



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA AMAZÔNIA

LUIZ EDUARDO OLIVEIRA DE ARAÚJO

ESTUDO DAS INTERAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E REOLÓGICAS DE LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO A TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA COM FIBRAS DE
POLIÉSTER RECICLADO

MANAUS - AM

Agosto/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS DA AMAZÔNIA

LUIZ EDUARDO OLIVEIRA DE ARAÚJO

ESTUDO DAS INTERAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E REOLÓGICAS DE LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO A TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA COM FIBRAS DE
POLIÉSTER RECICLADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da
Amazônia da Universidade Federal do Amazonas
como requisito para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Recursos da Amazônia.

Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro
Orientador

Manaus – AM
Agosto/2013

A663e

Araújo, Luiz Eduardo Oliveira de.

Estudo das interações químicas, físicas e reológicas de ligante asfáltico modificado a temperatura intermediária com fibras de poliéster reciclado / Luiz Eduardo Oliveira de Araújo. - 2013.

128 f. : il. color. ; 31 cm.

Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) — Universidade Federal do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro.

1. Asfalto 2. Plásticos – Reaproveitamento 3. Trabalhos com garrafas plásticas 4. Produtos reciclados 5. Reologia I. Couceiro, Paulo Rogério da Costa, orientador II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU (2007): 625.85(811)(043.3)



Ata de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado do aluno **Luiz Eduardo Oliveira de Araújo**, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, realizada no dia 12 de agosto de 2013.

Às 14h30 horas do dia 12 de agosto de 2013, na Sala da Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia (PPG-ENGRAM), na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, foi realizada a Defesa Pública de Dissertação de Mestrado do discente **Luiz Eduardo Oliveira de Araújo**, intitulada “**Estudo das Interações Químicas, Físicas e Reológicas de Ligante Asfáltico Modificado a Temperatura Intermediária com Fibras de Poliéster Reciclado**”, como parte final de seu trabalho para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Recursos da Amazônia. A Banca Examinadora constitui-se dos seguintes professores: Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro (Presidente - UFAM-PPG-ENGRAM), Prof. Dr. José Ferreira da Silva Júnior (Membro - UFAM-PPG-ENGRAM) e Prof^a. Dr^a. Virgínia Mansanares Giacon (Membro Externo - UFAM). Após a apresentação do trabalho pelo aluno, os examinadores fizeram as observações concernentes. Todas as sugestões da Banca Examinadora serão consideradas pelo aluno ao preparar a versão final de seu trabalho escrito. Em seguida, a Banca Examinadora reuniu-se e concedeu o conceito APROVADO (aprovado / não-aprovado). Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, em Manaus, 12 de agosto de 2013.

Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro (Orientador e Presidente)
Universidade Federal do Amazonas (PPG-ENGRAM)

Prof. Dr. José Ferreira da Silva Júnior
Universidade Federal do Amazonas (PPG-ENGRAM) (Membro Interno)

Prof^a. Dr^a. Virgínia Mansanares Giacon
Universidade Federal do Amazonas (Membro Externo)

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família por sempre estarem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus colegas de trabalho da Receita Federal do Brasil.

Aos meus colegas do PPG-ENGRAM que compartilharam a vida acadêmica nesses anos.

Aos meus colegas da Universidade Federal de Sergipe (UFS) em Aracaju que me ajudaram nas análises reológicas e químicas desta minha pesquisa.

Em especial à Profa. Gisélia Cardoso por ser pessoa de extrema simplicidade e avançados conhecimentos, em ter me recebido tão bem e me ajudado em fase tão complexa deste trabalho. Quanta honra tê-la conhecido e aprendido com ela.

Aos colegas do Departamento de Química e do LAPEC da UFAM por também me ajudarem em muitas análises e repetições das mesmas.

Ao meu fraterno irmão Alexandre Veríssimo e toda sua família por ter me ajudado com as amostras de PET reciclado.

A todos os professores do PPG-ENGRAM pela dedicação e empenho em nos ensinarem e repassarem seus profundos saberes.

À Profa. Dra. Rita Moura Fortes por vir a Manaus como professora visitante.

À Profa. Dra. Consuelo Frota por ter sido a pedra fundamental deste programa de mestrado.

E ao meu professor e orientador nesse caminho, Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro, por tanto ter me ensinado e solidificado conhecimentos científicos tão raros e pela sua enorme paciência e dedicação à ciência.

“Lembra-te do teu Criador nos dias de tua juventude, antes que cheguem os dias maus e se aproximem os anos dos quais dirás: não sinto prazer neles. Antes que se obscureçam o Sol e a luz, a Lua e as estrelas; então, o pó retorna para a terra tal qual era; e o espírito volta a Deus, que o deu.” (Eclesiastes 12: 1, 7 e 8).

RESUMO

O presente trabalho pesquisou as características químicas, físicas e reológicas de um compósito cujos materiais são o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, um emulsificante químico para melhorar a viscosidade a temperaturas intermediárias e fibras de politereftalato de etileno (PET) recicladas a partir principalmente da reutilização de garrafas descartadas no pós-consumo. Foram feitas análises químicas de Termogravimetria (TGA), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e imagens captadas em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As análises físicas foram as mais utilizadas para caracterizar o CAP, quais sejam, Penetração (P), Ponto de Amolecimento (PA) e Envelhecimento Termoxidativo em Estufa RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), ou Estufa de Fino Filme Rotativo. Os teste reológicos compõem-se da Viscosidade Dinâmica (Brookfield) e da Reometria por Cilhamento Dinâmico (DSR). A adição da fibra de PET reciclado melhorou o desempenho do CAP 50/70 o qual foi misturado a temperaturas menores que as utilizadas comumente na indústria do asfalto. Essas temperatura são em média próximas ou maiores que 160 °C. Nesse estudo o compósito foi mistura a até 140 °C. A adição das fibras fez com que o CAP melhorasse as especificações físicas diminuindo a Penetração e o Ponto de Amolecimento. Pelos resultados de reometria percebeu-se que a modificação tornou o compósito mais viscoso nas temperatura de 135, 150 e 177 °C. O Ângulo de Fase (δ) diminuiu e o Módulo Complexo (G^*) aumentou nas frequências de estudo. As imagens MEV mostram a fibra presente aderidas ao cimento asfáltico de petróleo. O FTIR mostrou os vários componentes presentes na mistura pura e modificada, bem como no PET. O TGA evidenciou uma melhora geral nas condições de estabilidade térmicas da mistura modificada.

Palavras chave: Asfalto, Plásticos – Reaproveitamento, Trabalhos com garrafas plásticas, Produtos reciclados, Reologia.

ABSTRACT

This paper researched the chemical, physical and rheological properties of a composite whose materials are asphalt cement CAP 50/70, an emulsifier chemical to improve the viscosity at intermediate temperatures and fibers of polyethylene terephthalate (PET) recycled from mainly of the reuse of the discarded bottles after consumption. Chemical analyzes were made of thermogravimetry (TGA), Fourier Transform Infrared (FTIR) and images captured in Scanning Electron Microscopy (SEM). The physical analysis were the most used to characterize the CAP, namely, penetration (P), Softening Point (AP) and Aging Termoxidative in RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). The rheological test consist of Viscosity Brookfield and by Dynamic Shear Rheometer (DSR). The addition of recycled PET fiber improved the performance of CAP 50/70 which was blended at temperatures lower than those commonly used in the asphalt industry. These are average temperature close to or higher than 160 °C. This study was the composite mixture to 140 °C. The addition of fibers caused the asphalt improve the physical specifications and decreasing Penetration and Softening Point. The results rheometry realized that the modification made the composite more viscous the temperature of 135, 150 and 177 ° C. The Phase Angle (δ) decreased and Module Complex (G^*) increased the frequencies of study. SEM images show adhered to the present fiber petroleum asphalt cement. The FTIR showed the various components in the mixture, pure and modified, as well as PET. The TGA showed a general improvement in the conditions of thermal stability of the modified mixture.

Words keys: Asphalt, Plastics - Reuse, Working with plastic bottles, Recycled Products, rheology.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AMP	- Asfaltos Modificados por Polímeros
ANP	- Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis
API	- American Petroleum Institute
ASAC	- Agregado Sinterizado de Argila Calcinada
ATR	- Refletância Total Atenuada
CA	- Concreto Asfáltico
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
COV	- Compostos Orgânicos Voláteis
dmm	- Décimo de milímetro
DSR	- Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
DTA	- Análise Termogravimétrica Diferencial
EVA	- Etileno Acetato de Vinila
FTIR	- Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
G*	- Módulo Complexo
G'	- Módulo Elástico Recuperável
G''	- Módulo Viscoso Não-Recuperável
GBC	- Green Building Council
GEE	- Gás de Efeito Estufa
HMA	- Hot Mix Asphalt
HPA	- Hidrocarboneto Policíclico Aromático
kV	- Quilovolt
m ³	- Metro cúbico
OGFC	- Open Grade Friction Concrete
ONG	- Organização Não Governamental
Pa	- Pascal (Unidade de medida de tensão)
Pa s	- Pascal segundo (Unidade de medida de viscosidade dinâmica)
pA	- pico-Ampére
PEAD	- Polietileno de Alta Densidade
PEBD	- Polietileno de Baixa Densidade
PET	- Politereftalato de Etila
PNMC	- Política Nacional de Mudança do Clima
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	- Polipropileno
REMAN	- Refinaria de Manaus
RSU	- Resíduo Sólido Urbano
RTFOT	- Rolling Thin Film Oven Test
SB	- Estireno Butadieno

- SBR - Borracha Estireno Butadieno
- SBS - Estireno Butadieno Estireno
- SHRP - Strategic Highway Research Program
- SMA - Stone Mastic Asphalt
- SUPERPAVE - Superior Performance Pavement
- TEP - Tonelada Equivalentes de Petróleo
- TGA - Análise Termogravimétrica
- TRB - Transportation Road Bureau
- TUC - Temperatura de Usinagem e Compactação
- UE - União Europeia
- USIRF - Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française
- UV - Radiação Ultravioleta
- VB - Viscosidade Brookfield
- WMA - Warm Mix Asphalt
- δ - Ângulo de mudança de fase ou Ângulo de fase
- ν - Frequência

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Classificação dos petróleos quanto ao seu grau °API.....	37
Tabela 2.	Reserva provada em 2010 e densidade API dos principais poços produtores de asfalto no Brasil.....	38
Tabela 3.	Especificação para cimento asfáltico de petróleo - CAP (Resolução 19/2005, ANP).....	48
Tabela 4.	Extensão da malha rodoviária brasileira. Fonte: DNIT, 2012.....	50
Tabela 5.	Extensão total da rede rodoviária do estado do Amazonas.....	51
Tabela 6.	Principais HPAs e respectiva estrutura molecular.....	73
Tabela 7.	Quantidades em massa (g) de cada componente utilizada na preparação das amostras de ligante asfáltico.....	81
Tabela 8.	Atribuições das bandas observadas nos espectros FTIR das amostras de CAP puro e modificados.....	94
Tabela 9.	Resumo dos resultados das análises termogravimétricas.....	96
Tabela 10.	Resultado dos ensaios de Viscosidade Dinâmica (em Pa s) das amostras CAP puro e modificados.....	110
Tabela 11.	Resultados de viscosidade Brookfield e penetração da amostra C4E1P comparados com outros similares obtidos da literatura.....	110
Tabela 12.	Especificações da Viscosidade Brookfield para TUC.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Defeitos no pavimento: (a) Panela. (b) Deformação plástica e fluência.	21
Figura 2 - Principais indicadores de transformações ambientais globais. Fonte: BARNOSKY, 2012.	25
Figura 3 - Acompanhamento do lançamento de CO ₂ na Troposfera. Fonte: NOAA, 2012.	26
Figura 4 - Evolução do consumo de resina PET e quantidade reciclada. Fonte: ABIPET 2012.	30
Figura 5 - Principais rochas da bacia sedimentar amazônica. Fonte: SARGES <i>et al.</i> , 2010.	34
Figura 6 - Mapa da região amazônica mostrando as áreas carentes de material granular. Fonte: BATISTA, 2004.	34
Figura 7 - Classificação das cadeias carbônicas.	36
Figura 8 - Distribuição percentual da produção de derivados de petróleo não energéticos em 2012. Fonte: ANP, 2013.	38
Figura 9 - Representação de cadeias carbônicas homogêneas.	39
Figura 10 - Representação de uma cadeia heterogênea com o seu heteroátomo.	40
Figura 11 - Lago de asfalto de Trindade no século XIX (a). Lago nos dias atuais (b).	41
Figura 12 - Asfalto TLA paletizado. Fonte: CAVALCANTI, 2010.	41
Figura 13 - Esquema básico de destilação de asfalto em 2 estágios.	43
Figura 14 - Representação estrutural das frações do asfalto. Fonte: XU e HUANG, 2010.	46
Figura 15 - Produção anual de asfalto no Brasil, em m ³ . Fonte: ANP. Dados estatísticos, 2013.	47
Figura 16 - Exemplificação do ensaio de penetração. Fonte: BERNUCCI, 2006.	48
Figura 17 - Corpo de prova de concreto asfáltico. Fonte: BATISTA <i>et al.</i> , 2010.	50
Figura 18 - Rede rodoviária nacional quanto ao seu estado de pavimentação. Fonte: DNIT, 2012.	51
Figura 19 - A deformação permanente e suas componentes.	54
Figura 20 - Deformação permanente em pavimentos flexíveis. Fonte: BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006.	54
Figura 21 - Formação de trilha de roda.	55

Figura 22 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço. Fonte: BERNUCCI, 2006 <i>apud</i> SHELL, 2003.	58
Figura 23 - Fórmula estrutural da molécula de PET.	65
Figura 24 - Fibras de poliéster em meio a ligante asfáltico. Fonte: CHEN e LIN, 2005.	67
Figura 25 - Classificação das misturas em função da temperatura e consumo de energia. Fonte: MOTTA, 2011.	68
Figura 26 - Esquema de recobrimento do agregado pelo ligante asfáltico em função da elevação de temperatura. Fonte: MOTTA, 2011.	71
Figura 27 - Comportamento reológico de fluidos conforme sua viscosidade. (a) Newtoniano. (b) Pseudoplástico. (c) Dilatante.	76
Figura 28 - Gráfico representativo do carregamento expressando tensão e deformação.	77
Figura 29 - Exemplar de uma amostra de fibras de PET reciclado fornecido pela empresa Unnafibras.	79
Figura 30 - Exemplar da amostra de Evotherm M1 fornecido pelo representante da empresa MWV, no Brasil.	80
Figura 31 - (a) - Misturador mecânico da FISATON, modelo 647. (b) – Vista de cima mostrando em detalhe a homogeneização da amostra.	81
Figura 32 - Aparelho de ponto de amolecimento.	82
Figura 33 - Ensaio de durabilidade em estufa. (a) Detalhe dos frascos com amostras. (b) Frascos de vidro com amostras fixados no tambor rotativo do equipamento RTFOT. (c) Frascos com amostras após o ensaio. Fonte: SOUZA, 2010.	84
Figura 34. Microscópio eletrônico de varredura marca FEI, modelo QUANTA 250, com detalhe da imagem reproduzida no monitor do computador, do Laboratório de Técnicas Mineralógicas do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas.	85
Figura 35. Detalhe do processo de metalização das amostras. (a) Porta amostras. (b) Amostras preparadas para a metalização (c) Introdução das amostras na câmara de metalização (d) Visão geral do equipamento de metalização.	85
Figura 36. Ilustração de ensaio de viscosidade em um equipamento da Brookfield. Fonte: BERNUCCI, 2006.	86

Figura 37 - Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III Ultra do Laboratório Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).	87
Figura 38 - Representação do ensaio de DSR com amostra. Fonte: Airey, 2002.	88
Figura 39 - (a) Reômetro de Cisalhamento Dinâmico do Laboratório Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS). (b) Detalhe da amostra sendo retirada do molde para inserção no reômetro.	88
Figura 40 - Padrão de uma curva típica de análise de termogravimetria (TGA).	89
Figura 41 - Detalhe do termo analisador simultâneo da Shimadzu, modelo DTG-60H do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).	90
Figura 42 - Espectrômetro de FTIR, com detalhe da câmara de amostra, do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).	91
Figura 43 - Os espectros de FTIR das amostras de CAP puro e modificados obtidos na região de 4.000 a 600 cm^{-1}	93
Figura 44 - Curvas TGA e DTA das amostras de fibra PET e os CAPs puro (até 600 °C) e modificados (C4E1P, C4E2P, C4E4P e C4E6P).	95
Figura 45 - Microimagem da amostra C4E2P ampliada 50 \times , e em detalhe a fibra reciclada de PET (perfil em linha curva) agregada no respectivo ligante asfáltico.	97
Figura 46 - Microimagem da amostra C4E2P ampliada 60 \times , e em detalhe a fibra reciclada de PET (perfil em anovelado) agregada no respectivo ligante asfáltico.	98
Figura 47 - Resultados do ensaio de Penetração (em dmm) nas amostra CAP puro e modificados.	99
Figura 48 - Resultado do ensaio de Ponto de Amolecimento do CAP puro e amostras modificadas.	100
Figura 49 - Resultado do ensaio RTFOT para as amostras de CAP puro e modificados.	101
Figura 50 - Resultados do Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) para as amostras CAP puro e modificados (C4E1P, C4E2P, C4E4P e C4E6P).	102

Figura 51 - Curvas Mestras do Módulo Elástico (G') em função da frequência (ν) para as amostras de CAP puro e modificados.	104
Figura 52 - Curvas Mestras do Módulo Elástico (G'') em função da frequência (ν) das amostras de CAP puro e modificados.	105
Figura 53 - Curvas Mestras do Módulo Complexo (G^*) em função da frequência (ν) das amostras de CAP puro e modificados.	106
Figura 54 - Ângulo de fase das amostras de CAP puro e modificados.	106
Figura 55 - Módulo Complexo (G^*) e Ângulo de Fase (δ) <i>versus</i> frequência das amostras de CAP puro e modificado.	107
Figura 56 - Resistência à Deformação Permanente das amostras CAP puro e modificados.	108
Figura 57 - Gráfico da viscosidade Brookfield (Pa s) para as amostras CAP puro e modificados.	109
Figura 58 - Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra CAP puro.	111
Figura 59 - Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E1P.	112
Figura 60 - Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E2P.	112
Figura 61 - Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E4P.	113
Figura 62 - Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E6P.	113
Figura 63- Gráfico da Viscosidade Brookfield <i>versus</i> Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para as amostras CAP puro e modificados.	114

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
SUMÁRIO	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVOS.....	24
2.1. GERAIS	24
2.2. ESPECÍFICOS.....	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1. O MEIO AMBIENTE E SUAS RELAÇÕES COM A INDÚSTRIA DO ASFALTO.....	25
3.2. O PET E A BUSCA PELA SUA REUTILIZAÇÃO.....	28
3.3. PROGRAMAS DE APOIO E INCENTIVO ÀS CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS	31
3.4. SUSTENTABILIDADE NA REGIÃO AMAZÔNICA – ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	32
3.5. PETRÓLEO	35
3.6. ASFALTO.....	39
3.6.1. PRINCÍPIOS	39
3.6.2. FONTES NATURAIS DE ASFALTO	40
3.6.3. REFINO DO ÓLEO CRU PARA PRODUZIR ASFALTO.....	42
3.6.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ASFALTO	43
3.6.5. PRODUÇÃO NACIONAL DE CAP	47
3.7. PAVIMENTO	49
3.7.1. PATOLOGIAS DO PAVIMENTO	52
3.8. AGENTES MODIFICADORES DO ASFALTO.....	60
3.8.1. POLÍMEROS	63
3.9. ASFALTO MORNO.....	68
3.10. REOLOGIA DO ASFALTO	74
3.10.1. ENSAIOS SUPERPAVE	78
4. METODOLOGIA.....	79

4.1. MATERIAIS	79
4.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO (CAP 50/70).....	79
4.1.2. POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) RECICLADO EM FORMA DE FIBRA.....	79
4.1.3. EMULSIFICANTE COMERCIAL EVOTHERM M1.....	80
4.1.4. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO.....	80
4.2. ENSAIOS FÍSICOS	81
4.2.1. PONTO DE AMOLECIMENTO (ABNT NBR 6560: 2000, DNIT 131/2010 - ME).....	82
4.2.2. PENETRAÇÃO A 25 °C (ABNT NBR 6576: 1998).....	82
4.2.3. ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA (IST)	83
4.2.4. DURABILIDADE EM ESTUFA RTFOT A 163 °C POR 85 min (ABNT NBR 15235:2009, ASTM D2872).....	83
4.4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	84
4.3. ENSAIOS DE REOMETRIA	86
4.3.1. VISCOSIDADE DINÂMICA (BROOKFIELD) NAS TEMPERATURAS 135, 150 E 177 °C (ABNT NBR 15184:2004 e ASTM D 4402/02)	86
4.3.2. REOMETRIA DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR) (ASTM D 7175).....	87
4.4. ENSAIOS QUÍMICOS	88
4.4.1. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA/DTA).....	89
4.4.2. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	90
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
5.1. CAP MODIFICADO	92
5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	92
Espectroscopia no FTIR	92
Termogravimetria	94
Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	96
5.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	98
Penetração a 25° C (P).....	98

Ponto de amolecimento (PA).....	99
Durabilidade em estufa RTFOT	101
Índice de Susceptibilidade Térmica.....	102
5.4. ENSAIOS DE REOMETRIA	103
Reometria de Cisalhamento Dinâmico	104
Viscosidade Dinâmica (Brookfield).....	108
6. CONCLUSÕES.....	115
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
ANEXO 01	128

1. INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras são pavimentadas em grande parte por um composto industrial denominado concreto asfáltico (CA). O principal constituinte desse compósito é o asfalto que é um produto obtido do fundo das torres de destilação de petróleo que após enquadrar-se em critérios técnicos nacionais recebe a denominação de cimento asfáltico de petróleo (CAP).

O CAP quando misturado com agregados minerais, como rochas de diferentes tamanhos e a temperatura controlada resulta no concreto asfáltico, o qual recobrirá não só as rodovias, mas também pistas de aeroportos além de pátios de estacionamento e manobras (STORM *et al.*, 1996).

O Brasil desenvolveu-se tendo as estradas como seu principal meio de transporte de passageiros e de cargas. Entretanto, quando o pavimento é mal dimensionado ou executado fora dos padrões de qualidade exigidos tem comprometida sua vida útil trazendo enormes prejuízos aos diferentes níveis governamentais e a toda a sociedade que contribuiu direta ou indiretamente para aquela obra.

No Amazonas e especificamente em Manaus o concreto asfáltico degrada-se fortemente devido a dois principais fatores, além de outros:

- (i) ausência de material granular que seja compatível com o tipo de rodovia, em que será aplicado sendo substituído indiscriminadamente por material fino, comumente areia, e maior uso de ligante;
- (ii) forte insolação sobre o pavimento aumentando sua temperatura para valores próximos a 60 °C (D'ANTONA, 2009; PIKANÇO *et al.*, 2011).

Os danos são imediatos como o rápido envelhecimento termo-oxidativo, desgaste superficial, afundamento plástico, panelas, escorregamento e trincas por fadiga do revestimento (A Figura 1 mostra alguns exemplos dos danos).

As grandes distâncias e o enorme vazio demográfico oneram sobremaneira a manutenção das poucas estradas que cortam o Estado do Amazonas. O petróleo, recurso

natural que origina o asfalto, é um bem cada vez mais escasso e, portanto, mais oneroso para o país. Sua maior importação desestabiliza a balança comercial e o produto interno bruto. Além disso, as pesquisas e a exploração no pré-sal podem levar mais de uma década para então haver maior disponibilidade de óleo cru.



Figura 1- Defeitos no pavimento: (a) Panela. (b) Deformação plástica e fluência.

Para tanto, novas tecnologias têm sido desenvolvidas a fim de possibilitar maior durabilidade e tempo de vida aos pavimentos, diminuindo os custos com manutenção, conservação e até mesmo sua reconstrução, além de conferir-lhes características mais benéficas para o meio ambiente.

Os asfaltos modificados com polímeros são uma alternativa já consolidada para se melhorar o desempenho do ligante e por consequência da mistura asfáltica. Entre os polímeros o SBS e o EVA são até agora os mais utilizados.

Outros modificadores são as fibras, utilizadas para reforçar as qualidades químicas, físicas e reológicas do CAP. Entre as de maior emprego estão as fibras poliméricas (poliéster, polipropileno, polietileno e poliamida), as fibras vegetais (coco, açai e curauá) e as minerais (asbesto, carbono e vidro) (BENTO, 2006).

Por estarmos inseridos num meio ambiente extremamente sensível e onde as cidades, principalmente Manaus, produzem grande quantidade de resíduos sólidos é necessário reutilizar tais produtos descartados no pós-consumo, diminuindo a pressão sobre os aterros sanitários e os cursos hídricos.

O reaproveitamento de garrafas PET (politereftalato de etileno) tem-se desenvolvido e nos últimos anos indústrias especializadas as transformam em vários outros produtos. O de maior interesse para a engenharia geotécnica e de pavimentação são as fibras de PET reciclado.

Contudo, o problema ambiental não se restringe aos resíduos sólidos urbanos (RSU). Após a reunião da Organização das Nações Unidas (ONU) na cidade de Kyoto em 1998, vários países estão comprometidos em diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs). É certo que a indústria do asfalto consome grande quantidade de energia e emite várias formas de partículas e gases na atmosfera. Essas emanações atingem não somente o meio ambiente mas ainda todos os trabalhadores envolvidos na produção da mistura asfáltica e na construção de rodovias.

As novas tecnologias que permitem diminuir as elevadas temperaturas de usinagem, transporte e compactação da massa asfáltica vêm largamente se desenvolvendo, entre elas e uma das mais acessíveis economicamente são as emulsões químicas. Elas permitem que a viscosidade do ligante asfáltico seja menor a temperaturas mais baixas. Há nesse ponto um deslocamento da tradicional produção de mistura asfáltica a quente (ou em inglês chamada de hot mix asphalt, HMA) para as misturas asfálticas mornas (ou warm mix asphalt, WMA).

Atualmente, o concreto asfáltico produzido em Manaus é feito em temperaturas próximas a 160 °C utilizando principalmente areia de jazidas e seixo extraído do fundo dos rios, aglutinados com um tipo de CAP extremamente compassivo às elevadas temperaturas da região e cujos projetos de mistura não suportam as cargas ora atuantes sobre os pavimentos desta grande metrópole amazônica.

O estudo em questão tem como objetivo desenvolver uma melhoria do ligante e conseqüentemente da mistura asfáltica para as rodovias do estado do Amazonas através de um compósito cuja matriz principal é o CAP 50/70, fornecido pela Petrobras, acrescido de PET reciclado em forma de fibras, produzido a uma temperatura intermediária de até 140 °C combinado com a emulsão química denominada comercialmente Evotherm M1.

Este novo tipo de pavimento flexível tende a ser mais resistente e ecologicamente amigo do meio ambiente, pois o acréscimo da tecnologia inovadora Evotherm M1 na

produção de asfalto morno diminui a emissão de gases de efeito estufa (GEE), além de outros poluentes, economizando o consumo de energia para o aquecimento do CAP e dos agregados, haja vista que é possível diminuir a temperatura de usinagem e compactação (TUC) em torno 20 °C ou mais.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAIS

Caracterizar química, física e reologicamente ligante asfáltico em temperaturas intermediárias, usando-se a emulsão EVOTHERM M1, modificado com fibras de poliéster (PET) reciclado, para aplicação em pavimentos flexíveis.

2.2. ESPECÍFICOS

- Selecionar e obter o CAP (ligante asfáltico) e os agentes modificadores (emulsificante e fibra);
- Estabelecer as proporções de fibras a serem adicionadas na massa de ligante asfáltico e as condições do processo de homogeneização (temperatura da mistura, rotação e tempo de agitação);
- Caracterizar os ligantes puro e modificados mediante as seguintes análises: (i) Químicas – Termogravimetria (TGA), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR); (ii) Físicas – Envelhecimento em estufa RTFOT (Durabilidade), Penetração (P), Ponto de Amolecimento (PA), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e (iii) Reológicas - Viscosidade Dinâmica (ou Brookfield) e Reometria de Cisalhamento Dinâmico (DSR);
- Analisar e discutir os resultados obtidos comparando com os especificados por normas técnicas determinadas por entidades reguladoras do uso de ligantes asfálticos para revestimentos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O MEIO AMBIENTE E SUAS RELAÇÕES COM A INDÚSTRIA DO ASFALTO

Quando os seres humanos passaram a dominar a Terra, transformaram sua capacidade de nos sustentar, e de outras espécies também, representando para todos uma grande ameaça. Essa constatação levou a um crescente interesse em prever respostas científicas em diferentes escalas, das mais específicas às mais abrangentes, para a preservação do nosso meio ambiente (BARNOSKY *et al.*, 2012).

O homem é o principal consumidor de todos os recursos naturais do planeta. Por conta de sua atuação desestabiliza inúmeros ecossistemas deixando rastros de destruição, ou melhor, as suas pegadas ecológicas. Essas pegadas representam resíduos de seu consumo que poluem e degradam o ambiente terrestre comum. Esses geralmente estão mais expressivamente representados na forma sólida, e menos em estado líquido ou gasoso, mas não por isso menos impactantes.

O meio ambiente é o resultado de processos de origem natural e de ações antrópicas. As ações antropogênicas têm uma importância considerável, pois provocam alterações em curto prazo nos processos naturais (VIERA; WEBER, 1997 *apud* RAUBER; CANASSEGO; SILVA, 2004). A Figura 2 mostra transformações na harmonia do ambiente terrestre.

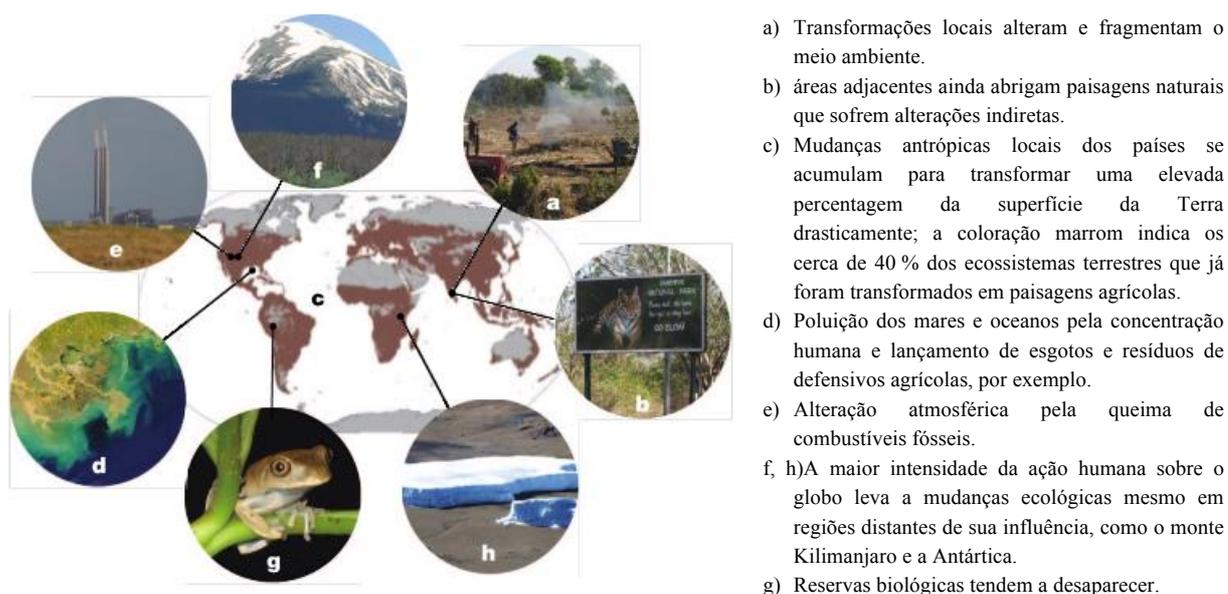


Figura 2 - Principais indicadores de transformações ambientais globais. Fonte: BARNOSKY, 2012.

