado graúdo presente. Observa-se, igualmente, que a mistura com



RCD mostrou-se inferior a mistura com seixo. Conclusão esta discordante alusivo à Frota *et al.* (2007), podendo-se creditar a maior resistência à abrasão do Seixo, pois era visível nos corpos de prova ensaiados (Figura 4.4-1e Figura 4.4-2) que o material aluvionar não rompia, ocorrendo sim cisalhamento no mastique.



Figura 4.4-1: Corpo-de-prova com agregado graúdo Seixo após ensaio de RT



Figura 4.4-2: Corpo-de-prova com agregado graúdo RCD após ensaio de RT

#### 4.4.2 Fluência por compressão uniaxial dinâmica

O ensaio de fluência por compressão uniaxial dinâmica foi escolhido por ser capaz de detectar as diferenças de comportamento de misturas asfálticas com utilização de distintos ligantes, segundo Mugayar (2004), Sá e Motta (1996), Valkering *et al.* (1990). No citado

experimento é possível obter informações, devido os ciclos de carga-d Descarregamento, para determinar o componente elástico instantâneo e o componente plástico, como também as componentes viscoelásticas e viscoplásticas, os quais são função do tempo de resposta do material.

Little; Button; Yossef (1993) adotaram como análise oriunda do ensaio de fluência por compressão uniaxial os resultados da deformação total ao final do ensaio, a inclinação da curva de fluência no estágio secundário e o módulo de fluência.

As tabelas 4.4-3, 4.4-4, 4.4-5 e 4.4-6 indicam o resumo dos resultados do trabalho em pauta nas temperaturas 25°C, 40°C e 64°C, para as misturas de concreto asfáltico. Recordar-se que tais misturas são formadas por areia e cimento *Portland*, variando-se o agregado graúdo e o ligante asfáltico: SMAN (seixo e ligante REMAN), SEVA (seixo e ligante AMP EVA), RMAN (RCD e ligante REMAN) e REVA (RCD e ligante AMP EVA).

Nº CP	Temp (°C)	Tensão (kPa)	Ciclos	e (%)	Média	Módulo (kPa)
CP29	25	100	3600	0,095	0,103	970,9
CP06			3600	0,102		
CP08			3600	0,112		
CP26	40	100	3600	0,445	0,478	209,2
CP27			3600	0,491		
CP28			3600	0,498		
CP26	64	100	780	4,980	-	-
CP28			798	5,020		
CP27			863	9,980		

Tabela 4.4-3: Resultado do *Creep* Dinâmico para a mistura SMAN

O critério de finalização dos ensaios, utilizado como padrão nas pesquisas do grupo Geotec, é estipulado em 5% da deformação específica total. Entretanto, no ensaio realizado sob a temperatura de 64°C, o corpo-de-prova com a mistura SMAN atingiu este limite antes de completar os 3600 ciclos. Buscando-se concluir este ensaio, alterou-se o limite de finalização para 10% de deformação específica. Submeteu-se, também, uma outra amostra, tipo SMAN, mas não houve êxito, pois aumentou em apenas 65 ciclos. Devido a pouca

influência e, ainda, ao risco de dano aos equipamentos, os demais ensaios continuaram com o critério de parada em 5% da deformação específica.

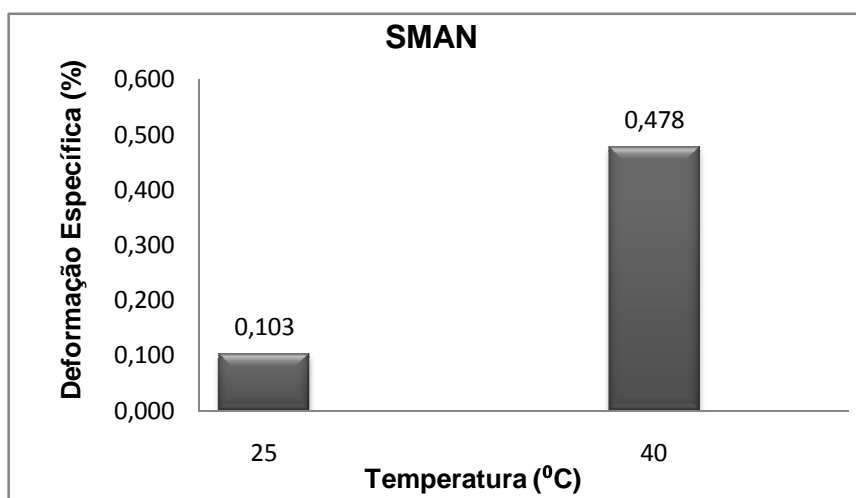


Gráfico 4.4-3: Deformação específica x variação de temperatura para mistura SMAN

Para a mistura SMAN o aumento da temperatura de ensaio em 15°C, resultou numa maior deformação permanente, como era esperado, apresentando valor cerca de 3,6 vezes maior respeitante a 25°C. À razão inversa o módulo de fluência diminuiu, conforme mostra os Gráfico 4.4-3 e 4.4-4.

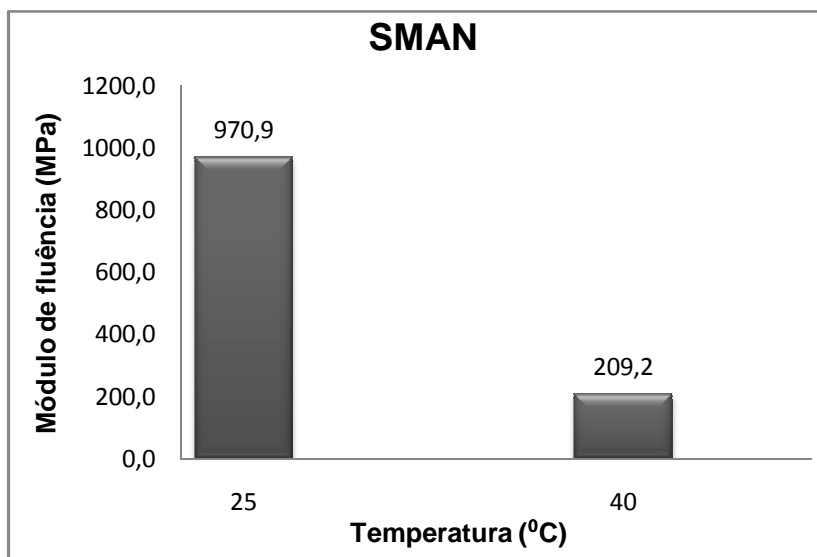


Gráfico 4.4-4: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura SMAN

Embora o ligante REMAN seja classificado pela Superpave como adequado para desempenho até a temperatura de 70°C, a mistura SMAN não alcançou bons resultados para a temperatura de ensaio igual a 64°C, apresentando alta instabilidade. Destaca-se que esta

temperatura situa-se acima do Ponto de amolecimento (53°C na condição virgem e 59°C após RTFOT). Depois que o corpo-de-prova foi submetido ao citado experimento, ocorreram consideráveis variações na sua forma: diminuição da altura e aumento do diâmetro, como pode ser visualizada na Figura 4.4-3, e ainda apresentou tendência a desagregação.



Figura 4.4-3: Corpo-de-prova da mistura SMAN antes e após ensaio de *Creep* Dinâmico à 64°C

Da mesma forma, a mistura SEVA não concluiu os 3600 ciclos no ensaio a temperatura de 64°C, pois o mesmo finalizou na média de 1540 ciclos, para o critério de parada em 5% da deformação específica total. A Figura 4.4-4 exibe o estado do corpo-de-prova antes e após ensaio de compressão uniaxial dinâmico. Nota-se redução na altura e aumento do diâmetro, entretanto, tais variações mostraram-se mais suaves comparadas à mistura SMAN.

Nº CP	Temp (°C)	Tensão (kPa)	Ciclos	e (%)	Média	Módulo (kPa)
CP01			3600	0,155		
CP02	25	100	3600	0,143	0,147	681,8
CP03			3600	0,142		
CP05			3600	0,250		
CP06	40	100	3600	0,247	0,251	398,4
CP07			3600	0,256		
CP08			1658	4,976		
CP09	64	100	1428	4,895	4,933	-
CP10			1544	4,927		

Tabela 4.4-4: Resultado do *Creep* Dinâmico para a mistura SEVA

Esse resultado é discordante com os dados concernentes a caracterização do ligante AMP EVA na condição virgem, pois a temperatura ensaiada foi superior ao Ponto de

Amolecimento, porém inferior à condição envelhecida. Rememora-se que a classificação Superpave indica o ligante AMP EVA como adequado para uso em temperatura até 70°C.

