

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

ÁREA GEOTÉCNICA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DO ETILENO ACETATO DE VINILA
(EVA) DESCARTADO PELA INDÚSTRIA CALÇADISTA EM MISTURAS
ASFÁLTICAS**

Denneyele Alves Gama

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Campina Grande – Paraíba
Fevereiro de 2013

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DO ETILENO ACETATO DE VINILA
(EVA) DESCARTADO PELA INDÚSTRIA CALÇADISTA EM MISTURAS
ASFÁLTICAS**

Dennyele Alves Gama

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Orientador

Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
Orientadora

Campina Grande – Paraíba
Fevereiro de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G184a Gama, Denneye Alves.

Avaliação do potencial do uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas / Denneye Alves Gama. – Campina Grande, 2013.

131 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo L. Lucena, Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro.

Referências.

1. Resíduo Industrial. 2. Indústria Calçadista. 3. EVA.
4. Pavimentação. I. Título.

CDU 62-665.9(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Dennyele Alves Gama

Título: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DO ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA)
DESCARTADO PELA INDÚSTRIA CALÇADISTA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Dissertação defendida e aprovada em: 27/02/13

Pela Banca Examinadora

(Assinatura): Adriano Elísio de F. S. Lucena

Prof. D.Sc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Profa. D.Sc. (Orientadora) Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Profa. Ph.D. (Examinadora Externa) Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará – UFC

(Assinatura): Lêda Christine de Figueiredo Lopes Lucena

Profa. D.Sc. (Examinadora Interna) Lêda Christine de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): William de Paiva

Prof. D.Sc. (Examinador Interno) Willian de Paiva
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

DEDICATÓRIA

Ao meu Senhor, Deus.

“Porque dEle, por Ele, e para Ele são todas as coisas.

Glórias, pois, a Ele eternamente. Amém.”

Romanos 36:11

AGRADECIMENTOS

A Deus, ao qual devo todas as coisas, sem o qual eu nada seria.

A minha mãe, Lineida Alves, por todo apoio e orações a mim destinadas desde seu ventre, sua Fé me trouxe a este ponto, a ela todo amor e agradecimento.

Aos meus irmãos Dennyson e Daniel, meus companheiros em todo momento ao longo da estrada da vida.

Ao meu melhor amigo, companheiro, cúmplice, namorado e noivo, Gustavo Brito, por alegrar meus dias e por toda ajuda direta e indireta na realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Adriano e Veruschka, por todo ensinamento, dedicação, por acreditar em meu potencial e fornecer ferramentas para meu crescimento profissional e até pessoal, muito obrigado.

Aos professores Kennedy, Lêda e Willian, por toda contribuição na realização deste trabalho.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, 'Nildinho' e Jadilson, pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho.

Aos demais amigos do LEP, Arimatéia, Paulo, Daniel e Jonny por toda ajuda nas etapas de compactação, nos 'trabalhos pesados', e até mesmo nos lanches, obrigado pelo apoio e amizade.

Às minhas 'Pivicas' Thayse, Jeovanesa e Thalita pela ajuda e disposição, espero que também possa ter contribuído um pouco na formação de cada uma.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em especial ao coordenador Carlos Galvão, que foi meu mestre em tantas etapas da vida acadêmica.

A Josete e Liana, pela disposição em ajudar e servir aos alunos e professores do Programa.

À Universidade Federal de Campina Grande, instituição na qual me graduei e foi responsável por formar boa parte do que sou hoje.

Ao CNPq pela bolsa concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!

RESUMO

Os resíduos industriais, principalmente os classificados como perigosos, quando descartados de forma inadequada podem causar danos irreversíveis ao meio ambiente e até a comunidade em geral. A indústria calçadista descarta resíduos em suas mais diversas fases de produção. O Etileno Acetato de Vinila (EVA), usado na produção das palmilhas dos calçados, produz cerca de 20% de resíduos. Na pavimentação, diversos modificadores são utilizados para otimizar as propriedades do ligante asfáltico diante de condições extremas, entre os principais modificadores estão os polímeros, destacando-se o EVA. Este trabalho propõe uma avaliação do uso do resíduo do EVA, descartado pela indústria calçadista da cidade de Campina Grande, em misturas asfálticas. Foram realizados ensaios de caracterização no ligante asfáltico puro e modificado (por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional), dos agregados e ensaio de classificação do resíduo do EVA segundo a NBR 10004/04 da ABNT. Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Lottman nas misturas asfálticas. Para isto foi utilizada a ferramenta estatística de Planejamento Fatorial utilizando dois fatores (teor de resíduo do EVA (%) e tempos de envelhecimento (h) em diferentes níveis) que realizou uma interação entre os fatores e diminui a quantidade de ensaios. A mistura foi dosada através da metodologia Superpave. O resíduo do EVA foi triturado e incorporado ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) através do processo úmido em teores de 0, 2, 3, 4 e 5% em massa. O resíduo do EVA foi classificado como um resíduo perigoso, Classe I, por conter teores de Zinco e de Alumínio acima do limite estabelecido pela norma. Observou-se, também, um aumento na viscosidade do ligante asfáltico modificado. Nos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, todas as misturas que utilizaram o resíduo de EVA em sua composição atenderam aos critérios de Resistência do DNIT para uso na pavimentação, porém somente os teores até 2% de resíduo de EVA e até 3 horas de envelhecimento atenderam aos critérios mínimos de perda da resistência por umidade induzida (Lottman). O uso do resíduo do EVA na pavimentação mostrou-se uma alternativa eficaz de destino, por atender aos requisitos estabelecidos pelo DNIT para uso na pavimentação asfáltica.

Palavras Chave: Resíduo industrial, indústria calçadista, EVA, pavimentação.

ABSTRACT

The inappropriate disposal of industrial waste can cause serious impacts to the environment. Hazardous waste can cause irreversible damage to the environment and the community. The footwear industry disposes waste at its various stages of production. Ethylene vinyl acetate (EVA) used in the production of footwear insoles generates about 20 wt.% of residue. In paving, several modifiers are used to optimize the properties of asphalt binder extreme conditions. Polymers are among the main modifiers used, which include EVA. This work proposes the use of EVA residue discarded by the shoe industry in the city of Campina Grande in asphalt mixtures. The neat and modified asphalt binder were characterized by penetration test, softening point and rotational viscosity. The EVA residue was classified following NBR 10004/04 ABNT. In addition, mechanical tests, tensile strength, resilience modulus and Lottman test were also conducted. A experimental design tool using two factors (residue content of EVA (wt.%) and aging times (h) at different levels), was used to perform interactions between the factors and decrease the number of tests required. The mixture was designed using the Superpave methodology. The EVA residue was triturated and incorporated into asphalt cement (AC) using the wet process at levels of 0, 2, 3, 4 and 5 wt.%. The EVA residue was classified as a hazardous waste, Class I, containing levels of Zinc and Aluminum well above the limit set by the standard. It was also observed an increase in the modified binder viscosity. Tensile strength and resilience modulus results, all mixtures using EVA met the criteria DNIT, but only levels up to 2 wt.% of EVA waste and up to 3 hours of aging met the minimum criteria of loss of resistance induced by moisture (Lottman) and the ratio MR/RT. The use of EVA residue in asphalt mixtures proved to be an effective alternative, besides meeting the requirements established by DNIT for use in asphalt paving.

Keywords: industrial waste, footwear industry, EVA, asphalt mixtures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	18
1.0 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.2 Organização do Trabalho.....	20
CAPÍTULO 2.....	22
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 Ligantes Asfálticos.....	22
2.1.1 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímero.....	25
2.2 Resíduos Industriais.....	31
2.2.1 Resíduos da Indústria calçadista.....	36
2.2.2 Resíduo de EVA.....	41
2.2.3 Utilização de Resíduos Industriais em Misturas Asfálticas.....	43
2.2.3.1 Uso do Resíduo de EVA em Misturas Asfálticas.....	46
2.3 Considerações Finais da Fundamentação Teórica.....	49
CAPÍTULO 3.....	50
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 Materiais Utilizados.....	51
3.1.1 Ligante Asfáltico.....	51
3.1.2 Agregados.....	51
3.1.3 Resíduo de EVA.....	52
3.2 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.....	54
3.2.1 Agregados.....	54
3.2.1.1 Granulometria.....	54
3.2.1.2 Absorção e Densidade dos Agregados Graúdos.....	56
3.2.1.3 Massa Específica do Agregado Miúdo.....	58
3.2.1.4 Abrasão Los Angeles.....	60
3.2.2 Resíduo do EVA.....	61

3.2.2.1	Classificação do Resíduo	61
3.2.3	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	63
3.2.3.1	Mistura do CAP com o Resíduo de EVA	63
3.2.3.2	Ensaio de Penetração	65
3.2.3.3	Ponto de Amolecimento	65
3.2.3.4	Viscosidade Brookfield	66
3.2.4	Dosagem SUPERPAVE.....	67
3.2.4.1	Compactação dos Corpos de Prova	71
3.2.5	Caracterização Mecânica.....	78
3.2.5.1	Planejamento experimental fatorial	79
3.2.5.1.1	Variáveis Independentes	80
3.2.5.1.2	Variáveis Dependentes	81
3.2.4.1	Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral	83
3.2.4.2	Determinação do Módulo de Resiliência	84
3.2.4.3	Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida – Lottman Modificado ...	86
CAPÍTULO 4		88
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	Caracterização Física dos Agregados.....	88
4.1.1	Granulometria.....	88
4.2	Resíduo de EVA	89
4.2.1	Classificação do Resíduo	89
4.3	Caracterização do CAP	91
4.3.1	Ensaio de Penetração	91
4.3.2	Ensaio de Ponto de Amolecimento	93
4.3.3	Viscosidade Brookfield	95
4.4	Ensaio Mecânicos	97
4.4.1	Resistência à Tração.....	99
4.4.2	Módulo de Resiliência	102
4.4.3	Resistência ao Dano por Umidade Induzida – Lottman.....	108
CAPÍTULO 5		114
5.0	CONCLUSÕES	114
5.1	Sugestões para Futuras Pesquisas	115