Um dos principais resíduos sólidos descartados no meio ambiente é o plástico. Este é de difícil degradação, não retornando à sua forma inicial em um curto espaço de tempo. Seu retorno, em teoria, seria possível apenas em centenas de anos. O ícone maior do resíduo plástico são as garrafas em forma de embalagem de bebidas gasosas produzidas de politereftalato de etileno (PET), um polímero sintético de larga utilização.

No Brasil, governos e sociedades civis organizadas têm se preocupado com o controle de resíduos sólidos urbanos e de emissões gasosas e particuladas.

A queima de combustíveis químicos tem lançado na atmosfera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂), principal gás responsável pela elevação da temperatura na Terra (BROECKER, 1975). Pelos dados obtidos do National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA) podemos verificar o crescente lançamento de dióxido de carbono na troposfera ao longo da última década (Figura 3).

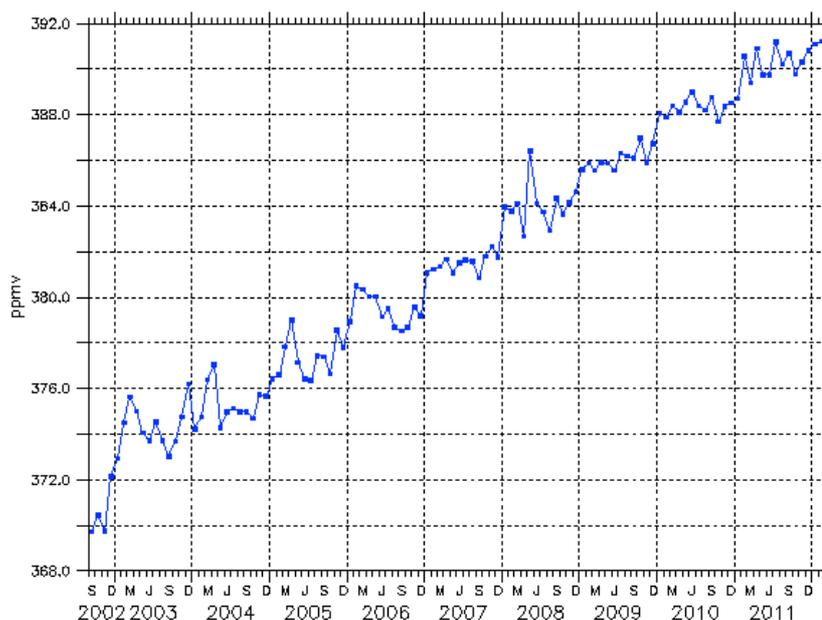


Figura 3- Acompanhamento do lançamento de CO₂ na Troposfera. Fonte: NOAA, 2012.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC considera que o desenvolvimento sustentável é a condição para enfrentar as alterações climáticas e conciliar o atendimento às necessidades comuns e particulares das populações e comunidades que vivem no território nacional (BRASIL, 2009).

A PNMC apresenta como visão estratégica a redução das emissões por ação humanas de GEE em relação às suas diferentes fontes. Uma de suas principais diretrizes são os compromissos assumidos pelo Brasil na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, no Protocolo de Kyoto.

Os pavimentos asfálticos e as mudanças climáticas estão intimamente ligados. O aumento da população global e a rápida urbanização vão continuar demandando maior crescimento da infraestrutura de transporte dos países o que exige a construção adicional de mais pavimentos (WHITE *et al.*, 2010).

No ano de 2010 entrou em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, cujos princípios constam a prevenção e a precaução, o desenvolvimento sustentável, o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania e o respeito às diversidades locais e regionais (BRASIL, 2010).

São citados como objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dentre outros:

- Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- Adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais, e
- Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

Pelos motivos acima expostos os projetos ambientalmente amigáveis e o desenvolvimento sustentável surgiram como uma ponte entre a nossa civilização avançada e um meio ambiente enfraquecido. É neste novo quadro de sensibilidade ambiental onde o projeto e as construções de estradas vão desempenhar um papel importante, levando-se em consideração o tamanho do sistema de rodovias e nossa atual dependência sobre esse modelo de transporte (ZAPATA e GAMBATESE, 2005).

3.2. O PET E A BUSCA PELA SUA REUTILIZAÇÃO

A escassez de áreas tem-se constituído em um dos maiores problemas na disposição de resíduos sólidos urbanos nos últimos anos em razão, principalmente, do crescente volume de detritos gerados diariamente. Devido às regulamentações ambientais restritivas para esse tipo de obra é cada vez mais difícil encontrar novas áreas adequadas e próximas aos centros geradores e, além disso, existe grande resistência por parte da população na aceitação de depósitos na vizinhança de suas propriedades, o que leva à necessidade de otimizar a capacidade dos depósitos em operação (RIBEIRO *et al.*, 2013).

A disposição dos resíduos sólidos urbanos apresenta problemas relacionados à instalação adequada dos mesmos, ao espaço físico ocupado pelos rejeitos e à proliferação de doenças por parte da população que reside próxima e sobrevive da comercialização desses resíduos. Nos países desenvolvidos, principalmente na Europa, existem problemas nítidos relacionados ao espaço físico para alocação de rejeitos. Em alguns países, os resíduos sólidos são transportados por longas distâncias até alcançar sua destinação final (SANTOS; AGNELLI e MANRICH, 2004).

Por conta disso, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de agrotóxicos, pilhas, baterias e pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas e produtos eletroeletrônicos e seus componentes são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos. Contudo não se contempla de forma direta o retorno das embalagens produzidas com PET, mas ela é possível e o Brasil é um dos maiores recicladores globais (BRASIL, 2010).

De acordo com Santos e colaboradores (2004), no Brasil, 4 % das embalagens plásticas e dos pneus presentes no resíduo sólido urbano são reciclados. No entanto, considerando grandes centros urbanos como São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre e Salvador, os índices de reciclagem do material pós-consumo estão entre 9,4 e 19 %.

Por ser um produto que pode ser reutilizado várias vezes, apesar de perder parte de suas propriedades ao longo de sua reutilização, é necessário um forte desenvolvimento na logística reversa do PET.

A taxa de recuperação de PET produzido no Brasil foi da ordem de aproximadamente 57,1 % em 2011 (ABIPET, 2012).

As formas de reciclagem de plásticos podem ser classificadas de quatro formas diferentes:

- **Reciclagem primária:** consiste na conversão dos resíduos industriais por processos técnicos determinados em produtos com características equivalentes às das dos produtos originais produzidos com matéria-prima virgem, tal como, aparas que são introduzidas novamente no processamento;
- **Reciclagem secundária:** consiste na conversão de resíduos provenientes do RSU, ou seja, pós-consumo, por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com a matéria-prima virgem, como por exemplo, reciclagem de Polipropileno (PP) para a obtenção de sacos de lixo;
- **Reciclagem terciária:** consiste no processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos;
- **Reciclagem quaternária:** está embasada em processos tecnológicos de recuperação de energia de resíduos por incineração controlada (FERREIRA, 2009).

Os principais polímeros produzidos no Brasil e encontrados descartados no resíduo sólido urbano (RSU) são: o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno de baixa densidade linear, (PELBD), além de polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), politereftalato de etileno (PET) e poliestireno (PS).

A produção de PET corresponde a 9 % em massa da produção total de polímeros no Brasil, entretanto, a fração de PET no RSU correspondente aos polímeros é em média de 20 % de massa total. Isto se deve ao fato do PP e do PVC serem utilizados como matéria-prima na fabricação de produtos acabados com longa vida útil nas indústrias de bens de consumo e construção civil; o PET é usado em produtos com curta vida útil como as embalagens (ROMÃO *et al.*, 2009).

O consumo de resina virgem de PET cresce a cada ano no Brasil. Segundo a ABIPET (2012) em 2000 esse consumo era de 255.000 toneladas. Já, em 2011 foram consumidas

572.000 toneladas deste importante polímero industrial. A Figura 4 mostra esse crescimento além da quantidade reciclada desse produto a cada ano.

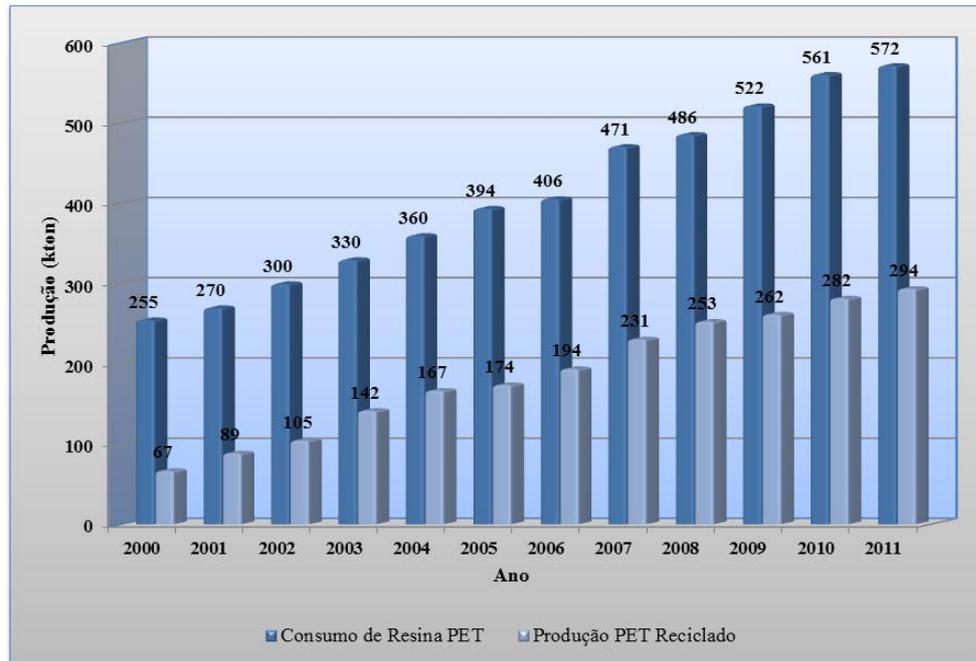


Figura 4 - Evolução do consumo de resina PET e quantidade reciclada. Fonte: ABIPET 2012.

Historicamente, 90 % do Consumo de PET no Brasil são utilizados para a produção de embalagens para bebidas e alimentos, tais como refrigerantes, água e óleo comestível.

O reuso de materiais pós-consumo pode trazer um importante significado para o meio-ambiente e a economia em diferentes aspectos, notadamente:

- Ajuda a reduzir a pressão por produtos naturais e economiza sua extração;
- Contribui para diminuir os níveis de poluição ambiental como um resultado da geração de “lixo” em áreas urbanas e industriais;
- Participa da economia de energia e de recursos financeiros (AHMADINIA *et al.*, 2011).

3.3. PROGRAMAS DE APOIO E INCENTIVO ÀS CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) é a sigla em inglês para liderança em energia e design ambiental, que é um programa de certificação e classificação para projeto, construção e operação de construções verdes de alto desempenho. Foi criado e é gerido pela Organização Não Governamental (ONG) Green Building Council (GBC) dos Estados Unidos (USGBC) para reconhecer a liderança na concepção de ambientes, tanto comerciais quanto residenciais, quer na construção ou renovação.

O LEED promove uma abordagem total da construção reconhecendo cinco áreas-chave de saúde ambiental e humana:

- seleção de materiais e recursos;
- energia e atmosfera;
- desenvolvimento de espaço sustentável;
- qualidade ambiental interna;
- uso racional da água; e uma área opcional de inovação em design (FERNANDES e MACHADO, 2011).

O desenvolvimento sustentável implica equilíbrio entre objetivos ambientais, políticos, sociais e econômicos para proteger o mundo para as gerações futuras. A este respeito, um sistema de classificação verde é necessário para medir o impacto ambiental durante o período de vida de um produto ou sistema. O sistema de classificação também pode fornecer estratégias para a seleção de materiais, método de construção, utilitário de produção, reciclagem e reutilização de materiais com o mínimo de cargas ambientais (JAMSHIDI *et al.*, 2013).

Atualmente o petróleo é consumido um milhão de vezes mais rápido do que ele é formado e o pico do ponto de produção mundial de petróleo já pode ter ocorrido ou possa ocorrer no futuro próximo, ou seja, entre 2010 e 2030. Por conseguinte, os custos de energia aumentam enquanto a depleção de petróleo bruto é acoplada com um aumento da procura de energia.

Além disso, o CO₂ (o tipo mais importante de GEE devido à queima de combustível) é um bom absorvente de calor e pode agir como um cobertor para aquecer o globo terrestre. Assim, os formuladores de políticas ambientais devem investigar qualquer método através do qual o CO₂ possa ser ainda mais reduzido na produção de massa asfáltica.

Pavimentos asfálticos podem produzir CO₂ quando a energia é consumida durante os processos de mistura e compactação e quando o aglutinante de asfalto oxida as moléculas de hidrocarboneto durante a construção. Portanto, a mistura asfáltica feita com conteúdos elevados de ligante é susceptível de emitir mais CO₂ (TATARI *et al.*, 2012).

3.4. SUSTENTABILIDADE NA REGIÃO AMAZÔNICA – ASPECTOS GEOTÉCNICOS

A busca por um desenvolvimento sustentável traz a indústria da construção civil a foco. Este setor da sociedade é considerado de tal importância que a maioria das outras áreas industriais perde em comparação. As habitações e as necessárias infraestruturas para transportes, comunicação, suprimento de água, esgoto e energia para atender as demandas crescentes da população do mundo propõem o desafio central da construção sustentável.

Partem do início da década de 1990 as primeiras medidas consistentes no Brasil em busca de construções mais sustentáveis, com estudos mais sistemáticos e resultados mensuráveis sobre a reciclagem de material usado ou descartado, redução de perdas em canteiro de obras e economia de energia.

A construção civil pode exercer um importante papel na preservação do meio ambiente, visto que sua escala de produção utiliza uma grande quantidade de recursos naturais.

Sabe-se que este setor é um segmento que pode absorver resíduos industriais, a fim de contribuir para a redução da exploração de agregados naturais não renováveis e para a diminuição do depósito de materiais inservíveis descartados de forma incorreta formando lixões (LEITE, 2007; SEYDELL e LINTZ, 2009).

Ao tomarmos especificamente o setor da construção rodoviária e da pavimentação a vasta literatura aponta ser este um consumidor de elevadíssimo volume de materiais, sendo uma fonte de aplicação racional de resíduos e rejeitos (SEYDELL e LINTZ, 2009).

Um dos pilares do desenvolvimento sustentável é a proteção ao meio ambiente. A redução no consumo de recursos naturais (combustíveis) e na produção de CO₂ é a chave elementar para a sustentabilidade (D'ANGELO *et al.*, 2008).

A redução das emissões de CO₂ é um compromisso assumido por várias nações, inclusive o Brasil, pela ratificação do Protocolo de Kyoto. Neste não há indicação direta dos impactos ambientais das indústrias de asfalto convencional, mas as mesmas vêm tomando atitudes proativas e desenvolvem pesquisas objetivando a redução de emissão de gás carbônico e menor consumo energético.

O Brasil é considerado um laboratório riquíssimo de solos e clima tipicamente tropicais de grande importância para a geotecnia e a infraestrutura de transportes. A pavimentação consome uma enorme quantidade de materiais, em que pode ser feita a aplicação racional de resíduos e rejeitos, sejam *in natura*, processados ou modificados (SEYDELL e LINTZ, 2009).

No Estado do Amazonas há uma enorme ausência de disponibilidade de material granular, porquanto a maioria de seus municípios se situa em bacia sedimentar, com rochas datadas especialmente do período do Paleozóico e do Cenozóico. Os horizontes rochosos, de uma maneira geral, possuem baixo grau de consolidação e pouca resistência mecânica (SARGES *et al.*, 2010).

Por conta do processo de intenso intemperismo, tais horizontes são recobertos por camada de espesso solo residual, também dito sedimentar, tornando sua extração inviável sob o prisma econômico (FROTA *et al.*, 2007). A Figura 5 mostra a distribuição das principais rochas da região amazônica notadamente as sedimentares, ígneas e metamórficas. A Figura 6 apresenta as principais rodovias planejadas e construídas sobre elas.

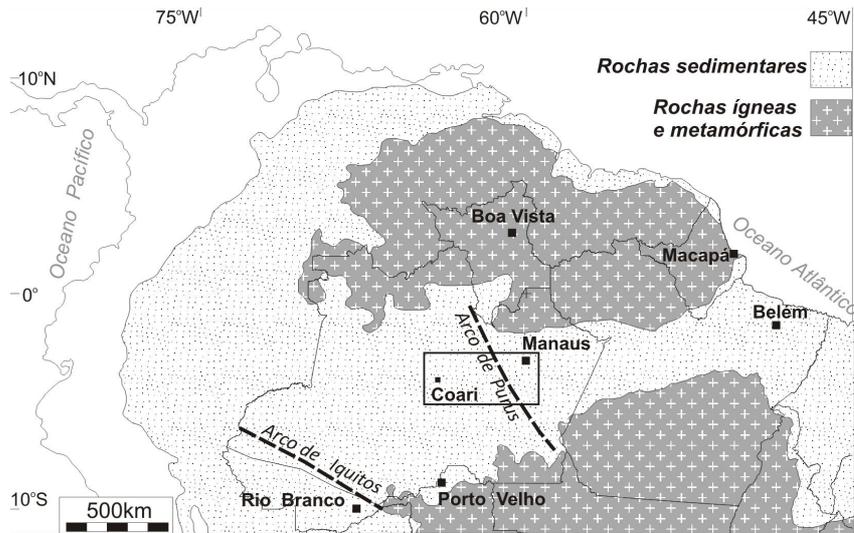


Figura 5 - Principais rochas da bacia sedimentar amazônica. Fonte: SARGES *et al.*, 2010.

A cidade de Manaus está situada na formação geológica chamada Alter do Chão. Os depósitos desta formação são constituídos por arenitos, argilitos caulinizados e, subordinadamente, conglomerados, contendo, localmente, níveis descontínuos de arenitos silicificados e ferruginosos, com espessura entre 1 e 2 metros, denominados informalmente de “Arenito Manaus” (SOUZA e NOGUEIRA, 2009).



Figura 6 - Mapa da região amazônica mostrando as áreas carentes de material granular. Fonte: BATISTA, 2004.

A ausência de material pétreo em quase todo o Estado do Amazonas tem levado construtores a adotarem alternativas que, comprovado pelo respectivo histórico, propiciam pavimentos de baixa resistência mecânica, o que acarreta sua falência estrutural precoce, razão de elevados gastos com manutenção e recuperação (SILVA *et al.*, 2009).

Na Amazônia, a interferência humana tem provocado inúmeras mudanças nos processos que controlam a sustentabilidade de seus ecossistemas (FEARNSIDE, 1996 citado por MARQUES *et al.*, 2010).

Para Sarges e colaboradores (2010) o maior desafio vem ser a busca por novos materiais ou tecnologias que possam tornar viável a construção de estradas pavimentadas, importantes para o desenvolvimento e auto-sustentação de qualquer região.

3.5. PETRÓLEO

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos e impurezas. Nesse estado é também chamado de petróleo bruto ou óleo cru, ou simplesmente cru. Os hidrocarbonetos são constituídos por átomos de carbono e hidrogênio e podem originar no petróleo moléculas das mais diversas formas: abertas de ligações simples (parafínicas – C_nH_{2n+2}), abertas com ligações duplas (naftênicas – C_nH_{2n}), cadeias fechadas em forma de anel (ou cíclicas), e aromáticas (C_nH_n) - anel benzênico. A classificação das cadeias carbônicas está esquematizada na Figura 7.

No petróleo cru quase não há hidrocarbonetos insaturados (SZKLO e ULLER, 2008). Os insaturados, tais como os alcenos, que possuem ligações duplas entre os átomos de carbono, são extremamente reativos, ou seja, dificilmente se preservam e são encontrados em menor quantidade nos petróleos. Dependendo da proporção de hidrocarbonetos na sua composição, o petróleo bruto se acha mais adequado para a produção de um ou outro derivado. Os crus mais adequados para a obtenção de asfalto são os de cadeias mais pesadas, que produzem mais resíduos.

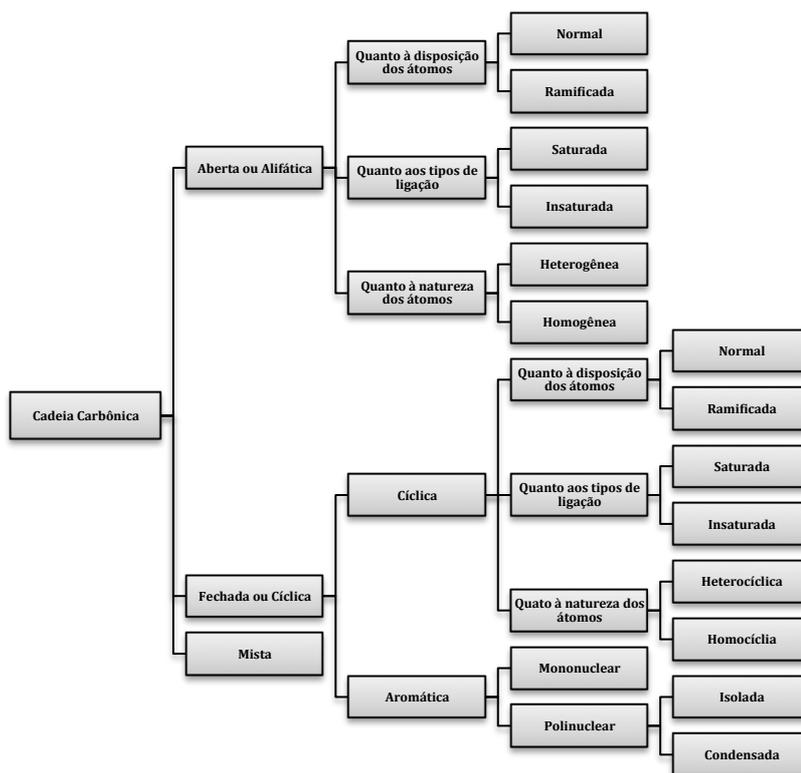


Figura 7 - Classificação das cadeias carbônicas.

Desses petróleos mais pesados os mais utilizados para produção de CAP são os de base naftênica e intermediários. Aqueles contêm alto teor de resíduos (> 45 % em volume) e sofrem destilação em apenas um estágio. Os petróleos intermediários requerem destilação em dois estágios: a pressão atmosférica e a vácuo. Os petróleos mais leves podem gerar CAP desde que submetidos a processos especiais, como no caso da desasfaltação a propano (CASTRO, 2003).

No ano de 2003, quando a população mundial era de 6,27 bilhões de habitantes, pesquisas realizadas apontaram para um consumo médio total de energia de 1,69 tonelada equivalentes de petróleo (tep) per capita. Uma tonelada de petróleo equivale a 10.000.000 de quilocalorias (kcal), e o consumo diário médio de energia é de 46.300 kcal por pessoa. Como comparação, vale a pena mencionar que 2.000 kcal é a energia que obtemos dos alimentos e que permite que nos mantenhamos vivos e funcionando plenamente. O restante é usado em transporte, gastos residenciais e industriais e perdas nos processos de transformação energética (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Na literatura, utilizam-se duas escalas de densidade como avaliação preliminar das características do petróleo: a densidade específica e a densidade API. A densidade do petróleo em graus API ($^{\circ}\text{API}$) é normalmente a mais utilizada (QUIRINO, 2009). API é a sigla do American Petroleum Institute órgão americano que criou essa medida.

O cálculo do $^{\circ}\text{API}$ é dado pela Equação 1:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{SG (60/60)} - 131,5 \quad (1)$$

onde, SG é densidade relativa do petróleo em relação à água a 60 °F.

O valor de SG geralmente varia de 0,8 (45,3 $^{\circ}\text{API}$) para óleos leves a 1,0 (10 $^{\circ}\text{API}$) para óleos pesados.

O grau API é apenas uma forma de expressar a densidade do petróleo através de um índice adimensional. Quanto maior for a densidade do petróleo, menor será seu $^{\circ}\text{API}$, ou mais pesado será o petróleo (SZKLO e ULLER, 2008).

O UNITAR Centre define como pesado os óleos com $^{\circ}\text{API}$ menor que 30. Entretanto, a classificação mais utilizada é a do American Petroleum Institute, conforme a Tabela 1:

Tabela 1. Classificação dos petróleos quanto ao seu grau $^{\circ}\text{API}$.

Óleo bruto	Massa específica (kg/m^3)	$^{\circ}\text{API}$
Petróleos leves	< 870	> 31,1
Petróleos médios	870 a 920	22,3 a 31,1
Petróleos pesados	920 a 1000	10,0 a 22,3
Petróleos extrapesados	> 1000	< 10,0

No Brasil, os petróleos mais utilizados na produção de asfaltos são os originados dos Campos Fazenda Alegre e Ceará-Mar, localizados nos estados brasileiros do Espírito Santo e do Ceará, respectivamente. A Tabela 2 mostra a produção de cada um desses poços em 2012 e a respectiva densidade API (Fonte ANP, 2011).

O produto do refino do petróleo são os seus derivados, e estes se subdividem em energéticos e não energéticos.

Tabela 2. Reserva provada em 2010 e densidade API dos principais poços produtores de asfalto no Brasil.

Origem	Reserva provada (em m ³)	Densidade (°API)	Tipo de óleo cru segundo a classificação API
Ceará-Mar	305.084	28,10	Médio
Fazenda Alegre	386.116	13,20	Pesado

São derivados energéticos: a gasolina, o óleo diesel, o querosene de aviação (QAV), o óleo combustível e o gás liquefeito de petróleo (GLP).

Entre os derivados não energéticos, podemos citar: a nafta, o asfalto, os solventes, o coque e o xisto. A produção de derivados não energéticos no Brasil em 2012 foi de 17.675.603 m³ e teve a seguinte distribuição proporcional descrita na Figura 8.

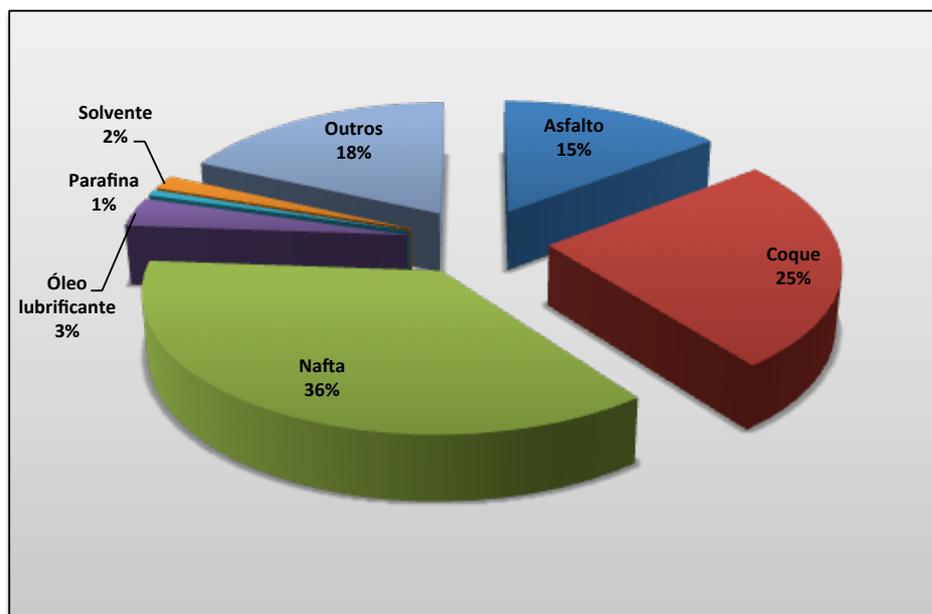


Figura 8 - Distribuição percentual da produção de derivados de petróleo não energéticos em 2012. Fonte: ANP, 2013.

3.6. ASFALTO

3.6.1. PRINCÍPIOS

O registro mais remoto do uso do asfalto é por volta de 180.000 anos atrás na região de El KnownBasin na Síria, onde os habitantes daquela região manuseavam-no para proteger as alças de várias ferramentas rudimentares do período Neolítico (LESUEUR, 2009).

Os materiais asfálticos são obtidos como um subproduto do petróleo. Cerca de 90 a 95 % em massa do asfalto consiste de hidrogênio (H) e carbono (C). Além disso, dois tipos de átomos também estão em porções remanescentes no asfalto: os heteroátomos e os metais. Os heteroátomos tais como nitrogênio (N), oxigênio (O) e enxofre (S) frequentemente substituem o carbono por aquecimento ou tensão de cisalhamento. Estes contribuem para o desempenho físico e químico, colaborando para uma maior interação entre as moléculas. Átomos de metais, tais como níquel (Ni), vanádio (Va) e ferro (Fe), estão representados, em quantidades residuais, tipicamente menos de 1 % (YAO *et al.*, 2013).

Nesse sentido pode-se dizer que as cadeias carbônicas podem ser classificadas de diversas formas, entretanto devido à existência de uma grande variedade de cadeias orgânicas, foram estabelecidos alguns critérios para classificação dos compostos orgânicos em relação a sua cadeia orgânica. Dentre estas, temos que quanto à natureza do átomo a cadeia poder ser:

- Homogênea: ocorre quando não possui qualquer átomo diferente entre carbonos, como mostrado na Figura 9:

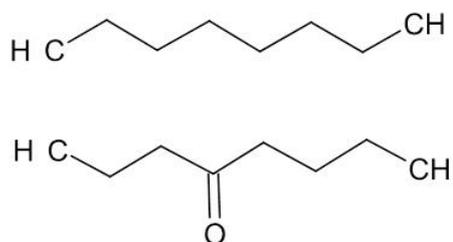


Figura 9 - Representação de cadeias carbônicas homogêneas.

- Heterogênea: ocorre quando possui um heteroátomo (átomo de outro elemento) entre carbonos, tal como a Figura 10:

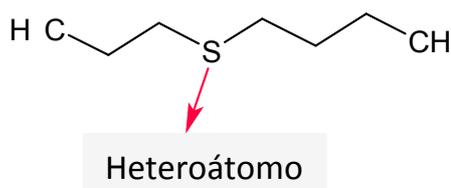


Figura 10 - Representação de uma cadeia heterogênea com o seu heteroátomo.

O tipo e a quantidade de heteroátomos que existem no asfalto é função da origem do petróleo bruto e de sua exposição ao envelhecimento. Os heteroátomos, mais especificamente o enxofre, reagem mais facilmente do que o carbono e o hidrogênio para incorporar o oxigênio (oxidação). A oxidação é o primeiro passo do processo de envelhecimento dos asfaltos, sendo que a evaporação (volatilização) e a fotodegradação também contribuem para esse fenômeno (ASPHALT INSTITUTE, 2003).

Inicialmente os asfaltos ocorriam de forma livre na natureza. Eles foram encontrados em estratos geológicos em estado semissólido, formando veias negras em formações rochosas mais frágeis (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

Há ainda a possibilidade de o asfalto poder ser encontrado em escoamentos superficiais devido a falhas geológicas nas vizinhanças de depósitos subterrâneos de petróleo bruto e que ali permaneceram perdendo seus compostos voláteis mais leves (WHITEOAK e READ, 2003).