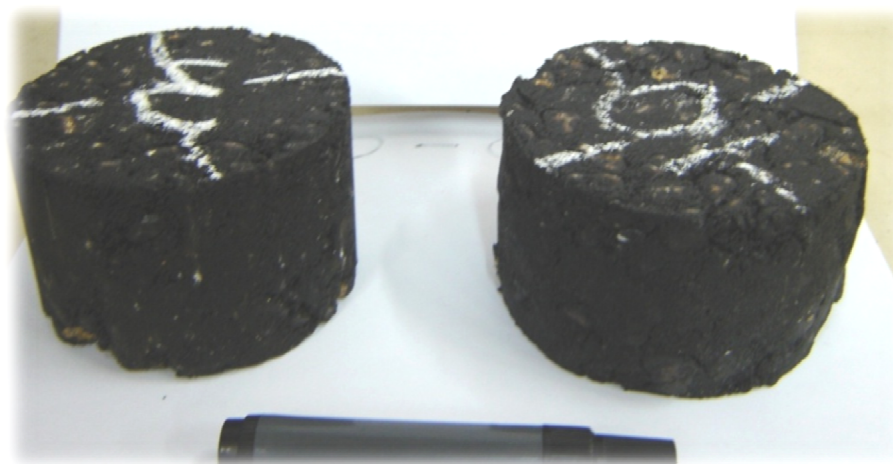


Figura 4.4-4: Corpo-de-prova da mistura SEVA após e antes do ensaio *Creep* dinâmico a 64°C

Observa-se nos Gráficos 4.4-5 e 4.4-6 que a deformação específica variou em 171% com o aumento de 15°C na temperatura, representando, por conseguinte, 160% atinente a temperatura de 25°C. Por outro lado o módulo de fluência reduziu a razão inversa.

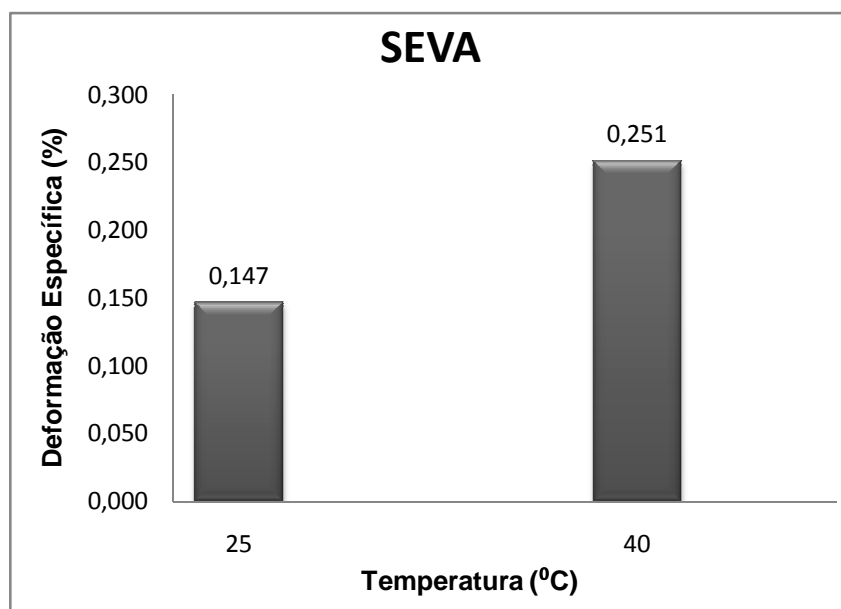


Gráfico 4.4-5: Deformação específica x variação de temperatura para mistura SEVA

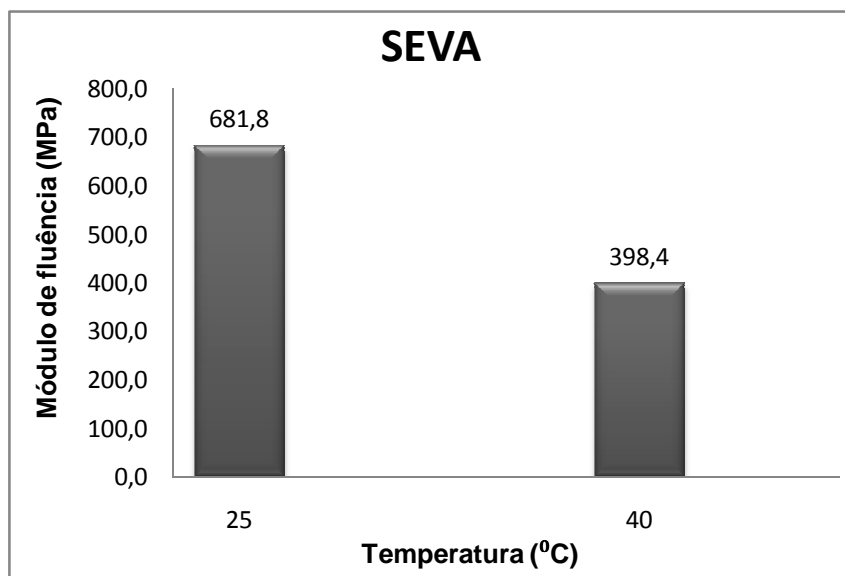


Gráfico 4.4-6: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura SEVA

Analogamente aos demais resultados apresentados a mistura RMAN não finalizou o ensaio a 64°C, parando em 2170 ciclos para o limite de 5% de deformação específica (Tabela 4.4-5). Apresentou acréscimo na deformação em 2,2 vezes ao se elevar à temperatura de 25°C para 40°C, tendo o módulo de fluência reduzido à razão oposta. Os Gráfico 4.4-7 e 4.4-8 ilustram as variações.

Nº CP	Temp (°C)	Tensão (kPa)	Ciclos	e (%)	Média	Módulo (kPa)
CP06	25	100	3600	0,117	0,093	1079,1
CP07			3600	0,070		
CP04			3600	0,091		
CP17	40	100	3600	0,278	0,208	481,5
CP27			3600	0,187		
CP28			3600	0,158		
CP01	64	100	2167	4,982	4,818	-
CP02			2176	4,703		
CP03			2171	4,770		