REFERÊNCIAS..... 117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média do CAP	23
Tabela 2 - Utilização de materiais para calçados ao longo das décadas.....	37
Tabela 3 - Características do ligante asfáltico modificado com EVA e resíduo de EVA (SAUOLA <i>et al.</i> , 2009).....	48
Tabela 4 - Caracterização do CAP	51
Tabela 5 - Ensaio para caracterização dos agregados e especificações.....	54
Tabela 6 - Granulometria dos agregados	55
Tabela 7 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP	64
Tabela 8 - Proporções dos agregados nas granulometrias.....	69
Tabela 9 - <i>Gmb</i> corrigidas e critérios	76
Tabela 10 – Tabela de resumo da compactação das misturas tentativas.....	76
Tabela 11 – Resumo das informações das misturas tentativas para $V_v=4\%$ no $N_{projeto}$	77
Tabela 12 - Condições experimentais para os fatores e níveis propostos	81
Tabela 13 - Matriz de ensaio corrido.....	82
Tabela 14 - Densidade e absorção dos agregados	88
Tabela 15 - Metais analisados e concentrações	89
Tabela 16 - Resultados do ensaio de penetração.....	91
Tabela 17 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento	93
Tabela 18 - Resultados da viscosidade rotacional.....	95
Tabela 19 - Resultados dos ensaios mecânicos na matriz de ensaios do planejamento fatorial .	98
Tabela 20 - ANOVA Resistência à Tração.....	99
Tabela 21 - Valores da ANOVA	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais metais usados na indústria, suas fontes e riscos à saúde.....	33
Quadro 2 – Materiais de fabricação de calçados.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura provável de uma molécula de asfalto. Fonte: Corbbert (1984).....	23
Figura 2 - Representação esquemática de um elastômero termoplástico EVA	29
Figura 3 - Resíduo de EVA da indústria calçadista em forma de corte de aparas	42
Figura 4 - Curvas de viscosidade a 135°C (GARCÍA-MORALES <i>et al.</i> , 2003)	47
Figura 5 - Caracterização dos Materiais	50
Figura 6 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 12,5mm, (c) Areia e (d) Pó de pedra.	52
Figura 7 - Resíduo de EVA em forma de aparas	53
Figura 8 - Resíduo de EVA cortado	53
Figura 9 - Resíduo de EVA passante na peneira #10	54
Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados.....	56
Figura 11 - Brita 19mm em imersão.....	57
Figura 12 - Verificação da massa submersa da brita 19mm	57
Figura 13 - Secagem do material.....	58
Figura 14 - (a) Molde tronco-cônico e haste de compactação (b) Agregado miúdo na forma do molde.....	59
Figura 15 - Agregado na condição saturado superfície seca	59
Figura 16 - Picnômetro com amostra submersa em água	60
Figura 17 - (a) Material de faixa B que ficou retido na peneira 12,5mm e 9,5mm e (b) Resíduo Obtido após abrasão.....	61
Figura 18 - Determinação do pH da amostra de EVA.....	62
Figura 19 - Amostra para obtenção de extrato lixiviado	62
Figura 20 - Amostra sendo filtrada após o período de 7 dias.....	63
Figura 21 - Misturador do CAP ao EVAR.....	64
Figura 22 - Penetrômetro	65
Figura 23 - Amostra no banho d'água.....	66
Figura 24 - Verificação da medida do ponto de amolecimento do CAP	66
Figura 25 - Viscosímetro rotacional tipo Brookfield.....	67
Figura 26 - Fluxograma da Dosagem Superpave (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2007).....	69
Figura 27 - Curva Granulométrica Superior	70
Figura 28 - Curva Granulométrica Intermediária.....	70
Figura 29 - Curva Granulométrica Inferior	71

Figura 30 - Compactador Giratório Superpave	72
Figura 31 - Equipamento para ensaio de determinação da Gmm.....	72
Figura 32 - Corpos de prova no teor estimado de 4,9% de CAP	75
Figura 33 - Compactação com os teores de 4,3%, 4,8%, 5,3% e 5,8% em Ni, Np e Nm	77
Figura 34 - Estimativa do teor de projeto de CAP	78
Figura 35 - Corpos de prova moldados no teor de projeto de 5,06% de CAP e 4% de Vv	78
Figura 36 - Caracterização mecânica	83
Figura 37 - Posicionamento do corpo-de-prova para ensaio de Resistência à Tração.....	84
Figura 38 - Ruptura do corpo-de-prova por tração.....	84
Figura 39 - Prensa UTM-25 utilizada no ensaio de Módulo de Resiliência	85
Figura 40 - Ensaio de Módulo de Resiliência	86
Figura 41 - Ensaio de Lottman.....	87
Figura 42 - Rompimento do corpo-de-prova após o condicionamento	87
Figura 43 - Resultados do ensaio de penetração	92
Figura 44 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento (°C)	93
Figura 45 - Índice de Susceptibilidade Térmica	94
Figura 46 - Viscosidade do CAP puro e modificado com EVA.....	96
Figura 47 - Diagrama de Pareto para RT.....	99
Figura 48 - Superfície de resposta da Resistência à Tração	100
Figura 49 - Curvas de nível das variáveis EVA (%) e Envelhecimento (h) para RT.....	101
Figura 50 - Diagrama de Pareto para MR.....	102
Figura 51 - Valores observados <i>versus</i> previstos para MR.....	103
Figura 52 - Superfície de resposta para MR	104
Figura 54 - Curvas de nível para MR	105
Figura 55 - Relação MR/RT das misturas asfálticas	107
Figura 56 - Curvas de nível para a relação MR/RT.....	107
Figura 57 - Diagrama de Pareto para Lottman.....	109
Figura 58 - Superfície de Resposta para Lottman	110
Figura 59 - Curvas de Nível para Lottman	111
Figura 60 - Superfície de resposta da RRT.....	112
Figura 61 - Curvas de nível da RRT	112

LISTA DE ABREVIATURAS

VA	Acetato de Vinila
h	Altura
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
ANOVA	Análise de Variância
ABICALÇADOS	Associação Brasileira das Indústrias de Calçados
ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NR	Borracha Natural
TR	Borracha Termoplástica
BV	Borracha Vulcanizada
SBR	Butadieno Estireno
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
C	Couro
3I	Curva Inferior
2M	Curva Intermediária
1S	Curva Superior
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
d	Diâmetro
POE	Elastômero Poliolefínico
TPE	Elastômero Termoplástico
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SIS	Estireno Isoprino Estireno
EVA	Etileno Acetato de Vinila

EBA	Etileno Butilo Acrilato
GMA	Etileno Metacrilato de Glicidila
Fa	Fator de Absorção
k	Fatores
FUNMINERAL	Fundação de Apoio à Mineração
P	Grau de Confiança do Modelo Estatístico
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
MI	Índice de Fluidez
IST	Índice de Susceptibilidade Térmica
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LABGER	Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos
LR	Látex
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
LUBNOR	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
Gsb	Massa Específica Aparente da Composição de Agregados
Gse	Massa Específica Efetiva da Composição de Agregados
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
ME	Método de Ensaio
EME	Misturas de Módulo Elevado
MR	Módulo de Resiliência
N	Níveis
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
Pag	Percentual de Agregados
R ²	Poder de Explicação do Modelo Estatístico
PVC	Policrotoleto de Vinila
PE	Polietileno
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PU	Poliuretano
LPDE	Poliuretano de Baixa Densidade
TPU	Poliuretano Termoplástico
PI	Porcentagem de Ligante
Pli	Porcentagem de Ligante Inicial

P/A	Proporção Pó Asfalto
RBV	Relação Betume Vazios
EVAR	Resíduo de Etileno Acetato de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RT	Resistência à Tração
Rtu	Resistência à Tração após o Condicionamento
RRT	Resistência à Tração Retida
RPM	Rotações por Minuto
F	Significância do Modelo Estatístico
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal de Peneira para a Composição dos Agregados
Np	Número de giros de projeto
Ni	Número de giros inicial
Nm	Número de giros máximo
UEAQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Volume de Agregado Mineral
Vla	Volume de Ligante Absorvido
Vle	Volume de Ligante Efetivo
Vv	Volume de Vazios

1.0 INTRODUÇÃO

No dia 02 de agosto de 2010 foi sancionada, no Brasil, a Lei nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos a qual representa um marco regulatório para o setor. Dentre os principais tipos de resíduos mundialmente produzidos nas indústrias, destaca-se o resíduo da borracha, pelo fato desse material ser de difícil reciclagem em virtude de sua complexa e heterogênea composição. Este fato dificulta, e até mesmo impede seu reaproveitamento (ARAÚJO *et al.*, 1997).