3.6.2. FONTES NATURAIS DE ASFALTO

Em sua forma natural o asfalto pode ser encontrado nos chamados lagos de asfalto ou em rochas impregnadas com asfalto (ASPHALT INSTITUTE, 2007; WHITEOAK e READ, 2003).

I - Lagos de asfalto:

Os mais importantes lagos de asfalto do mundo encontram-se na América do Sul, especificamente na ilha de Trinidad e na Venezuela.

O lago conhecido como Pitch Lake, ou Lago de Trinidad, foi descoberto oficialmente em 1595 pelo explorador inglês Sir Walter Raleigh, entretanto, sabe-se agora que portugueses

e provavelmente espanhóis conheceram de sua existência antes dessa época (WHITEOAK e READ, 2003).

Há uma variedade de outros pequenos depósitos lacustres de asfalto na ilha de Trinidad, mas o Pitch Lake, ou Trinidad Lake Asphalt (TLA) ou ainda o La Brea, é o maior do mundo, ocupando uma área de aproximadamente 35 ha e profundidade estimada de 90 m, estando ali depositados mais de 10 milhões de toneladas desse material. As Figura 11 (a) e (b) mostram o Pitch Lake em diversas fases de sua história.

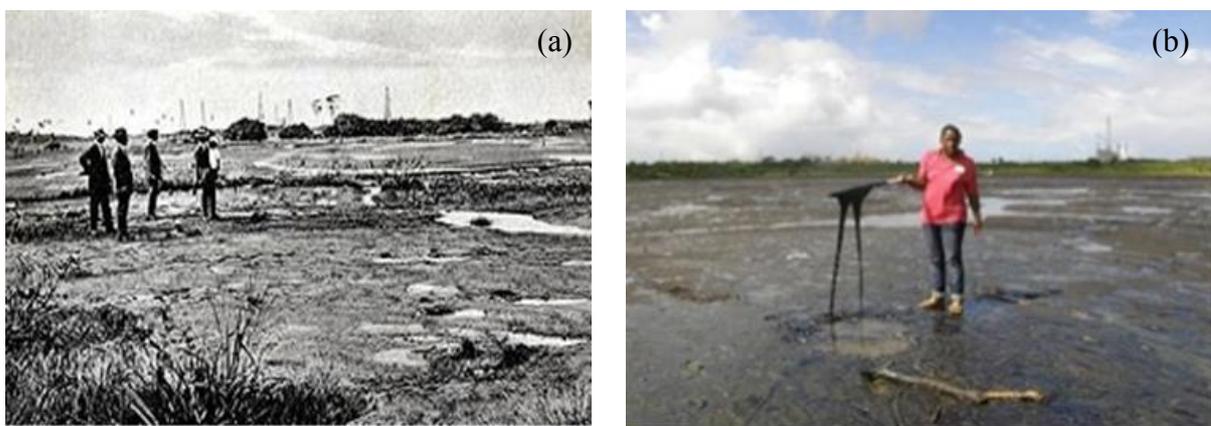


Figura 11- Lago de asfalto de Trinidad no século XIX (a). Lago nos dias atuais (b).

O asfalto natural de Trinidad atualmente é fornecido em forma de granulado envolvidos por pó de calcário com diâmetros entre 6 e 9 mm, como mostra a Figura 12. Este processo de moldagem em grãos com cobertura de material fino é feito para impedir a aglomeração, facilitar o transporte e permitir diversas alternativas de aplicação e é denominado paletização (CAVALCANTI, 2010).



Figura 12 - Asfalto TLA paletizado. Fonte: CAVALCANTI, 2010.

O Lago de Asfalto de Bermudez, na Venezuela, é outra importante fonte na natureza desse produto. Estima-se que possua uma extensão total de 445 ha e tenha um depósito de aproximadamente 6 milhões de toneladas de asfalto (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

II – Rochas asfálticas

O asfalto que é encontrado impregnado em rochas tem sido usado na Europa desde a primeira metade do século XVII. Seus principais usos são a impermeabilização de telhados, calefação de embarcações e proteção de madeira contra o apodrecimento e cupins.

As rochas recebem diferentes nomes de acordo com o lugar onde são encontradas, mas genericamente são chamadas de Asfaltita.

A asfaltita é um mineral natural, formado a partir da ação da pressão e do calor em reservatórios de petróleo adjacentes a formações tectônicas (LIBERATORI, 2000).

No estado americano de Utah existe um depósito natural de rocha asfáltica que recebeu o nome comercial de Gilsonita, homenagem ao seu descobridor Samuel H. Gilson, feito datado de 1880 (WHITEOAK e READ, 2003).

Na América do Sul, principalmente na Argentina, as rochas asfálticas são chamadas de Rafaelitas (LEITE, 1999).

3.6.3. REFINO DO ÓLEO CRU PARA PRODUZIR ASFALTO

No início do século XX, a descoberta do método de refinamento do asfalto a partir do petróleo – bem como um aumento das exigências por estradas melhores devido à popularização do automóvel – criou uma expansão industrial (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

A obtenção do asfalto a partir da destilação do petróleo iniciou-se, nos Estados Unidos, em 1902 e sua utilização mais intensa começou em 1909 (BOTARO, 2006 *apud* SENÇO 1997). A Figura 13 mostra um processo de destilação em dois estágios para obtenção de asfalto e outros derivados.

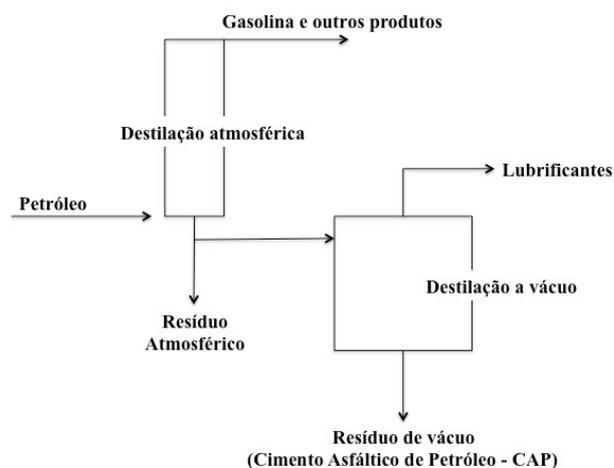


Figura 13 - Esquema básico de destilação de asfalto em 2 estágios.

Betume é outro nome para designar o asfalto. É comum encontrar na literatura os dois termos (asfaltos e betumes), no plural, confirmando a grande variedade de tipos e aplicações deste produto (LEITE, 1999).

A literatura sobre o assunto afirma que de um ponto de vista reológico, o asfalto deve ser considerado como um material viscoelástico, muito sensível à temperatura, uma vez que apresenta um comportamento predominantemente elástico a baixas temperaturas, e/ou durante carregamento rápido (pequeno tempo de aplicação de carga – alta frequência de aplicação), e características de viscosidade a temperaturas moderadas, e elevadas e/ou durante carregamento longo (longo tempo de aplicação de carga – baixa frequência de aplicação) (BRINGEL, 2007; PÉREZ-LEPE *et al.*, 2003).

3.6.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ASFALTO

Frente à enorme complexidade de sua composição química onde cada molécula tem o número de átomos de carbono variando entre 20 e 120 e peso molecular de 300 a 2000, vários pesquisadores elaboraram metodologias de separação dos ligantes asfálticos como os métodos de Schweyer e Traxler, Rostler e Sternberg, e Corbett, este um dos mais utilizados (SOUZA, 2010).

O método de Rostler usa ácido sulfúrico variando o teor para separar os grupos enquanto o método de Corbett o faz por absorção diferencial e dessorção (ASPHALT INSTITUTE, 2003).

Os componentes do asfalto podem ser separados em asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos são definidos como uma fração de cor preta que são insolúveis no *n*-heptano. Já os maltenos são constituídos de compostos saturados, compostos aromáticos e resinas, que são solúveis no *n*-heptano (BOTARO *et al.*, 2006).

Asfaltenos e resinas podem ser fraccionados por meio de técnicas de solventes para proporcionar uma série de frações de peso molecular crescente. Os heteroátomos e os aromáticos aumentam com o peso molecular, rapidamente nas resinas, mas de forma mais gradual nos asfaltenos (FERRIS *et al.*, 1967).

Os ligantes asfálticos consistem de compostos polares e polarizáveis (pirróis, fenóis, amidas, ácidos carboxílicos, piridinas e aromáticos polinucleares), capazes de associação e compostos não polares (hidrocarbonetos aromáticos e saturados) (CASTRO, 2003).

Para o Asphalt Institute (2003) todas as moléculas presentes no asfalto podem ser incluídas nesses dois grupos funcionais de moléculas: polares e não-polares. As polares formam um entrelaçamento e dão ao betume propriedades elásticas. As moléculas não-polares formam o corpo de matéria ao redor do entrelaçamento e contribuem para formar característica viscosa ao asfalto. Ambos os tipos de moléculas existem juntas e homogeneamente no ligante.

3.6.4.1. ANÁLISE DO ASFALTO PELO MÉTODO SARA

De acordo com Lesueur (2009), em 1836 o químico francês Jean-Baptiste Boussingault separou pela primeira vez por destilação (a 230 °C durante alguns dias), dois componentes de um betume originário da cidade de Bechelbronn (que significa "fonte pitch", ou "fonte de piche", atualmente chamada Merkwiller-Pechelbronn na Alsácia, na França): obteve 85 % em massa de uma fração destilável a qual chamou de petroleno e 15 % de uma fração mais viscosa, classificada como asfalteno. Nascia nesse instante da história a primeira

das várias tentativas de entendimento dos componentes do asfalto e suas intra e interrelações moleculares, ou seja, como esses componentes atuariam no seu desempenho.

Posteriormente, estudos realizados na Holanda detectaram que a maioria dos compostos asfálticos contêm substâncias que são insolúveis em hidrocarbonetos alifáticos de baixo peso molecular, e que, quando aquecidos não amolecem, mas se decompõem, incham e, finalmente, aglomeram-se conjuntamente. Esta fração é aquela chamada de "asfaltenos" e é usada para distinguir a fração solúvel, a qual se denominou de "maltenos", que consiste de um óleo pesado, puramente viscoso (PFEIFFER e SAAL, 1940).

Ainda de acordo com estudos de Pfeiffer e Saal (1940) a fração asfáltica do cimento asfáltico possui elevado peso molecular onde estão presentes hidrocarbonetos de caráter predominantemente aromático, com um teor relativamente baixo de hidrogênio, formados por condensação e desidrogenação de hidrocarbonetos aromáticos naftênicos de peso molecular mais baixo. Como regra há quantidades mínimas de oxigênio, algum enxofre, e uma quantidade ainda menor de nitrogênio.

Uma das técnicas mais usadas para caracterizar óleos pesados é o método SARA, em que o óleo é fracionado por precipitação seletiva (para os asfaltenos), e/ou técnicas cromatográficas, em quatro classes de componentes: Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos. Das quatro classes de compostos identificáveis, somente os saturados são distinguíveis do resto dos componentes na mistura. A ausência de ligações π nos constituintes dessa classe os permite ser facilmente diferenciados. O que sobra no óleo pesado é composto por aromáticos e componentes heteroatômicos de vários graus de condensação, substituição alquílica e funcionalização. As resinas são mais ricas em heteroátomos e tem uma concentração maior de carbonos aromáticos, enquanto que os asfaltenos são as frações de maior massa molar e contém a maioria dos compostos polares (QUIRINO, 2009).

A forma estrutural dos principais componentes do asfalto está representada na Figura 14 (XU e HUANG, 2010). Os saturados, aromáticos e resinas formam o grande grupo dos maltenos.

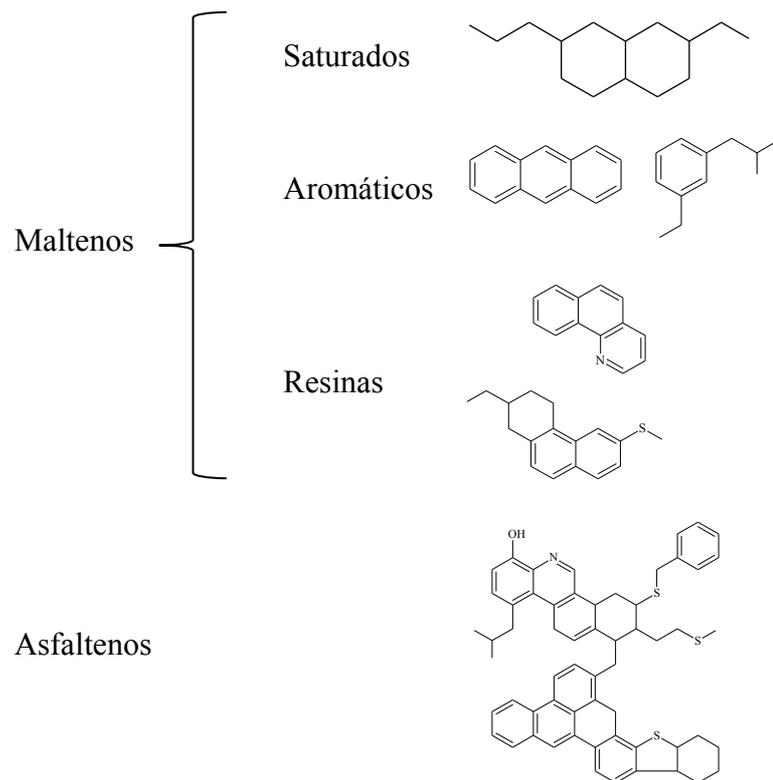


Figura 14 - Representação estrutural das frações do asfalto. Fonte: XU e HUANG, 2010.

Importantes relações são entendidas de acordo com as proporções desses grupos no cimento asfáltico.

De uma forma geral pode-se dizer que os saturados influenciam negativamente a susceptibilidade térmica e os aromáticos contribuem para a melhoria de propriedades físicas do ligante. As resinas melhoram a ductilidade e dispersão dos asfaltenos e estes contribuem com o aumento da viscosidade e tornando os asfaltos menos susceptíveis a variações de temperatura (FERNANDES, 2007).

Há várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

3.6.5. PRODUÇÃO NACIONAL DE CAP

A produção brasileira de todos os tipos de CAP em 2012 foi de 2.464.544 m³. A Figura 15 apresenta o comparativo entre a produção brasileira total e a da Refinaria de Manaus (REMAN) de asfalto desde o ano de 2008 (ANP, 2012).

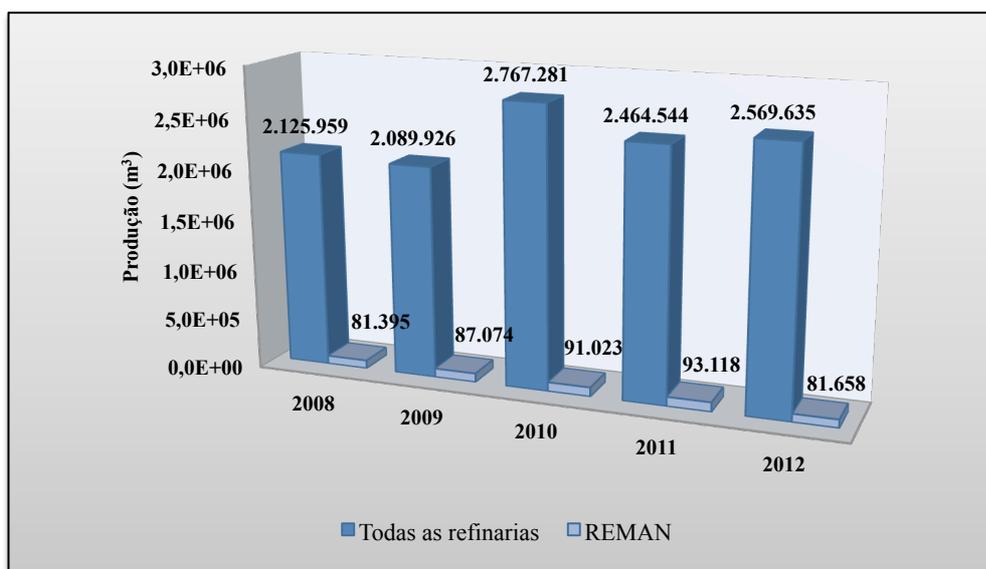


Figura 15 - Produção anual de asfalto no Brasil, em m³. Fonte: ANP. Dados estatísticos, 2013.

Os CAPs mais utilizados para pavimentação rodoviária no Brasil são o 30/45 e 50/70. Esta classificação é feita por meio da penetração de uma agulha padrão sob condições padronizadas (uma medida de dureza), conforme a Figura 16, e os números indicam a faixa de penetração (CAVALCANTI, 2010). Entretanto, cimentos asfálticos com a mesma dureza normalmente são capazes de apresentar diferentes propriedades reológicas (PFEIFFER e SAAL, 1940).

O ensaio de penetração mede a resistência do CAP à entrada de uma agulha numa pequena amostra em temperatura controlada, quanto menor a penetração, mais viscoso (mais rígido em temperatura ambiente) é o CAP.

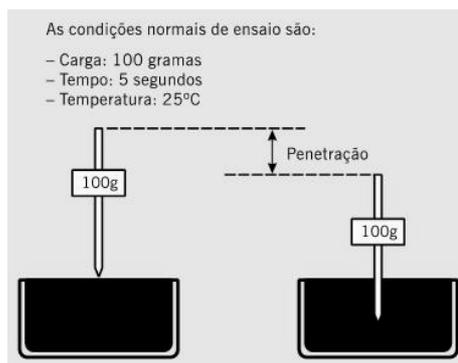


Figura 16 - Exemplificação do ensaio de penetração. Fonte: BERNUCCI, 2006.

A

Tabela 3 apresenta as especificações brasileiras para os diversos tipos de CAP.

Tabela 3. Especificação para cimento asfáltico de petróleo - CAP (Resolução 19/2005, ANP).

Parâmetros	Unidade	Método de Ensaio		Tipo de CAP			
		ABNT	ASTM	30/45	50/70	85/100	150/200
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	0,1 mm	NBR 6576	D 5	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	D 36	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135 °C, mín.	S	NBR 14950	E 102	192	141	110	80
a150 °C, mín.	S	NBR 14950	E 102	90	50	43	36
a 177 °C	S	NBR 14950	E 102	40-150	30-150	15-60	15-60
Viscosidade Brookfield							
a 135 °C, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	374	274	214	155
a150 °C, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	203	112	97	81
a 177 °C, Spindle 21	cP	NBR 15184	D 4402	76-285	57-285	28-114	28-114
Índice de suscetibilidade térmica		-	-	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7	-1,5 a +0,7
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR 11341	D 92	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	NBR 14855	D 2042	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	Cm	NBR 6293	D 113	60	60	100	100
Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163 °C/85 min							
I. Variação em massa, máx.	%	-	D 2872	0,5	0,5	0,5	0,5
II. Ductilidade a 25 °C, mín.	Cm	NBR 6293	D 113	10	20	50	50
III. Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR 6560	D 36	8	8	8	8
IV. Penetração retida, mín.	%	NBR 6576	D 5	60	55	55	50

Também expõe Bernucci (2006), quando o asfalto se enquadra em uma determinada classificação particular, que em geral se baseia em propriedades físicas que pretendem assegurar o bom desempenho do material na obra, seguida de algum outro identificador numérico.

3.7. PAVIMENTO

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define pavimento como uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (DNIT, 2006a).

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Concreto asfáltico é uma mistura a quente executada em usina apropriada, constituída de agregado mineral graduado e cimento asfáltico, espalhada e comprimida a quente, com características de estabilidade, vazios e relação betume-vazios definidas nas especificações de serviços (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Para misturas asfálticas a indústria usa predominantemente rochas duras ou cristalinas de origem ígnea ou metamórfica que possuem boa resistência à ação de forças mecânicas. No Estado do Amazonas as matérias primas para agregados de maior dimensão, as chamadas britas, ocorrem longe dos grandes centros populacionais distando mais de 200 km ao norte de Manaus (SARGES *et al.*, 2010).

Alternativamente a estrutura granular do pavimento pode ser formada por materiais sintéticos como o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) (FROTA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2009), ou provenientes da reutilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (ARAÚJO; PICANÇO; FROTA, 2011; MOTTA; BERNUCCI; MOURA, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2010). A Figura 17 representa um corpo de prova de um concreto asfáltico cujo agregado é o RCD.



Figura 17 - Corpo de prova de concreto asfáltico. Fonte: BATISTA *et al.*, 2010.

Pode-se complementar dizendo que uma rodovia de concreto asfáltico consiste em uma escolha de agregados de diferentes tamanhos mantidos unidos pelo cimento asfáltico de petróleo. O asfalto significa apenas 5 a 7 % em peso ou aproximadamente 15 % do volume total da mistura. Não obstante essa menor percentagem, o ligante asfáltico tem uma importante influência no desempenho da rodovia ao longo de toda a sua vida de serviço (AHMEDZADE, 2013).

De acordo com o relatório do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) sobre a Rede Rodoviária do Sistema Nacional de Viação (SNV) (2012) a extensão total malha brasileira, incluindo as estradas federais, estaduais e municipais, é de 1.691.215 km. As rodovias federais têm extensão de 64.721 km, as estaduais de 110.841 km e as municipais de 26.826 km.

Desse total apenas 202.388 km são pavimentados. As não pavimentadas representam 1.359.059 km. As planejadas somam 129.763 km. Esses dados estão consolidados na Tabela 4 para uma melhor leitura.

Tabela 4. Extensão da malha rodoviária brasileira. Fonte: DNIT, 2012.

TIPO DE RODOVIA	EXTENSÃO DA MALHA RODOVIÁRIA POR ENTE POLÍTICO (km)			
	Federal	Estadual	Municipal	Total
PAVIMENTADA	64.721	110.841	26.826	202.388
NÃO PAVIMENTADA	12.808	111.333	1.234.918	1.359.059
PLANEJADA	42.171	15.407	72.185	129.763
TOTAL	119.700	237.581	1.333.929	1.691.210

Em termos percentuais a Figura 18 mostra o enorme déficit brasileiro em pavimentação rodoviária.

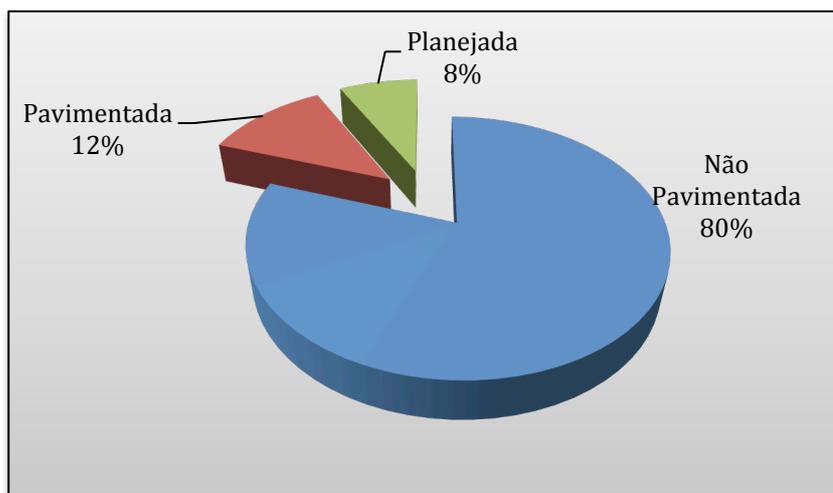


Figura 18 - Rede rodoviária nacional quanto ao seu estado de pavimentação. Fonte: DNIT, 2012.

O Estado do Amazonas possui um total de 14.369 km de rodovias, sendo de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5. Extensão total da rede rodoviária do estado do Amazonas.

Tipo de rodovia	Extensão de Rodovia	
	km	%
Pavimentada	2.165,80	15,97
Não pavimentada	4.007,00	27,88
Planejada	8.196,20	57,04
TOTAL	14.369,00	100

O relatório anual da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2012) pesquisou o estado de trafegabilidade de grande parte da malha rodoviária brasileira pavimentada, incluindo somente as rodovias estaduais e federais mais relevantes. Foram percorridos aproximadamente 95.707 km de rodovias, sendo 30.434 km estaduais e 65.273 km federais (CNT, 2012).

Nessas condições, a avaliação qualitativa do pavimento mostra que, do total de 95.707 km, 49,0 % são classificados como “ÓTIMO” e 5,1 % como “BOM”, perfazendo um total de 54,0 % da malha pesquisada em situação considerada como satisfatória. Em contrapartida, o restante, 46,0 %, é classificado como “REGULAR” (33,4 %), “RUIM” (8,6 %) ou “PÉSSIMO” (3,9 %). Destaca-se que a situação crítica ocorre em 12.037 km

(12,5 %), onde nestes o nível de segurança e a produtividade das viagens ficam bastante comprometidos.

Os recursos governamentais devem ser alocados em pavimentos que transformem esses números, melhorando significativamente as condições de trafegabilidade dos mesmos. Para tanto, as políticas públicas vêm aumentando o volume de concessões, mas mantêm o nível tecnológico das rodovias ainda muito obsoleto. Portanto há a necessidade de se desenvolver pavimentos com maior durabilidade e mais adequados às atuais exigências regionais de tráfego.

3.7.1. PATOLOGIAS DO PAVIMENTO

Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos ou irregularidades nessa superfície são percebidos uma vez que afetam o seu conforto. Quando o conforto é prejudicado, isto significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências desses defeitos. Essas consequências acarretam maiores custos operacionais, relacionados a maiores gastos com peças de manutenção dos veículos, com consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A Norma DNER-ES 321/97 (Pavimentação – recuperação de defeitos em pavimentos flexíveis) define as seguintes patologias no pavimento flexível:

- **Afundamento:** depressão pronunciada na superfície do pavimento, em área limitada, acompanhada ou não de fissuramento;
- **Desagregação:** perda do agregado superficial, principalmente de finos, e do ligante, os quais, não resistindo à ação do tráfego, produzem irregularidades superficiais acentuadas;
- **Envelhecimento:** perda das propriedades aglutinantes e elásticas do ligante, seguida da redução no envolvimento superficial do agregado;
- **Escorregamento do revestimento:** escoamento do revestimento constituído por mistura betuminosa, sobre a base, produzido sob a ação do tráfego em ocasiões de temperatura ambiente muito elevada;

- **Exsudação:** excesso de ligante localizado em forma de manchas mais escuras na pista de rolamento, resultando em uma superfície lisa e escorregadia;
- **Fissuras:** aberturas superficiais de dimensões capilares que ocorrem na camada de revestimento, com menos de 1 mm de largura;
- **Panelas e buracos:** ruptura da estrutura do revestimento, geralmente acompanhada pela camada de base, com perda de materiais constituintes;
- **Trincas:** aberturas superficiais de dimensões capilares que ocorrem na camada de revestimento, com largura variando de 1 a 4 mm.

Em várias zonas da cidade de Manaus os defeitos nos pavimento encontraram-se principalmente em afundamentos de trilhas de rodas, envelhecimento de misturas asfálticas, desagregação da mistura, escorregamento do revestimento, falhas nas áreas de entradas e saídas dos empreendimentos e falta de aderência entre o asfalto e a superfície de contato (CAVALCANTE *et al.*, 2012).

O manuseio e estocagem do asfalto devem ser feitos com a temperatura mais baixa possível, a fim de se evitar o envelhecimento precoce do material. Este envelhecimento é um fenômeno que tem influência no desempenho da mistura asfáltica. A exposição do cimento asfáltico às altas temperaturas e às intempéries ocasiona perda de voláteis e oxidação, o que é prejudicial no que diz respeito à fadiga. Tem-se, ao longo dos anos, tentado atenuar esses efeitos com a adição de produtos e novas tecnologias executivas (CAVALCANTI, 2010).

Portanto, podemos dizer que no Brasil os principais problemas enfrentados pelo pavimento e pelo ligante são: (i) a deformação permanente; (ii) a fadiga da vida útil do pavimento com o seu trincamento e (iii) o seu envelhecimento termo-oxidativo (BERNUCCI *et al.*, 2006).

3.7.1.1 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Os materiais constituintes do pavimento apresentam propriedades visco-plásticas, ou melhor, ao retirar-se a ação de uma carga a recuperação da deformação passa a ser fator do tempo, além da intensidade de aplicação da mesma e da temperatura do ambiente. A deformação apresenta duas componentes: uma elástica (reversível, podendo ainda ter duas fases ditas instantânea e retardada) e outra plástica (irreversível) (D'ANTONA, 2009). A Figura 19 demonstra de forma esquemática e mais claramente essas componentes.

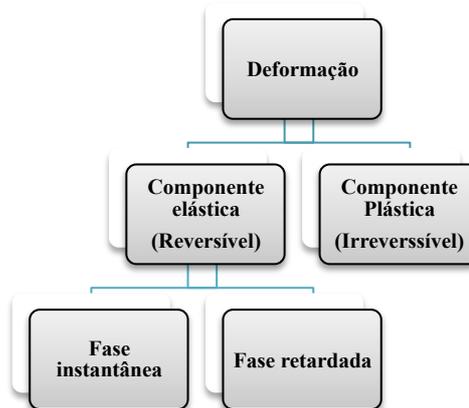


Figura 19 - A deformação permanente e suas componentes.

A deformação plástica, também chamada de permanente, é o resultado da constante influência do tráfego intenso e da maior pressão causada pelos pneus dos veículos que transportam a cada dia mais carga (AHMADINIA *et al.*, 2011; BERNUCCI *et al.*, 2006).

A deformação permanente pode ocorrer:

- Na camada de revestimento: quando a mesma não é adequada ao tráfego e às condições climáticas do pavimento, como mostrado na Figura 20 (a);
- No conjunto das diversas camadas: a ocorrência está associada a problemas estruturais, pois elas afundam por excesso de carga, conforme a Figura 20 (b).



Figura 20 - Deformação permanente em pavimentos flexíveis. Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006.

O cimento asfáltico, quanto à deformação permanente, apresenta menor resistência no início de sua vida de serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas altas temperaturas e por veículos trafegando a baixas velocidades com cargas elevadas, fato comum em diversas cidades e rodovias (CAVALCANTI, 2010).

Outras considerações afirmam que a deformação permanente em revestimentos asfálticos é caracterizada pela seção da superfície que não se encontra mais em sua posição original. Ela é chamada de permanente, pois representa o acúmulo de pequenas deformações que ocorrem a cada aplicação de cargas e esta deformação não pode ser recuperada. A forma mais comum das deformações permanentes é a trilha de roda (NOGUEIRA, 2008).

Trilha de roda é a deformação permanente superior a seis metros de extensão em um dado pavimento flexível. Quando a distância é inferior aos seis metros diz-se que o afundamento é local (Figura 21).



Figura 21 - Formação de trilha de roda.

Ou seja, a formação de trilhas de roda nas camadas superiores do pavimento é causada pela deformação plástica acumulada na mistura que resulta da aplicação repetida de carga de tráfego. Uma vez que é mais prevalente a deformação permanente a altas temperaturas do que a temperaturas intermédias ou baixas, as propriedades relacionadas com a mesma devem, portanto, ser medidas na gama de temperaturas de serviço superior do pavimento (KUMAR *et al.*, 2010).