Tabela 4.4-5: Resultado do *Creep* Dinâmico para a mistura RMAN

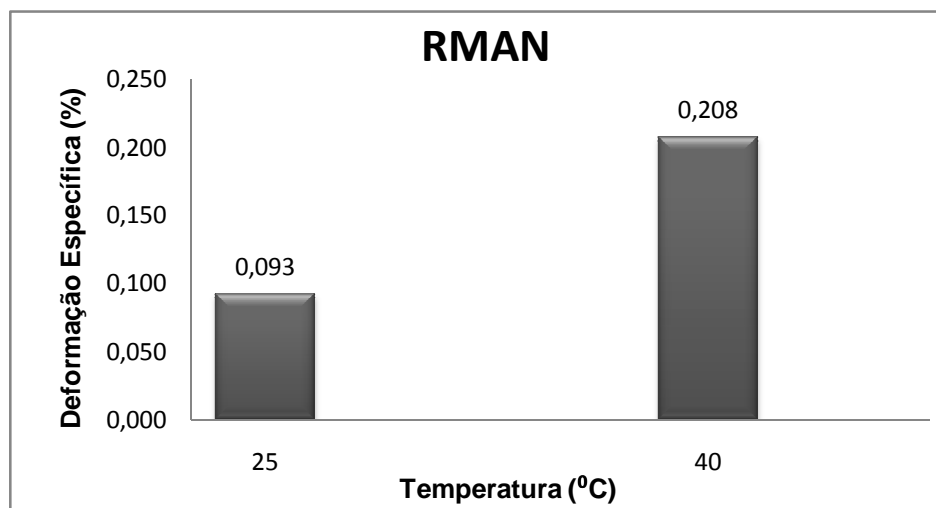


Gráfico 4.4-7: Deformação específica x variação de temperatura para mistura RMAN

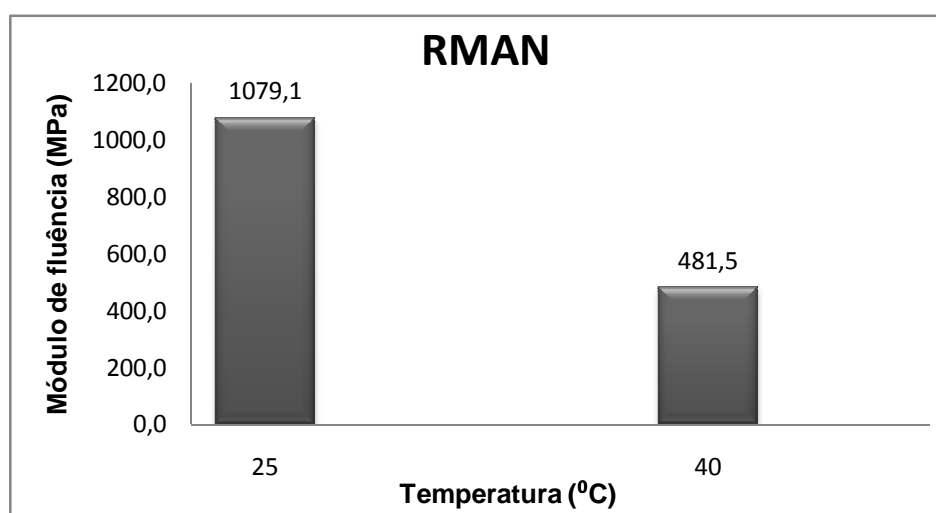


Gráfico 4.4-8: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura RMAN

A Tabela 4.4-6 aponta que a mistura REVA conseguiu concluir o ensaio a temperatura de 64°C, mostrando uma deformação específica muito inferior aos 5% estipulado como critério de parada. Como as diferenças na forma do corpo de prova, antes e após ensaio a 64°C, mostraram-se muito pequenas não foi possível visualizar na Figura 4.4-5..

Nota-se, também, a baixa suscetibilidade térmica da mistura REVA, evidenciada nos Gráficos 4.4-9 e 4.4-10, pois com o aumento da temperatura de 25°C para 40°C, a deformação específica dobrou. Entretanto, com a variação de 40°C para 64°C, a deformação específica acresceu em apenas 20% relativa a temperatura 40°C. Assim, como o módulo de fluência diminuiu pela metade, mostrando em seguida uma leve redução.

Nº CP	Temp (°C)	Tensão (kPa)	Ciclos	e (%)	Média	Módulo (kPa)
CP01	25	100	3600	0,219	0,160	623,7
CP02			3600	0,105		
CP03			3600	0,157		
CP04	40	100	3600	0,359	0,334	299,7
CP05			3600	0,337		
CP06			3600	0,305		
CP07	64	100	3600	0,423	0,404	247,7
CP09			3600	0,379		
CP10			3600	0,409		

Tabela 4.4-6: Resultado do *Creep* Dinâmico para a mistura REVA

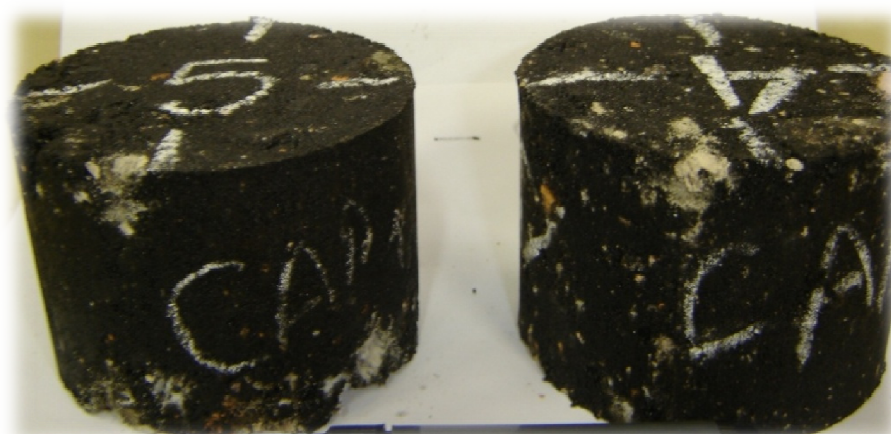


Figura 4.4-5: Corpo-de-prova da mistura REVA antes e após ensaio a 64°C

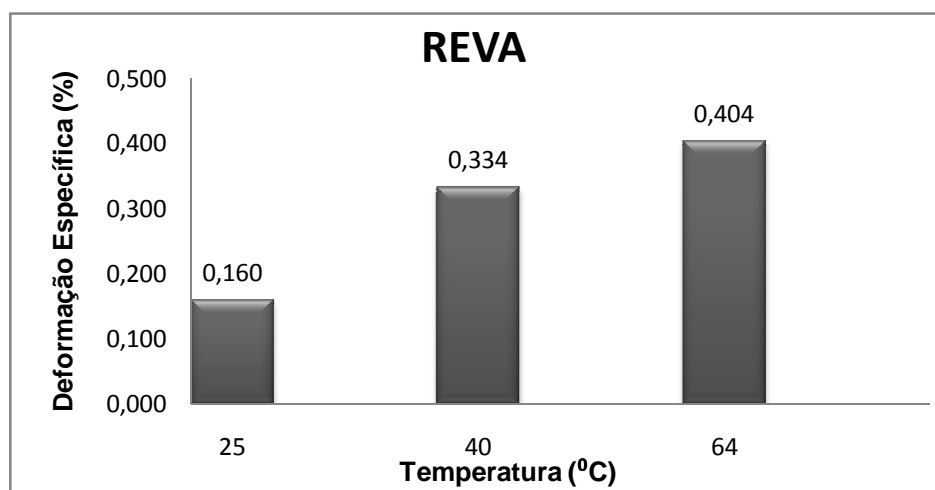


Gráfico 4.4-9: Deformação específica x temperatura para mistura REVA



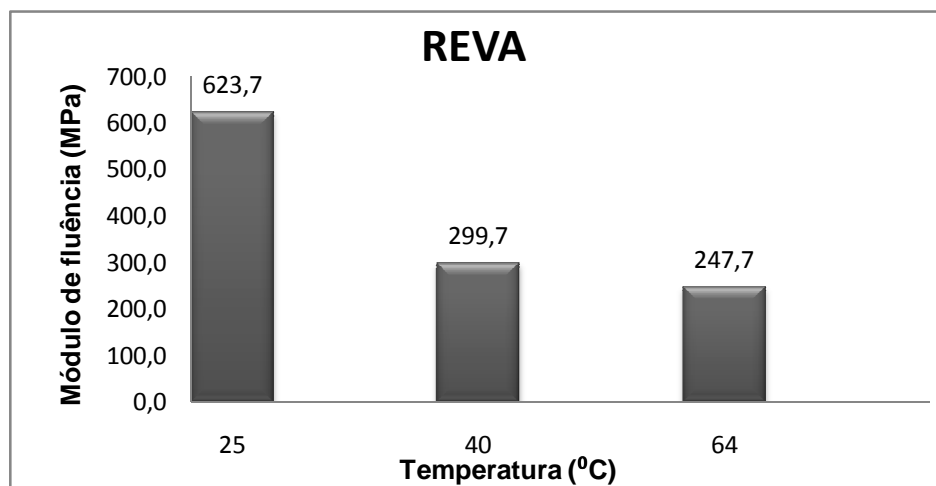


Gráfico 4.4-10: Módulo de Fluência x variação de temperatura para mistura REVA

No Gráfico 4.4-11, sob a temperatura de 25°C, apresentam-se todas as curvas de fluência até o estágio secundário, caracterizado pela taxa de deformação constante. As inclinações das retas oscilaram entre  $7 \times 10^{-6}$  e  $9 \times 10^{-6}$ . Comparando-se o resultado de cada mistura aponta-se o melhor desempenho para as misturas com o ligante REMAN.