Desde 1963 vem sendo desenvolvida a técnica da utilização da borracha de pneus na manutenção e na restauração, visando prolongar a vida útil dos pavimentos. Essa técnica incrementa o desempenho dos ligantes asfálticos tradicionais com relação características importantes, tanto do ponto de vista do comportamento reológico quanto mecânico, das misturas asfálticas (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Os ligantes asfálticos convencionais satisfazem grande parte das solicitações aos quais são requisitados com bom comportamento e desempenho adequado. Porém, quando submetidos a altas temperaturas de serviço, o ligante asfáltico tende a se deformar. Fatores como condições e tipo de veículo, volume de tráfego, variações térmicas, entre outros, se tornam agentes nocivos à vida útil do pavimento, além de provocar desgaste, e quanto maior a velocidade e a circulação de veículos esta deformação tende a crescer (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Os ligantes asfálticos com adição de modificadores apresentam propriedades físicas, mecânicas e químicas melhoradas em relação aos ligantes asfálticos convencionais, proporcionando o aumento da durabilidade e da resistência ao aparecimento de falhas. São adicionados aos ligantes asfálticos produtos como agentes melhoradores de adesividade, agentes rejuvenescedores, polímeros (SBR, SBS, EVA etc.) e, também, borracha de pneu moída.

A modificação do CAP tem por objetivo fazê-lo tornar-se um material mais rígido ao receber esforços, conseqüentemente, sofrendo menos deformações plásticas, e mais flexível ao aliviar os mesmos esforços, ou seja, apresentar maior recuperação elástica. Outros objetivos na modificação do CAP são: elevar a coesão do material; reduzir a susceptibilidade térmica; baixar

a viscosidade à temperatura de aplicação; resultar em CAP de baixa fluência; oferecer elevada resistência à deformação plástica, fissuração e fadiga; garantir boa adesividade e melhorar a resistência ao envelhecimento (BALBO, 2007).

Segundo Specht (2004), o alto custo e a função estrutural das camadas asfálticas e cimentadas são aspectos marcantes no desempenho do pavimento e a razão de se combinar ligantes asfálticos com determinados polímeros é prevenir a degradação prematura do pavimento e, desta forma, estender sua vida útil. As propriedades que são esperadas para o ligante asfáltico com adição de polímeros são: a redução da suscetibilidade térmica e o aumento da ductilidade, levando a uma maior resistência a deformações plásticas a altas temperaturas e suprimindo o aparecimento de fissuras de retração térmica e fadiga.

As borrachas oriundas das indústrias calçadistas, assim como de pneus, também são fortes fontes de poluição ambiental e desperdício de matéria-prima. Araújo *et al.* (1997) relatam que, esses materiais apresentam resistência relativamente alta a agentes biológicos e às intempéries, causando assim, sérios problemas à comunidade em geral quando descartados.

A utilização de borracha moída proveniente da indústria calçadista, como adição ao cimento asfáltico tradicional, tem se mostrado uma alternativa ambientalmente adequada, pois promove grandes reduções de volume desse resíduo. Há de se considerar ainda o aspecto mais importante, a redução de custos de manutenção devido a degradação do pavimento asfáltico.

O polímero EVA (Etileno Acetato de Vinila), com teores de acetato de vinila de 18-28% em massa, possui aplicação na indústria de calçados (ZATTERA *et al.*, 2005). No processo de produção há uma sobra de aproximadamente 20% de aparas de EVA, produzindo o montante, estimado no Brasil, de descarte da ordem de 7.932 toneladas anuais (DARIVA, 2000), que são direcionados a aterros sanitários e lixões (SANTOS *et al.*, 2008). Tanto os aspectos econômicos quanto a poluição ambiental são justificativas para que existam esforços no sentido de se promover a reutilização e/ou reciclagem destes materiais poliméricos.

Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de agosto de 2011, no Brasil existem 1.581.104 km de rodovias, dos quais apenas 213.909 km são pavimentadas, o que representa 13,5% da malha viária. Portanto, sabendo-se do potencial da pavimentação que o Brasil possui e conhecendo-se a problemática em relação ao destino inadequado dos rejeitos de EVA das placas expandidas, e diante do desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao reaproveitamento de resíduos de borracha na pavimentação asfáltica, houve a motivação para a

inserção dos resíduos de EVA oriundos de indústrias de calçados como agente modificador de misturas asfálticas. O intuito dessa mistura é de proporcionar um destino ambientalmente adequado aos rejeitos e promover uma alternativa de reutilização deste resíduo industrial, bem como analisar os efeitos e as características promovidas ao ligante modificado e ao comportamento mecânico da mistura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas contendo resíduo do Etileno Acetato de Vinila (EVA) proveniente da indústria calçadista.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar propriedades físicas e reológicas de ligantes asfálticos convencional e modificado com resíduo de EVA;
- Verificar o efeito do percentual de resíduo de EVA e do tempo de envelhecimento do ligante asfáltico modificado com resíduo do EVA nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica confeccionadas com esses materiais;
- Avaliar a viabilidade ambiental de misturas asfálticas confeccionadas com ligante asfáltico modificado por resíduo de EVA.

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação é composta de cinco capítulos, a seguir é apresentada uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

Capítulo 1 – É composto de introdução, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2 – Compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: os ligantes asfálticos puros e modificados com polímero, uma abordagem sobre os resíduos industriais, a problemática do descarte dos resíduos da indústria calçadista com uma ênfase nos resíduos de EVA, a utilização de resíduos industriais na pavimentação asfáltica, e a utilização do resíduo de EVA em misturas asfálticas.

Capítulo 3 – São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo 4 – São apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 5 – Apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

No final do trabalho estão inseridas as referências bibliográficas.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, faz-se uma abordagem sobre os ligantes asfálticos puro e modificado com polímero, suas definições e características principais no que diz respeito ao desempenho do pavimento, os principais polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos e os tipos de modificação.

Em seguida faz-se uma abordagem sobre os resíduos industriais, seus tipos, conceituação e os resíduos da indústria calçadista, destacando-se o seu uso em misturas asfálticas, assim como a utilização do resíduo do EVA como agente modificador do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

2.1 Ligantes Asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção encontrados na natureza, há indícios de seu uso desde 6.000 a.C. Na antiguidade, por ser um material impermeável e aglutinante, foi usado por diversos povos como material cimentante, impermeabilizante e de revestimento. No entanto, a primeira utilização do asfalto na pavimentação ocorreu em Lyon, na França, no ano de 1829, com a utilização de um mastique asfáltico para melhorar as condições de rodagem (MANUAL DO ASFALTO, 1989). Hoje, o asfalto é amplamente utilizado na construção de estradas, mais precisamente, como ligante em pavimentos flexíveis.

O CAP é uma mistura complexa de hidrocarbonetos de elevada massa molar, cujos componentes principais são o carbono e o hidrogênio, contendo também outros elementos como o oxigênio, o enxofre e alguns metais. Sua estrutura e propriedades são dependentes da temperatura. Os principais constituintes do CAP são os asfaltenos, os compostos saturados e os aromáticos polares e naftênicos (CORBETT, 1984). O conhecimento global da química do ligante asfáltico não é suficiente para o entendimento das suas propriedades e para o esclarecimento de processos que ocorrem na pavimentação.

A Tabela 1 apresenta a composição química média dos principais asfaltos:

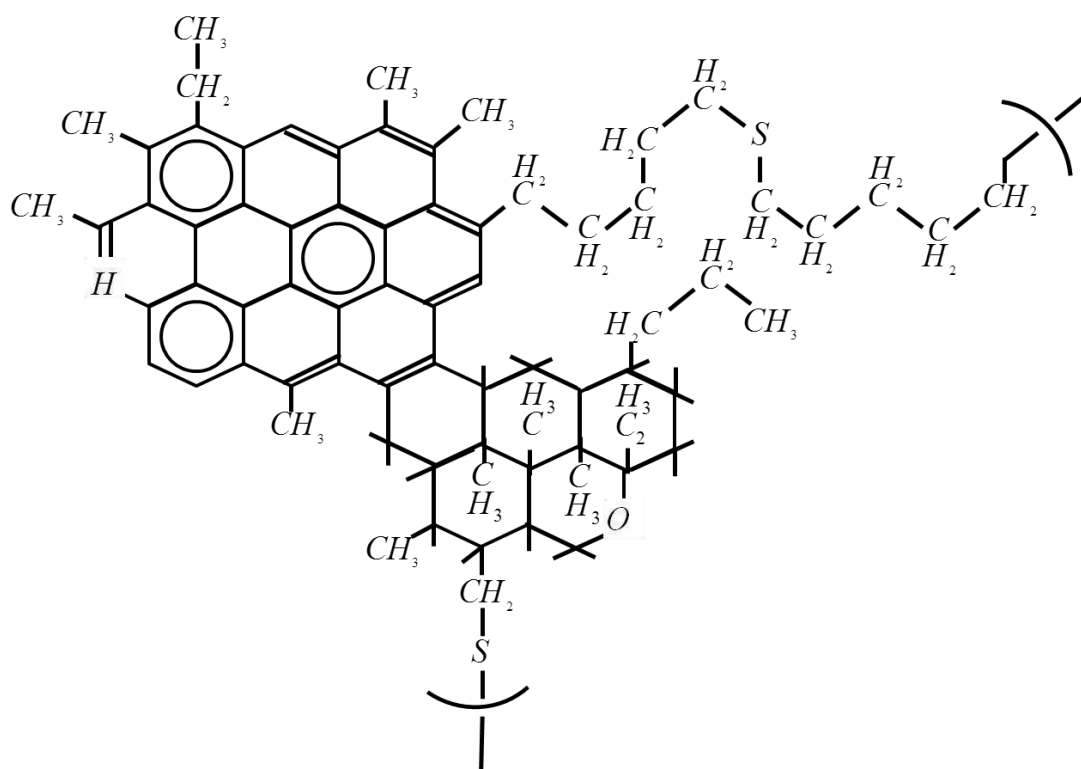
Tabela 1 - Composição química média do CAP

Elemento	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	N (%)
Teor	84,80	10,40	3,20	0,25	0,68

Fonte: Corbett (1984)

O asfalteno é o mais importante componente do asfalto. É formado de aglomerados de anéis aromáticos e exerce grande influência nas suas propriedades reológicas. A Figura 1 mostra a estrutura provável de uma molécula de asfalteno (CORBERTT, 1984).