A deformação permanente e por consequência a formação de trilha de roda é mais provável que ocorra quando a temperatura do pavimento esteja próxima de 60 °C, É importante determinar a rigidez do cimento asfáltico, a essa temperatura, de modo que seja possível especificar essa característica ao seu mínimo para assegurar uma resistência adequada à deformação durante um rigoroso verão (KUMAR *et al.*, 2010; LESUEUR, 2009)

Segundo estudos de Picanço e colaboradores (2011) a temperatura máxima de um pavimento flexível em Manaus atingiu até 52,85 °C , de acordo com medições feitas entre os meses de junho e julho daquele ano de referência.

De acordo com Motta (2011) citando Bernucci e colaboradores (2008) e Brown e colaboradores (2009), os revestimentos asfálticos estão sujeitos a sofrerem afundamentos com o tráfego devido à redução dos seus vazios. Uma camada asfáltica de rolamento com cerca de 10 cm de espessura e com vazios iniciais da ordem de 7 a 8 %, por exemplo, deve afundar aproximadamente 3 mm ao passar para 4 a 5 % de vazios após dois ou três anos de construção. Este afundamento é considerado insignificante, porém se for de maior magnitude significa que é excessivo. Além disso, a deformação permanente nestas camadas também pode ocorrer devido à fluência da mistura ou ruptura por cisalhamento.

3.7.1.2. FADIGA DO PAVIMENTO

Considerando-se um pavimento satisfatoriamente projetado e bem construído, a evolução de seu nível de deflexão durante a exposição às cargas e aos agentes de intemperismo envolve a consideração de três fases distintas (DNER, 1979), a saber:

- **Fase de consolidação:** a qual sucede imediatamente à construção, sendo caracterizada por um decréscimo desacelerado do valor da deflexão, decorrente da consolidação adicional proporcionada pelo tráfego nas diversas camadas do pavimento. O valor da deflexão tende a se estabilizar ao fim desta primeira fase;
- **Fase elástica:** sucedânea à fase de consolidação e, ao longo da qual, o valor da deflexão do pavimento se mantém quase constante;
- **Fase de fadiga:** a qual se inicia após a fase elástica, caracterizada por um crescimento acelerado do nível de deflexão do pavimento, na medida em que a estrutura começa a exteriorizar efeitos da fadiga, representados por fissuras, trincas e acúmulos de deformação permanente sob cargas repetidas.

Trinca por fadiga é um dos principais problemas dos pavimentos flexíveis, causada principalmente pela repetição das cargas de tráfego gerando tensões e deformações nas camadas do pavimento. As tensões repetidas causam danos no concreto asfáltico a cada carga

cíclica. O dano se acumula e leva a trinca por fadiga do material consistindo na iniciação da fissura e propagação no pavimento (LIAO *et al.*, 2012).

Tem sido reconhecido que as trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada de concreto asfáltico e, em seguida, se propagam para cima atingindo a parte superior da camada superficial de pavimentos de asfalto mais finas (<50 mm).

3.7.1.3. ENVELHECIMENTO TERMO-OXIDATIVO

O envelhecimento do ligante asfáltico envolve uma quantidade de processos físicos e químicos que ocorrem durante a vida de serviço do pavimento e tem algumas causas, tais como a oxidação, a qual é responsável pelo aumento de rigidez do ligante por perda de voláteis (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A oxidação é a principal causa do envelhecimento do asfalto e ocorre com mais violência durante os trabalhos com o asfalto a altas temperaturas. Nessa fase são gerados radicais livres e hidroperóxidos, além de produtos intermediários como cetonas, álcoois, ácidos, fenóis, aldeídos e asfaltenos (LINS *et al.*, 2008).

A Figura 22 mostra as fases de envelhecimento do asfalto. O índice de envelhecimento é traduzido como uma relação entre as viscosidades do ligante antes e após o envelhecimento simulado em laboratório.

O envelhecimento em pavimentos e no ligante betuminoso consiste em uma degradação contínua e transformação de seus componentes devido à exposição prolongada ao ar e às condições ambientais (VALTORTA *et al.*, 2007).

O envelhecimento do asfalto ocorre em três momentos distintos:

- Mistura em usina;
- Aplicação e compactação na via;
- Vida em serviço.

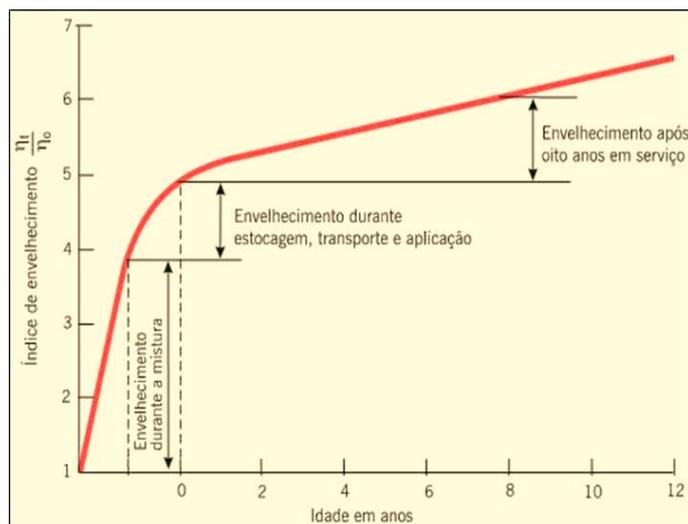


Figura 22 - Envelhecimento do ligante durante a mistura com o agregado em usina, estocagem, transporte, aplicação no campo e durante vários anos de serviço. Fonte: BERNUCCI, 2006 *apud* SHELL, 2003.

É importante observar que à medida que há o envelhecimento, o CAP vai gradativamente aumentando o seu teor de asfaltenos e diminuindo, na mesma proporção, seu teor de maltenos (CASTRO, 2003).

Os processos termo-oxidativos levam à formação de estruturas químicas instáveis as quais podem induzir à deterioração das propriedades físico-químicas do revestimento asfáltico (LUCENA *et al.*, 2004).

De acordo com Lu e Isacson (1998) a principal causa do envelhecimento do asfalto e fissuramento do pavimento em serviço é a oxidação atmosférica de certas moléculas que levam à formação de grupos funcionais de alta polaridade contendo oxigênio em sua estrutura interagindo fortemente.

Segundo Pilati (2008), o envelhecimento tem como efeito o enrijecimento da mistura, que pode ser favorável quanto à distribuição de carga e deformações permanentes, porém pode favorecer o aparecimento de trincas por fadiga e até mesmo, eventualmente, a desintegração da camada asfáltica.

Há ainda o envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo devido à ação da radiação solar. A mesma deve ser considerada nos estudos de desempenho de pavimentos flexíveis,

principalmente em geolocalidades onde radiação solar é intensa, as temperaturas são elevadas e ocorre uma alta umidade relativa do ar, como na cidade de Manaus (LINS *et al.*, 2008).

O estudo do envelhecimento de ligantes em laboratório é realizado por testes padronizados por instituições tais como a ASTM, AASHTO e a ABNT. São eles o TFOT (Thin Film Oven Test), RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) e o PAV (Pressure Aging Vassel).

O ensaio de TFOT, este em desuso, e o RTFOT avaliam o envelhecimento a curto prazo, ou seja, durante a usinagem e a compactação do concreto asfáltico no pavimento.

O PAV é usado para avaliação em longo período de tempo. As amostras são submetidas durante 20 h a uma temperatura de 100 °C e sob pressão de 2,1 MPa. Durrieu e colaboradores (2007) reportam que estudos de teste em PAV equivalem a um envelhecimento de quatro anos.

Esses procedimentos de envelhecimento em laboratório objetivam simular as condições ambientais observadas durante a produção do concreto asfáltico e construção do pavimento (RTFOT), lançamento e compactação, e mais tarde durante sua vida em serviço (PAV). Nesses ensaios a degradação do asfalto é acelerada pelo aumento da temperatura sobre uma fina película de ligante, bem como se elevando a pressão de ar ou uma combinação desses fatores (VALTORTA *et al.*, 2007).

A avaliação do envelhecimento do CAP em meios controlados pode trazer importantes informações sobre o tempo de evolução e as propriedades reológicas do ligante.

Para se conhecer o mecanismo de envelhecimento físico-químico do betume é essencial julgar a relevância de métodos de simulação de envelhecimento durante a mistura em usina ou ainda em sua vida de serviço. Desta forma, o principal objetivo é estudar a evolução, durante a oxidação dos agrupamentos estruturais e funcionais do asfalto, os responsáveis pelo envelhecimento químico e físico. Sob este ponto de vista, é essencial o uso de técnicas não destrutivas do equilíbrio interno do ligante asfáltico (LAMONTAGNE *et al.*, 2001).

Ainda segundo Lamontangne e colaboradores (2001), a espectroscopia de radiação no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma das técnicas mais adequadas para esse tipo de trabalho.

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) pode ser usada para a análise quantitativa e/ou qualitativa de material asfáltico. Tem sido aplicada ao asfalto para a caracterização da composição química e de envelhecimento, para a detecção de impurezas e para estudar a modificação causada pela adição de polímeros.

Pode-se dizer que FTIR é uma técnica analítica que oferece facilidade de coleta e interpretação de espectros obtidos na análise do CAP (NASRAZADANI, 2011).

3.8. AGENTES MODIFICADORES DO ASFALTO

Os agentes modificadores atuam no sentido de melhorar o desempenho do asfalto puro. Eles podem ser de dois tipos: a) naturais: geralmente fibras naturais orgânicas ou inorgânicas, ou b) sintéticos: polímeros, melhoradores de aderência, surfactantes, agentes rejuvenescedores entre outros.

Os asfaltos modificados usados em trabalhos de pavimentação têm várias vantagens incluindo menor susceptibilidade a variações de temperatura diárias e sazonais, maior resistência à deformação em temperaturas elevadas no revestimento, melhor adesividade entre o ligante e os agregados, melhor resultado quanto à vida por fadiga, atraso em trincas normais e reflexivas, melhorias gerais do desempenho em condições climáticas extremas e sob tráfego pesado (KUMAR *et al.*, 2010).

As principais desvantagens dos pavimentos construídos com ligantes não modificados são em termos de aparecimento prematuro de problemas estruturais tais como a deformação permanente, as trincas por fadiga, o trincamento a baixas temperaturas e os danos por umidade induzida (DIVYA *et al.*, 2013).

Ou seja, para aliviar essas falhas, o ligante asfáltico pode ser modificado usando-se polímeros, granulado de borracha ou aditivos químicos variados (BAHIA *et al.*, 2001).

A adição de modificadores, geralmente polímeros, nos ligantes asfálticos proporciona melhorias físicas, químicas e reológicas ao ligante tradicional, visando aumentar a sua durabilidade, por meio do aumento da recuperação elástica, aumento da resistência à deformação permanente e mitigação do envelhecimento (MORILHA, 2004 *apud* SOUZA, 2010).

A utilização dos asfaltos modificados com polímero em todo o mundo, onde novas concepções de misturas asfálticas são cada vez mais empregadas, propiciou uma redução nos gastos com manutenção e aumento da vida útil dos pavimentos (FONTANA FILHO, 2009).

Ainda segundo Fontana Filho (2009) a utilização de asfaltos modificados por polímeros propicia uma melhoria de resistência à formação de trilhas de roda e ao trincamento por fadiga, aumento da resistência ao envelhecimento, diminuição da susceptibilidade térmica, melhor característica coesiva e adesiva, elevação do ponto de amolecimento, dentre outros benefícios.

Ahmadinia e colaboradores (2011) também afirmam que quando se adicionam polímeros às misturas asfálticas eles aumentam o grau de rigidez do ligante, melhorando a sua temperatura de susceptibilidade térmica, a qual, em contrapartida, aumenta a resistência à deformação permanente tão comum em locais de clima quente.

Silva e colaboradores (2002) afirmam que a razão de se adicionar determinados polímeros ao asfalto é de prevenir a ruptura prematura do pavimento e, desta forma, estender a sua vida útil, reduzindo custos de conservação e restauração.

Pode-se ainda dizer que ao se adicionar polímeros à matriz asfáltica, pretende-se, principalmente, aumentar a impermeabilidade, impedindo a deterioração pela água, diminuir a fragilidade a baixas temperaturas e diminuir o desgaste pela abrasão (BOTARO *et al.*, 2006).

A fim de suportar o aumento das cargas de tráfego no pavimento, bem como resistir às influências térmicas, são utilizados polímeros específicos como aditivos ao ligante. O pavimento modificado com polímero apresenta maior resistência à deformação permanente e às trincas térmicas, além de um menor dano por fadiga, corrugações e susceptibilidade térmica. Polímeros modificadores do cimento asfáltico têm sido usados com bastante sucesso

em locais que recebem maior esforço na via, tais como, intercessões de tráfego intenso, aeroportos, posto de pesagem de veículos e autódromos (AHMEDZADE, 2013).

Atualmente os polímeros são os principais modificadores comerciais do CAP. Estima-se que no ano de 2003 foram usados nos Estado Unidos da América mais de 4 milhões de toneladas de asfalto modificado por polímero (AMP), representando cerca de 10 % do mercado total de asfalto naquele país (LESUEUR, 2009).

As fibras poliméricas quando adicionadas ao ligante asfáltico funcionam como agente de reforço que influenciam nas propriedades mecânicas e na durabilidade da mistura asfáltica. No levantamento do Transportation Road Bureau (TRB), feito em 2001, a fibra de celulose foi a mais utilizada, seguida do PP (polipropileno) e poliéster. O efeito depende do tipo (forma, tamanho, superfície de contato e ramificações) e teor de fibra adicionado (SILVA, 2005).

A literatura demonstra que as fibras podem melhorar o desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, ao trincamento por fadiga e à suscetibilidade das misturas a variações térmicas (SOUZA, 2010).

Entre os agentes modificadores de asfalto, as fibras têm ganhado superior atenção pelos seus excelentes efeitos melhoradores das características originais do ligante. Ainda assim, várias fibras modificadoras, tais como fibra de celulose, fibra de poliéster e fibra mineral tem sido largamente utilizadas em diferentes misturas asfálticas, incluindo Stone Mastic Asphalt (SMA) e Open Grade Friction Concrete (OGFC) (WU *et al.*, 2007).

Entre a grande quantidade de aditivos disponíveis no mercado internacional, as fibras têm sido usadas intensamente em misturas betuminosas. Atuam principalmente como agentes de reforço aumentando a viscosidade em temperaturas de serviço mais elevadas, minimizando os efeitos danosos nas primeiras fases de transporte e utilização do pavimento (CRISPINO *et al.*, 2013).

3.8.1. POLÍMEROS

Polímeros são feitos a partir do arranjo de pequenas moléculas, chamadas monômeros, que se encadeiam formando longas correntes de repetição estrutural. A denominação dos polímeros é baseada no nome dos monômeros usados para construir a molécula polimérica. Assim, o polímero produzido pela polimerização do monômero etileno (C_2H_4) é chamado polietileno (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

Polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas meros. O número de meros da cadeia polimérica é denominado grau de polimerização (MANO e MENDES, 1999).

O advento dos polímeros se deu posteriormente à revolução industrial, iniciada no século XIX, e trouxe à sociedade moderna enormes benefícios e facilidades. As propriedades físicas dos polímeros são governadas pela estrutura e tamanho das macromoléculas que determinam as forças intermoleculares (RODRIGUES, 2008).

Ainda segundo Rodrigues (2008) os polímeros são substâncias químicas de alto peso molecular, obtidos pela reação denominada polimerização. As reações de polimerização mais importantes na obtenção de polímeros são as reações de policondensação e adição de monômeros insaturados.

A presença do polímero no ligante asfáltico pode modificar bastante as respostas da mistura asfáltica aos pulsos das cargas geradas pelo tráfego em movimento, influenciando diretamente no desempenho do pavimento.

Sendo o asfalto um produto que se torna fluido a altas temperaturas e viscoso a baixas, essas propriedades na vida em serviço podem trazer consequências não admitidas em projeto, tais como, afundamentos, trincas e rápido envelhecimento.

Isso resultou na necessidade de se melhorar as propriedades dos ligantes puros. Os polímeros modificadores do asfalto são uma solução para essa desvantagem, o que importa na melhoria de seu desempenho de agregação (YU *et al.*, 2007).

As melhorias nas propriedades do ligante asfáltico modificado são a redução da susceptibilidade térmica e o aumento da ductilidade, o que leva a uma maior resistência à deformações plásticas em altas temperaturas e maior resistência ao surgimento de fissuras devido a retração térmica e fadiga. Os polímeros também podem contribuir para uma maior resistência ao envelhecimento e uma melhor adesão ligante/agregado (SILVA *et al.*, 2002).

Os polímeros são classificados principalmente quanto à sua variação térmica, e podem ser, de acordo com o sugerido por Bernucci (2006):

- **termorrígidos** - são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster e poliuretano;
- **termoplásticos** - são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC e PET;
- **elastômeros** - são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;
- **elastômeros termoplásticos** - são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Bahia e colaboradores (2001) reportaram que nos Estados Unidos entre os departamentos estaduais de transporte os polímeros mais utilizados para modificar o asfalto são, nessa ordem de importância:

- SBS (Estireno Butadieno Estireno) usado em 28 departamentos;
- SBR (Borracha Estireno Butadieno) usado em 17 departamentos;
- SB (Estireno Butadieno) usado em 16 departamentos estaduais;
- EVA (Etileno Acetato de Vinila) usado em 6 departamentos.

Entre as fibras as mais utilizadas são:

- Celulose usada em 12 departamentos estaduais;
- Polipropileno usado em 7 departamentos e;
- Poliéster usado em 6 departamentos.

3.8.1.1. POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)

Poliiolefinas, tais como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polipropileno (PP) e poliésteres, como o politereftalato de etileno (PET) são as duas classes de termoplásticos mais consumidas e que estão disponíveis em grandes quantidades a partir do descarte doméstico, sendo desafiadora, tecnológica e ambientalmente correta, a reciclagem destes materiais e sua caracterização mecânica antevendo a possibilidade de um novo ciclo de vida na forma de novos produtos (MARCONCINI, 2006).

Poliéster é uma categoria de polímeros que contém o grupo funcional éster na sua cadeia principal. Apesar de existirem muitos poliésteres, o substantivo masculino "poliéster" como material específico refere-se ao PET. Sua fórmula estrutural pode ser representada como na Figura 23. Os poliésteres incluem produtos químicos que ocorrem naturalmente, e produtos químicos sintéticos obtidos por policondensação tais como o policarbonato e o polibutirato. Os poliésteres naturais e alguns sintéticos são biodegradáveis, mas a maioria dos últimos não o são.

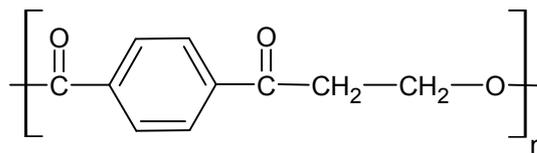


Figura 23 - Fórmula estrutural da molécula de PET.

O politereftalato de etileno (PET) é uma resina termoplástica que pertence à família dos poliésteres. O PET é usado em garrafas de bebida, fibras sintéticas, pratos descartáveis e outras embalagens plásticas similares (AHMADINIA *et al.*, 2011).

São classificados como termoplásticos os polímeros lineares ou ramificados, que sofrem fusão por aquecimento e solidificação por resfriamento (RODRIGUES, 2008).

O PET é um polímero desenvolvido por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, em 1941, empregados da Calico Printer's Association na cidade de

Manchester. Esse polímero é formado pela reação entre o tereftalato de dimetila (-H₃C-HOOC-C₆H₄-COOH-CH₃-) e o etilenoglicol (HO-CH₂CH₂-OH).

O PET apresenta alta temperatura de fusão, em torno de 265 °C, e alta estabilidade hidrolítica devido à presença de anéis aromáticos na cadeia principal. Esse polímero é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo (ROMÃO *et al.*, 2009).

É correto afirmar que fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, de reduzida seção transversal e elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100) (MANO e MENDES, 1999).

As principais características de uma fibra são dentre outras:

- Estabilidade ao ar, à luz, ao calor e à umidade;
- Resistência a solventes, detergentes e oxidantes;
- Resistência mecânica, muito baixa deformação permanente por tração;
- Resiliência, pouco amassamento, facilidade de empacotamento, e
- Resistência à abrasão.

Por suas propriedades termoplásticas o PET pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecidos a temperaturas adequadas, esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados. Entretanto, após várias reciclagens o material (PET) perde várias de suas propriedades, principalmente propriedade mecânica.

Pode ser reciclado pelo processo de termorreação ou a quente, onde a determinada temperatura, o polímero fica líquido, podendo então ser moldado, extrusado, comprimido ou em outra forma. A Figura 24 mostra fibras de poliéster em ligante asfáltico.

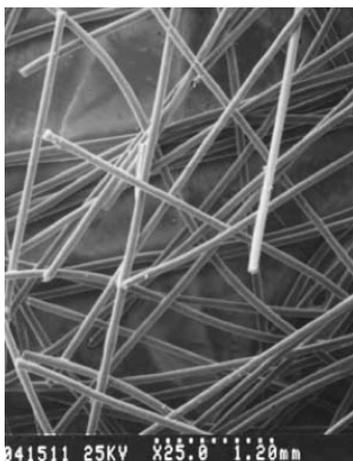


Figura 24 - Fibras de poliéster em meio a ligante asfáltico.
Fonte: CHEN e LIN, 2005.

O uso desse tipo de material contribui para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção através da reciclagem e da disponibilidade de materiais de baixo custo. (PELLISER *et al.*, 2012).

Mesmo representando apenas 10 % do mercado brasileiro de plásticos destinado ao setor de embalagens, o PET constitui o centro da atenção dos recicladores. Entre os fatores que cooperam para este quadro estão: custo da resina virgem, competitividade dos processos de reciclagem mecânica, valor agregado do reciclado cujo desempenho depende da tecnologia aplicada, podendo ser similar ao da resina virgem (GONÇALVES-DIAS e TEODÓSIO, 2006).

Navarro e colaboradores já reportavam em 2004 que a substituição de material comercial virgem por polímeros reciclados tem sido levada em consideração, em termos para reduzir custos e se obter ganhos ambientais com a modificação (NAVARRO *et al.*, 2004).

Estudos de CHEN e XU (2010) com diferentes tipos de fibras (Poliéster, Poli acrilonita, Lignina e Asbesto) levaram à conclusão, entre outras, que a lignina tem uma menor termoestabilidade e as fibras de poliéster têm essa maior característica do que as outras.

Sendo o PET um polímero termoplástico este pode ser utilizado numa variada gama de aplicações e tem a vantagem de ser 100 % reaproveitável. A evolução da cadeia e os avanços tecnológicos têm impulsionado novas aplicações para o PET reciclado, das cordas e fibras aos carpetes, bandejas de frutas e até mesmo novas garrafas (GONÇALVES-DIAS e TEODÓSIO, 2006).

3.9. ASFALTO MORNO

A tecnologia de misturas asfálticas mornas, ou semiquentes, se apresenta como um processo construtivo alternativo, por ser ecologicamente menos agressiva quando comparado com tecnologias usuais, principalmente as misturas a quente (KOENDERS *et al.*, 2000).

Existem diferentes técnicas que visam à redução em até 55 °C nas temperaturas de fabricação e aplicação de misturas asfálticas a quente. Estes novos processos e produtos empregam variados meios mecânicos e químicos para reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de construção mantendo ou melhorando o desempenho do pavimento (RIVOIRE *et al.*, 2011).

As expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla WMA (Warm Mix Asphalt) que agrupa uma série de tecnologias que permite a redução da temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas e aplicadas. Estas tecnologias permitem a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 25 a 55 °C mais baixas que a temperatura das misturas a quente (CAVALCANTI, 2010).

Poucos processos e produtos tornaram-se disponíveis com capacidade de reduzir a temperatura pela qual o asfalto quente é misturado, sem comprometer o desempenho estrutural dos pavimentos. A Figura 25 mostra a classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem e o consumo de energia aproximado em cada etapa (MOTTA, 2011).

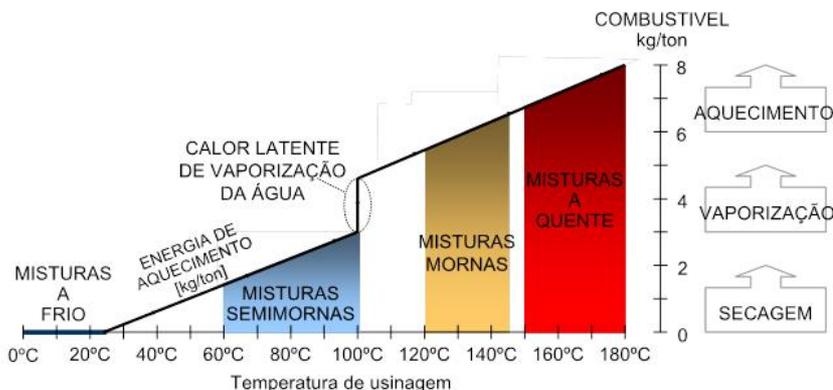


Figura 25 - Classificação das misturas em função da temperatura e consumo de energia. Fonte: MOTTA, 2011.

Uma importante observação diz respeito sobre a diminuição da temperatura de usinagem e a economia de energia que pode levar a uma redução de até 30 % no consumo de combustível (OTTO, 2009).

Ainda assim, diminuindo a temperatura na produção do WMA ocorrerá além de um decréscimo no uso de combustível a redução direta nas emissões de GEE relacionadas ao uso desse combustível (GANDHI, 2008).

No início dos anos 1990, a fim de atender ao Protocolo de Kyoto no que diz respeito à redução de emissão de GEE, a União Europeia (UE) iniciou pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias de misturas asfálticas mornas e semimornas. Essas novas formas de produção de misturas ainda são pouco utilizadas no Brasil.

A tecnologia convencional de produção de asfalto a quente requer temperaturas mínimas ao redor de 160 °C de modo a se obter uma menor viscosidade e uma melhor mistura com os agregados (LESUEUR, 2009).

Além disso, a temperatura de compactação da massa asfáltica pode variar entre 125 e 150 °C. Antes de serem misturados ao asfalto líquido quente, os agregados são aquecidos a altas temperaturas para retirar a umidade, facilitar a cobertura, e manter toda a mistura trabalhável o suficiente, possibilitando o seu manuseio na etapa de aplicação.

Ou seja, redução da viscosidade é o que permite, às diversas tecnologias de produção de asfalto morno, uma cobertura de ligante betuminoso sobre os agregados minerais, sem que, para isso, sejam necessárias altas temperaturas (OTTO, 2009).

Esta menor temperatura pode ajudar na redução de emissões dos GEE e outros tradicionais poluentes. Ainda de acordo com Gandhi (2008) uma menor temperatura do ligante asfáltico indica uma redução nos níveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos evaporados durante o aquecimento.

Abrandar as emissões permite que as usinas de misturas asfálticas estejam situadas em zonas regulamentadas com restrição de poluição do ar. Tendo uma usina localizada em uma área restrita com controle de poluição e produzindo mistura quente com produto que permite

uma redução da temperatura de operação irá encurtar as distâncias que melhorará a produção e diminuição do período de construção (OTTO, 2009).

As principais tecnologias de redução de temperatura de usinagem e compactação de misturas asfálticas baseiam-se em diferentes produtos, que são, dentre outras (OTTO, 2009; RUBIO *et al.*, 2012):

- **Zeólitas:** mineral encontrado diretamente na natureza ou sintetizado em laboratório com aproximadamente 20 % de água em massa, liberada a temperaturas de 85 a 180 °C. São exemplos: Aspha-Mim, Advera;
- **Aditivos orgânicos (Ceras orgânicas):** de origem parafínica, reduzem a temperatura de serviço entre 20 e 30 °C. Esses aditivos são utilizados para diminuir a viscosidade do ligante e permitem que a mistura asfáltica tenha trabalhabilidade superior ao da trabalhabilidade no ponto de fusão São exemplos: Sasobit, Cecabae RT;
- **Misturas espumadas:** dois ligantes de diferentes durezas são misturados. Adiciona-se primeiro um ligante mais fluido para pré-envolver os agregados. O ligante mais viscoso é adicionado em seguida em forma de espuma produzida pela injeção de água fria entre 1 e 5% no ligante aquecido. Quando a água entra em contato com o ligante quente se transforma em vapor que produz uma espuma volumosa que se desfaz lentamente e o ligante mantém suas propriedades originais. São exemplos: Double Barrel Green, Terex WMA System, WAN Foam Shell;
- **Aditivos químicos (Emulsões):** Esses produtos têm a vantagem de cobrir mais rapidamente os agregados e de lubrificar as partículas. Seu uso é feito adicionando a emulsão diretamente na linha de injeção do ligante no momento da usinagem. São exemplos: Evotherm®, Rediset WMX.

O Evotherm® provoca a formação de micelas que desenvolvem “planos de deslizamento” o que permite que as partículas de asfalto se movimentem mais facilmente, exigindo menos energia mecânica durante mistura e compactação (Figura 26).

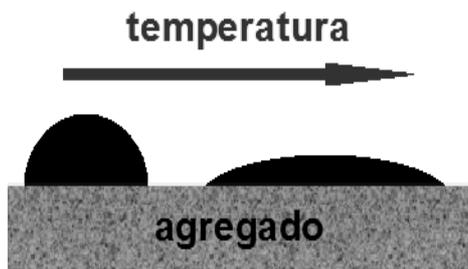


Figura 26 - Esquema de recobrimento do agregado pelo ligante asfáltico em função da elevação de temperatura. Fonte: MOTTA, 2011.

Na verdade, a mistura morna com Evotherm apresenta as mesmas propriedades reológicas que o concreto asfáltico convencional quando submetida a baixas forças de cisalhamento, mas quando submetida a alto cisalhamento (usinagem e rolagem) apresenta menor viscosidade mesmo em temperaturas mais baixas.

Em comparação com o HMA, as misturas de asfalto morno com Evotherm têm algumas vantagens, tais como a economia de energia na produção e redução da liberação de fumos durante a produção e colocação, além disso, pode ser compactada mais facilmente, porque o intervalo de temperatura de compactação de asfalto morno com o Evotherm é maior, o que pode também prolongar o tempo de compactação do asfalto quente mistura em baixas temperaturas. Uma aplicação de Evotherm® em um pavimento ultrafino na China foi comprovadamente bem sucedido em baixa temperatura do ar em dezembro de 2007 (TAO *et al.*, 2009).

Além da economia de combustível o uso de Evotherm apresenta outras vantagens:

- O ligante aditivado mantém as propriedades de especificação original;
- Redução da temperatura de produção, com consequente redução da degradação por oxidação do ligante;
- Em consequência da menor oxidação, pode-se otimizar o projeto da mistura, e portanto, é possível ter uso mais eficiente dos materiais;
- Totalmente compatível com os projetos originais de pavimentação com HMA;
- Permite trabalhar com elevado teor de pavimento reciclado;
- Não requer nenhuma modificação na usina, a aditivação é direta no ligante.
 - Além do consumo de combustível, o aquecimento do asfalto líquido a essas temperaturas causa grande emissão de COV's (Compostos Orgânicos Voláteis)

e de fumaça (material particulado), que são extremamente poluentes e nocivos ao meio ambiente e à saúde do trabalhador.

A preocupação com as emissões de GEE se deve ao fato de acreditar-se que o aumento da temperatura média global desde meados do século XX seja em consequência do crescimento da concentração destes elementos na atmosfera por ação do homem.

Os principais gases que são considerados GEE, são:

- Dióxido de carbono – CO₂;
- Hexafluoreto de enxofre – SF₆;
- Hidrofluorcarbonos – HFC;
- Metano – CH₄;
- Óxido nitroso – NO₂;
- Perfluorcarbonos – PFC.