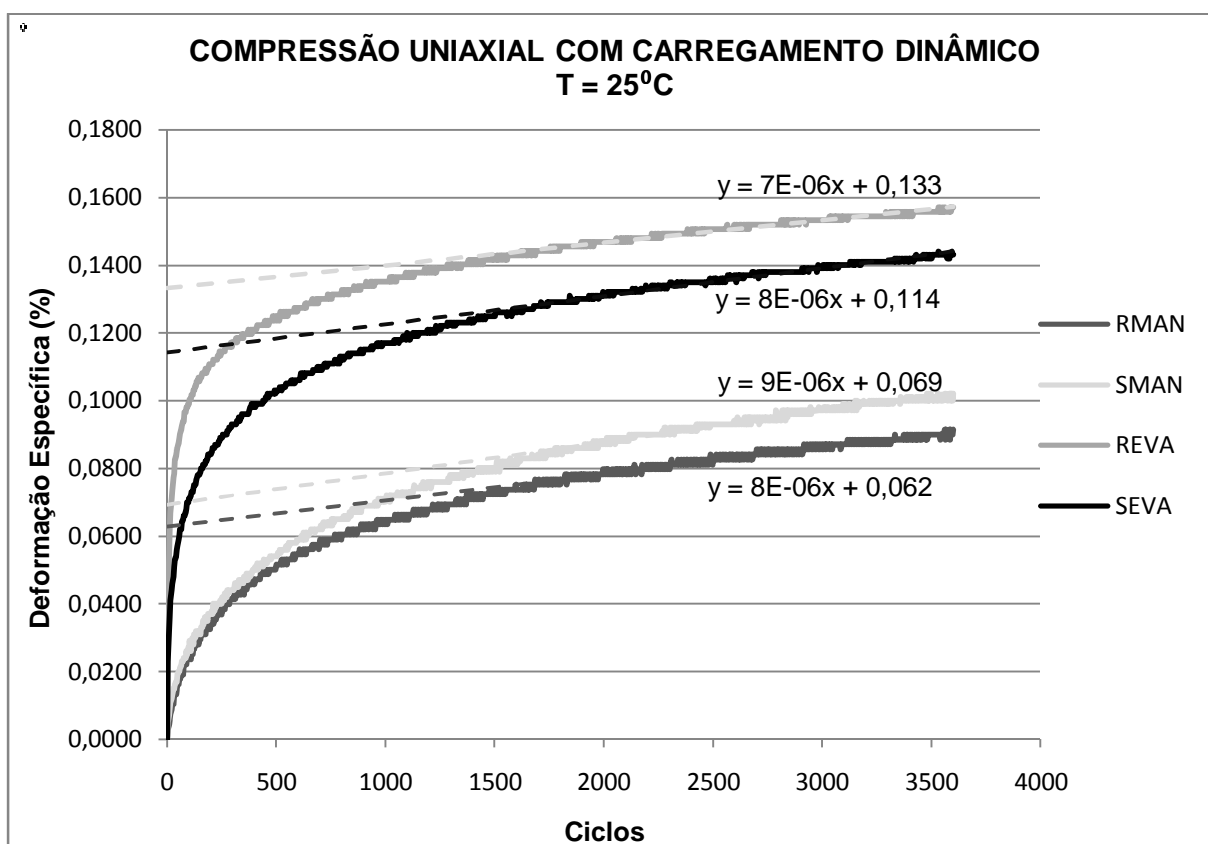


Gráfico 4.4-11: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 25°C

Conforme já constatado por Frota; Melo; Nunes, 2005a e Frota; Melo; D'Antona 2007b, as misturas asfálticas confeccionadas por agregado RCD, respectivo às misturas com ligante convencional, obtiveram menor deformação e inclinação da curva de fluência, sugerindo um esqueleto estrutural mais forte e maior intertravamento dos agregados, devido sua superfície rugosa. Em contradição com as expectativas a mistura REVA apresentou pior comportamento, seguida da mistura SEVA, ambas constituídas pelo ligante AMP EVA.

Sob temperatura de 40°C, tem-se o efeito positivo da adição de polímero nas misturas compostas por Seixo, pois a mistura SMAN apresentou maior inclinação ( $8 \times 10^5$ ), como também o dobro da deformação específica comparada à mistura SEVA (Gráfico 4.4-12).

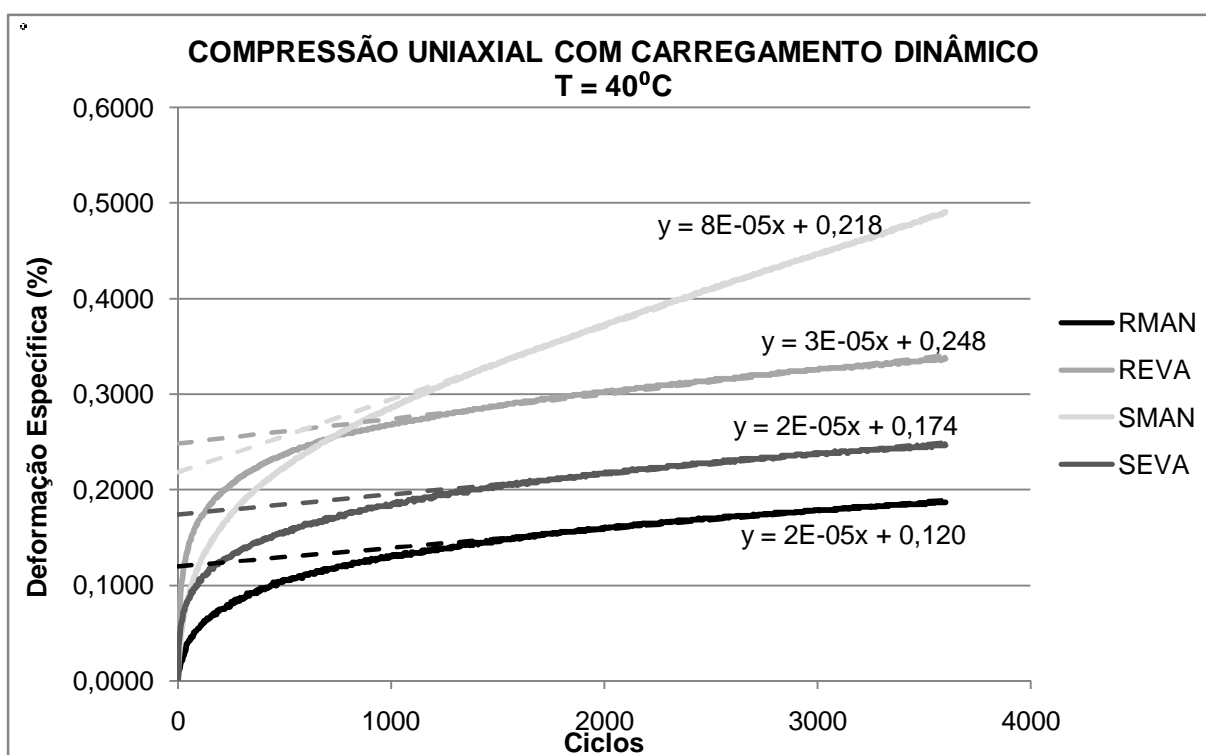


Gráfico 4.4-12: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 40°C

Todavia, entre as misturas com agregado RCD, o melhor desempenho aludiu a mistura confeccionada com asfalto convencional, pois mostrou baixa inclinação ( $2 \times 10^5$ ), assim como, a menor deformação específica ao fim do ensaio.

Dentre as misturas com ligante REMAN, outra vez enfatiza-se a melhor atuação do agregado reciclado. Embora, nas misturas constituídas com asfalto modificado, o melhor desempenho tenha sido apresentado pelos compósitos com agregado convencional.

Nessa temperatura não ficou clara a vantagem da participação do polímero EVA, para as misturas constituídas por RCD, o contrário mostrou-se evidente para as misturas compostas com agregado aluvionar.

O desempenho das misturas com RCD, sob temperatura de 64°C, é realçado no Gráfico 4.4-13, sendo REVA a única mistura que finalizou o experimento, mantendo-se a taxa de deformação constante ao longo do mesmo. Apresentou inclinação na ordem de  $10^{-5}$ , equivalente ao comportamento das demais misturas sob temperatura de 40°C, justificando-se, destarte, a modificação pela presença do polímero EVA. A mistura RMAN, embora não tenha alcançado o fim do ensaio, submeteu-se a 2.165 ciclos, quantidade superior as demais misturas com seixo.