Figura 1 - Estrutura provável de uma molécula de asfalteno. Fonte: Corbbert (1984)



De acordo com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), o asfalto é definido como um material cimentante castanho escuro ou preto, em que os constituintes principais são betumes que ocorrem na natureza ou que se obtêm do processamento de petróleo. O betume é uma classe de substância cimentante preta ou escura (sólida, semi-sólida ou viscosa), natural ou fabricada, composta principalmente de hidrocarbonetos de alta massa molecular, de que os asfaltos são produtos típicos (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação natural das frações mais leves (mais voláteis) de jazidas de petróleo localizadas na superfície terrestre, e também podem ser obtidos por destilação do

petróleo em unidades industriais, refinarias, onde após a remoção dos demais destilados de petróleo, é obtido um resíduo que apresenta consistência adequada à pavimentação e é denominado de CAP. Segundo Bernucci *et al.* (2007) a denominação CAP, é dada para designar esse produto semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas.

As propriedades físicas dos ligantes asfálticos são normalmente expressas por meio da penetração, do ponto de amolecimento, da susceptibilidade térmica, da viscosidade e da ductilidade. Dentre estes, destaca-se a susceptibilidade térmica, sendo a temperatura um fator preponderante no seu comportamento, pois esta altera substancialmente seus estados físicos e de consistência.

Quanto à sua classificação, até 2005, os ligantes asfálticos eram classificados de duas maneiras: pela viscosidade (a 60°C) resultando em três classes: CAP-7, CAP-20 e CAP-40 e/ou pela penetração (25°C); CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200 (ABNT MB-827). Atualmente os ligantes asfálticos são classificados pela penetração (100g, 5s, 25°C) como: CAP 30-45, CAP 50-70 e CAP 85-100 (PETROBRAS, 2013).

Quando utilizados em serviços de pavimentação, os ligantes asfálticos devem tornar-se suficientemente líquidos para facilitar a mistura com os agregados e posterior lançamento na pista. Após o lançamento e a compactação da mistura na pista este material deve ficar suficientemente sólidos; de modo que as camadas asfálticas do pavimento resistam às ações das cargas do tráfego (mesmo quando submetidas a altas temperaturas) sem sofrer deformações permanentes, e quando expostos a baixas temperaturas devem apresentar flexibilidade suficiente para impedir o aparecimento de trincas na camada asfáltica do pavimento.

Outra característica importante da mistura betuminosa é a sua estabilidade. A estabilidade ótima é aquela que consegue atender aos requisitos de tráfego de forma satisfatória, pois quando a estabilidade é menor do que a demanda de tráfego há deformações e afundamento na superfície do pavimento. Além disso, a variação de temperatura também contribui para o afundamento de trilhas de roda. Desta forma, a utilização de um ligante asfáltico com susceptibilidade térmica próxima de zero é necessária para garantir a estabilidade do pavimento (KALANTAR *et al.*, 2012).

O tempo de aplicação de carga no pavimento também pode modificar o comportamento da mistura, pois um ligante asfáltico submetido a um mesmo nível de carregamento, com

diferentes tempos de aplicação apresentará comportamentos distintos. Portanto, nos ensaios para a caracterização dos ligantes asfálticos, devem ser considerados os valores especificados de temperatura, de tempo e de magnitude de aplicação de carregamentos (CAMBOIM, 2004).

Ao ser utilizado em misturas asfálticas a quente, o ligante asfáltico é aquecido e sofre um envelhecimento já na mistura com os agregados pétreos, que também se encontram aquecidos. Em geral, esse envelhecimento tem como efeito o enrijecimento da mistura, que pode ser benéfico quanto à distribuição de carga e deformações permanentes, porém pode favorecer o aparecimento de trincas de fadiga e até mesmo, eventualmente, a desintegração da camada asfáltica (ILDEFONSO, 2007).

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

No processo de envelhecimento de curto prazo a mistura sofre mudanças reológicas bruscas, como o aumento de viscosidade e diminuição da penetração, por meio da oxidação pelo ar quente e perda de componentes voláteis. Já no processo de envelhecimento de longo prazo, as mudanças continuam, porém a uma taxa menor e cada vez mais lenta, sendo mais perceptível nos dois ou três primeiros anos. Diante deste contexto, como as misturas asfálticas convencionais nem sempre apresentam propriedades adequadas, ou seja, não têm um desempenho desejável. Uma das alternativas para melhorar as propriedades mecânicas é incorporando ao ligante asfáltico materiais que possam fornecer melhores características ao pavimento, como por exemplo os polímeros.

2.1.1 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímero

A utilização de polímeros sintéticos e naturais em ligantes asfálticos é datada de 1843. Em 1950 existiam projetos em execução na Europa e América do Norte incorporando látex de borracha. Aplicações práticas de ligantes asfálticos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França.

A primeira estrada construída com ligante modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes (ODA, 2000). Os ligantes modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. Atualmente

os líderes em pesquisa sobre ligantes asfálticos modificados por polímero são os Estados Unidos, a China, a França e a Itália, havendo ainda trabalhos importantes sendo desenvolvidos no Japão, na Alemanha, na Rússia, na Grã-Bretanha e no Canadá (KALANTAR *et al*, 2012).

Segundo Giovarini (1994), elevadas temperaturas têm influência expressiva no revestimento betuminoso devido, principalmente, no comportamento reológico do CAP, particularmente pela redução da sua viscosidade, tornando as misturas asfálticas mais suscetíveis à deformação permanente. Outros fatores podem influenciar na deformação permanente dos pavimentos, porém é possível diminuir a ocorrência destas deformações aumentando a rigidez do ligante asfáltico a partir do uso de modificadores das suas propriedades, como por exemplo, os polímeros.

Polímeros podem melhorar expressivamente o desempenho dos pavimentos asfálticos em baixa, média e altas temperaturas. Eles atuam na melhoria da resistência da mistura à deformação permanente, às trincas por fadiga e às fissuras de origem térmica a baixa temperatura, diminuindo o fluxo viscoso e o módulo de cisalhamento em altas temperaturas. Consequentemente, aumentam significativamente a vida útil do pavimento (KALANTAR *et al.*, 2012).

Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP e nem todo CAP modificado apresenta condições favoráveis à estabilidade à estocagem. É fundamental, nos processos de modificação, verificar a compatibilidade entre o polímero e o CAP, pois problemas de heterogeneidade podem piorar seu comportamento. A quantidade de polímero a ser incorporada também depende das propriedades finais desejadas.

Cada polímero tem um tamanho de partícula específica para melhorar as propriedades reológicas do ligante asfáltico, e a modificação da composição química do material conduz inevitavelmente à modificação da sua estrutura e suas propriedades. Segundo Figueroa-Infante (2009), a mistura do ligante asfáltico com um polímero pode apresentar as seguintes condições:

- Mistura heterogênea: Ela ocorre quando o ligante asfáltico e o polímero são incompatíveis. Os componentes da mistura são separados e o conjunto tem as mesmas características de ligação que o original;
- Mistura completamente homogênea: Neste caso, o aglutinante é extremamente estável, mas a alteração da utilização de propriedade é muito fraca em comparação com o asfalto original e só aumenta a sua viscosidade. Este não é o resultado desejado; e

- Mistura microeterogênea: Consiste de duas fases interligadas finamente. Esta é a consistência desejada. Num sistema deste tipo, o polímero incha após a absorção de parte da fração leve oleosa do ligante asfáltico para formar uma fase de polímero diferente que a fase de ligante asfáltico residual.

Ainda segundo Figueroa-Infante (2009), de acordo com seu comportamento diante da mudança de temperatura os polímeros podem ser divididos em termoplásticos e termofixos. A seguir são apresentados alguns polímeros modificadores de ligantes asfálticos:

- Homopolímeros: tem uma única unidade estrutural (monômero);
- Copolímeros: tem diferentes unidades estruturais (EVA, SBS); e
- Elastômeros: apresentam deformações pseudoplástico com pouca elasticidade.
- Plastômeros: são polímeros constituídos por polietilenos ou por polietilenos modificados, os de baixo peso molecular são os mais empregados nos plastômeros para a modificação de ligantes asfálticos (BALBO, 2007).

Segundo Balbo (2007), a adição de um polímero termofixo ao CAP, como a resina epóxica, resulta em um ligante asfáltico de excelente qualidade e pro misturas asfálticas com bom desempenho, porém as resinas são muito caras. Já os polímeros exclusivamente termoplásticos não modificam as propriedades do CAP, apenas causam aumento na sua consistência. Os polímeros puramente elastômeros melhoram as condições de deformação resiliente. O elastômero mais empregado para modificação do CAP é o SBR (Estireno-Butadieno-Borracha).