De forma geral, as emissões das misturas usinadas a quente são classificadas em duas grandes categorias: emissões visíveis e não visíveis.

As emissões não visíveis são as que preliminarmente consistem em compostos orgânicos voláteis (COV's) não condensáveis, os quais precipitam formando gás ozônio ao nível do solo. As emissões visíveis consistem em partículas de poeira geradas nas indústrias de concreto asfáltico, depósito deste material e seu transporte ao local de aplicação além de outros hidrocarbonetos mais pesados que facilmente evaporam a temperaturas em torno de 150 °C (GANDHI, 2008).

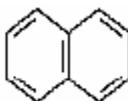
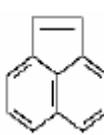
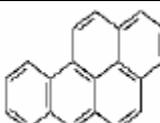
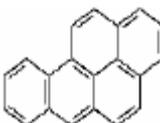
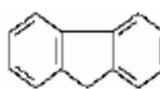
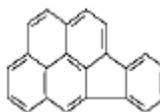
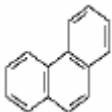
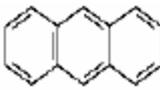
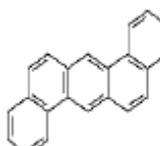
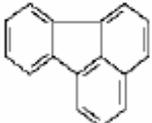
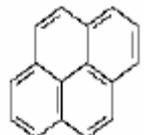
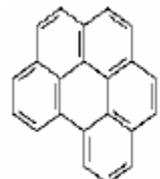
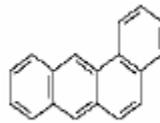
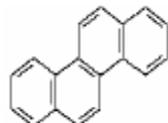
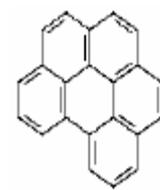
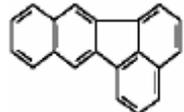
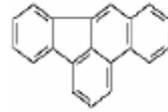
As emissões visíveis condensam-se no ar do ambiente, capturam as partículas menores de pó e água e têm um odor característico.

Outro tipo de substância emitida para o meio ambiente através do HMA são os HPAs que formam uma classe de compostos orgânicos, constituídos de 2 a 7 anéis benzênicos fundidos, que podem ser de origem natural, produzidos nas queimadas ou por microrganismos em seu metabolismo, ou de origem antropogênica, sendo essa a principal fonte dos HPAs (FERNANDES, 2007).

De maneira geral, tanto os HPAs quanto seus derivados estão associados ao aumento da incidência de diversos tipos de cânceres no homem.

Nas fontes de produção de HPAs se destaca a indústria petrolífera (petrogênicos) e a queima de combustíveis fósseis (NETTO *et al.*, 2000). Os principais HPAs estão representados na Tabela 6.

Tabela 6. Principais HPAs e respectiva estrutura molecular.

Denominação do HPA	Estrutura molecular	Denominação do HPA	Estrutura molecular	Denominação do HPA	Estrutura molecular
Naftaleno		Acenaftileno		Benzo(A)Pireno	
Acenafteno		Flureno		Indeno[123-CD]Pireno	
Fenantreno		Antraceno		Dibenzo[AH]Antraceno	
Fluoranteno		Pireno		Benzo[GHI]Perileno	
Benzo(A)Antraceno		Criseno		Benzo[GHI]Perileno	
Benzo(K)Fluorante		Benzo(O)Fluorante			

Experimentos de laboratório têm mostrado que vários HPAs são mutagênicos, carcinogênicos e teratogênicos. O interesse pela determinação da composição de HPAs em amostras ambientais (solo, água, ar e matrizes complexas como o asfalto) decorre da ação tóxica destes compostos sobre o meio ambiente e o homem (FERNANDES, 2007).

Relatório publicado na França pela USIRF (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française) em 2011 contradizem os efeitos das emissões de misturas asfálticas dizendo que estudos feitos pelo Centro Internacional de Pesquisa sobre o Câncer durante 15 anos e em 8 países não provaram a ligação das emissões asfálticas com o aparecimento de neoplasias. Entretanto, este mesmo artigo recomenda o uso de equipamentos de proteção individual pra os trabalhadores diretamente envolvidos, pois os fumos emitidos provocam irritação nas vias respiratórias superiores.¹

As misturas mornas atuais oferecem a possibilidade de quase eliminar essas emissões, com destaque para a grande diminuição de emissão de CO₂, em virtude da redução de até 45% no consumo de óleo combustível no processo de aquecimento dos agregados (desde que a usina esteja otimizada para maximizar a produção).

Motta (2011) analisou as emissões de poluentes asfálticos em laboratório e em campo e constatou que houve uma redução em cerca de três vezes a concentração total de HPAs relativos ao material particulado dos ambientes de mistura morna, em relação àquela quente. Observou ainda que a magnitude do total de HPAs é mais elevada em usina, em comparação com a aplicação em pista, entendendo-se que isto se deva às maiores temperaturas no início do processo de pavimentação (usinagem).

3.10. REOLOGIA DO ASFALTO

A reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões. Corpos, neste contexto, podem ser sólidos, líquidos ou gasosos (SCHRAMM, 2006).

Portanto, pode-se afirmar que a reologia é a ciência que lida com o fluxo e a deformação da matéria (WHITEOAK e READ, 2003)

¹ (Le Bitume: 5 Vérités à Connaitre, 2011. <http://www.usirf.com/site/Publications/Telechargement>. Acessado em 23 de fevereiro de 2013).

Quando as propriedades reológicas são determinadas em laboratório, diz-se que está se realizando ensaios de reometria. Para isso existem diversas técnicas experimentais disponíveis que variam de acordo com o material a ser ensaiado (CASTRO *et al.*, 2011).

Em termos reológicos existem os sólidos e fluidos ideais, ou melhor, os:

- **Sólidos ideais** se deformam elasticamente. A energia requerida para a deformação é completamente recuperada quando a tensão é removida. Uma martelada num bloco de borracha vulcanizada deixa a marca do martelo por algum tempo, mas depois o bloco volta ao seu estado inicial.
- **Fluidos ideais**, tais como líquidos e gases, deformam-se irreversivelmente, eles fluem. A energia requerida para a deformação é dissipada sob a forma de calor e não pode ser recuperada pela remoção da tensão. A água que cai da jarra sobre uma mesa se espalha por completo, e não retorna ao seu estado dentro da jarra.

Segundo Schramm (2006), os corpos reais não são nem sólidos ideais e nem fluidos ideais.

A resistência de um fluido a qualquer mudança irreversível de seus elementos de volume é chamada de viscosidade.

Para Pilati (2008), a viscosidade é uma medida de consistência, definida como a resistência que um determinado material oferece ao escoamento, quando submetido a tensões de cisalhamento.

A lei básica da reometria foi primeiramente expressada por Isaac Newton, descrevendo o comportamento de fluxo de um líquido ideal, conforme a equação a seguir:

$$\tau = \eta \times \gamma \quad (2)$$

onde τ (tau) é a tensão de cisalhamento, η (eta) é a viscosidade e γ (gama) é a taxa de cisalhamento.

O líquido viscoso ideal segundo a lei de Newton é aquele que quando submetido a uma tensão cisalhante, escoar e sofrer deformação irreversível. A relação tensão de

cisalhamento (τ) aplicada com a taxa de deformação (dy/dt) é linear e constante, denominada coeficiente de viscosidade (μ). Os CAP's se comportam como fluidos newtonianos a temperaturas próximas a 100 °C (LEITE, 1999).

Um fluido é dito Newtoniano se a viscosidade independe da taxa de cisalhamento, e considerado pseudoplástico ou dilatante, conforme a viscosidade decresce ou cresce com o aumento desta, respectivamente (Figura 27) (LUCENA *et al.*, 2003).

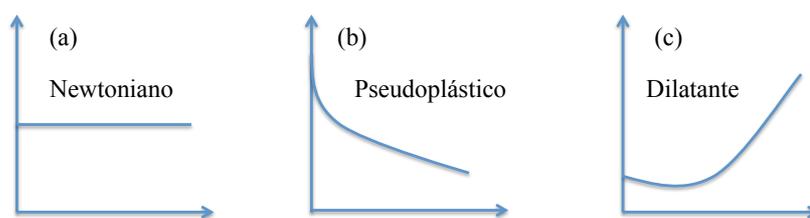


Figura 27 - Comportamento reológico de fluidos conforme sua viscosidade. (a) Newtoniano. (b) Pseudoplástico. (c) Dilatante.

As características reológicas dos asfaltos em uma temperatura particular são determinadas pela sua constituição (composição química) e sua estrutura (arranjo físico) das moléculas no material. Mudanças na sua constituição, estrutura, ou ambas, resultará em mudanças na reologia. Assim, para entender as mudanças reológicas nos asfaltos é essencial compreender como sua estrutura e constituição interagem para influenciar a reologia (WHITEOAK e READ, 2003).

A reologia do asfalto pode amplamente ser representada por dois parâmetros principais viscoelásticos: o módulo complexo e o ângulo de mudança de fase, ou simplesmente ângulo de fase. Esses parâmetros mudam com a temperatura e o tempo de carregamento dos veículos no pavimento. O módulo complexo (G^*) representa o módulo de rigidez, ou melhor, a resistência de uma substância contra uma deformação aplicada. Enquanto que o ângulo de fase (δ) é normalmente utilizado para demonstrar a resposta viscoelástica de materiais betuminosos (LIU *et al.*, 2008). Pela Figura 28 visualizamos tensão e deformação sob um carregamento harmônico.

O G^* é determinado pelos componentes G' (Módulo Elástico) e G'' (Módulo Viscoso), em que é representado pela equação (3):

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (3)$$

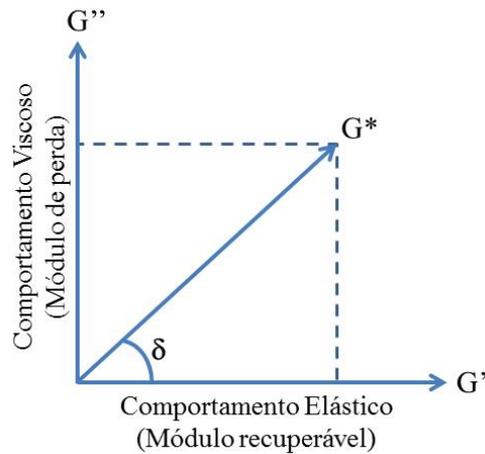


Figura 28 - Gráfico representativo do carregamento expressando tensão e deformação.

O ângulo de fase é o desvio entre a tensão aplicada e a deformação resultante. É também um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não recuperável.

Se uma substância é puramente viscosa, então o ângulo de fase δ é de 90° : $G' = 0$ e $G'' = G^*$.

Se uma substância é puramente elástica, então o ângulo de fase δ é igual a 0° : $G' = G^*$ e $G'' = 0$.

Os valores de G^* e δ são altamente dependentes da temperatura e do carregamento aplicado sobre o asfalto. Sendo o asfalto um material viscoelástico, dependendo do seu estado da temperatura, então a altas temperaturas δ tende a 90° e a baixas temperaturas δ tende a 0° (BRINGEL, 2007).

Os valores de G^* e δ nos fornecem ainda mais duas importantes equações:

- Resistência à deformação permanente (R_{dp} ; Equação (4)) para altas temperaturas, $>46^\circ\text{C}$ é dada por:

$$R_{dp} = \frac{G^*}{\text{sen}\delta} \quad (4)$$

- Resistência ao trincamento por fadiga (R_{tf} ; Equação (5)) para temperaturas intermediárias, entre 7 e 34°C , é dada por:

$$R_{dp} = G^* \text{sen}\delta \quad (5)$$

Para Bringel (2007) o estudo da reologia dos materiais betuminosos tem por objetivo principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura.

3.10.1. ENSAIOS SUPERPAVE

A nova especificação Superpave (Superior Performance Pavement), desenvolvida a partir do Programa SHRP (Strategic Highway Research Program) desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos, classifica os ligantes asfálticos com base no desempenho e leva em consideração as condições climáticas, assim como o volume e as cargas do tráfego (ODA e FERNANDES, 2001).

Para determinar as propriedades fundamentais relacionadas aos principais defeitos que ocorrem nas misturas asfálticas, a especificação Superpave apresenta uma série de novos ensaios laboratoriais, em substituição aos ensaios tradicionais.

A premissa adotada no Programa SHRP foi de que os métodos empíricos não garantiam um bom desempenho em longo prazo e que precisavam ser revistos ou substituídos. Dessa forma, os ensaios Superpave realizados a temperaturas similares às que ocorrem durante a vida em serviço dos pavimentos procuram simular quatro estágios críticos da vida do ligante, que são:

- comportamento durante o transporte, armazenagem e manuseio: simulado pelo ensaio de viscosidade dinâmica utilizando um equipamento Brookfield;
- comportamento em serviço: simulado pelo reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR);
- comportamento durante a produção e aplicação da mistura na pista: simulado pelo envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa, RTFOT;
- comportamento após liberação ao tráfego: simulado pelo envelhecimento em vaso de pressão, PAV.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação são apresentadas descrições das características das matérias-primas utilizadas, bem como dos procedimentos dos ensaios e os equipamentos utilizados para os objetivos propostos.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO (CAP 50/70)

Devido a maior produção no Brasil e o grande consumo em pavimentos da cidade de Manaus, o ligante asfáltico sugerido como objeto de estudo foi o CAP 50/70 fornecido pela Refinaria de Manaus – REMAN, localizada na Rua Quixito, 1 – Vila Buriti, Distrito Industrial, zona sul da cidade de Manaus.

4.1.2. POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) RECICLADO EM FORMA DE FIBRA

Atualmente tem havido um grande interesse na utilização do PET reciclado em diversas misturas de novos materiais, uma vez que apresenta excelentes propriedades de resistência mecânica, estabilidade térmica e difícil degradação, além do apelo ecológico retirando-o do meio ambiente quando descartado no pós-consumo.

A amostra de PET em forma de fibras foi fornecida cordialmente pela empresa Unnafibras Têxtil Ltda. localizada na cidade de Santo André (SP) (Figura 29). Em Manaus as empresas recicladoras ainda não produzem fibras do PET reciclado.



Figura 29 - Exemplo de uma amostra de fibras de PET reciclado fornecido pela empresa Unnafibras.

4.1.3. EMULSIFICANTE COMERCIAL EVOTHERM M1

O emulsificante comercial Evotherm (Figura 30) é um “pacote químico” desenvolvido para promover a adesão, cobertura, compactação e trabalhabilidade de misturas asfálticas a temperaturas reduzidas. Outros pacotes químicos estão disponíveis comercialmente para vários tipos de agregados. A principal diferença entre esses pacotes químicos é o agente de adesividade. Cerca de 50 % desse pacote químico é proveniente de recursos renováveis, e permite reduzir entre 50 a 75 °C na usinagem e compactação comparado com o asfalto convencional (D'ANGELO, 2008).

Amostra de emulsificante foi fornecida pela empresa MedWestVaco (MWV) através do representante comercial no Brasil, com sede em São Paulo/SP.



Figura 30 - Exemplo da amostra de Evotherm M1 fornecido pelo representante da empresa MWV, no Brasil.

4.1.4. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO

As amostras de ligante asfáltico modificado foram preparadas com as seguintes proporções em massas de CAP50/70, emulsificante (Evotherm) e fibras de PET reciclado, mostradas na Tabela 7.

Essas proporções foram estimadas com base nos dados da literatura (Anexo 01).

Tabela 7. Quantidades em massa (g) de cada componente utilizada na preparação das amostras de ligante asfáltico.

Amostra	CAP 50/70	EVOTHERM	PET
	massa/g		
CAP	250	0	0
C4E1P	250	1,0	0,25
C4E2P	250	1,0	0,50
C4E4P	250	1,0	1,00
C4E6P	250	1,0	1,50

Assim sendo, foi fixada uma proporção de emulsificante de 0,4 %m/m e variada a quantidade de fibra nas proporções de 0,1, 0,2, 0,4 e 0,6 %m/m.

Cada amostra foi homogeneizada em um misturador mecânico da FISATON, modelo 647 (Figura 31 a e b), em temperaturas crescentes a partir de 100 °C e agitação de 200 rpm até 140 °C e 1.000 rpm, por 90 min.

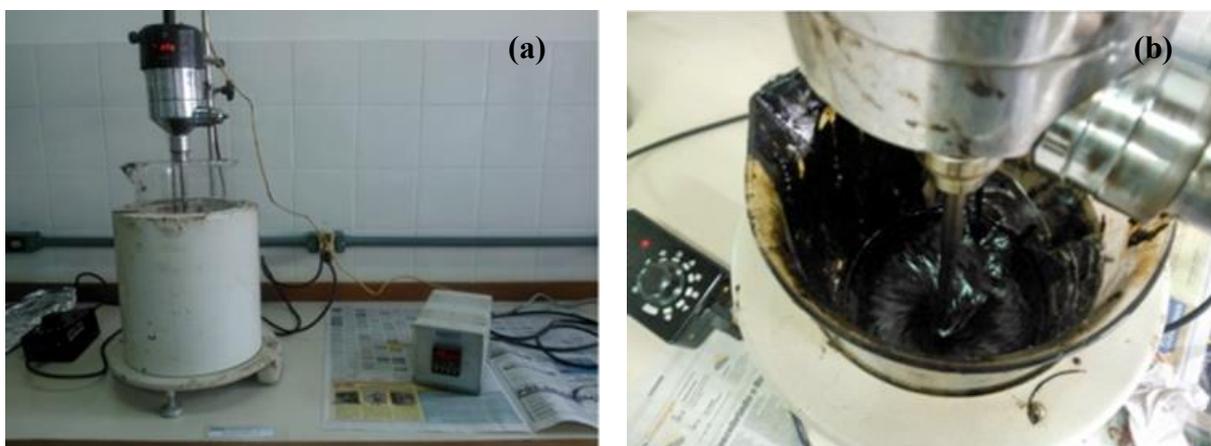


Figura 31 - (a) - Misturador mecânico da FISATON, modelo 647. (b) – Vista de cima mostrando em detalhe a homogeneização da amostra.

4.2. ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos das amostras de ligante asfáltico modificado foram realizados em conformidade com as normas brasileiras para (i) ponto de amolecimento; (ii) penetração a 25 °C; (iii) índice de susceptibilidade térmica e (iv) durabilidade em estufa, RTFOT.

4.2.1. PONTO DE AMOLECIMENTO (ABNT NBR 6560: 2000, DNIT 131/2010 - ME)

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona à temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido à temperatura controlada até atingir determinada condição de escoamento.

O ensaio consistiu em colocar uma esfera de aço de dimensão e massa padronizadas no centro da amostra de ligante asfáltico modificado confinada no interior de um anel metálico padrão. Este conjunto foi fixado em haste de apoio sobre o banho de água, seguido de aquecimento a taxa de temperatura controlada de $5\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ (Figura 32). A temperatura de amolecimento foi registrada quando a primeira fração da amostra atingiu o fundo do banho (protegido por uma placa metálica).

O ensaio de cada amostra foi realizado em duplicatas simultaneamente.



Figura 32 - Aparelho de ponto de amolecimento.

4.2.2. PENETRAÇÃO A 25 °C (ABNT NBR 6576: 1998)

Os testes de penetração são considerados fundamentais para a classificação e entendimento das propriedades dos asfaltos.

A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra numa amostra de volume padronizado (cadinho metálico de 50 mL) de cimento asfáltico, por 5 s, à temperatura de 25 °C.

O ensaio de cada amostra foi realizado em triplicatas.

4.2.3. ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA (IST)

Os asfaltos apresentam propriedades termoplásticas, ou seja, tornam-se mais fluidos quando aquecidos e duros quando resfriados (WHITEOAK e READ, 2003). O comportamento termoplástico do cimento asfáltico possibilita o manuseio a quente e o retorno às suas propriedades viscoelásticas por simples resfriamento, quando utilizado na pavimentação (LUCENA, 2005).

O valor de IST define o modo como a viscosidade ou consistência, se altera de acordo com as mudanças de temperatura. Comumente, a equação de Pfeiffer e Van Doormaal é utilizada para estimar o IST a partir dos dados empíricos de ponto de amolecimento (PA) e penetração a 25 °C (P), representada pela equação (6):

$$IST = \frac{500 \log(P) + 20PA - 1951}{120 - 50 \log(P) + PA} \quad (6)$$

4.2.4. DURABILIDADE EM ESTUFA RTFOT A 163 °C POR 85 min (ABNT NBR 15235:2009, ASTM D2872)

O envelhecimento, ou durabilidade, do asfalto está associado aos fenômenos de perda de componentes voláteis durante o seu aquecimento nas fases de usinagem e compactação além da oxidação progressiva no campo, principalmente na superfície exposta a intempéries.

O ensaio em estufa promove o envelhecimento do ligante de modo a simular o processo que ocorre durante a usinagem e compactação, também denominado envelhecimento em curto prazo (LEE *et al.*, 2008).

O RTFOT (do inglês Rolling Thin Film Oven Test) - estufa de filme fino rotativo ou estufa de película delgada rotacional - é um ensaio que mede o envelhecimento por oxidação e evaporação, porém de forma mais severa por estar continuamente expondo nova porção do ligante ao efeito do ar.

O ensaio de durabilidade em estufa foi realizado em um equipamento ISL RTFOT, modelo 8. Foram utilizadas $35 \pm 0,5$ g de cada amostra, em duplicatas. Essa massa foi transferida e dispersa na parede do frasco de vidro, esse conjunto foi pesado ($m_{inicial}$) e fixado horizontalmente num tambor rotativo. Em seguida, procedeu-se o ensaio a $163 \pm 0,5$ °C por 85 min, sendo sequencialmente aplicado na amostra jato de ar com vazão de 4.000 ± 200 mL min⁻¹ (Figura 33).



Figura 33 - Ensaio de durabilidade em estufa. (a) Detalhe dos frascos com amostras. (b) Frascos de vidro com amostras fixados no tambor rotativo do equipamento RTFOT. (c) Frascos com amostras após o ensaio. Fonte: SOUZA, 2010.

Após o ensaio os frascos com as amostras foram resfriados por 60 min, no mínimo, e em seguida pesado novamente (m_{final}) para determinar a percentagem massa perdida ($\%m$), conforme a Equação (7):

$$\%m = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (7)$$

4.4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que fornece informações a respeito da microestrutura dos materiais, ou seja, descrições referentes aos aspectos morfológicos.

O princípio operacional da MEV se dá através da emissão de feixes de elétrons, em vácuo, por um filamento capilar de tungstênio, por aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 e 30 kV. A energia emitida pelas partículas é transcodificada gerando imagens virtuais visíveis no monitor de um computador (Figura 34). As imagens podem ser ampliadas em até 300.000 vezes (PAIVA, 2009).

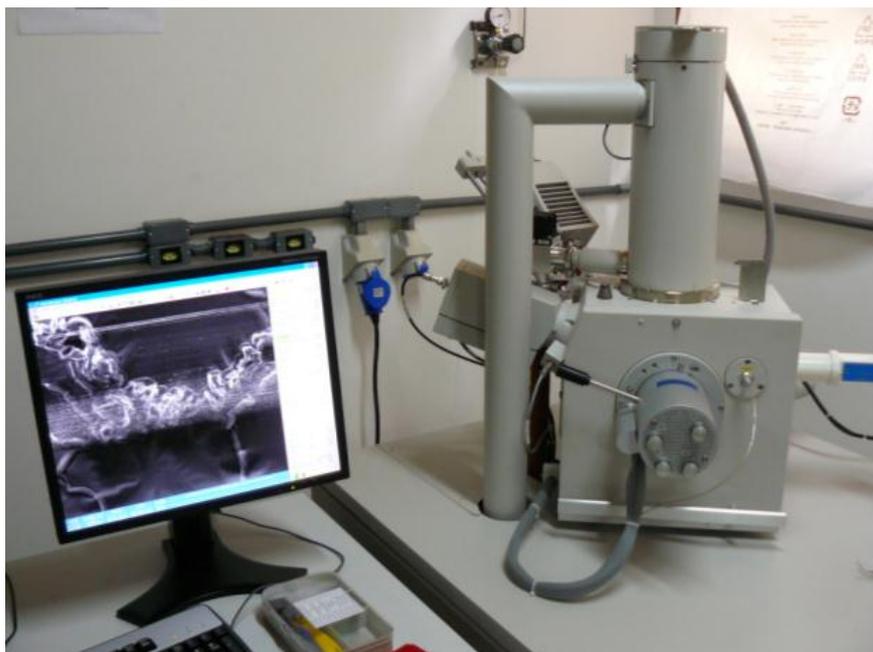


Figura 34. Microscópio eletrônico de varredura marca FEI, modelo QUANTA 250, com detalhe da imagem reproduzida no monitor do computador, do Laboratório de Técnicas Mineralógicas do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

Para a análise de MEV foi usado um microscópio FEI, modelo QUANTA 250, a 20 kV e 60 pA. As amostras foram metalizadas superficialmente com ouro (Figura 35), pois os materiais orgânicos são maus condutores de energia, em sua grande maioria e o metal ajuda nessa condução. Em seguida foram transferidas à câmara a vácuo.

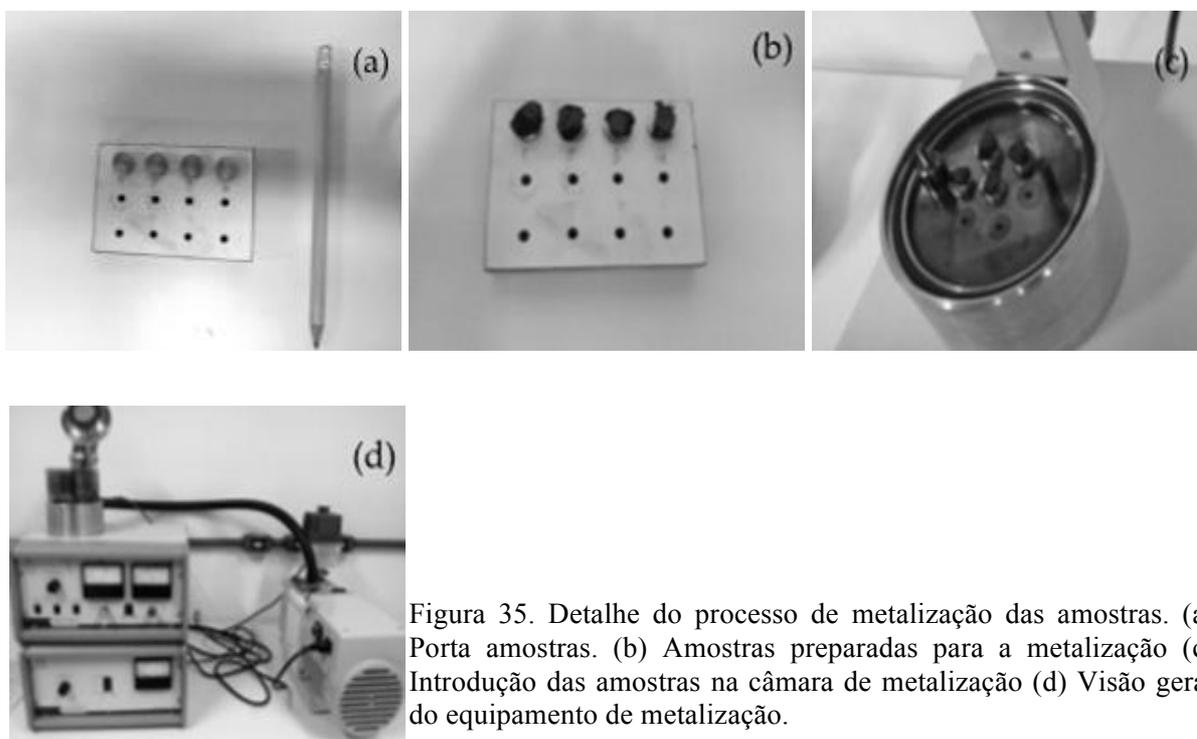


Figura 35. Detalhe do processo de metalização das amostras. (a) Porta amostras. (b) Amostras preparadas para a metalização (c) Introdução das amostras na câmara de metalização (d) Visão geral do equipamento de metalização.

4.3. ENSAIOS DE REOMETRIA

Os ensaios de reometria foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS), sob a supervisão da Profa. Dra. Gisélia Cardoso.

4.3.1. VISCOSIDADE DINÂMICA (BROOKFIELD) NAS TEMPERATURAS 135, 150 E 177 °C (ABNT NBR 15184:2004 e ASTM D 4402/02)

O teste de viscosidade dinâmica ou absoluta ou rotacional (expressa em centipoise², cP), em misturas asfálticas é usado para determinar o fluxo em altas temperaturas e fornecer relativa segurança de que o bombeamento e o manuseio serão fáceis numa mistura asfáltica a quente (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

A medida de viscosidade é dada pelo torque necessário para girar um *spindle* (haste de prova) imerso na amostra de asfalto quente, a velocidade constante (Figura 36). A especificação requer que o material betuminoso de referência, nesse caso o CAP 50/70 puro, seja de mínimo de 274 cP a 135 °C.

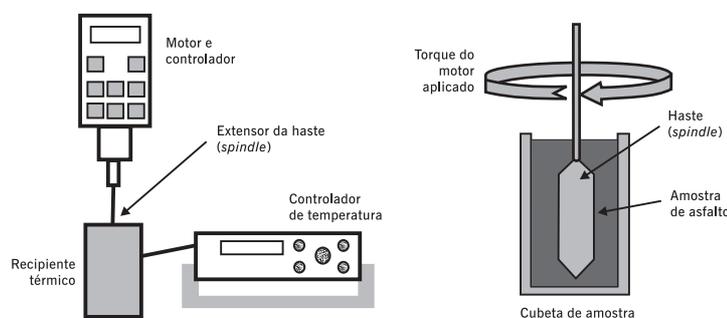


Figura 36. Ilustração de ensaio de viscosidade em um equipamento da Brookfield. Fonte: BERNUCCI, 2006.

Para o ensaio de viscosidade foi utilizado um viscosímetro da Brookfield, modelo DV III Ultra (Figura 37). Cerca de 8,5 g de cada amostra foi transferida para a cubeta de amostragem e colocada no recipiente térmico com temperaturas controladas, em 135, 150 e 177 °C, em que foram registradas as medidas de viscosidade.

²A viscosidade dinâmica também pode ser medida em Pa s, onde 1 Pa s = 1000 cP.



Figura 37. Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III Ultra do Laboratório Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

4.3.2. REOMETRIA DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR) (ASTM D 7175)

A reometria de cisalhamento dinâmico (sigla DSR, do inglês Dynamical Shear Rheometer) foi o método usado para caracterizar as propriedades reológicas do ligante a temperatura de 60 °C. O ensaio visa medir o módulo de armazenamento (G'), o módulo de perda (G''), o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ). Sendo que as amostras de ligante puro e modificado foram submetidas a uma varredura de tensões de cisalhamento, denominado regime oscilatório, entre duas placas paralelas circulares, sendo uma fixa (inferior) onde foi colocada a amostra e a outra oscilante (superior) entre 0,1 e 40 Hz (1,59 ciclos por segundo), o equivalente a 10 rad s^{-1} . Esta frequência equivale a um tráfego de 90 km h^{-1} (Figura 38). O ângulo δ avalia a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento.