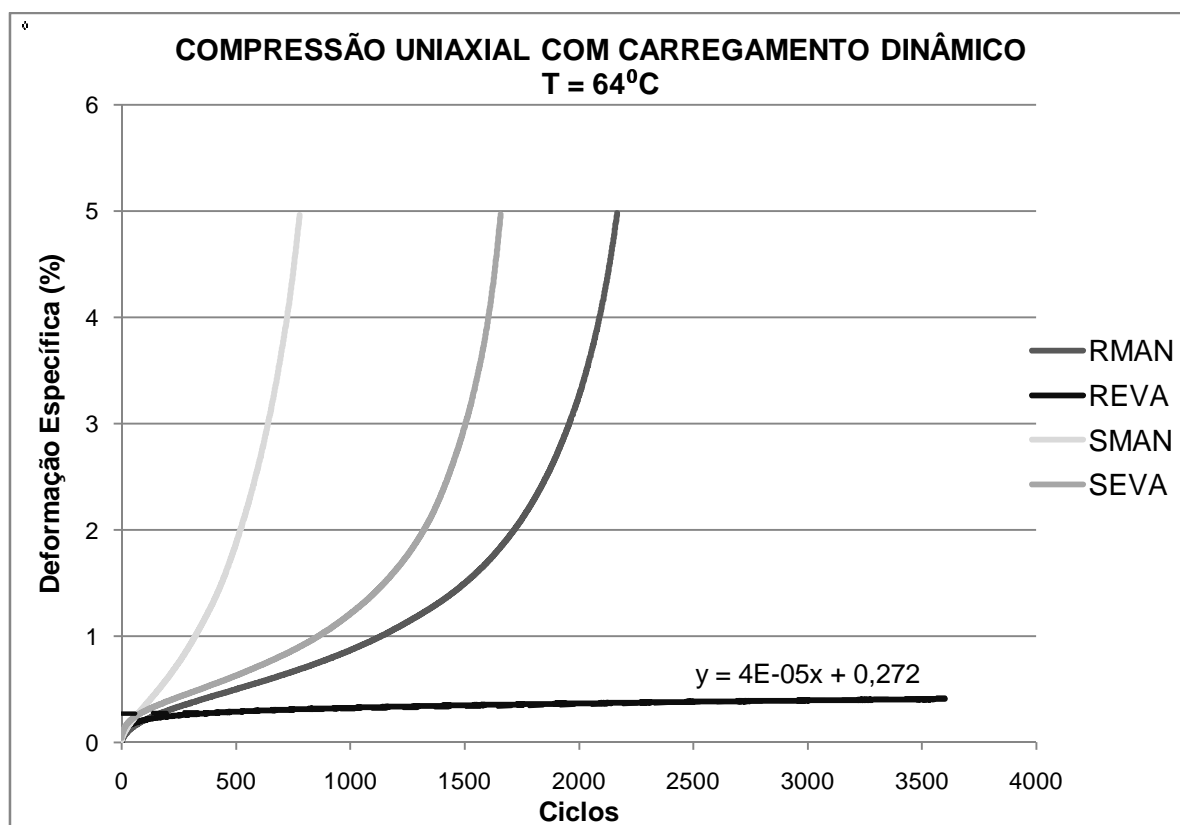


Gráfico 4.4-13: Resultado do ensaio compressão uniaxial com carregamento dinâmico a 64°C

Salienta-se que as misturas RMAN, SMAN e SEVA exibiram o estágio terciário, onde as taxas de deformação crescem progressivamente com o tempo, indicando estado de fadiga. Dentre elas, somente a mistura SMAN não alcançou o estágio secundário.

A mistura SMAN obteve o pior desempenho, finalizando o ensaio com 770 ciclos, demonstrando incapacidade de resistir a cargas a temperatura de 64°C. A mistura SEVA terminou o experimento com 1650 ciclos para a mesma deformação específica de 5%. Apresentou, também, um pequeno estágio secundário sucedendo ao estágio terciário.

Destaca-se, outra vez, o desempenho superior da mistura composta com asfalto REMAN e agregado RCD, concernente à mistura em que se empregou o agregado graúdo seixo e ligante AMP EVA. Nessa temperatura ficou, igualmente, ratificado o efeito positivo do polímero para as misturas com ambos os agregados. Demonstrado, assim, uma ligação mais forte entre o agregado RCD e o ligante AMP EVA.

A capacidade do concreto asfáltico de resistir à deformação imposta pelas cargas, está relacionada à coesão e ao atrito interno. O módulo de fluência, obtido no ensaio de compressão uniaxial dinâmico, é um indicador da resistência à deformação permanente.

Corroborando com a literatura pesquisada, no Gráfico 4.4-14 observa-se claramente que a elevação da temperatura implica na redução da resistência à deformação plástica. Portanto, a diminuição na força interna de ligação da mistura aludiu-se à redução da viscosidade do ligante.

Os resultados da caracterização tradicional do ligante (item 4.2.1), indicaram que a adição do polímero EVA ao ligante REMAN ocasionou aumento na consistência do mesmo. Souza *et al.* (1991) *apud* Greco (2004), afirmam que o aumento da consistência no ligante conduz a uma maior resistência à deformação permanente. Entretanto, a 25°C, esta relação não é verificada, pois as misturas com ligante AMP EVA apresentaram maiores deformações. A temperatura de 40°C, o aumento da resistência à deformação foi constatado somente para

mistura com agregado seixo. No entanto para a temperatura de 64°C a citada relação é condizente para as misturas com ambos os agregados.

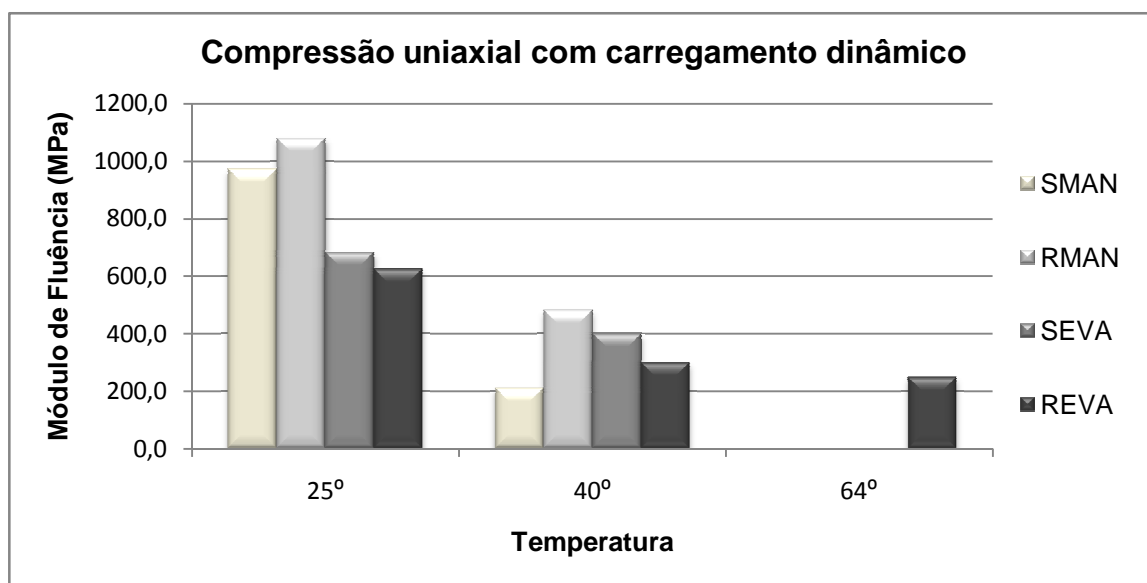


Gráfico 4.4-14: Resumo do Ensaio Compressão Uniaxial com carregamento dinâmico em várias temperaturas

Observa-se, do mesmo modo, que as misturas constituídas com o ligante AMP EVA, apresentaram menores variações do módulo de fluência relativas às elevações da temperatura, indicando menor suscetibilidade térmica.