Os polímeros normalmente utilizados na modificação de CAPs são divididos em duas classes: elastômeros termoplásticos e plastômeros. Copolímeros elastômeros termoplásticos constituem a categoria mais frequentemente utilizada de polímeros para modificação de ligante asfáltico, entre eles, o poli (Estireno-Butadieno-Estireno) (SBS) é o preferido. O Poli (Estireno-Isopreno-Estireno) (SIS), que pertence à mesma família de copolímero, também é frequentemente utilizado (LUO e CHEN, 2011).

Copolímeros em bloco são produzidos pela união de dois ou mais blocos de polímeros quimicamente distintos em série linear de monômeros idênticos. Exemplos de plastômeros utilizados para modificação de ligante asfáltico são o Polietileno (PE), o Etileno Acetato de Vinila (EVA), e copolímeros de Etileno-Butilo-Acrilato tardios (EBA) (LUO e CHEN, 2011). No caso do EVA, o acetato de vinila é capaz de diminuir a cristalinidade do etileno, o que o torna mais

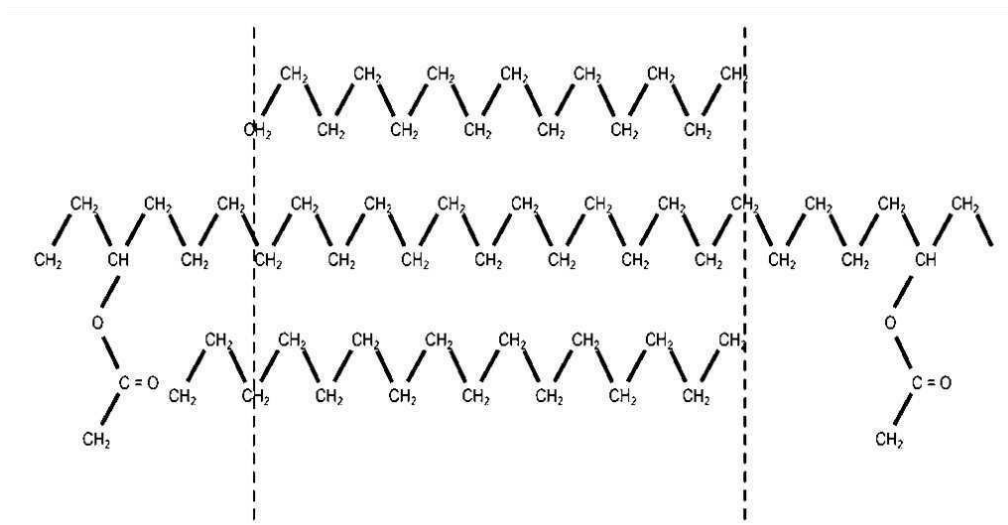
compatível para mistura com ligantes asfálticos. No entanto, na grande maioria dos casos, as interações entre CAP e polímero dependem da arquitetura do polímero.

Ultimamente, têm sido desenvolvidos estudos voltados para testar um novo polímero reativo como modificador de ligante asfáltico (CHEN, 2002; TOMÉ *et al.*, 2005; LUO e CHEN, 2011). Um destes polímeros reativos é o Etileno Metacrilato de Glicidila (GMA), e um grupo éster, normalmente de Metacrilato de Butila. Nele, os grupos funcionais devem ser capazes de interagir quimicamente com a menor fração dos asfaltenos. Assim, as interações, tais como a formação de uma ligação química primária, podem realizar-se dando origem à formação de uma espécie de copolímero asfáltico (LUO e CHEN, 2011).

De todos os polímeros chamados plastômeros, o EVA é o que apresenta melhor comportamento quando misturado ao ligante asfáltico, por isso é um dos principais plastômeros utilizados na modificação do CAP para aplicação em pavimentos afim de melhorar a trabalhabilidade do ligante asfáltico durante a vida útil do pavimento. O copolímero EVA apresenta elevada resistência inicial, devido à sua estrutura tridimensional rígida, aumentando, assim, a resistência às deformações dos ligantes asfálticos modificados (DE CEZARO JUNIOR, 2008).

O EVA é chamado de copolímero porque são empregadas espécies diferentes de monômeros (etileno + acetato de vinila). O copolímero EVA (Figura 2) é um termoplástico que apresenta segmentos de etileno, que são semi-cristalinos, enquanto os que contêm os grupos acetato constituem a fase amorfa (NEGRÃO, 2006).

Figura 2 - Representação esquemática de um elastômero termoplástico EVA



O EVA é um composto microporoso, formado por resina de poli-(etileno-co-vinil acetato), agente de expansão, agente reticulante, cargas ativadoras e auxiliares de processo, além de outros polímeros, como a borracha. Sua formação se dá pela polimerização do etileno com acetato de vinila via radicais livres em reatores de alta pressão, e pode apresentar propriedades diferentes de acordo com a porcentagem de acetato de vinila utilizado na polimerização, podendo ser utilizado como termoplástico ou elastômero (ILDEFONSO, 2007).

Em relação a sua utilização, o EVA além de ser utilizado como excelente modificador de ligantes asfálticos, tem um vasto alcance de aplicações industriais: calçados, mangueiras, adesivos hot-melt, brinquedos, isolante elétrico, proteção contra a corrosão, indústria automotiva (colagem de faróis, base de carpete), medicina (produção de bolsas de soro), embalagens de absorventes. Contudo, é para a confecção de artigos esportivos (solados para calçados leves e resistentes), bem como outras modalidades como calçados femininos, palmilhas, expandidos e artefatos de uso geral, que a maior parte do EVA é consumida no país (ALENCAR, 2005).

O setor calçadista trabalha com resinas de EVA que contêm de 2% a 28% de acetato de vinila (VA) e índices de fluidez (MI) na faixa de 0,3 a 150 g/10min. A combinação destes dois parâmetros determina as propriedades da resina formada e, portanto, o seu campo de aplicação (ILDEFONSO, 2007).

De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria de Plásticos (ABIPLAST, 2009), o consumo de resinas termoplásticas no Brasil em 2009 foi de 5,19 milhões de toneladas, sendo que o EVA representa cerca de 1% deste montante, 52 mil toneladas. Cerca de 58% do

EVA consumido no país em 2007 foi destinado à indústria de calçados. O processo de corte das chapas expandidas gera resíduos que variam de 12 a 20% sobre o consumo de EVA, os quais ainda não possuem soluções adequadas de reaproveitamento e/ou reciclagem (ZATTERA *et al.*, 2005).

No entanto, os ligantes asfálticos modificados com EVA apresentam menor resistência à baixa temperatura. Por isso, Luo e Chen (2011) fez um estudo da inserção de grupos funcionais (anidrido maleico) ao EVA como forma de fazê-lo reagir com os grupos funcionais orgânicos dos asfaltenos do betume, resultando na diminuição dessas desvantagens.

Em relação ao aspecto econômico, o ligante asfáltico modificado, apesar de possuir um custo de 25% a 30% mais elevado em relação ao puro, oferece melhorias em relação ao comportamento físico-químico do ligante asfáltico. A eficácia se traduz no aumento da vida útil do pavimento, diminuição da sensibilidade às variações térmicas, melhoria da aderência pneu-pavimento e redução de 65% a 85% do ruído provocado pelo tráfego sobre a pista. Por ser mais elástico, ele ainda absorve melhor o impacto, oferecendo maior resistência ao envelhecimento e à propagação de trincas e formação de trilhas de rodas (PINTO, 2003).

Leite (1999) estudou o ligante asfáltico modificado com diferentes polímeros, considerando também polímeros menos usuais em pavimentação, formulando as condições operacionais de preparo de ligantes asfálticos modificados além de realizar ensaios de caracterização reológica dos mesmos e o uso de compatibilizantes. Verificou-se que, os ligantes asfálticos modificados com EVA têm melhor resistência ao envelhecimento e a deformação permanente, porém possuem elasticidade e resistência à fadiga inferior se comparados com aqueles modificados com SBS.

Segundo Kalantar *et al.* (2012), existem dois métodos comuns utilizados para incorporar polímeros ou borrachas ao ligante asfáltico, o método úmido e método seco. No método úmido, o polímero sólido se mistura com o ligante asfáltico a alta temperatura antes do ligante asfáltico modificado ser misturado aos agregados. O tempo e a temperatura de mistura irão depender do tipo de polímero e ligante asfáltico.

Segundo Specht (2004), no processo úmido a temperatura e o tempo de mistura da borracha dependem de sua granulometria, que quanto mais fina, maior a área superficial e menor temperatura e tempo para se obter um material homogêneo. São necessários neste processo, o polímero/borracha é misturado com o ligante asfáltico para produzir uma mistura de

asfalto-borracha que possa ser usada da mesma forma que um asfalto modificado. A proporção de borracha utilizada é normalmente entre 14% e 20%, dependendo do ligante asfáltico.

No processo úmido, em que a borracha é triturada e incorporada ao ligante a uma certa temperatura, a borracha adicionada sofre inchamento, absorvendo na cadeia de polímeros certos óleos aromáticos contido no CAP, tornando-o mais dúctil, menos viscoso e com menor susceptibilidade térmica. Assim, esta favorece a resistência ao envelhecimento do material e a resistência à fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento (SPECHT, 2004).