Para o ensaio de DSR das amostras foi utilizado um reômetro TA Instruments Asphalt Rheometer CSA II (Figura 38), sob aquecimento através de um circulador de água, da Julabo, modelo FS 18, mantendo temperatura constante a 60 °C e frequência variando de de 0,1 a 40 rad s^{-1} , com taxa de cisalhamento de $0,1 \text{ s}^{-1}$.

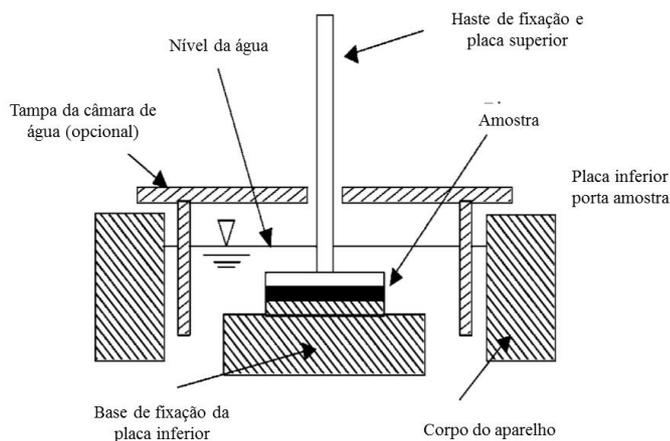


Figura 38 - Representação do ensaio de DSR com amostra. Fonte: Airey, 2002.

A amostra, ou melhor, o corpo de prova, foi estruturado em molde de silicone, e teve aproximadamente 1 mm de espessura, 10 a 15 mL de volume e 25 mm de diâmetro, igual a diâmetros das placas (Figura 39)



Figura 39. (a) - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico do Laboratório Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS). (b) – Detalhe da amostra sendo retirada do molde para inserção no reômetro.

4.4. ENSAIOS QUÍMICOS

Os ensaios químicos consistiram do uso das técnicas analíticas de termogravimetria (TGA/DTA) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier visando fornecer informações a cerca da composição química e estabilidade térmica das amostras.

4.4.1. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA/DTA)

A análise termogravimétrica ou termogravimetria baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra (perda ou ganho), resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação etc.) ou química (degradação, decomposição e oxidação) em função do tempo ou da temperatura (MOTHÉ e AZEVEDO, 2002). O tipo de termogravimetria mais usada atualmente é a dinâmica, onde uma amostra é aquecida em um ambiente no qual a variação de temperatura está programada ou pré-determinada, preferencialmente em velocidade linear (Figura 40).

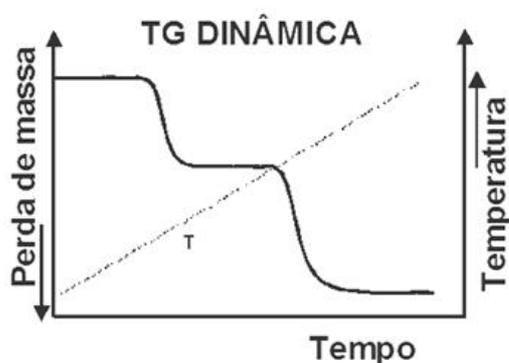


Figura 40 - Padrão de uma curva típica de análise de termogravimetria (TGA).

Ainda segundo Mothé e Azevedo (2002) a TGA é uma técnica muito utilizada na caracterização do perfil de degradação de polímeros e de outros tantos materiais. A exposição à temperatura elevada pode, certas vezes, alterar a estrutura química e, por consequência, as propriedades físicas do material, em nosso caso o asfalto modificado com fibras de PET reciclado.

A estabilidade térmica pode ser definida como a capacidade da substância em estudo manter suas propriedades, durante o processo térmico, o mais próximo possível de suas características iniciais.

Desta forma, a curva de degradação térmica, em condições não isotérmicas, mostra o perfil da resistência ou estabilidade térmica que a amostra apresenta quando submetida a uma varredura de temperatura.

A análise térmica diferencial (DTA - do inglês "Differential Thermal Analysis") é capaz de identificar transições de fase sem variação de massa, como mudanças estruturais,

reações e transições sólido-sólido, cristalização, fusão, polimerização e reações catalíticas. A principal função do acoplamento TGA-DTA é prover maior resolução em temperaturas específicas nas quais a variação de massa é pequena e sucessiva a outras perdas de massa deixando a visualização apenas pelo perfil gráfico de massa por temperatura, típico de TGA, muito difícil de ser interpretado.

As amostras foram analisadas em um termo analisador simultâneo da Shimadzu, modelo DTG-60H, em atmosfera de N₂, razão de aquecimento de 10 °C e fluxo de gás de 50 mL min⁻¹ (Figura 41). Foi usada panela de alumina (Al₂O₃) contendo aproximadamente 10 mg de amostra.



Figura 41 - Detalhe do termo analisador simultâneo da Shimadzu, modelo DTG-60H do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

4.4.2. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectroscopia vibracional no infravermelho por transformada de Fourier é uma ferramenta eficaz para a determinação de grupos funcionais e nos estudos de conformação e estruturas de compostos. Esta técnica estuda a interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho com a matéria, analisando a transição das vibrações normais moleculares (BRINGEL 2007).

Em ligantes asfálticos a análise FTIR é capaz de fornecer informações de forma rápida e confiável sobre compostos aromáticos, alifáticos e a taxa de oxigenação. Além disso, também pode fornecer dado mais preciso e acurado, tais como o tamanho médio da distribuição de cadeias alifáticas, oxigenação e o modo de substituição de grupos aromáticos (LAMONTAGNE *et al.* 2001).

Os espectros de infravermelho foram obtidos em um espectrômetro FT-IR VARIAN, modelo 640-IR (Figura 42), na faixa de 4.000 a 600 cm^{-1} com 32 varreduras. Uma fina película da amostra foi depositada sobre o suporte do acessório ATR (Atenuador de Refletância Total) com detector de Germânio (Ge).



Figura 42 - Espectrômetro de FTIR, com detalhe da câmara de amostra, do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

O método de espectroscopia no infravermelho usando ATR (Attenuated Total Reflectance), ou Refletância Total Atenuada, explora a atenuação da luz refletida internamente em um prisma. Ou seja, quando um feixe de radiação passa de um meio mais denso para um menos denso, ocorre reflexão. Consideram-se duas vantagens no uso do FTIR-ATR em asfaltos: (i) a totalidade do espectro é obtida sem uso de solvente e (ii) evita-se a influência de solventes químicos sobre a amostra.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo é dedicado ao estudo, análise e interpretação dos resultados obtidos desde a preparação das amostras, análises químicas, físicas, reológicas e morfológica, empregando as diversas técnicas analíticas descritas anteriormente.

5.1. CAP MODIFICADO

Na preparação das amostras as fibras foram adicionadas lentamente ao ligante, pois é importante que elas não se aglomerem visando ao final obter uma amostra bem homogênea. A proporção máxima de fibras não excedeu 0,6 % da massa total do ligante asfáltico, esse limite se baseou em vários estudos registrados na literatura com fibras sintéticas e naturais, ver o Anexo I.

Visualmente os aspectos, em geral, das amostras de CAP modificado se mantiveram inalteradas em comparação com o CAP 50/70 puro.

5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Espectroscopia no FTIR

Esta análise permite a identificação e quantificação de grupos funcionais presentes no asfalto. A FTIR mede a luz infravermelha absorvida por ligações covalentes em moléculas (ou vibrações de cristais de estrutura). A absorção de diferentes tipos de ligações é diferente da intensidade e da frequência da luz absorvida, o que permite a identificação de funcionalidades químicas.

A interpretação de um espectro FTIR de asfalto, a fim de identificar certos grupos funcionais deve ser realizada com cuidado, uma vez que pode haver muitas fontes de interferência. Tais fontes são sobrepostas de diferentes bandas de absorção, mudança de número de onda, devido à formação de dímeros, elétrons retirados de grupos de vizinhos e de conjugação, ou geometria estrutural do grupo funcional estudada e sua vizinhança (KARLSSON e ISACSSON, 2003).

Os espectros de FTIR das amostras de CAP Puro e modificados são mostrados na Figura 43. Os resultados das atribuições das bandas de absorção mais importantes são

apresentados na Tabela 8. O perfil gráfico das amostras C4E1P, C4E2P e C4E4P são muito similares, não apresentam diferenças significantes, o que sugerem ter os mesmos grupos funcionais das substâncias que as compõem.

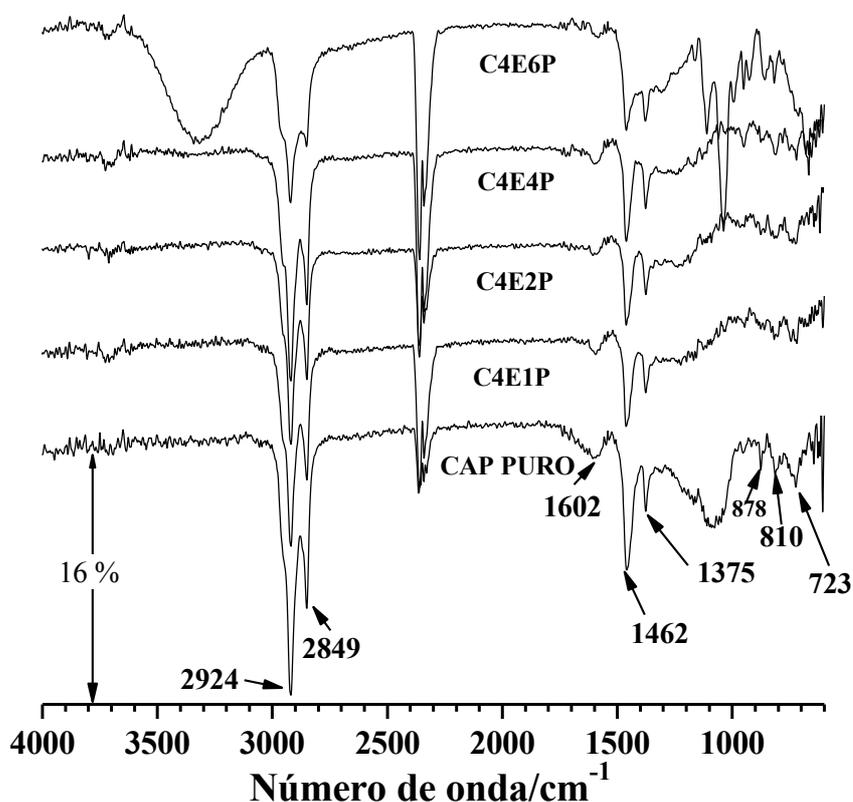


Figura 43 - Os espectros de FTIR das amostras de CAP puro e modificados obtidos na região de 4.000 a 600 cm^{-1} .

A banda forte e larga em 3341 cm^{-1} observada somente na amostra C4E6P é típica de estiramento O-H, o que sugere a presença de água ou umidade nesta amostra. As bandas fortes em 2924 e 2849 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramentos de grupos metil (CH_3) e metileno (CH_2) alifático, respectivamente. Estes grupos também são confirmados pela ocorrência de bandas de vibrações de dobramentos 1462 (CH_3 e CH_2), 1375 (CH_3) e 723 cm^{-1} (CH_2). As bandas fracas em 1602 cm^{-1} são associadas a $\text{C}=\text{C}$ de grupos aromáticos, bem como a 810 cm^{-1} banda típica de dobramento de C-H em aromáticos substituídos (ARAÚJO *et al.*, 2012; KARLSSON e ISACSSON, 2003; LAMONTAGNE *et al.*, 2001).

A aparente ausência de banda de absorção em torno de 1700 cm^{-1} sugere a ausência ou quantidade traços de compostos carboxílicos (C=O), típico de aldeído, cetona ou éster, substâncias orgânicas altamente voláteis.

Tabela 8. Atribuições das bandas observadas nos espectros FTIR das amostras de CAP puro e modificados.

Bandas de absorção (cm^{-1})		Atribuições	Observações
(1)	(2)		
722	723	$\delta_r(\text{CH}_2)_n, n > 4$	Cadeia alifática
746, 814, 874	810, 875	δ C-H em aromáticos substituídos	Aromático
1376	1375	$\delta_{sim} \text{CH}_3$	Alifático
1460	1462	$\delta_{ass} \text{CH}_2, \text{CH}_3$	Alifático
1600	1602	$\nu \text{C}=\text{C}$	Aromático
2860	2849	$\nu \text{C-H} (\text{CH}_2)$	Hidrogênio Alifático
2920	2924	$\nu \text{C-H} (\text{CH}_3)$	Hidrogênio Alifático

Legenda:

⁽¹⁾ ARAÚJO *et. al.*, 2012; KARLSSON e ISACSSON, 2003; LAMONTAGNE *et al.*, 2001.

⁽²⁾ Amostras de CAP puro e modificados.

O metanol pode ser formado por reformação de grupos hidroxila livres e grupos C-O. Os fenóis podem ser formados pela ruptura de ligações de éter. Devido à complexidade da estrutura de ligante betuminoso, muitos grupos funcionais estão contidos nos fenóis gerados, tais como os grupos metoxil e alquil (XU e HUANG, 2010).

Termogravimetria

As curvas de TGA e DTA das amostras de fibra PET reciclada e os asfaltos modificados são mostradas na Figura 44. Graficamente as curvas estudadas de TGA apresentaram padrão de comportamento de perdas de massas muito semelhantes, sendo que a curva da fibra (PET reciclado) apresentou uma maior estabilidade térmica de degradação ($\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$) com perda de massas relativamente brusca resultando num menor intervalo de temperaturas em relação as demais amostras.

Para os CAPs modificados a estabilidade térmica ficou em torno dos $300\text{ }^\circ\text{C}$, esse comportamento garante a temperatura de processabilidade, ou seja, de 0 até $220\text{ }^\circ\text{C}$, na presença de nitrogênio, o qual possibilitou avaliar o comportamento da amostra, bem como a temperatura de degradação da mistura (CUNHA, 2011).

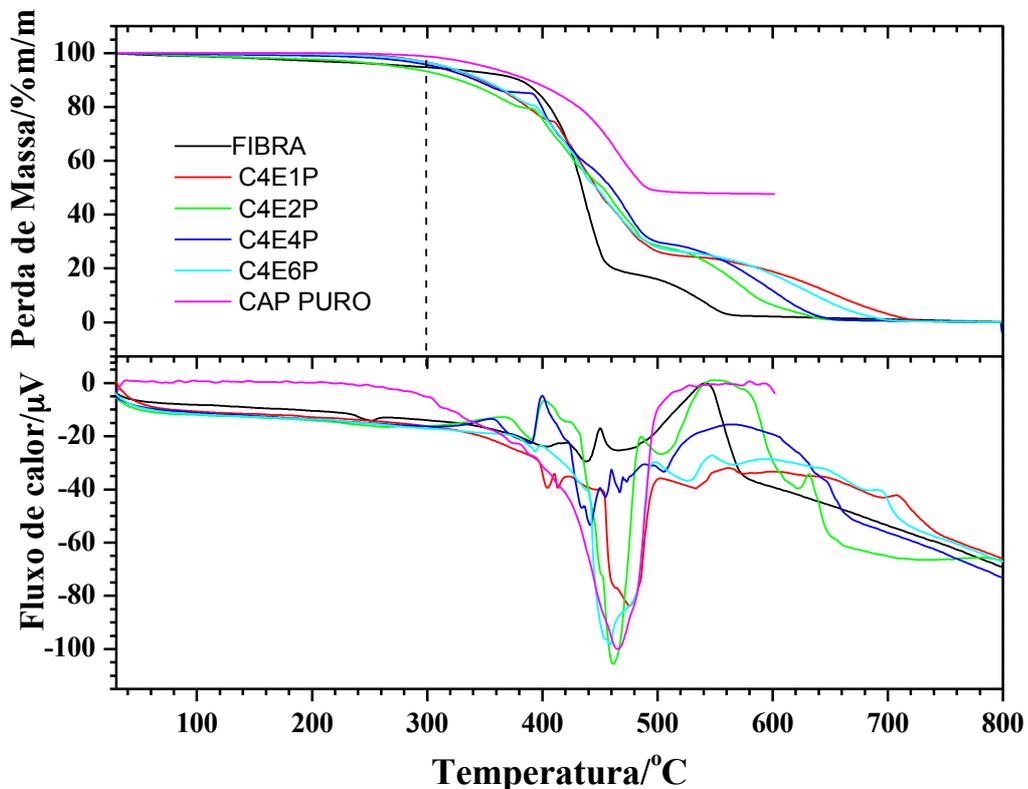


Figura 44 - Curvas TGA e DTA das amostras de fibra PET e os CAPs puro (até 600 °C) e modificados (C4E1P, C4E2P, C4E4P e C4E6P).

As curvas TGA/DTA para o CAP puro foram obtidas no intervalo de temperaturas de 25 a 600 °C. O perfil gráfico da curva TGA mostra aparentemente um único evento térmico de decomposição ocorrendo entre 290 e 490 °C, referente à perda de massa de 51,4 % (Tabela 9), típica de materiais orgânicos da classe de hidrocarbonetos de alta massa molecular. Conforme MOTHÉ (2009) e BRINGEL (2007) referem-se à degradação dos maltenos e asfaltenos, respectivamente.

Pela análise da Figura 44 e da Tabela 9, conjuntamente, observa-se que a degradação da fibra de poliéster reciclado ocorreu a temperatura próxima de 429 °C semelhante às demais amostras, exceto para a amostra CAP puro que teve maior valor de temperatura.

As amostras de CAP modificados tiveram temperatura de início de degradação antes da amostra de CAP puro. Entretanto, esse comportamento era previsto pela presença da

substância usada para aumentar a viscosidade do ligante, mas ainda acima da temperatura máxima de processabilidade do CAP em usina, ou seja, 220 °C no máximo.

Tabela 9. Resumo dos resultados das análises termogravimétricas.

Amostra	T_1	Δm_1	T_2	Δm_2	T_3	Δm_3	%R
Fibra	429	73,7	534	11,9	-	-	2,6
CAP puro	440	51,4	-	-	-	-	-
C4E1P	404	74,4	646	22,4	-	-	0,3
C4E2P	335	15,7	441	50,1	573	24,3	1,2
C4E4P	334	12,1	440	54,4	592	26,1	0,7
C4E6P	402	72,1	627	23,4	-	-	0,8

Legenda:

T é a temperatura em °C que ocorre o evento.

Δm é a variação de massa em certo evento, expresso em percentagem de massa (%mg/mg).

%R é percentagem do resíduo em %mg/mg.

O índice 1 indica o primeiro evento, o índice 2 o segundo e o índice 3 representa o terceiro evento de perda de massas, respectivamente.

As amostras C4E2P e C4E4P apresentaram três eventos térmicos de decomposição, onde se observa um pequeno deslocamento na curva TGA em uma temperatura próxima de 335 °C.

As curvas de DTA das amostras se mostram bastante complexas, o que sugere a ocorrência de degradação de misturas de compostos da classe dos hidrocarbonetos, como maltenos e asfaltenos. Mas, os perfis gráficos dos picos são típicos de comportamento endotérmico, característicos de fenômenos químicos, ou melhor, de reações de degradação dos compostos tipicamente orgânicos presentes nessas amostras.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nos estudos de materiais a importância da MEV diz respeito aos aspectos morfológicos, nesse caso, em relação ao mastique asfáltico formado pelas fibras de PET reciclado e o CAP 50/70.

Mas, na preparação das amostras deveria considerar dois passos de real importância para um melhor resultado: (1) congelar as amostras por criogenização com nitrogênio líquido

(N₂) e (2) abrir um sulco diametral na amostra para uma melhor visualização no microscópio. Após esses dois passos metalizar e efetuar a aquisição da microimagem da superfície da amostra.

A Figura 45 e a Figura 46 mostram as microimagens dos CAP modificados (C4E2P e C4E6P, respectivamente) com ampliações variando de 50 a 350 ×.

Na superfície da amostra C4E2P é observada de forma aleatória algumas linhas de perfis curvas atribuídas às fibras de poliéster reciclado agregadas ao ligante asfáltico com tamanho aproximado de 1,1 mm de comprimento, por outro lado também é observado um típico revelo aparente de aspecto vulcânico que é característico de formação de microbolhas durante a realização do ensaio quando submetido ao bombardeio de elétrons, sem portanto alterar a uniformidade do compósito.

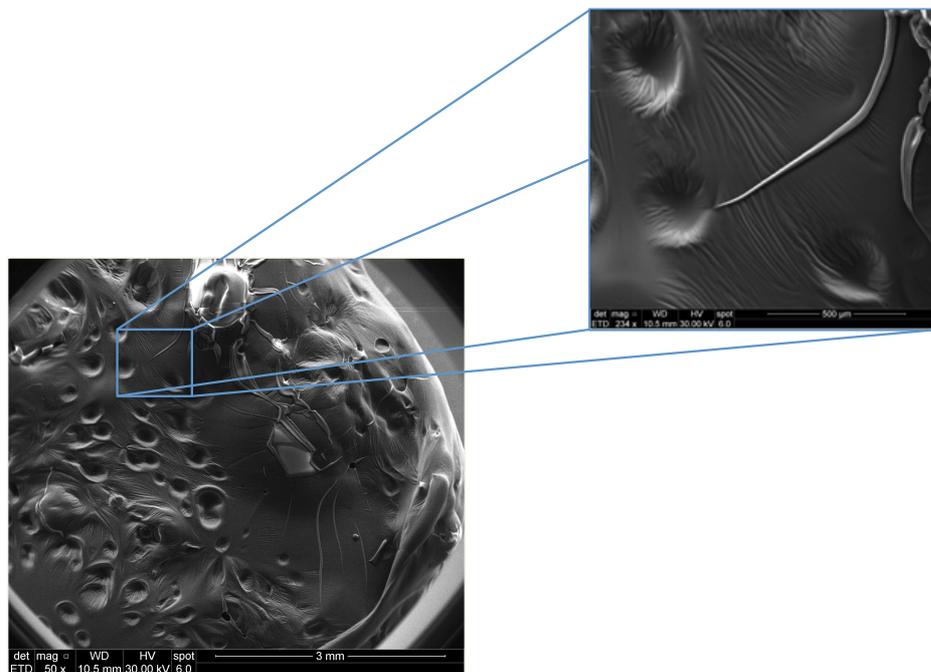


Figura 45 – Microimagem da amostra C4E2P ampliada 50×, e em detalhe a fibra reciclada de PET (perfil em linha curva) agregada no respectivo ligante asfáltico.

A microimagem da amostra C4E6P apresenta comportamento morfológicamente similar ao da amostra C4E2P, distinguindo aparentemente na forma do comportamento da fibra em que sugere está na forma anovelada ou enrolada, com dimensão maior que 0,5 mm, devido ao processo de aquecimento durante a mistura, ou melhor, deixando de ter a forma esticada ou estirada.

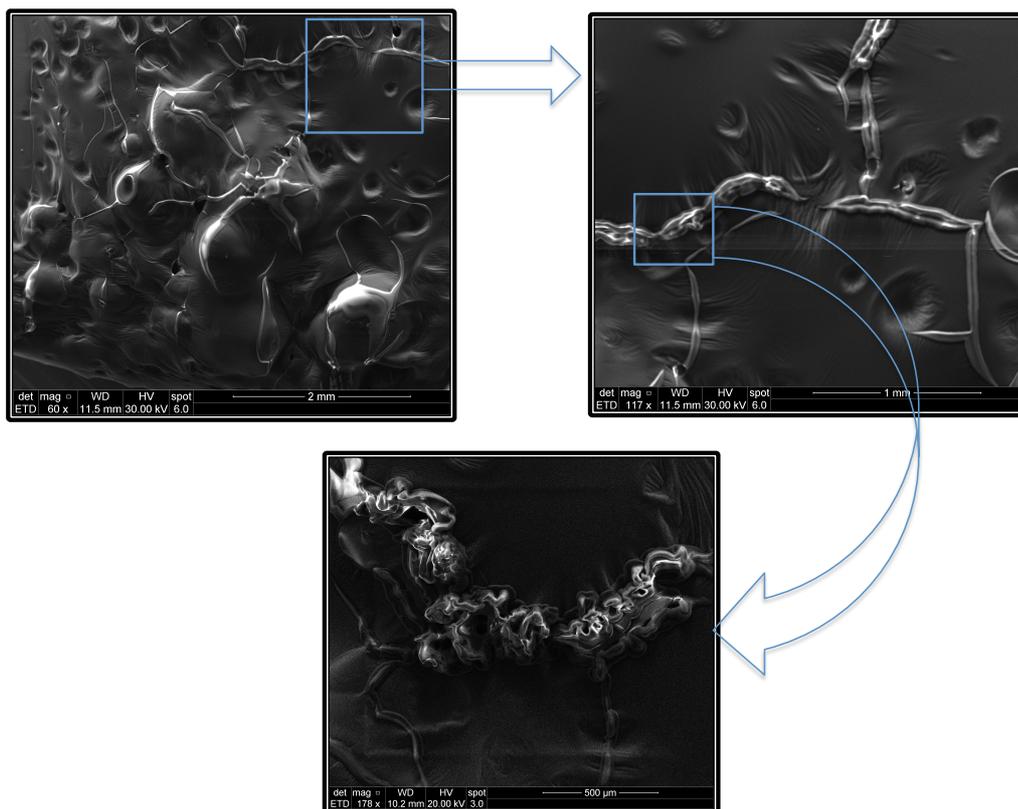


Figura 46 - Microimagem da amostra C4E2P ampliada 60×, e em detalhe a fibra reciclada de PET (perfil em anovelado) agregada no respectivo ligante asfáltico.

5.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Esses ensaios mostram o comportamento do asfalto puro e do ligante modificado frente a condições similares de uso.

Penetração a 25° C (P)

A importância deste ensaio foi saber que a consistência do CAP é tanto maior quanto menor foi a penetração da agulha.

Conforme resultados obtidos e traçados na Figura 47 o ligante modificado é mais resistente à penetração devido ao efeito das fibras de poliéster reciclado.

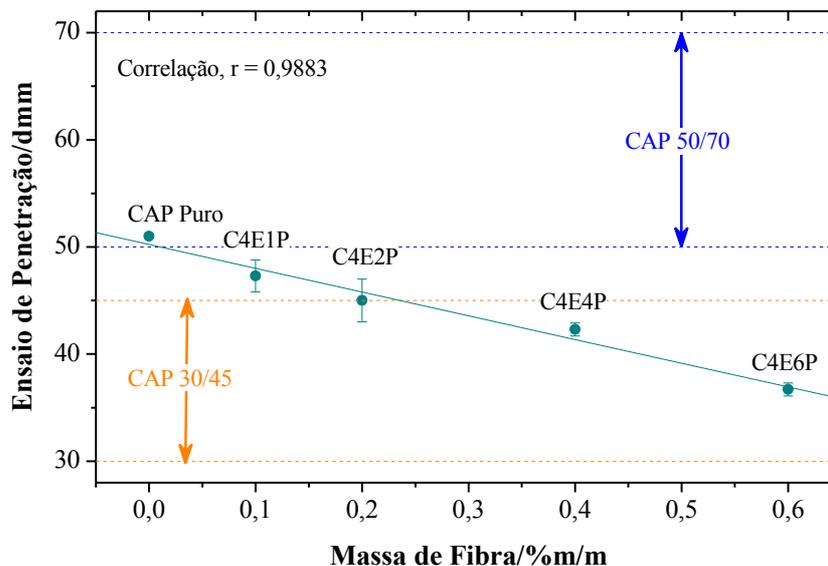


Figura 47 - Resultados do ensaio de Penetração (em dmm)³ nas amostra CAP puro e modificados.

Com a adição de 0,1 % de fibra PET ao CAP puro obteve-se um ganho de 7,2 % de resistência à penetração, 0,2 % o ganho foi de 12,7 %, 0,4 % o ganho foi de 19,3 % e 0,6 % o ganho foi de 33,9 %.

A correlação entre a adição de fibra com o ensaio de penetração mostrou-se ser aparentemente linear, com $r = 0,9883$, e equação $P = -22,155m + 50,227$ (Figura 49) onde P é o valor de ensaio de penetração e m é massa percentual de fibra adicionada ao CAP puro. Os CAPs modificados com 0,4 e 0,6 % de fibra, C4E4P e C4E6P, respectivamente, apresentaram valores dentro da faixa de categoria da ANP para o CAP 30/45, ou seja, mais nobre e de melhor uso para fins rodoviários.

Ponto de amolecimento (PA)

Inicialmente, a adição do Evotherm M1 diminuiu a resistência ao cisalhamento do ligante com valor próximo ao do CAP puro. Entretanto, ao se aumentar o teor de fibra para 0,4 e 0,6 %, esses valores foram mais elevados e satisfatórios, ou seja, a magnitude do aumento realizável do Ponto de Amolecimento é uma função direta da concentração de fibra (CHEN e LIN, 2005).

³ Essa unidade representa a décima parte de 1 mm.

Como a temperatura máxima medida em pavimentos é de aproximadamente 60 °C, com teor de fibra de 0,6 % a amostra ficou próximo desse valor de temperatura. Entretanto, todas as outras amostras apresentaram melhorias dessa relação física. A Figura 48 apresenta a tendência crescente dos valores para as amostras.

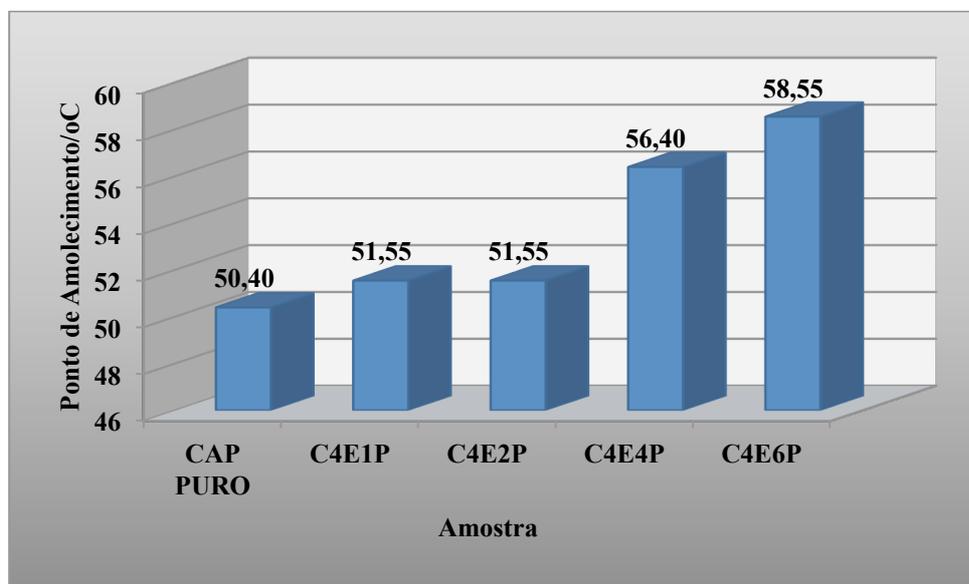


Figura 48 - Resultado do ensaio de Ponto de Amolecimento do CAP puro e amostras modificadas.

O teste foi conduzido com duas amostras (ou duplicata) dos mesmos materiais: CAP 50/70, C4E1P, C4E2P, C4E4P e C4E6P.

O aumento da temperatura de amolecimento do ligante é um importante fator para a avaliação dos comportamentos das misturas, pois pode permitir uma aplicação destas em condições de rodagem com temperaturas ambientes mais elevadas, sem perdas das propriedades mecânicas das mesmas (BOTARO *et al.*, 2006).