Segundo Souza *et al.* (1991) *apud* Greco (2004), a variação dos agregados de superfície lisa para rugosa e de angulosidade, de redondo para anguloso, gera maior resistência à deformação plástica. Ressaltando-se as características do seixo, com superfície lisa e forma arredondada e as do agregado RCD, possuindo superfície rugosa e facetadas, essa constatação é constatada para as misturas com ligante convencional, em toda a faixa de temperatura estudada, e para a mistura com ligante AMP EVA na temperatura de 64°C.

Não obstante, para as misturas confeccionadas com asfalto modificado, sob as temperaturas de 25°C e 40°C, essa verificação é discordante, pois a mistura REVA apresentou a menor resistência. Salienta-se que a mistura SEVA contém menor teor de ligante. Porém, da literatura sabe-se que quanto menor o teor de ligante menor a suscetibilidade à deformação permanente.

Para avaliação do método de Bailey confrontaram-se os resultados obtidos nesta pesquisa com misturas constituídas com ligante convencional e outros verificados pelo grupo GEOTEC. A Tabela 4.4-7 apresenta um resumo, onde consta a composição, número de ciclos, temperatura e a tensão usada na execução dos ensaios. Compararam-se os resultados pelo módulo de fluência devido às diferentes tensões de carregamento.

Mistura	Composição	Temp.	Tensão (kPa)	Ciclos	$\epsilon$ (%)	Módulo
SMAN	Bailey	25°C	100	3600	0,103	971
RMAN	Bailey	25°C	100	3600	0,093	1079
Seixo Faixa C*	50% SEIXO; 45% AREIA; 5% CIMENTO	25°C	200	3600	0,390	513
Seixo Faixa C**	50% SEIXO; 45% AREIA; 5% CIMENTO	25°C	200	3600	0,420	476
Seixo Superpave**	60% SEIXO; 35% AREIA; 5% CIMENTO	25°C	200	3600	0,550	364
RCD Faixa C**	50% RCD; 45% AREIA; 5% CIMENTO	25°C	200	3600	0,106	1887
RCD Superpave**	65% RCD; 30% AREIA; 5% CIMENTO	25°C	200	3600	0,240	833

Tabela 4.4-7: Resultado do ensaio Compressão Uniaxial Dinâmico pelo GEOTEC

Fonte: \* Rufino (2007); \*\* Frota *et al.* (2006)

No Gráfico 4.4-15 constata-se que a mistura SMAN, enquadrada na faixa Superpave, selecionada pelo método de Bailey, proporcionou maior resistência a deformação plástica frente às demais segundo a faixa C/ DNIT e Superpave.

Dentre as misturas com agregado reciclado, evidencia-se o desempenho superior da mistura RCD na “Faixa C”, Frota *et al.* 2006, seguida de RMAN selecionada pelo método de Bailey, e por último a mistura enquadrada na Superpave. Ressalta-se que as duas misturas com agregado RCD, embora enquadradas na mesma faixa Superpave, tiveram desempenhos divergentes, demonstrando a utilidade do método de Bailey para a escolha dos componentes.

Dentre os concretos asfálticos compostos com agregado aluvionar, destaca-se o comportamento da mistura SMAN, escolhida pelo método Bailey, indicando o módulo de fluência superior as demais misturas. Comprovando, deste modo, que o método contribuiu para um arranjo melhor entre os grãos, levando a uma maior estabilidade.

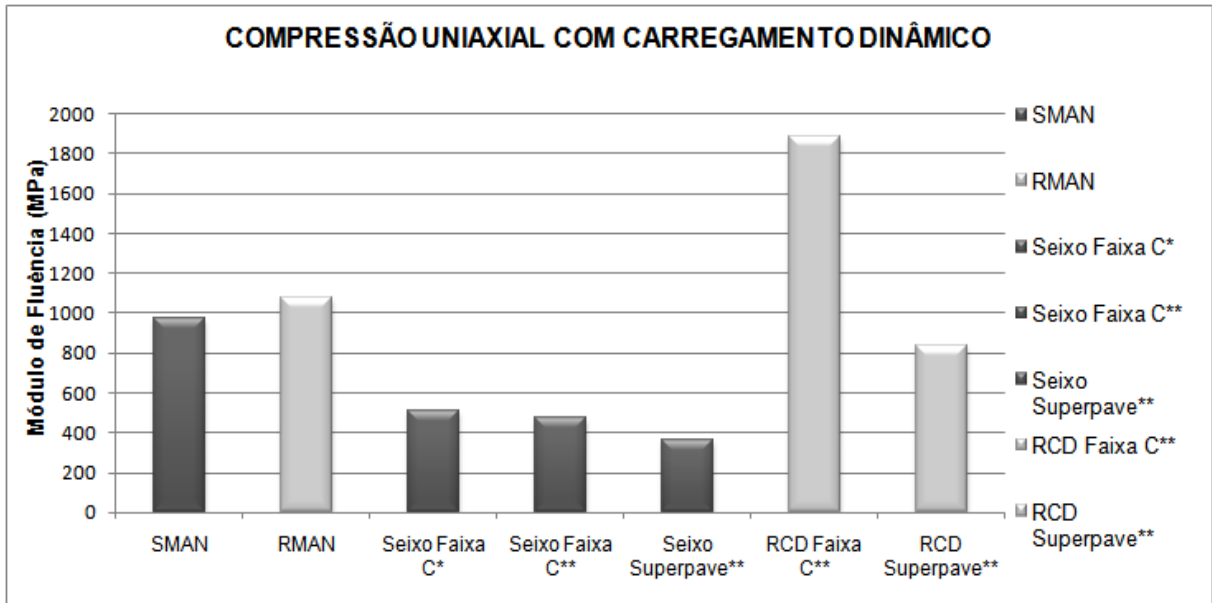


Gráfico 4.4-15: Resultado do ensaio de Compressão Uniaxial Dinâmico pelo GEOTEC

## 5 CONCLUSÃO

São expostas as seguintes conclusões e considerações sobre os resultados alcançados:

### 5.1 Caracterização dos Agregados

- O agregado graúdo seixo mostrou: partículas de diâmetros menores, relativas ao agregado RCD, 20% de porção fina em sua composição, superfície lisa e arredondada;

- O agregado RCD exibiu: grãos com diâmetros maiores, referentes ao agregado seixo, 4% de porção fina, superfície visivelmente áspera, alta absorção e baixa densidade relativa ao agregado seixo, sugerindo grande porosidade, além de resistência abrasão Los Angeles no limite especificado pelo DNIT;

- Os resultados obtidos para o agregado RCD corroboram com os dados encontrados na literatura pesquisada.

### 5.2 Caracterização do Ligante

- O asfalto modificado por polímero EVA apresentou menor valor no ensaio de Penetração e maior temperatura para o Ponto de Amolecimento, quando comparado ao cimento asfáltico convencional. Tais resultados são indicativos de maior consistência e portanto menor suscetibilidade a deformação permanente;

- Quanto aos ensaios realizados após envelhecimento em estufa de filme rotativo (RTFOT), o ligante citado exibiu menor variação de massa. Todavia, ao comparar os resultados com a amostra na condição virgem, o mesmo mostrou maiores variações nos demais ensaios (Penetração, Ponto de Amolecimento, DSR – Deformação Permanente), sugestivo de maior suscetibilidade ao envelhecimento;

- O ligante AMP EVA delineou ao longo de todo ensaio de deformação permanente e fadiga, menor ângulo de fase que o asfalto não modificado, sugerindo superioridade quanto à elasticidade, assim como maior módulo complexo, alvitando maior resistência à deformação.



- O ensaio de deformação permanente foi finalizado na temperatura de 82°C, para a amostra condicionada em RTFOT, embora a mesma não tenha atingido o limite especificado. Portanto, quanto à resistência a afundamentos em trilha de roda este ligante é passível de uso em pavimentos com temperaturas ainda superiores ao citado valor, haja vista que sempre ocorre envelhecimento durante usinagem e aplicação;

- O ligante modificado ao ser confrontado com o convencional, indicou novamente melhor desempenho quanto aos ensaios de fadiga;

- Quanto a trincas sob baixa temperatura, os ligantes apresentaram mesmo desempenho, embora não seja relevante em nossa região;

- O ligante AMP EVA apresentou maior viscosidade, ou seja, maior resistência ao fluxo para as mesmas temperaturas que o asfalto REMAN;

- Ainda que ao longo de todos os ensaios a amostra AMP EVA tenha obtido melhores resultados, segundo o sistema de classificação SUPERPAVE, ambos os ligantes estudados mostram-se com mesmo grau de desempenho igual a PG 70-16, sendo este superior ao requerido por Manaus (PG 64+2).