No processo seco, a interação entre o ligante asfáltico e a borracha é muito pequena. Ele normalmente requer uma mistura substancial e de corte uniforme, a fim de dispersar os polímeros. O polímero será misturado com os agregados, como uma forma sólida de grãos ou aparas, somente após a mistura o ligante asfáltico é adicionado. O processo a seco pode ser utilizado para mistura de asfalto quente, e de granulometria aberta densa ou descontínua, mas não em misturas a frio (LUO e CHEN, 2011).

2.2 Resíduos Industriais

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, faz a distinção entre resíduo (lixo que pode ser reaproveitado ou reciclado) e rejeito (o que não é passível de reaproveitamento), se referindo a todo tipo de resíduo: doméstico, industrial, da construção civil, eletroeletrônico, entre outros; com o objetivo de redução, reutilização e não-geração de resíduos sólidos, bem como a destinação final adequada dos rejeitos.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduo sólido é todo e qualquer resíduo nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Essa definição ainda inclui os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

O lixo gerado pelas atividades agrícolas e industriais é tecnicamente conhecido como resíduo e os geradores são obrigados a cuidar do gerenciamento, do transporte, do tratamento e da destinação final de seus resíduos. A indústria é responsável por grande quantidade de

resíduo – sobras de carvão mineral, refugos da indústria metalúrgica, resíduo químico, gás e fumaça lançados pelas chaminés das fábricas. O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao ambiente, pois nele estão incluídos produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados (KRAEMER, 2006).

A classificação dos resíduos envolve a identificação do processo ou da atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Esta classificação se dá a partir das análises físico-químicas sobre o extrato lixiviado obtido a partir da amostra bruta do resíduo. As concentrações dos elementos detectados nos extratos lixiviados são comparadas com os limites máximos estabelecidos nas listagens constantes da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente, os resíduos sólidos são classificados em dois grupos – perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), sendo ainda este último grupo subdividido em inerte (A) e não inerte (B). Os inertes (Classe II – A) são aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, já os não inertes (Classe II – B) são os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, de biodegradabilidade ou de solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I ou Perigosos.

Quanto às suas características físicas, os resíduos podem ser classificados como seco ou molhado. Quanto à sua composição química, em orgânico ou inorgânico e quanto à origem em domiciliar, comercial, serviços públicos, hospitalar, de Portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, radioativo, agrícola, entulho ou industrial.

Visando facilitar a classificação dos resíduos sólidos industriais, Flohr *et al.*, (2005) sugerem uma alternativa para a classificação de resíduos sólidos usando bioensaios através do uso do microcrustáceo *Daphnia magna* para verificação da toxicidade do resíduo sólido e sua posterior classificação em classe I ou II. Neste método, destaca-se a rapidez e a viabilidade econômica em relação às análises físico-químicas.

No caso das indústrias, a eliminação do resíduo acontece por vários processos. Alguns produtos, principalmente os sólidos, são amontoados em depósitos, enquanto que o resíduo

líquido é geralmente despejado nos rios e nos mares. O aumento do descarte é proporcional à diminuição do ciclo de vida dos produtos.

Certos resíduos perigosos são jogados no meio ambiente justamente por serem danosos. Não se sabe como lidar com eles com segurança e espera-se que o ambiente absorva as substâncias tóxicas. Porém, essa não é uma solução segura para o problema. Muitos metais e produtos químicos não são naturais nem biodegradáveis. Em consequência, quanto mais se enterram os resíduos, mais os ciclos naturais são ameaçados, e o ambiente se torna poluído (KRAEMER, 2006).

Segundo Kraemer (2006), desde os anos 50, os resíduos químicos e tóxicos têm causado desastres cada vez mais frequentes e sérios. Atualmente, há mais de 7 milhões de produtos químicos conhecidos, e a cada ano outros milhares são descobertos. Isso dificulta, cada vez mais, o tratamento efetivo do resíduo.

O consumo habitual de água e de alimentos - como peixes de água doce ou do mar - contaminados com metais pesados, coloca em risco a saúde humana. As populações que moram em torno das fábricas de baterias artesanais, indústrias de cloro-soda que utilizam mercúrio, indústrias navais, siderúrgicas e metalúrgicas, correm risco de serem contaminadas.

Os metais pesados são muito usados na indústria e estão em vários produtos. No Quadro 1 são apresentados os principais metais usados, suas fontes e seus riscos oferecidos à saúde.

Quadro 1 - Principais metais usados na indústria, suas fontes e riscos à saúde

Metais	Origem	Efeitos
Alumínio	Produção de artefatos de alumínio; serralheria; soldagem de medicamentos (antiácidos) e tratamento convencional de água.	Anemia por deficiência de ferro; intoxicação crônica.
Arsênio	Metalurgia; manufatura de vidros e fundição.	Câncer (seios paranasais)
Cádmio	Soldas; tabaco; baterias e pilhas.	Câncer de pulmões e próstata; lesão nos rins.
Chumbo	Fabricação e reciclagem de baterias de autos; indústria de tintas; pintura em cerâmica; soldagem.	Saturnismo (cólicas abdominais, tremores, fraqueza muscular, lesão renal e cerebral)

Continua...

Continuação do Quadro 1:

Cobalto	Preparo de ferramentas de corte e furadoras.	Fibrose pulmonar (endurecimento do pulmão) que pode levar à morte
Cromo	Indústrias de corantes, esmaltes, tintas, ligas com aço e níquel; cromagem de metais.	Asma (bronquite); câncer.
Fósforo amarelo	Veneno para baratas; rodenticidas (tipo de inseticida usado na lavoura) e fogos de artifício.	Náuseas; gastrite; odor de alho; fezes e vômitos fosforescentes; dor muscular; torpor; choque; coma e até morte.
Mercúrio	Moldes industriais; certas indústrias de cloro-soda; garimpo de ouro; lâmpadas fluorescentes.	Intoxicação do sistema nervoso central
Níquel	Baterias; aramados; fundição e niquelagem de metais; refinarias.	Câncer de pulmão e seios paranasais
Fumos metálicos	Vapores (de cobre, cádmio, ferro, manganês, níquel e zinco) da soldagem industrial ou da galvanização de metais.	Febre dos fumos metálicos (febre, tosse, cansaço e dores musculares) - parecido com pneumonia.

Fonte: <http://www.ambientebrasil.com.br/>

Para o armazenamento de resíduos, a NBR 12235 (ABNT, 1992) orienta que deve haver uma contenção temporária de resíduos em área autorizada pelo órgão de controle ambiental à espera da reciclagem, da recuperação, do tratamento ou outra forma de disposição final adequada.

O armazenamento de resíduos perigosos deve ser feito de modo a não alterar a quantidade/qualidade do resíduo, sendo acondicionados de forma temporária de espera pode ser realizado em contêineres, tambores, tanques ou a granel. Porém, nenhum resíduo deve ser armazenado sem antes ter as suas propriedades verificadas.

O local adequado para o armazenamento de resíduos deve ser tal que:

- a) o perigo de contaminação ambiental seja minimizado;
- b) a aceitação da instalação pela população seja maximizada;
- c) evite o máximo de alteração da ecologia da região; e
- d) esteja de acordo com o zoneamento da região.

Os resíduos industriais são separados, ainda, conforme diferentes categorias, sendo elas:

- borrachas: resíduos de borracha natural ou sintética;
- metais: resíduos de ferramentas de corte e de afiar, rebarbas de aço e de materiais não ferrosos; e
- vidro e cerâmica: vidros, refratários, cerâmica, porcelana etc.

Entre os resíduos de borracha, o resíduo de pneus aumentou seu consumo em números expressivos com o desenvolvimento da indústria automobilística no século XXI. A quantidade de borracha proveniente de pneus produzidos a cada ano no mundo ultrapassa 2 milhões de toneladas na Europa e na América do Norte, 1 milhão de toneladas no Japão e mais de 1 milhão de toneladas na China (LARSEN *et al.*, 2006). No mundo, o problema do descarte inadequado de pneus no meio ambiente vem sendo uma grande preocupação da sociedade no que se refere ao gerenciamento de resíduos sólidos.

No Brasil, desde 2002, os fabricantes e as importadoras são responsáveis pela coleta e pela destinação dos pneus inservíveis. A partir da revisão da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n°258/99 (BRASIL, 2008) e a aprovação da Resolução n°416/09 houve um crescimento no número de pontos de coleta, empresas de pré-tratamento e valorização energética no país. Em 2009, foi aprovada a Resolução n°416/09 (BRASIL, 2009) que revogou a resolução n°258/99.

Segundo Lagarinhos (2012), de 2002 a abril de 2011, o descarte inadequado correspondeu a 2,1 milhões de toneladas do produto. Nesse período, os importadores de pneus novos cumpriram 97,03% das metas de descarte estabelecidas, os fabricantes, 47,3% e, os importadores de usados, 12,92%.

Segundo dados da ABETRE – Associação Brasileira das Empresas de Tratamento de Resíduos (2012), ao longo das duas últimas décadas, e mesmo sem qualquer política de incentivo, a iniciativa privada consolidou no Brasil um parque especializado em tratamento de resíduos e em serviços ambientais diversificados. Nos últimos cinco anos o crescimento médio tem sido de 16% ao ano.

No ano de 2012 as unidades receptoras de resíduos somaram 258 no total, sendo cerca de 29% correspondente a Aterros para resíduos de Classe II – A, 6% de Aterros para resíduo Classe I e cerca de 9% de incineradores industriais os quais estão distribuídos em 13 estados brasileiros (ABETRE, 2012).