As amostras C4E1P e C4E2P melhoram a desempenho do ligante em 2,3 % atingindo para PA de 51,55 °C. Para o melhor CAP produzido no Brasil para fins rodoviários, CAP 30/45, a norma exige para o PA um valor mínimo de 52 °C.

As amostras C4E4P e C4E6P apresentaram resultados de desempenho em termos de aumento na temperatura do ponto de amolecimento da ordem de 11,9 % e 16,2 %, respectivamente.

Durabilidade em estufa RTFOT

Após o ensaio de RTFOT foi medida a variação de massa das misturas, ou melhor, a perda de voláteis ocorrida durante a etapa de envelhecimento, a qual simula os processos de usinagem e compactação em pista, o chamado envelhecimento rápido ou de curto prazo.

A alteração de massa máxima permitida em norma estabelecida pela ANP é de até 0,5 %. A Figura 49 apresenta os resultados obtidos com o envelhecimento do CAP modificado.

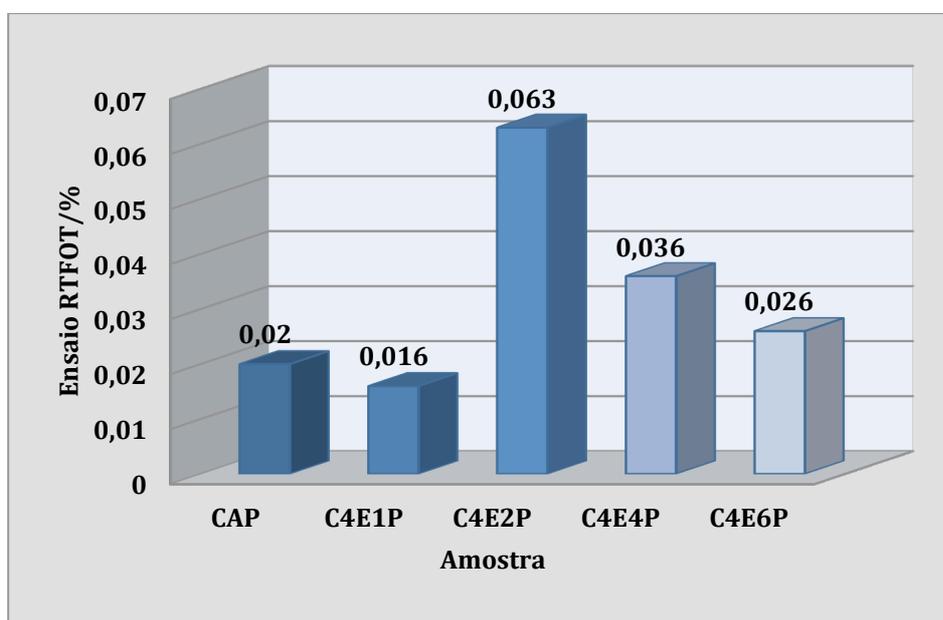


Figura 49 - Resultado do ensaio RTFOT para as amostras de CAP puro e modificados.

Os valores obtidos para todas as amostras estão em conformidade com especificado pela ANP, as discrepâncias dos valores observados para os CAP modificados em comparação com CAP puro não os comprometem e podem ser considerados adequados ao uso na pavimentação rodoviária.

Entretanto, à exceção da amostra C4E1P, todas as outras apresentaram maior variação relativa de massa, conduzindo para um envelhecimento do ligante mais precoce, isso devido provavelmente à decomposição da fibra reciclada, a qual já não conta com as mesmas propriedades físico-químicas de um polímero virgem.

Índice de Susceptibilidade Térmica

O índice de suscetibilidade térmica correlaciona às variações de temperatura e a consistência das misturas asfálticas. Ligantes pouco susceptíveis tornam-se duros e quebradiços, em condições de baixas temperaturas.

Asfaltos mais susceptíveis, com maior IST, modificam sua consistência para pequenas variações de temperatura o que não é uma boa característica.

O IST foi calculado a partir dos valores obtidos nos ensaios de penetração (P) e de ponto de amolecimento (PA) (LUCENA, 2005) conforme expressão matemática de van Doormaal (Equação 6). Com esses resultados pode-se plotar o gráfico mostrado na Figura 50.

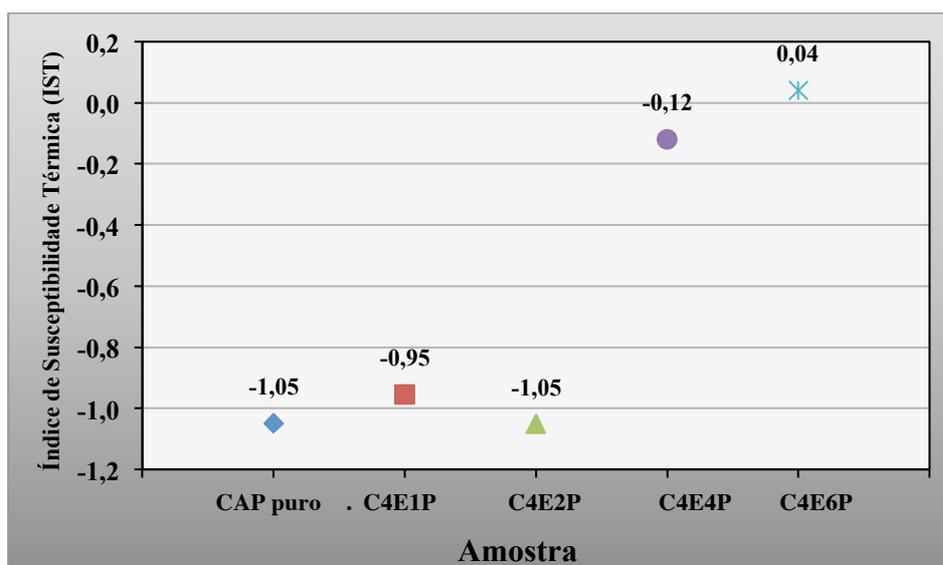


Figura 50 - Resultados do Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) para as amostras CAP puro e modificados (C4E1P, C4E2P, C4E4P e C4E6P).

Quanto menor o IST de um cimento asfáltico, em valor absoluto, menor será a sua susceptibilidade térmica. A atual norma brasileira que classifica os CAPs estabelece uma faixa admissível para o IST entre -1,5 e +0,7 (BERNUCCI *et al.*, 2006).

As amostras analisadas tiveram valores IST entre -1,0 e 0, esses resultados sugerem que essas amostras apresentam comportamento de baixa oxidação (resistente ao envelhecimento) e baixa tenacidade (resistente a trincamento ou fratura), bem como resistente a deformação permanente mediante a variação de temperatura, que os qualificam como

ligante para uso rodoviário. E estes estão em conformidade com a especificação ANP que determina limites de valores IST inferior de -1,5 e superior de 1,0, respectivamente.

O valor IST zero significa susceptibilidade mais adequada, e valores abaixo de -1,5 indicam CAPs muito susceptíveis, ou seja, que variam muito de consistência com a temperatura.

5.4. ENSAIOS DE REOMETRIA

As propriedades reológicas do CAP puro e das amostras modificadas obtidas através da análise no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico em fluxo oscilatório de pequena amplitude foram: o módulo de cisalhamento complexo (G^*), bem como seus dois componentes, o módulo elástico (G') e o módulo viscoso (G''), e ainda o ângulo de mudança de fase (δ), o qual serve de indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não recuperável.

Segundo Cunha (2011), o valor do módulo de perda, G'' , reflete a natureza das reações químicas que controlam as mudanças conformacionais moleculares e o deslocamento de moléculas em relação a outras, enquanto o módulo elástico, G' , reflete a rigidez das moléculas e a sua disposição no interior do material.

Considera-se que quanto maior o valor de G' a uma dada frequência, maior a elasticidade do ligante. Ou seja, o módulo de armazenamento indica que a energia de tensão é temporariamente armazenada durante o teste, porém pode ser recuperada mais tarde.

Entretanto, quanto maior o módulo de perda G'' maior sua contribuição viscosa ou dissipação de energia a cada ciclo de simulação de frequência de tráfego. Isto é, o módulo de perda indica que a energia usada para iniciar o fluxo é irreversivelmente perdida, sendo transformada em calor de cisalhamento.

Para os pavimentos resistirem à deformação permanente, um alto valor de G^* e um baixo valor de δ são desejados. Quanto maior o valor de G^* , mais rígido e por isso mais resistente à formação de trilha de roda no concreto asfáltico. Quanto mais baixo for o valor de

δ , mais elástico o pavimento. O aumento do teor de fibras, geralmente conduz a um aumento do módulo complexo (CHEN e LIN, 2005).

Reometria de Cisalhamento Dinâmico

Para Yao e colaboradores (2013) valores maiores dos módulos de cisalhamento (G') e da resistência à deformação permanente ($G^*/\text{sen}\delta$) nos asfaltos modificados revelam que esses asfaltos podem devolver mais energia quando o carregamento é aplicado sobre eles. Da mesma forma, isso também indica que os asfaltos modificados têm mais capacidade de resistir à deformação permanente e fissura por fadiga em temperaturas altas e intermediárias.

A Figura 51 apresenta as Curvas Mestras do Módulo Elástico (G') em função da frequência para as amostras de CAP puro e modificados.

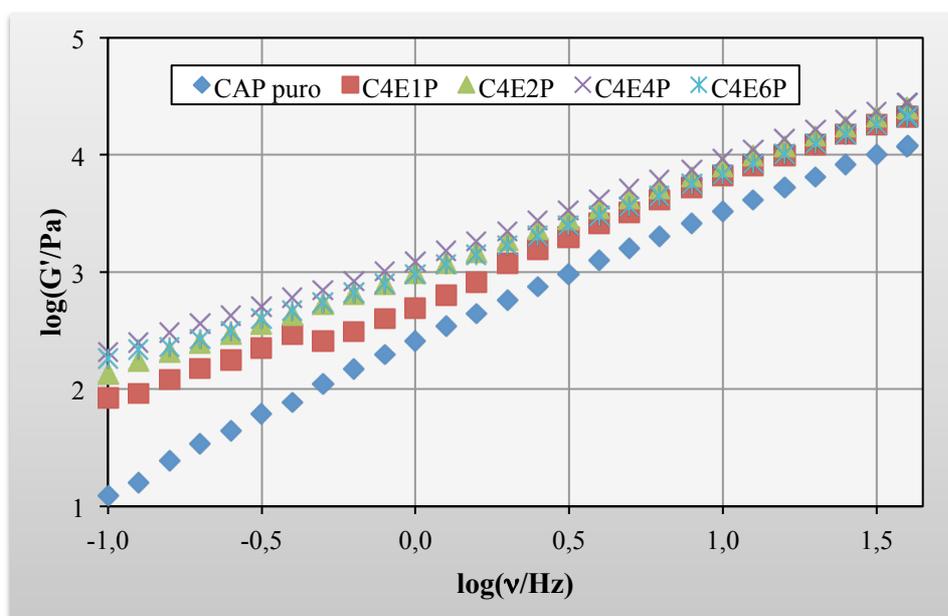


Figura 51 – Curvas Mestras do Módulo Elástico (G') em função da frequência (ν) para as amostras de CAP puro e modificados.

Os CAP modificados apresentaram valores de módulo elástico maiores que os do CAP puro. Esse resultado reforça as expectativas em que as fibras de PET reciclado melhoraram o desempenho do asfalto aumentando sua resposta elástica, ou seja, sua rigidez.

Por outro lado, a Figura 52 mostra perfil gráfico da curva Mestra do Módulo de Perda em função da frequência para as mesmas amostras, em que apresentaram comportamento

similar ao Módulo Elástico. As amostras de CAP modificados apresentaram valores de módulo de perda maiores que o do CAP puro. Esses resultados sugerem que caso ocorram deformações, estas podem ser permanentes.

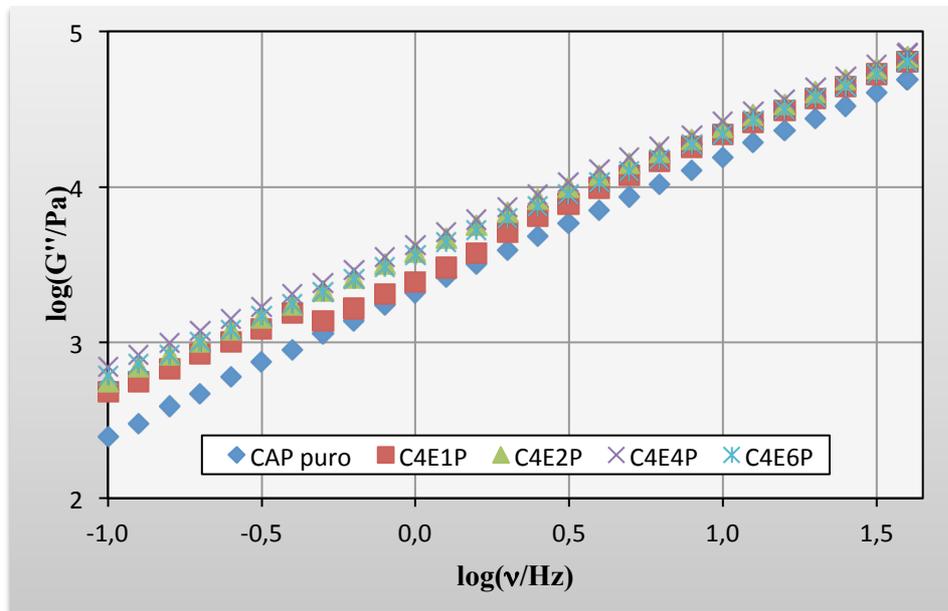


Figura 52 – Curvas Mestras do Módulo Elástico (G'') em função da frequência (ν) das amostras de CAP puro e modificados.

O módulo de cisalhamento complexo (G^*) é definido como a razão de cisalhamento máximo com a deformação máxima e indica a medida da resistência total e a deformação quando o ligante é sujeito a um dado carregamento (CUNHA, 2011).

A seguir na Figura 53 são apresentados os resultados do módulo complexo (G^*) onde foram traçadas as Curvas Mestras de cada amostra.

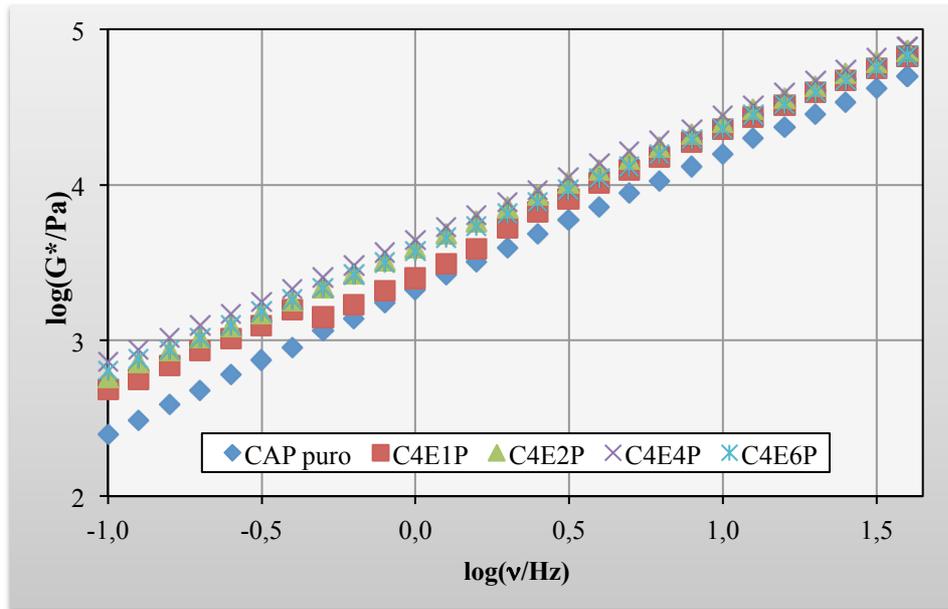


Figura 53 - Curvas Mestras do Módulo Complexo (G^*) em função da frequência (ν) das amostras de CAP puro e modificados.

O ângulo de fase é um indicador da quantidade relativa de recuperação e perda por deformação. A Figura 54 apresenta os resultados do ângulo de fase.

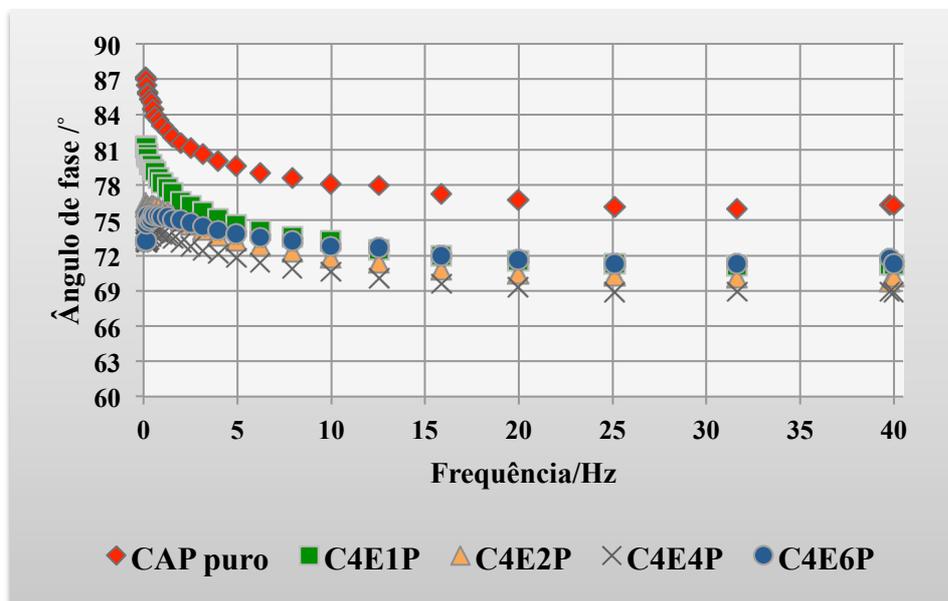


Figura 54 - Ângulo de fase das amostras de CAP puro e modificados.

Importante ressaltar que um alto módulo de cisalhamento complexo (G^*) representará maior rigidez enquanto um menor ângulo de fase (δ) representará uma maior resposta elástica, portanto, recuperável (LUCENA *et al.* 2004).

Os ângulos de fase δ das amostras de CAP modificados foram menores quando comparados com o CAP puro. Para Ahmedzade (2013) um ângulo de fase menor que o da amostra pura representa maior resistência à deformação permanente.

Pelos resultados expostos podemos afirmar que as amostras de CAP modificados têm comportamento de desempenho melhor que a amostra de CAP puro, haja vista que todos os módulos foram superiores em valores ao encontrados para o CAP 50/70 puro.

A análise do Módulo Complexo (G^*) em função do Ângulo de mudança fase (δ) é importante por fornecer uma visão geral das principais modificações de desempenho adquiridas pelo CAP puro (Figura 55).

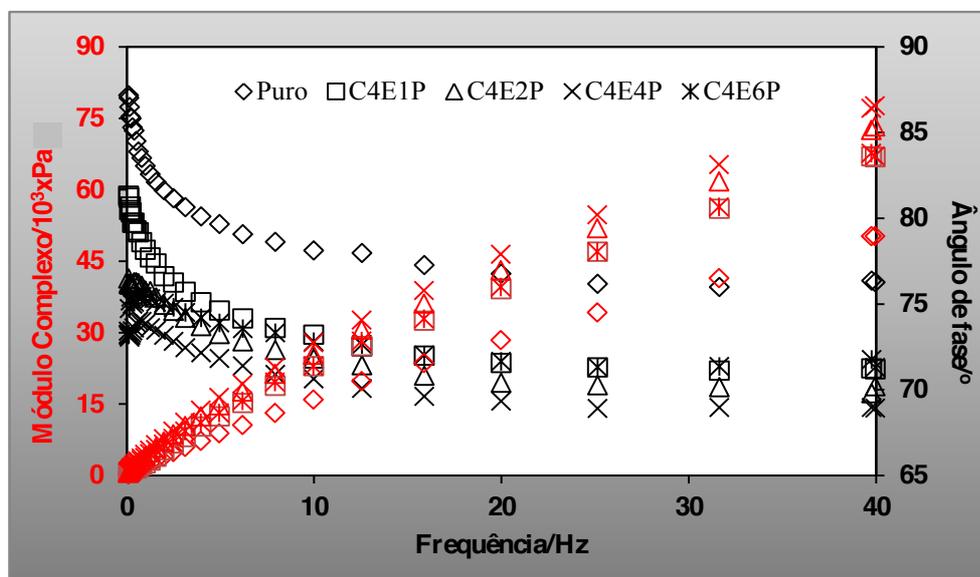


Figura 55 - Módulo Complexo (G^*) e Ângulo de Fase (δ) versus frequência das amostras de CAP puro e modificado

Através do gráfico o G^* aumenta enquanto o δ diminui tornando as amostras modificadas mais elásticas ao se afastar o δ de 90° .

Para garantir adequada resistência à deformação permanente de um ligante, os valores $G^*/\text{sen}\delta$ devem ser maiores que 1,0 kPa para amostras não envelhecidas e de 2,2 kPa para amostras envelhecidas no RTFOT (CAVALCANTI, 2010).

A resistência à deformação permanente aumenta de acordo com o acréscimo percentual de modificador no CAP puro (KUMAR *et al.*, 2010), nesse caso fibras de PET reciclado.

Para valores de $G^*/\text{sen}\delta > 1$ indica maior rigidez do ligante, portanto, uma melhor resistência à deformação permanente (AKSETTY, 2011).

Ambas as afirmações podem ser confirmadas com a Figura 56 obtida dos ensaios realizados, onde a adição de fibras aumentou a resistência à deformação das amostras CAP modificados.

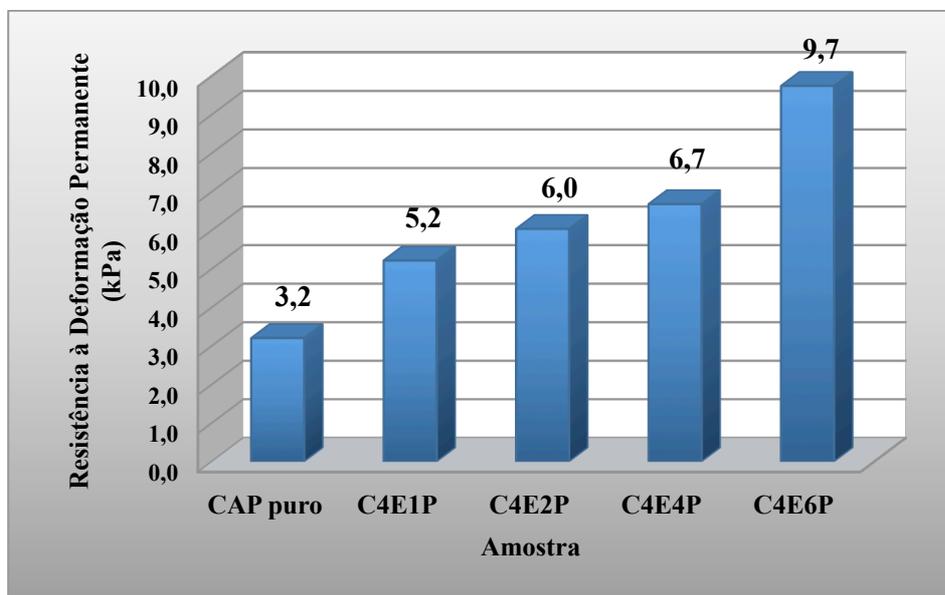


Figura 56 - Resistência à Deformação Permanente das amostras CAP puro e modificados.

A amostra C4E6P foi a que apresentou maior valor de resistência à deformação permanente, o que sugere maior resistência à formação de trilhas de roda. As amostras C4E1P, C4E2P e C4E4P em média duplicaram a resistência à deformação da amostra do CAP puro, enquanto que a amostra C4E6P aumentou a resistência em torno de 3 vezes quando comparado com o CAP puro.

Viscosidade Dinâmica (Brookfield)

O viscosímetro Brookfield permite obter o gráfico de viscosidade *versus* temperatura para as amostras CAP puro e modificados, por meio de medida do comportamento do fluido a

diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação do cilindro coaxial (*Spindle 21*) que ficou mergulhado nas amostras em ensaios.

Nos ensaios obteve-se uma maior viscosidade em todas as temperaturas para amostras CAP modificados, significando que as suas características de reforço e durabilidade foram favoravelmente alteradas em relação ao CAP puro (Figura 57).

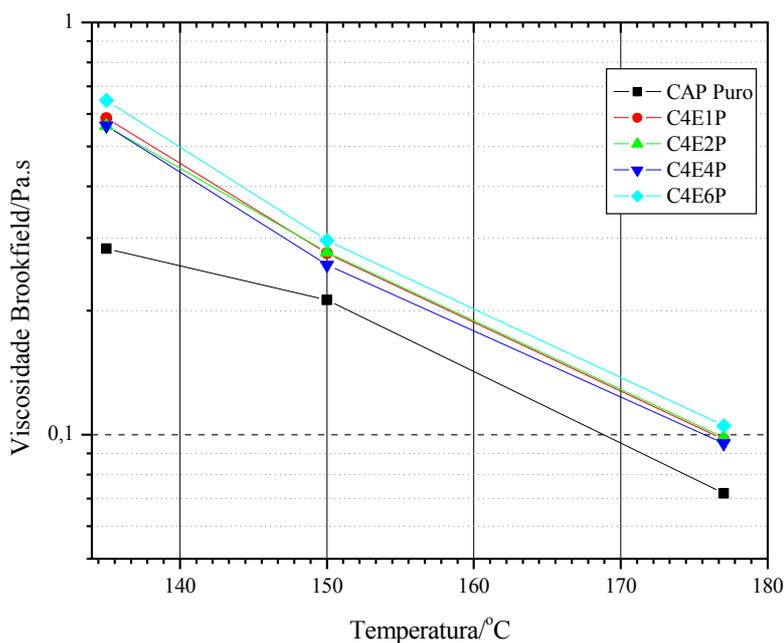


Figura 57 - Gráfico da viscosidade Brookfield (Pa s) para as amostras CAP puro e modificados.

Inicialmente, observa-se que a 135 °C a viscosidade das amostras CAP modificados é superior 0,3 Pa s em comparação com amostra CAP puro. Porém, a 150 °C esse diferença se reduz significativamente, ficando com uma diferença de aproximadamente de 0,07 Pa s. Sendo a amostra C4E4P a que mais se aproxima da viscosidade do CAP puro, em uma diferença de 0,04 Pa s. As viscosidades das amostras CAP modificados, a temperatura de 177 °C, apresentam uma aparente convergência para o valor de viscosidade da amostra CAP puro, em que atinge uma diferença de aproximadamente de 0,02 Pa s para a amostra C4E4P. Esses resultados indicam que no intervalo de temperatura de 150 a 177 °C a fluidez das amostras CAP modificados é similar a da amostra CAP puro. Logo, nesse intervalo de temperatura pode-se garantir excelente trabalhabilidade das amostras CAP modificados.

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos do ensaio de viscosidade dinâmica para as amostras estudadas.

Tabela 10. Resultado dos ensaios de Viscosidade Dinâmica (em Pa s) das amostras CAP puro e modificados.

Temperatura/°C	Viscosidade Dinâmica/Pa s						
	CAP 30/45 ⁽¹⁾	CAP 50/70 ⁽¹⁾	CAP puro	C4E1P	C4E2P	C4E4P	C4E6P
135	≥ 0,374	≥ 0,274	0,283	0,586	0,561	0,562	0,647
150	≥ 0,203	≥ 0,122	0,212	0,275	0,277	0,258	0,296
177	0,076 a 0,285	0,057 a 0,285	0,072	0,097	0,098	0,095	0,105

Legenda: ⁽¹⁾ Resolução N° 19/2005 – ANP.

A comparação dos resultados da amostra C4E1P (mínimo de fibra de reforço) com outros estudos similares demonstra uma melhor trabalhabilidade em relação a viscosidade e maior resistência à penetração (Tabela 11).

Tabela 11. Resultados de viscosidade Brookfield e penetração da amostra C4E1P comparados com outros similares obtidos da literatura.

Amostra	Viscosidade Brookfield/Pa s			Penetração /dmm	Referência
	135 °C	150 °C	177 °C		
C4E1P (CAP 50/70+0,4% Evotherm+ 0,1% PET)	0,585	0,275	0,097	47	-
CAP 50/70 + 4% EVA	1,600	0,780	0,270	52	D'Antona, 2009
CAP 50/70+Fibra Vegetal +2% SBS	0,870	0,386	0,139	47	Cunha, 2011

Considerando todos os resultados obtidos pelos testes com os CAP modificados a temperatura intermediária no DSR e no viscosímetro Brookfield, os mesmos mostram que houve um aumento do módulo complexo (G^*) e do parâmetro que indicia a resistência à deformação permanente ($G^*/\sin\delta$), além da diminuição do ângulo de fase (δ) quando comparamos os valores com o CAP puro. Conseqüentemente, o uso do PET reciclado e do aditivo químico Evotherm M1 nas quantidades proporcionais demonstraram melhorias nas propriedades elástica e resistência.

A temperatura do CAP puro no momento de ser misturado ao agregado (usinagem) deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre $0,17 \pm 0,02$ Pa s quando medida com o viscosímetro Brookfield. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C nem

superior a 177 °C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15 °C acima da temperatura definida para o CAP puro, sem ultrapassar 177 °C. A temperatura de compactação (lançamento em pista) deve ser tal que o CAP puro apresente viscosidades $0,28 \pm 0,03$ Pa s (DNIT, 2006b). A Tabela 12 mostra os valores máximos e mínimos para a temperatura de usinagem e compactação (TUC).

Tabela 12. Especificações da Viscosidade Brookfield para TUC.

Condição de Trabalho	Viscosidade Brookfield de CAP 50/70/Pa s (Norma DNIT 031/2006)	
	Mínimo	Máximo
Usinagem	0,15	0,19
Compactação	0,25	0,31

Conforme encontrado nas literaturas, os gráficos de TUC's mostram detalhes relacionados com as faixas de temperaturas de usinagem e compactação. Assim sendo, as Figuras 59 a 64 mostram o comportamento da viscosidade Brookfield e as estimativas dos intervalos de temperaturas para as condições de trabalho de usinagem e compactação para as amostras de CAP puro e modificados.

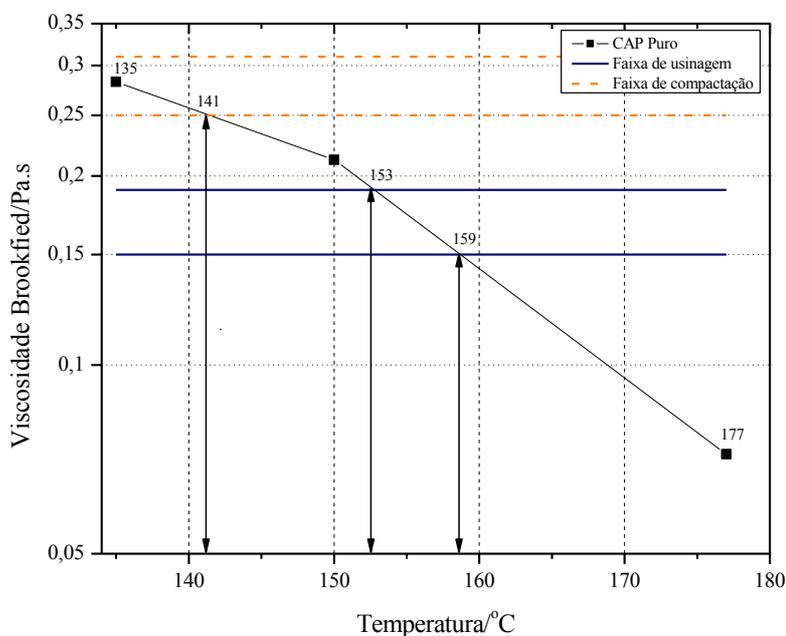


Figura 58 - Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra CAP puro.