### **5.3 Ensaio em Misturas**

- As misturas compostas por cimento asfáltico modificado exibiram menores teores de ligante para o volume de vazios de 4%, sendo maior a diferença para a mistura constituída pelo agregado aluvionar;

- A mistura SEVA mostrou baixo valor de vazios no agregado mineral;

- Todas as misturas atenderam os parâmetros do método de Bailey, com exceção do parâmetro  $FA_C$ , que relaciona a parte grossa do agregado fino;

- A mistura SMAN mostrou melhor resultado quanto à resistência à tração indireta. Todavia, ao ser comparada com as misturas confeccionadas com RCD, a mistura com ligante modificado obteve maior valor;

- As misturas selecionadas granulometricamente pelo método de Bailey exibiram resistências elevadas, quando confrontadas às demais misturas enquadradas nas faixas “C” DNIT e Superpave. Tal superioridade pode estar associada à presença de maior quantidade de agregado graúdo;

- O módulo de fluência, ou seja, a resistência à deformação permanente, decresceu com o aumento da temperatura, provavelmente causada pela redução da viscosidade do ligante, para todas as misturas pesquisadas;

- A 25°C as misturas compostas com o ligante REMAN auferiram menores deformações específicas;

- Sob a temperatura de 40°C, o efeito da modificação com polímero revelou-se eficaz para as misturas com Seixo. No entanto, entre as misturas constituídas com o agregado reciclado, o melhor desempenho foi alcançado com o ligante convencional;

- À exceção da mistura REVA, todas as demais não conseguiram concluir o ensaio a 64°C e apresentaram curva de fluência no estágio terciário, indicativo de ocorrência de fadiga no corpo de prova. Ressalta-se que o mesmo foi interrompido quando a deformação atingiu o limite de 5%;

- Enfatiza-se, igualmente, que a mistura REVA apresentou as melhores propriedades quanto à deformação permanente, pois no ensaio a 64°C não evidenciou o estágio terciário e a inclinação do estágio secundário permaneceu na mesma ordem que as demais misturas, sob a temperatura de 40°C, assim como mostrou a menor variação de deformação específica frente às variações térmica;

- As misturas confeccionadas com ligante AMP EVA apresentaram menor variação do módulo de fluência relativo às diferentes temperaturas e ao compará-las às misturas constituídas com ligante convencional, indicando, portanto, menor suscetibilidade térmica;

- Em toda faixa de variação térmica estudada as misturas compostas com RCD foram detentoras de menor deformação específica ao final dos ensaios. Aludi-se este comportamento ao aumento do atrito interno oriundo de suas características superficiais;

- Apesar da classificação Superpave atribuir desempenho adequado para temperatura superior à máxima ensaiada, as duas misturas confeccionadas com ligante REMAN não exibiram bom comportamento a 64°C;

- Verificou-se que as misturas constituídas com o ligante AMP EVA mostraram-se com resistência superior em temperaturas elevadas, embora ambos os ligantes pesquisados tenham apresentado mesma classificação quanto ao desempenho, pela metodologia Superpave;

- Observou-se que o Ponto de Amolecimento pode ser uma boa referência, quanto à capacidade a resistir à deformação em relação à temperatura;

- As misturas selecionadas pelo método de Bailey demonstraram menor capacidade em acumular deformações residuais ao compará-las as demais enquadradas na faixa “C” DNIT e Superpave. A única exceção foi o resultado mostrado pela mistura RCD na faixa “C”, cujo módulo de fluência mostrou valor acima da média.

#### **5.4 Sugestões para continuação da pesquisa:**

- Realizar os seguintes ensaios de caracterização, segundo o SHRP, nos agregados: angularidade, partículas alongadas e achatadas, teor de argila, sanidade e presença de materiais deletérios;

- Estudar as propriedades de outro agregado de origem granítica ou basáltica, assim como constituir misturas com ligante regional e também com modificado;

- Efetuar ensaio de recuperação elástica, para constatar as alterações após envelhecimento em estufa de filme rotativo das amostras;

- Examinar a diferença de coesão nos ligantes por meio do ensaio Coesividade Vialit

- Avaliar o comportamento das misturas asfálticas quanto à vida de fadiga, para averiguar o efeito do aumento da consistência e, ainda, a influência das propriedades elásticas verificadas no ensaio de caracterização;
- Analisar as deformações elásticas, pois segundo a literatura pesquisada o polímero EVA não altera as mesmas;
- Realizar envelhecimento em estufa ventilada por 2 horas para produção das misturas asfálticas, visando suscitar as melhorias obtidas após envelhecimento, pois este processo acarreta um aumento da consistência dos ligantes modificados por EVA, melhorando o desempenho do mesmo;
- Variar a composição granulométrica da mistura confeccionada com ligante modificado por EVA e agregado seixo, de forma a obter maior valor de VAM, bem como avaliar suas propriedades mecânicas;
- Realizar ensaio para avaliação da adesividade e sensibilidade a umidade das misturas asfálticas;
- Avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas através do ensaio *Flow Number* em temperaturas elevadas (NCHRP Report 580), assim como, também pelo parâmetro CDI utilizando o Compactador Giratório;
- Estudar os custos decorrentes da modificação do ligante pelo polímero e ao uso do agregado reciclado;
- Executar e monitorar trecho experimental para comparar os resultados do campo com os obtidos em laboratório.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDIGUERI, D. R.; SILVEIRA, M. A.; SOARES, J. B. Estudo comparativo entre compactação manual e automática de misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPV, 2001. v.1. p.804-813.

AMARAL, S. **Estudo de misturas asfálticas densas do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP 40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX 65/60)**. 2000. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

\_\_\_\_\_ Estudo de misturas Laterita-Asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimento. 2004. 174p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANGULO, S. C. *et al.* Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_ Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos: patologia e manutenção**. 1.ed. São Paulo: Plêiade, 1997. 103p.

BARROS, Maurício Correia. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. 2005. 96 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BERNUCCI L.B.; MOTTA L.M.G.; CERATTI J.A.P.; SOARES J.B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1.ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.

BODI, J.; BRITO FILHO, J.A; ALMEIDA S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPV, 1995. p.409-436.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

CARNEIRO, A. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 170p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E.; OLIVEIRA, A. M. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, J. C. S. *et al.* (org.) **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA, 2001a, p. 142-187.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. In: CASSA, J. C. S. *et al.* (org.) **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA, 2001b, p. 188-227.

CINCOTTO, A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. **A Construção**, São Paulo, n. 1855, p. 27-30, agosto. 1983.

COELHO, V. **Contribuição ao estudo de deformação permanente, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico na pavimentação**. 1996. 281p. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

COELHO, V.; SÓRIA, M. H. A. Influência da granulometria e da temperatura nas deformações permanentes das trilha-de-rodas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29, 1995, Cuiabá. **Anais...Cuiabá: ABPv**, 1995. v.2, p.403-431.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 307 CONAMA**, de 5 de julho de 2002.

COSTA, N. A. A. **A reciclagem do resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada**. 2003. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

CUNHA, M.B. **Avaliação do Método de Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. 2004. 105p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte**. 2004. 109 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FERNANDES FILHO, L. A. **Geologia, mineralogia, geoquímica dos lateritos de Manaus - Amazonas**. 1996. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém.

FRANCO, F. A. C. P. **Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos**. 2000. 171 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANCKEN, L. et al. Recent activities of RILEM TC 152 – PBM- performance bituminous materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENT, 8., 1997, Seattle, USA.

FREITAS, F.J.S. Asfalto Modificado com EVA. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. **Anais... Salvador: ABPv**, 1996, v.1, p.61-74.

FRITZEN, M. A. **Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimentos Asfálticos com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis**. 2005. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FROTA, C.A.; MENTA, C.O.; NUNES, F.R.G. Utilização do Entulho Reciclado em Misturas Asfálticas para a Região de Manaus. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 12., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2003.CD-ROM.