Ainda segundo a ABETRE (2012), do total de resíduos industriais destinados a tratamento, 76% são dispostos em aterro sanitário, 18% passam por co-processamento, 3% são incinerados e 3% recebem tratamento biológico. Destes, 25% são resíduos perigosos e 21% do total de resíduos gerados geram passivos ambientais, que correspondem ao resíduo estocado há mais de um ano e resíduos de áreas contaminadas.

Outra alternativa discutida nos últimos anos é a implantação do sistema de logística reversa nas empresas produtoras de matérias não recicláveis. Com a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), os fabricantes, distribuidores, importadores e comerciantes de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, produtos eletrônicos e seus componentes, estão obrigados a desenvolverem um sistema de logística reversa para o retorno de produtos e embalagens no final da vida útil, que independe do serviço público de limpeza urbana.

O sistema de logística reversa pode ser entendido, segundo Rodrigues *et al.* (2002), como uma nova área da logística empresarial que atua de forma a gerenciar e operacionalizar o retorno de bens e de materiais após sua venda e consumo, às suas origens, agregando valor por meio da reutilização controlada do bem e de seus componentes ou da reciclagem dos materiais constituintes, dando origem a matérias-primas secundárias que se reintegrarão ao processo produtivo.

2.2.1 Resíduos da Indústria calçadista

Apesar de apresentarem várias aparências e finalidades de uso, os calçados são fabricados com os mesmos componentes, entre eles solado, solado intermediário, contraforte, palmilha (exceção feita aos calçados femininos que normalmente não possuem palmilhas). Eles podem ser classificados em tênis, sapatos, sandálias e chinelos, atendendo a três mercados: feminino, masculino e infantil. E entre os segmentos destacam-se: calçados sociais, atléticos, casuais, sintéticos, tecidos entre outros.

A difusão de novas tecnologias e a utilização de novos materiais na produção leva essa atividade industrial a atingir grande projeção. A elevada utilização de recursos naturais tem como resultado uma considerável quantidade de resíduos que são gerados nas diversas fases de produção. Esses resíduos fazem com que o setor industrial responda por uma grande parcela de poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. E isso pode ser creditado à falta de atuação dos órgãos de controle ambiental, políticas públicas e falta de consciência por parte dos empresários (FRANÇA e LEITE, 2008).

A indústria de calçados utiliza diferentes tipos de materiais em seu processo fabril, como por exemplo, a sola intermediária (*midsole*) que normalmente é feita de um material expandido como Poliuretano (PU), Etileno Acetato de Vinila (EVA), Elastômero Poliolefínico (POE), Poliuretano Termoplástico (TPU), borracha e PVC, que conferem o necessário amortecimento para este uso (TORMENTO, 2012).

Na Tabela 2 observa-se, através das décadas, os novos materiais introduzidos em solas para calçados. Nela, consta que a cada ano um novo material foi desenvolvido, até os anos 70, quando vários novos materiais foram desenvolvidos: TPU, PU e Elastômero Termoplástico (TPE). Materiais desenvolvidos a partir dos anos 80 incluem EVA e POE: ambos utilizados em solados microcelulares.

Tabela 2 - Utilização de materiais para calçados ao longo das décadas

1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
C	C	C	C	C	C	C	C
	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
		BV	BV	BV	BV	BV	BV
			PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
				PU	PU	PU	PU
				TPE	TPE	TPE	TPE
				TPU	TPU	TPU	TPU
					EVA	EVA	EVA
						LR	LR
							POE
C	Couro			NR	Borracha Natural		
BV	Borracha vulcanizada			PVC	Policloreto de vinila		

PU	Poliuretano	TPE	Borracha termoplástica
TPU	Poliuretano termoplástico	EVA	Etileno Vinil Acetato
LR	Látex	POE	Elastômero poliolefínico

Fonte: Tormento (2012)

Existem ainda outros materiais utilizados durante o processo de fabricação dos demais constituintes dos calçados, o Quadro 2 apresenta alguns destes materiais e seus diferentes tempos de decomposição:

Quadro 2 – Materiais de fabricação de calçados

Material	Finalidade	Reaproveitamento	Tempo de decomposição
Curvin	Confecção do cabedal do sapato	Reciclável e reaproveitável para solados de tênis, sandálias e rasteirinhas	50 anos
Nylon	Confecção de tênis	Reaproveitado para travesseiros, sofás e enchimentos em geral	30 anos
Espuma	Confecção de tênis	Reaproveitável para fazer ursos de pelúcia, enchimento de travesseiros, sofás	> 2 anos
Lata de metal	Recipiente de cola para confecção de todo tipo de calçado.	Reciclável quando adquirida por siderúrgicas que a derretem em altos fornos, gerando novos produtos	> 10 anos
Plástico	Pouco usado na fabricação, mas gerado nela	Materiais recicláveis, que voltam para a fábrica em forma de sacos de lixo, embalagens e tubos	> 100 anos
Papel	Embalagens do produto final: caixas unitárias e coletivas	Reciclável. Novas caixas coletivas e unitárias e tubos para enrolar materiais	> 3 anos
Tecido	Fabricação de calçados, como sandálias femininas	Não é reciclável, deve ser destinado a empresas especializadas	6 meses a 1 ano
Borracha	Usada nos solados dos sapatos	É reciclável	indeterminado
Couro	Usado na confecção de calçados	Não é reciclável	50 anos
Estopa	Uso acessório na confecção de calçados	Não é reciclável	indeterminado

Fonte: <http://www.essencis.com.br/imprensa/essencial-news/2010/o-que-e-feito-com-os-materiais-usados-na-fabricacao-dos-calcados>

No ramo calçadista, um dos materiais mais poluentes e que não possui adequada forma de tratamento, é o couro. Os resíduos gerados pelo setor coureiro-calçadista são ricos, ainda, em cromo trivalente e em cromo hexavalente, cuja destinação final é vista como nociva pela legislação ambiental. Os resíduos que contêm cromo causam impactos significativos ao meio ambiente, pois possuem alto poder de contaminação. O resíduo do couro pertencente da indústria coureiro-calçadista está classificado segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como Classe I devido a sua periculosidade tóxica, (CULTRI e ALVES, 2008). Sousa (2006) constatou que, o Brasil gera diariamente em torno de 1.400 toneladas de resíduos sólidos de Classe I proveniente de curtumes, fábricas de calçados e artefatos.

Na década de 70, apareceram as primeiras preocupações com o impacto ambiental das atividades do complexo coureiro brasileiro. Além de trazer benefícios econômicos para a indústria, a minimização dos resíduos teve como resultados a redução dos riscos à saúde e ao meio ambiente e melhorias nas condições de segurança no trabalho. No caso da indústria calçadista, as discussões, as cobranças legais e a mudança de atitude com relação à questão ambiental começaram no início da década de 90 (SILVA, 2001).

Atualmente, segundo dados da ABICALÇADOS – Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (2012), o Brasil é o terceiro maior produtor de calçados em nível mundial, com mais de 800 milhões de pares produzidos por ano, e o oitavo maior exportador até 2010. A geração de grande volume de resíduos sólidos na atividade produtiva é o maior dos problemas ambientais enfrentados pelas indústrias calçadistas. De acordo com SILVA (2001) cada par de calçados gera, em média, 220 gramas de resíduos.

Os resíduos calçadistas podem, ainda, ser classificados em dois grupos - resíduos perigosos (Classe I) e resíduos não inertes (Classe II B). O primeiro grupo congrega resíduos como: couro atinado, couro cromo, sapatos com defeitos, pó de couro, varrição de fábrica, rachado, miolo, vira, atinado, resto de facheiro, resto de atinado e resto de recouro. O segundo grupo reúne os rejeitos não inertes, como sola PU, tecido PU, EVA, contraforte, borracha, papelão, cursel, palmilha rosa, telas de não/tecido, palmilha, papelão, PU, dublados e micro duro (CULTRI e ALVES, 2008).

Trabalhos como os de Dariva *et al.* (2000), Silva (2001), Cultri e Alves (2008), Santos *et al.* (2010) e Vieira (2011) visam a implantação de sistemas de gestão de resíduos em indústrias calçadistas realizando estudos para possível destinação do resíduo desde o início do processo

de produção. Eles tratam os resíduos como matéria prima para poderem ser utilizados por outras empresas na fabricação de novos materiais, pois caso não aproveitados, podem ser considerados como resultado da ineficiência do processo produtivo. A reciclagem é importante no contexto do ciclo de vida do material, pois se concebe por meio deste mecanismo a possibilidade da aplicação do material residuário que seria depositado, incinerado ou simplesmente colocado no meio ambiente.

A geração de resíduos constitui um grande desperdício em termos de materiais, água e energia, bem como das instalações e do trabalho realizado. Além disso, constituem risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente, uma vez que, quando manuseados, tratados, transportados e/ou dispostos inadequadamente, podem levar a graves acidentes e à geração de passivos ambientais (SANTOS *et al.*, 2010). Resíduos precisam ser tratados e dispostos adequadamente o que, na maioria das vezes, agrega custos e não valor de uso.