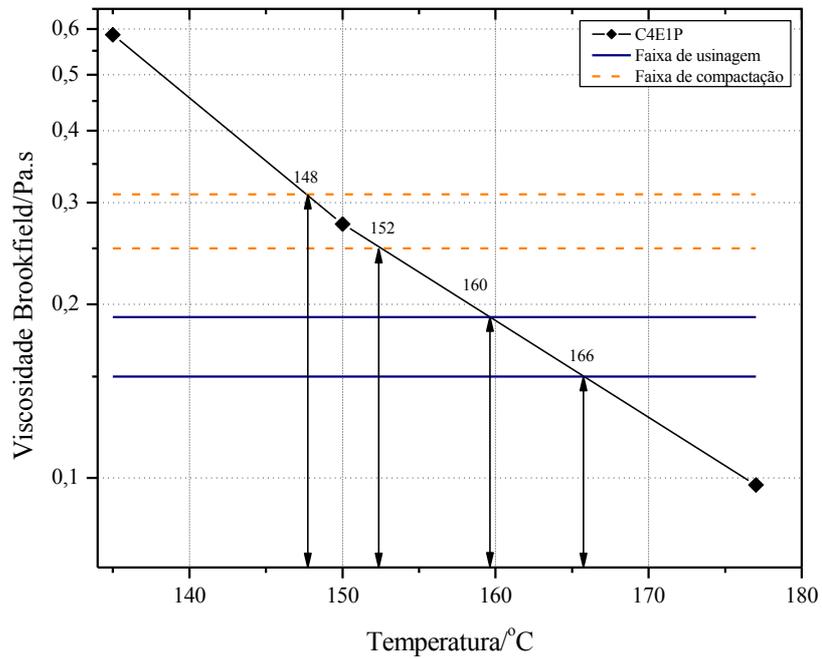


Figura 59 - Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E1P.

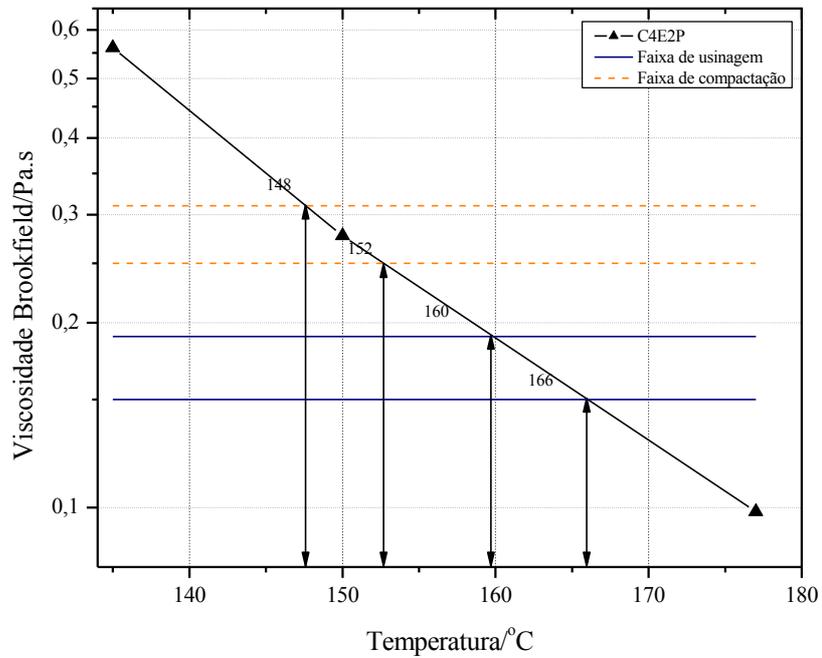


Figura 60 - Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E2P.

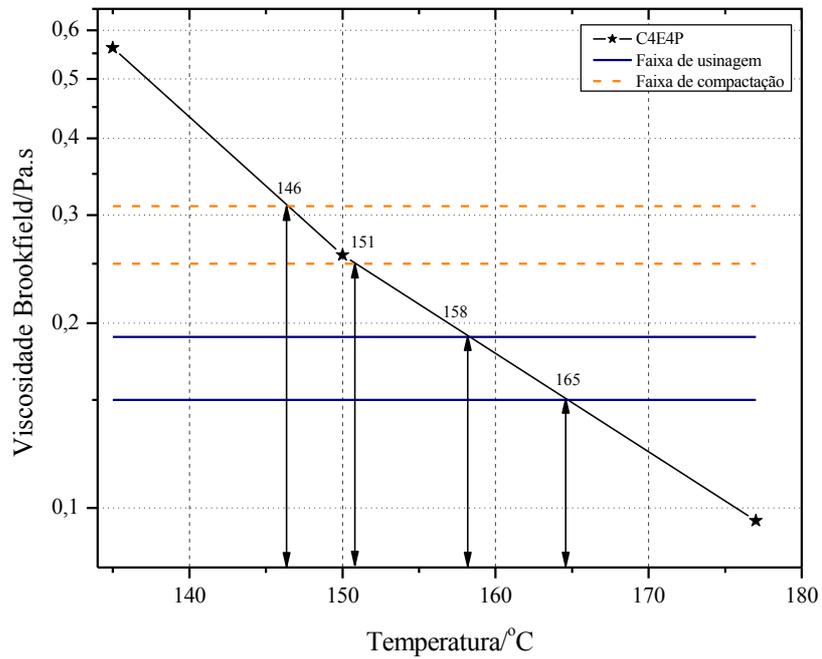


Figura 61 - Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E4P.

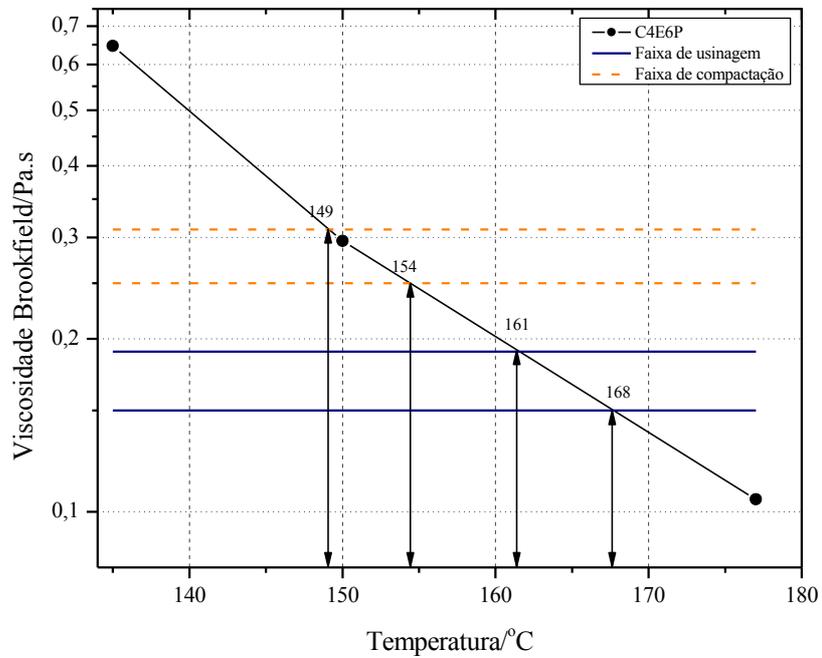


Figura 62 - Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para a amostra C4E6P.

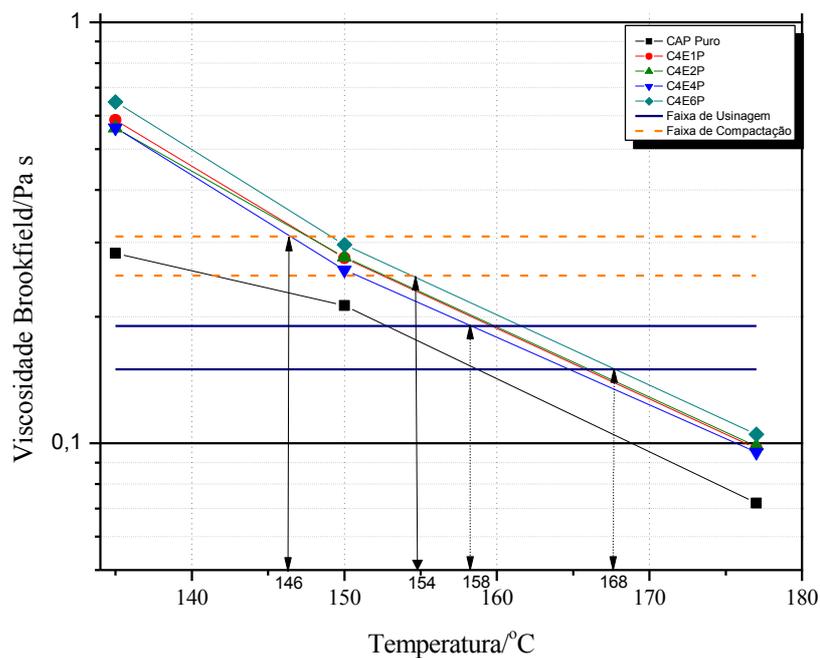


Figura 63- Gráfico da Viscosidade Brookfield *versus* Temperatura com as estimativas de faixa de temperaturas de condição de trabalho de usinagem e compactação para as amostras CAP puro e modificados.

A partir da Figura 63 foram estimadas as faixas de temperaturas de usinagem de 158 a 168 °C e de compactação de 146 a 154 °C, com segurança para essas condições de trabalhos para as amostras CAP modificados, esses valores de temperaturas estão em conformidade com a Norma DNIT 031/2006-ES.

6. CONCLUSÕES

A adição de fibra de PET ao CAP 50/70 nas proporções estudadas foram satisfatórias na fase de preparação (homogeneização) das misturas definidas inicialmente e que houve melhoria de suas propriedades físicas e reológicas, além de manter suas características químicas próximas ao do ligante puro.

O uso do aditivo químico Evotherm influenciou positivamente para a homogeneização da mistura CAP e fibra de poliéster, onde a temperatura próxima de 140 °C mostrou-se adequada para tal fim. Essa temperatura é cerca de 20 °C menor que as comumente usadas em usinas de produção de concreto asfáltico em conformidade com a faixa de temperaturas de usinagem. Tal temperatura de usinagem requer menor de energia e redução de emissão de gases de efeito estufa.

A análise das curvas TGA mostrou que a degradação térmica da fibra de PET reciclado ocorreu antes da amostra de CAP puro. A partir de 300 °C, a decomposição das amostras de CAP modificados aconteceu em valores de temperaturas inferiores ao do CAP puro, mas acima dos valores de temperaturas de PET reciclado, mantendo-se em uma região intermediária entre os dois materiais. Não obstante, as amostras de CAP modificados mostraram possuir resistência térmica suficiente para o uso industrial e em serviço.

De acordo com a análise de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram identificados grupos funcionais alifáticos, aromáticos e carbonila nas amostras de CAP modificados seguindo na maior parte as mesmas características do CAP puro.

A análise da morfologia das misturas modificadas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que as fibras estão aderidas ao CAP puro, de onde se prevê que essas não se descolarão no momento da usinagem da mistura asfáltica e nem durante sua vida em serviço.

O envelhecimento em estufa RTFOT mostrou que a exceção da amostra C4E1P as demais apresentaram maior variação de massa em comparação ao CAP puro. Essa característica das amostras modificadas indica uma maior tendência a um envelhecimento

mais precoce dessas. Esse fato se justifica pelo uso do produto reciclado, o qual ao longo das inúmeras reciclagens perde suas características iniciais.

O ângulo de mudança de fase (δ) decresceu e o módulo complexo (G^*) foi maior para todas as misturas, o que se correlaciona diretamente com uma maior rigidez e menor deformação permanente das misturas (CAP 50/70 + Evotherm + fibra PET reciclado).

Os ensaios de penetração (P), ponto de amolecimento (PA) e viscosidade Brookfield (VB) das amostras CAP modificados apresentaram valores consistentes com CAP 30/45 segundo as especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o que indica fortemente a sua adequação ao uso em pavimentos rodoviários ou em ruas de grande tráfego de cidades como Manaus.

Além disso, os resultados desse estudo apresentaram valores de ensaios físicos e reológicos próximos ou melhores que outras pesquisas com materiais poliméricos (SBS e EVA) e CAP 50/70.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADINIA, E.; ZAGAR, M.; KARIM, M. R.; ABDELAZIZ, M.; SHAPHIG, P.; Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. **Materials & Design**, v. 32, n. 10, p. 4844–4849, 2011.

AHMEDZADE, P.; The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 285–291, 2013.

AIREY, G. D.; Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 8, p. 473–487, 2002.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro. 2012.

ARAÚJO, L. E. O.; FROTA, C. A.; A atualidade das políticas de pneus inservíveis: aspectos gerais e locais. **T&C Amazônia**, v. IX, n. 21, p. 31–36, 2011.

ARAÚJO, L. E. O.; PIKANÇO, H. M.; FROTA, C. A. **Diagnóstico da geração e reciclagem de resíduos de construção e demolição na cidade de Manaus**. In: 17^a. RPU - Reunião de Pavimentação Urbana. Anais. Porto Alegre: 2011.

ARAÚJO, M. F. A. S; LINS, V. F. C; PASA, V. M. D.; Infrared spectroscopy study of photodegradation of polymer modified asphalt binder. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, p. 3275–3281, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **SP-1 Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specifications and Testing**. 3rd. ed., Lexington. USA: Asphalt Institute, 2003, 61 p.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. 7th. ed., Lexington. Asphalt Institute. USA. 2007, 788 p.

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A.; ANDERSON, R.M.; **NCHRP REPORT 459 - Characterization of modified asphalt binder in Superpave mix design**. Transportation Research Board (TRB). Washington, DC. 2001.

BARNOSKY, A. D. Approaching a state shift in Earth's biosphere. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 52–8, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras/ABEDA. 2006, 504 p.

BOTARO, V. R. CASTRO, S. R.; RODRIGUES, F.; CERANTOLA, A. E.; Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organossolve. **Revista Escola de Minas (REM)**, v. 59, n. 1, p. 117–122, 2006.

BRASIL. **Lei 12.187. Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)**. 2009.

BRASIL. **Lei 12.305. Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2010.

BRINGEL, R. M.; **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC), 2007.

BROECKER, W. S.; Climatic change : Are we on the brink of a pronounced global warming? **Science**, v. 189, n. 4201, p. 460–463, 1975.

CASTRO, A. L. DE; LIBORIO, J. B. L; PANDOLFELLI, V. C.; Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, v. 57, p. 63–75, 2011.

CASTRO, L. N.; **Reciclagem à Frio “in situ” com Espuma de Asfalto**. Dissertação de mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2003.

CAVALCANTE, D. G.; CRISÓSTOMO, P. H. S.; SILVA, L. C. P.; SOUZA, R. J. Q.; D'ANTONA, D. M.; FROTA, C. A.; Levantamento visual das patologias na cidade de Manaus-AM. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. Maio, n. 19, p. 77–87, 2012.

CAVALCANTI, L.; **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2010.

CHEN, H; XU, Q.; Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. **Fuel**, v. 89, n. 7, p. 1616–1622, 2010.

CHEN, J.-S; LIN, K.-Y.; Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. **Journal of Materials Science**, v. 40, n. 1, p. 87–95, 2005.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília: 2012.

CRISPINO, M; MARIANI, E; TORALDO, E.; Assessment of fiber-reinforced bituminous mixtures' compaction temperatures through mastics viscosity tests. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1031–1039, 2013.

CUNHA, T. M. F.; **Estudo do Comportamento Físico, Químico e Reológico de Ligante Asfáltico Modificado com Polímero e Materiais Advindos e Plantas Amazônicas para Aplicação em Revestimento Asfáltico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, 2011.

D'ANGELO, J. HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHID, M.; JONES, W. NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B.; **Warm-Mix asphalt : European Practice**. FHWA-PL-08-007. Washington, DC. 2008.

D'ANTONA, D. M. G.; **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado por Polímero EVA e Resíduo da Construção Civil para as Vias Urbanas de Manaus**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, 2009.

DA SILVA, L. S.; FORTE, M. M. C.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A.; Polímeros como Modificadores Asfálticos. **Transportes**, v. 10, n. 1, 2002.

DIVYA, P. S.; GIDEON, C. S.; MURALI KRISHNAN, J.; Influence of the Type of Binder and Crumb Rubber on the Creep and Recovery of Crumb Rubber Modified Bitumen. **Journal of Materials in Civil Engineering**, n. April, p. 438–449, 2013.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 010-79**. Brasília, 1979.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA. **DNIT 031/2006-ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**, 2006b.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA. **Manual de Pavimentação**. 3^a. ed., Rio de Janeiro. 2006, 274p.

DURRIEU, F; FARCAS, F; MOUILLET, V.; The influence of UV aging of a Styrene/Butadiene/Styrene modified bitumen: Comparison between laboratory and on site aging. **Fuel**, v. 86, p. 1446–1451, 2007.

FERNANDES, D; MACHADO, C.; Adoção da certificação LEED em meios de hospedagem: esverdeando a hotelaria? **RAE - Revista de Administração de Empresas**, v. 52, n. 2, p. 179–192, 2011.

FERNANDES, P. R. N.; **Caracterização de Ligante Asfáltico Brasileiro e Avaliação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

FERREIRA, E. M.; **Gestão da Qualidade na Reciclagem de PET para Transformação em Cobertura Ecológica em Indústria na Cidade de Manaus (AM)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus, 2009.

FERRIS, S; BLACK, E; CLELLAND, J.; Aromatic structure in asphalt fractions. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 6, n. 2, p. 127–132, 1967.

FONTANA FILHO, A.; **Análise Laboratorial de Misturas Asfálticas Abertas Usinadas a Quente com a Utilização de Diferentes Ligantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2009.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L.; MELO, D. M.; SANTOS, M. G. R.; Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada. **Cerâmica**, v. 53, p. 255–262, 2007.

GANDHI, T.; **Effects of Warm Asphalt Additives on Asphalt Binder and Mixture Properties**. Thesys. Clemson University, 2008.

GARIBALDI, C. M; SOARES, L; AUGUSTO FILHO, O.; Sistemática para Gestão de Passivos Ambientais Associados a Escorregamentos em Rodovias. **Geotecnia**, v. 125, n. Julho, p. 41–68, 2012.

GOLDEMBERG, J; LUCON, O.; Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007.

GONÇALVES-DIAS, S. L. F; TEODÓSIO, A. D. S. D. S.; Estrutura da cadeia reversa: “caminhos” e “descaminhos” da embalagem PET. **Produção**, v. 16, n. 3, p. 429–441, 2006.

JAMSHIDI, A; HAMZAH, M. O; YOU, Z.; Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 530–553, 2013.

KARLSSON, R; ISACSSON, U.; Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. April, p. 157–165, 2003.

KOENDERS, B. G. STOKER, D. A.; BOWEN, C.; de GROOT, P.; LARSEN, O.; HARDY, D.; WILNS, K. P.; **Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures**. In: 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Anais. Barcelona: 2000. Disponível em:<<http://www.eecongress.org/2000/pdfbook3/session3/Proc0088uk.pdf>>. Acesso em: 25 mar 2013.

KUMAR, P; MEHNDIRATTA, H; SINGH, K.; Comparative study of rheological behavior of modified binders for high-temperature areas. **Journal of Materials in Civil Engineering**, n. October, p. 978–984, 2010.

LAMONTAGNE, J.; DUMAS, P.; MOUILLET, V.; KISTER, J.; Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques : application to road bitumens. **Fuel**, v. 80, p. 483–488, 2001.

LEE, J. S. ; AKISETTY, C. K.; AMIRKHANIAN, S. N.; The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 7, p. 1368-1376, 2008.

LEITE, F. C.; **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Universidade de São Paulo (USP). 2007.

LEITE, L. F. M.; **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado. Instituto de Macromoléculas Eloisa Mano (IMA). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 1999.

LESUEUR, D.; The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in colloid and interface science**, v. 145, n. 1-2, p. 42–82, 2009.

LIAO, M; CHEN, J; TSOU, K.; Fatigue characteristics of bitumen-filler mastics and asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 7, p. 916–923, 2012.

LIBERATORI, L. A.; **Estudos de Cimentos Asfálticos Modificados por Asfaltita e sua Influência em Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2000.

LINS, V. F. C.; ARAÚJO, M. F. A. S.; YOSHIDA, M. I.; FERRAZ, V. P.; ANDRADA, D. M.; LAMEIRAS, F. S.; Photodegradation of hot-mix asphalt. **Fuel**, v. 87, p. 3254–3261, 2008.

LIU, C.; LIU, Q.; ZHU, G.; Rheological characteristics of aged asphalt binder. **Journal of Central South University of Technology**, v. 15, p. 298–301, 2008.

LU, X; ISACSSON, U.; Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. **Fuel**, v. 77, n. 9, p. 961–972, 1998.

LUCENA, M. C. C; SOARES, S. A; SOARES, J. B.; **Efeito da adição de SBS nas propriedades químicas e reológicas de asfalto oriundo de petróleo brasileiro**. IN: 2°. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Anais. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/4009.pdf>>. Acesso em: 17 abr 2013

LUCENA, M. DA C. C.; **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Ceará (UFC), 2005.

LUCENA, M. DA C. C; SOARES, S. D. A; SOARES, J. B.; Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt. **Materials Research**, v. 7, n. 4, p. 529–534, 2004.

MANO, E. B; MENDES, L. C.; **Introdução a Polímeros**. 2^a. ed, Edgard Blucher, São Paulo, 1999, 191 p.

MARQUES, J. D. DE O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A.M.; JUNIOR, O. F. C.; BATISTA, S. M.; AFONSO, M. A. C. B.; Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas : Serra de Parintins. **Acta Amazônica**, v. 40, n. 1, p. 1–12, 2010.

MOTTA, R. S.; **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2011.

MOTTA, R. S; BERNUCCI, L. L. B; MOURA, E.; **Aplicação de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Pavimentos**. In: XVII ANPET. Anais. 2004.

NASRAZADANI, S.; **Review of Applications of Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR) in Characterization of Construction Materials**. In: Geo-Frontiers 2011. Anais. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 11 mar. 2011Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41165\(397\)466](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41165(397)466)>. Acesso em: 15 jun. 2013

NAVARRO, F. J.; PARTAL, P.; MATÍNEZ-BOZA, F.; GALLEGOS, C.; Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. **Fuel**, v. 83, p. 2041–2049, 2004.

NETTO, A. D. P.; MOREIRA, J. C.; DIAS, A. E. X. O.; ARBILLA, G.; FERREIRA, L. F. V.; OLIVEIRA, A. S.; BAREK, J.; Avaliação da contaminação humana por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e seus derivados nitrados (NHPAs): Uma Revisão Metodológica. **Química Nova**, v. 23, n. 6, p. 765–773, 2000.

ODA, S; FERNANDES, J. L.; Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 6, p. 1589–1599, 2001.

OLIVEIRA, B. C.; BERTOLDO, R. A.; SOUZA, R. J. Q.; D'ANTONA, D. M.; FROTA, C. A.; **Utilização de Resíduos de Construção (RCD) e Ligante Modificado com SBS em Misturas Asfálticas para a Cidade de Manaus-AM**. In: 40^a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Anais. Rio de Janeiro. 2010.

OTTO, G. G.; **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2009.

PAIVA, O. A.; **Resíduo Industrial de Vidro Moído em Argamassa de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas (UFAM), 2009.

PÉREZ-LEPE, A.; MARTÍNEZ-BOZA, F. J.; GALEGGOS, C.; GONZÁLEZ, O. MUÑOZ, M. E.; SANTAMARÍA, A.; Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behavior of Polymer-modified Bitumen. **Fuel**, v. 82, n. 11, p. 1339–1348, 2003.

PFEIFFER, J. P; SAAL, R. N. J.; Asphaltic Bitumen as Colloid System. **The Journal of Physical Chemistry**, n. 2, p. 139–149, 1940.

PILATI, F.; **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2008.

PINTO, S; PREUSSLER, E.; **Pavimentos Rodoviários Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 2^a. ed., Rio de Janeiro. 2002, 269 p.

QUIRINO, F. A. B.; **Simulação do Processo de Desasfaltação de Asfaltenos e Óleo Lubrificante**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, 2009.

RAUBER, A. C. C.; CANASSEGO, M. L.; SILVA, R. F.; Diagnóstico de Impactos Ambientais Causados por Usina de Asfalto. **Disciplinarum Scientia**, v. 5, n. 1, p. 97–106, 2004.

RIBEIRO, A. G. C.; AZEVEDO, R. F.; ROCHA, E. F.; AZEVEDO, I. C. D.; LORETO, A. S.; Determinação de Parâmetros Mecânicos de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaio Realizados em Laboratórios. **Geotecnia**, v. Março, n. 127, p. 81–101, 2013.

RIVOIRE, L. CERATTI, J. A. P.; ROHDE, L.; NAKAHARA, S. M.; **Produção e Execução de Mistura Asfáltica em Temperaturas Intermediárias (Asfalto Morno) com Utilização de Zeólitas Naturais**. In: XVI CILA - Congresso Latino-americano do Asfalto. Anais. Rio de Janeiro. 2011.

RODRIGUES, M. R. P.; **Caracterização e Utilização do Resíduo da Borracha de Pneus Inservíveis em Compósitos Aplicáveis na Construção Civil**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), 2008.

ROMÃO, A.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M.-A.; Poli (Tereftalato de Etileno), PET : Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009.

RUBIO, M. C. M. MARTÍNEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F.; Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, p. 76–84, 2012.

SANTOS, A. S. F.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S.; Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros**. v. 14, n. 5. p. 307–312, 2004.

SARGES, R. R.; NOGUEIRA, A. C. R.; FROTA, C. A.; SILVA, C. L.; Depósitos argilosos Cenozóicos do estado do Amazonas : utilização como agregados de argilas calcinadas para pavimentações na região Amazônica. **Brazilian Geographical Journal: Geoscience and Humanities research medium**, v. 1, p. 33–49, 2010.

SCHRAMM, G.; **Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos**. Artliber, 2006, 240 p.

SEYDELL, M. R.; LINTZ, R. C.; Propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha de pneus para pavimentos rodoviários. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 5, n. 3, p. 363–373, 2009.

SILVA, C. L. A.; SILVA, C. L.; REBELO, E. P.; FROTA, C. A.; Processo produtivo de agregados sinterizados de argila calcinada para a região Amazônica. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 5, n. 3, p. 374–388, 2009.

SILVA, P. B.; **Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfáltica SMA 0/8S**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 2005.

SOUZA, M. V. R. E.; **Efeito de Fibras Sintéticas nas Propriedades de Ligantes e Concretos Asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2010.

SOUZA, V. DA S; NOGUEIRA, A. C. R.; Seção geológica Manaus – Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas : um guia para excursão de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 16–29, 2009.

SZKLO, A; ULLER, V. C.; **Fundamentos do Refino de Petróleo Tecnologia e Economia**. 2^a. ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2008, 285 p.

TAO, Z.; NI, F.; YAN, J.; Evotherm Warm Mix Asphalt Technology Applied on Ultra-Thin Pavement in China. **Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements**. Anais. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 17 jul. 2009. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41045\(352\)26](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41045(352)26)>. Acesso em: 24 mar 2013.

TATARI, O; NAZZAL, M; KUCUKVAR, M.; Resources, Conservation and recycling comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts : A thermodynamic based hybrid life cycle analysis. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 58, p. 18–24, 2012.

VALTORTA, D.; POULIKAKOS, L. D.; PARTL, M. N.; MAZZA, E.; Rheological properties of polymer modified bitumen from long-term field tests. **Fuel**, v. 86, p. 938–948, 2007.

WHITE, P.; GOLDEN, J. S.; BILIGIRI, K. P.; KALOUSH, K.; Modeling climate change impacts of pavement production and construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 11, p. 776–782, 2010.

WHITEOAK, D; READ, J.; **The Shell Bitumen Handbook**. 5th. ed., London: Thomas Telford Publishing, 2003, 460 p.

WU, S.; YE, Q.; LI, N.; YUE, H.; Effects of Fibers on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures. **Journal of Wuhan University of Technology**. v. 22, n. 4, p. 733–736, 2007.

XU, T; HUANG, X.; Study on combustion mechanism of asphalt binder by using TG – FTIR technique. **Fuel**, v. 89, n. 9, p. 2185–2190, 2010.

YAO, H.; YOU, Z.; LI, L.; GOH, S. W.; LEE, C. H.; YAP, Y. K.; SHI, X.; Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 327–337, 2013.

YODER, E. J; WITCZAK, M. W.; **Principles of Pavement Design**, 2nd Edition, Wiley, 1975, 736 p.

YU, J.; ZENG, X.; WU, S.; WANG, L.; LIU, G. S.; Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts. **Materials Science & Engineering**, v. 447, n. May 2006, p. 233–238, 2007.

ZAPATA, P; GAMBATESE, J. A.; Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction. **Journal of Infrastructure System**, n. March, p. 9–20, 2005.

ANEXO 01

Tabela 13. Estudo do tamanho, tipo e dosagem de fibras em compósitos de asfalto.

Tipo de fibra	Tamanho das fibras	Dosagem	Ensaio no compósito	Referência
Polyester (PET)	(16 ± 2,5) µm e 6 mm	2, 4, 6 e 8%	SEM, DSR	(1)
Polyacrylnitrile	13 µm e 6 mm	2, 4, 6 e 8%	SEM, DSR	(1)
Cellulose	5 mm (máx), 1 mm (médio) e 45 µm	2, 4, 6 e 8%	SEM, DSR	(1)
Cellulose	1.000 µm	0,3 %	Módulo Dinâmico e ângulo de fase	(2)
Polyester (PET)	1.000 µm	0,3 %	Módulo Dinâmico e ângulo de fase	(2)
Mineral	1.000 µm	0,4 %	Módulo Dinâmico e ângulo de fase	(2)
Coco	(30 ± 10) mm e 0,1 mm	LA+3%EVA+1%FC	VB (135, 150 e 175 °C), DSR (0,1 A e RTFOT)	(3)
Açaí	9mm (médio)	1) 0,5% p.p +RCD+AAUQ 2) 0,5% p.p + AAUQ	RT e MR	(4)
Castanha de cutia	Retido # 0,297 mm (n° 50) e Não retido #0,250 mm (n° 60)	1) 3%SBS +2%FCC+1%GU 2) 2,5%SBS+2,5%FCC+1%GU 3) 2%SBS+3%FCC+1%GU	TGA, DSC, DSR, RTFOT e tradicionais	(5)
Polyester 1	12000/90 µm	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5 %	SEM, Viscosity, DSR,	(6)
Polyester 2	6000/90 µm	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5 %	SP, Penetration Test	(6)
Basalto	6000/ 6µm	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5 %		(6)
Cellulose	1100/75 µm	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5 %		(6)

Legenda:

⁽¹⁾ CHEN *et al.*, 2008. ⁽²⁾ WU *et al.*, 2007. ⁽³⁾ SOARES *et al.*, 2008. ⁽⁴⁾ VALENÇA *et al.*, 2011. ⁽⁵⁾ CUNHA, 2011. ⁽⁶⁾ CHEN e LIN, 2005.