FROTA, C.A; ALENCAR, C.L; SILVA, C. P. L. Influência do Tipo de Agregado na Qualidade Técnica de Misturas Asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2004. CD-ROM.

FROTA, C.A; MELO, D.M; NUNES, F. R. G. Estudo de Creep de Misturas Asfálticas com Resíduo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABPv, 2005a. CD-ROM.

FROTA, C.A; MELO, D.M; NUNES, F. R. G. Análise da influência da capacidade de absorção do resíduo processado da construção civil na determinação de índices físicos de misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, 36., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABPv, 2005b. CD-ROM.

FROTA, C. A. et al. Novos Materiais Para a Construção de Pavimentos Rodoviários. In: RELATÓRIO DE PESQUISA, Universidade Federal do Amazonas, Grupo de Geotecnia, Manaus, 2006.

FROTA, C.A; MELO, D.M; NUNES, F. R. G. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduo Processado da Construção Civil. In: JORNADA LUSO-BRASILEIRA DE PAVIMENTOS, 5., 2006, Recife. **Anais...** Recife: ANDIT, 2006. CD-ROM.

FROTA, C. A. et al. Estudo da Resistência à Tração de Misturas Confeccionadas com Agregados Reciclados. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2007, SÃO PAULO. **Anais...** São Paulo: CONINFRA, 2007. CD-ROM

FROTA, C. A. ; MELO, D. M. ; D'ANTONA, D. M. G. Influência da Temperatura nas Misturas Asfálticas com Resíduos de Construção e Demolição. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS, 6., 2007, Porto. (a publicar).

GOUVEIA L. T. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação Superpave**. 2002. 139p. Dissertação (Mestrado em Infra- Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

\_\_\_\_\_ Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas. 2006. 309p. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GOUVEIA, L. T.; FURLAN, A. P.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES JR., J. L.; FABBRI, G. T. P. Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade. In: ANPET CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18., 2004. Florianópolis.

GRECO J. A. S. **Avaliação da Influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos.** 2004. 340p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HANSEN, T.C. **Rilem report 6 – recycling of demolished concrete and masonry.** Londres: E& FN SPON/Chapman & Hall, 1992, 305p.

HOMEM, T. R. **Comportamento de Misturas Asfálticas Porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** 2002. 111p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

IDELFONSO J. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero de etileno e acetato de vinil (EVA) descartado pela indústria caçaldista em misturas asfálticas (processo seco).** 2007. 331p. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Instituto Brasileiro de Petróleo. **Asfalto modificado com polímeros.** Informativo O Asfalto. ano 7, n.1, p.1-6, 1996.

Instituto de Asfalto. **Manual de Asfalto.** 1989 ed. 2002. 599p. série n.4.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 21-30.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V. M; AGOPYAN V. **Reciclagem de resíduos da construção.** In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, [2001?], São Paulo: CETESB.

JOHN, V. M; ANGULO, S. C.; KAHN H. **Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização.** In: SATTTLER, M. A.; PEREIRA, F.O. R. (Org.) **Construção e meio ambiente.** Porto Alegre: ANTAC, 2006. cap. 6, p. 168-207, (Coleção Habitare, 7v).

KENIS, W. J.; SHARMA, M.G. **Rut depth prediction and test procedures for permanent deformation in asphalt pavements.** **Transportation Research Record**, n. 616, p.28-30, 1976.

LEITE, L. F. M. **Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero.** 1999. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



LEITE, L. F. M. & TONIAL, I. A. Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 12., 1994. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1994. P.94-119.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** 1997. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

\_\_\_\_\_. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. 2002. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LIMA, J.A.R. **Proposição de Diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. 222p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential. **Transportation Research Record.** n.147, p.49-57, 1993.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho.** 2004. 184p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MAHBOUB, K. Asphalt concrete creep as related to rutting. **Journal of Materials in Civil Engineering,** v.2, n.3, p.147-163, 1990.

MEDEIROS JUNIOR, M. S. **Estudo de Interconversão entre o Módulo Complexo e a Creep Compliance na Caracterização de Misturas Asfálticas.** 2006. 123p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Fortaleza.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 574p.

MERIGHI, J.V. **Estudo da deformação permanente de misturas asfálticas em ensaios de laboratório.** 1999. 255p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MIRANDA, L. F. R. **Estudos de fatores que influem na fissuração de revestimento de argamassa com entulho reciclado.** 2000. 172p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOHAMED, E. H. H.; YUE, Z. Criteria for evaluation of rutting potential based on repetitive uniaxial compression test. **Transportation Research Record,** n. 1454, p.74-81, 1994.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOTTA, L.M.G.; Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. 1991. 366p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTTA, L. M. G. et al. O Ensaio de *Creep* Estático e Dinâmico na Avaliação das Misturas Asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: 1996. v.01, p.115-135.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005.134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. 2003. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MUGAYAR, A. N. **Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas**. 2004. 118p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. 2008. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NUNES, F. R G (2006). **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas Com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto a Deformação Permanente**. 2006. 203p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PINTO, T.P. **Utilização do resíduo de construção - estudo de uso em argamassas**. 1986. 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

\_\_\_\_\_. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RAMOS, C. R. **Estudo para o Desenvolvimento de um Catálogo de Pavimentos Flexíveis do Município do Rio de Janeiro**. 2003. 301 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RAMOS, C.; LÁO, V. L. E. S. T.; Martinho F. G. et al. Asfalto Modificado com Polímero uma Opção para Melhoria dos Asfaltos Nacionais. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 13., 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1996, p. 60-81

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S. e BROWN, E. R.; LEE D. Y. e KENNEDY T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. 2. ed. Lanham, Maryland: NAPA Research and Education Foundation, 1996.

RUFFINO, M.G.S. **Estudo do comportamento de agregado sintético de argila calcinada para uso em revestimentos asfálticos para Manaus**. 2007. 99p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Brasília, Brasília.

SÁ, M. F. P; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaio de *creep* estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 13., 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1996, p.91-115.

SANTANA, H.; GOTINJO, P. **Seleção dos tipos de CAP necessários à pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: ABEDA, 1984.

SANTOS, C. R.G. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. 109p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. 2003. 130p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHRP. **Superior Performance asphalt pavements (*Superpave*): the product of SHRP asphalt research program**. Superpave Series N°. 2. Strategic Highway Research Program, 1994.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo de envelhecimento de ligantes asfálticos: Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV**. 2005. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, P. B. **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S**. 2005.132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOUSA, F. V.; SOARES, J. B. Previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas a partir dos resultados do ensaio de *creep* estático. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002. v.1. p.29-41

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre.

TAYEBALI, A. A.; DEACON J. A.; COPLANTZ, J.S.; MONISMITH, C.L. Modeling fatigue response of asphalt-aggregate mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.62, p.285-421, 1993.

THEISSEN, K. M. **Aplicação do Princípio da Correspondência Elasto-viscoelástica para previsão de Deformabilidade de Misturas Asfálticas**. 2006. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SIDNEY. **Recycled construction and demolition material for use in roadworks and other local government activities**, 1999. Disponível em: <[http://www.ipwea.org.au/upload/final\\_scoping\\_report.pdf](http://www.ipwea.org.au/upload/final_scoping_report.pdf)>. Acesso em 30 dezembro 2008.

VALKERING, C.P. *et al.* Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polimer-modified binders. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v.59, p.590-609, 1990.

VAN DE LOO, P. J. Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. In: ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS. **Proceeding...** v.43, p.253-284, 1974.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H.; BAILEY, R. Bailey method for gradation selection in hot-mix asphalt mixture design. In: TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR, n. E-C044, 2002.

VIANNA, A. D. Creep. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 17., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2004.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção de concreto**. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

Ficha Catalográfica  
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

D'Antona, Daniela Muniz Guimarães

D194e      Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado por polímero EVA e resíduo da construção civil para as vias urbanas de Manaus / Daniela Muniz D'Antona Guimarães. - Manaus: UFAM, 2009.

146 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2009.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Consuelo Alves da Frota

1. Resíduo da construção civil (Materiais de construção) 2. Ligante modificado 3. Polímero EVA 4. Método de Bailey 5. Ensaio de compressão axial dinâmico 6. Mistura asfáltica I. Frota, Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 625.878(811.3)(043.3)

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)