Sabe-se que alguns resíduos resultantes do processo produtivo calçadista, como o EVA, o SBR, o PU, o PVC, a borracha não vulcanizada, a borracha termoplástica (TR), a borracha natural, o poliuretano termoplástico, têm boas possibilidades de serem empregados na construção civil como agregado sintético em substituição aos agregados naturais na composição de compósitos cimentícios leves ou na utilização de painéis de vedação (FILHO *et al.*, 2003 e LEAL e RIOS, 2010).

Kazmierczak *et al.*, (2003), propuseram uma tecnologia para a reciclagem de resíduos de contrafortes termoplásticos (que são um componente à base de polímeros utilizado na região do calcanhar do calçado) numa matriz de gesso. Este resíduo é gerado durante a operação de corte das placas com as navalhas, e representa uma perda de mais de 20% de material. Ele foi caracterizado como pertencente à Classe II B, que segundo a NBR 10004 “podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água”.

Rocha *et al.* (2005) estudaram a recuperação de resíduos de copolímero de butadieno-estireno (SBR) da indústria calçadista através da reincorporação em misturas com SBR virgem. Eles puderam concluir que o resíduo de SBR causou uma pequena alteração nas propriedades reológicas dos compostos formados por SBR reciclado e SBR virgem.

Serrano (2009) realizou a caracterização de compostos à base do SBR, contendo resíduo do próprio polímero oriundo de aparas de solados da indústria calçadista. Foi estudada a influência da incorporação de diferentes concentrações do resíduo SBR e os resultados

mostraram que é possível a utilização deste resíduo como carga em composições do próprio SBR, contribuindo para seu reaproveitamento e diminuindo o passivo ambiental gerado por este material no setor industrial.

Com relação à Cidade de Campina Grande – PB, sabe-se de seu destaque no cenário nacional como um polo calçadista, porém, as indústrias calçadistas instaladas são em sua maioria, de pequeno porte, o que desperta uma preocupação em relação aos impactos que estas causam ao meio ambiente na medida em que apresentam produção considerável e, paralelamente, ainda não possuem sistemas de gestão ambiental (BARROS *et al.*, 2010).

O município está entre os dez maiores produtores de resíduos industriais do estado da Paraíba e de acordo com Morosine *et al.* (2005), a produção anual de resíduos industriais é de 19.198,47 toneladas. Grande parte das indústrias do setor calçadista não possui planos de gerenciamento de resíduos e dispõe seus resíduos sólidos sem nenhum controle ambiental, tendo como destino final, os lixões, os corpos d'água e os terrenos baldios da cidade.

2.2.2 Resíduo de EVA

O EVA é uma substância orgânica e não oferece riscos à saúde humana em seu estado normal. Apesar de ser um material atóxico e ser classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não perigoso, o EVA não é biodegradável e não há reutilização dos resíduos provindos da indústria calçadista. O seu descarte deve ser feito de acordo com regulamentações federais, estaduais ou locais, que recomendam que sejam aterrados ou incinerados. Neste último caso, com o risco de liberação de gases tóxicos, como CO₂, CO, fumaça, hidrocarbonetos e possibilidade de traços de acroleína (ILDEFONSO, 2007).

Estes resíduos são resultado do corte das aparas no formato das solas dos calçados (Figura 3), sendo direcionados a aterros sanitários e lixões. A deposição em aterros sanitários apresenta sérias implicações, pois o resíduo de EVA possui baixa velocidade de degradação podendo provocar sérios problemas ao meio ambiente (ALENCAR, 2005).

Figura 3 - Resíduo de EVA da indústria calçadista em forma de corte de aparas



Para evitar que esses resíduos sejam encaminhados para aterro sanitário, uma alternativa industrialmente encontrada no setor calçadista brasileiro na atualidade é a reciclagem energética, a partir de sua utilização como combustível no processo de fabricação de cimento (co-processamento). Porém, além da necessidade de licenciamento ambiental, esta utilização ainda é considerada custosa para os fabricantes de EVA, pois há a necessidade de se arcar com o transporte e pagar às cimenteiras para que estas aproveitem os resíduos do polímero. Uma outra alternativa para essa questão seria a reciclagem química baseando-se na despolimerização do EVA e sua reutilização no processo produtivo, porém existem poucos estudos envolvendo metodologias similares (MONTAGNOLI *et al*, 2009).

Zattera *et al.* (2005) caracterizaram o resíduo de EVA proveniente da indústria calçadista visando à reciclagem mecânica desse material. Seus estudos demonstraram que, o resíduo de EVA apresenta uma morfologia microcelular que é destruída após o processo de moagem, e as análises das propriedades mecânicas demonstraram que este material apresenta maior rigidez quando comparado ao EVA virgem, com maiores valores de módulo elástico e de dureza

Silva *et al.* (2006) incorporaram o resíduo de EVA na matriz de EVA/LDPE (polietileno de baixa densidade) com o propósito de aumentar a rigidez do solado e observaram que estes materiais apresentaram propriedades mecânicas superiores (módulo elástico e tensão na ruptura) do ponto de vista tecnológico. Oliveira (2007) estudou o reaproveitamento do resíduo de EVA da indústria calçadista em formulação de borracha, a ser utilizada como solas de calçados, obtendo bons resultados para a viabilidade da incorporação.

O resíduo do EVA apresenta um grande potencial de uso como carga em formulações elastoméricas, visto que os solados são confeccionados adicionando-se agentes expansores e reticulantes, além de cargas inorgânicas (MOREIRA, 2001 e OLIVEIRA *et al.*, 2003). Oliveira *et al.* (2001) desenvolveram um trabalho com o objetivo de estudar o reaproveitamento de resíduos de EVA de forma racional, visando uma utilização mais nobre, preparando composições de borracha natural (BN) com resíduo EVA. Com base nos ensaios de tração, concluiu que o resíduo atua como carga de enchimento na matriz de NR sem grande prejuízo das propriedades mecânicas.

Outra alternativa que tem sido bastante empregada é a utilização do resíduo do EVA em misturas asfálticas, já que o EVA puro tem sido utilizado na modificação de ligantes asfaltos há mais de 30 anos, além de ser um dos principais polímeros utilizados nesta modificação (BERNUCCI *et al.*, 2007), apresentando boas propriedades ao ligante modificado.

2.2.3 Utilização de Resíduos Industriais em Misturas Asfálticas

Os pavimentos asfálticos possuem uma determinada vida útil, e sua conservação gera um aumento nos custos operacionais, que, por ventura, são repassados aos custos dos produtos. Por isso, a reutilização de resíduos na pavimentação, se torna uma proposta atrativa, uma vez que soluciona o problema dos elevados custos dos materiais substituindo-o por resíduos e subprodutos das indústrias, como matéria prima. Essa solução promove a diminuição do uso dos recursos naturais, e da demanda de extração e de transporte, além da questão ambiental, por promover a diminuição do volume de resíduos depositados nos aterros sanitários e lixões (CASTELO BRANCO *et al.*, 2004).

Dentre os resíduos industriais utilizados na pavimentação asfáltica, pode-se destacar os resíduos poliméricos e de borracha, escória, areia de fundição, resíduo de granito, caulim e cascalho de perfuração. A incorporação de materiais poliméricos descartados pelas indústrias vem sendo amplamente estudadas, tais como o resíduo da indústria de calçados (EVA) proveniente das sobras do corte das palmilhas. Estudos indicam que a incorporação deste resíduo melhora o desempenho do ligante asfáltico, ao passo que resolve uma questão ambiental preocupante, que é o acúmulo de lixo gerado pela indústria (ALENCAR, 2005; ILDEFONSO, 2007; SANTOS, 2007).

Lima (2008) estudou a incorporação do resíduo polimérico proveniente de uma fábrica de botões com a finalidade de obter melhorias nas propriedades físicas do ligante asfáltico e

torná-lo mais resistente ao tráfego. Este resíduo destaca-se por ser um polímero termorrígido e, portanto, constitui um problema ambiental devido à dificuldade de reaproveitá-lo. O estudo mostrou que a adição do resíduo alterou algumas propriedades físicas do CAP sendo considerada uma alternativa viável para a solução de um problema tanto ambiental quanto tecnológico.

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de aprimorar a tecnologia da incorporação de borracha de pneus na pavimentação asfáltica, entre alguns dos estudos desenvolvidos no Brasil pode-se destacar, Oda (2000), Borba *et al.*, (2003), Specht (2004), Lima (2008), Leal *et al.* (2010) e Pereira, (2010) e Pereira *et al.* (2012).

De acordo com experiências realizadas no Rio Grande do Sul, a maior parcela do custo da construção de uma rodovia utilizando ligantes asfálticos modificados com borracha ficaria por conta da logística associada à obtenção da borracha resultante da reciclagem de pneus. Porém, a economia vem de um ciclo de vida maior, que diminui a manutenção e a utilização de menos material. Na maioria dos casos, dada a flexibilidade e a força do ligante asfáltico modificado com borracha, apenas metade do material é necessário quando comparado ao concreto asfáltico tradicional. Além da melhoria das propriedades do ligante asfáltico levando a uma maior durabilidade (CAMBUIM, 2004).

Uma das principais características apresentadas pelo ligante asfáltico modificado com Grão de Borracha Reciclada (GBR) é o aumento da viscosidade da mistura resultante, o qual é flexível, a temperaturas baixas e menos plástico a temperaturas elevadas. Os benefícios das melhorias do pavimento estão associados com uma deformação permanente e resistência à fissuração por fadiga à baixa temperatura

Gardin *et al.* (2010) fizeram um estudo da logística reversa de pneus inservíveis verificando as melhores alternativas de reciclagem deste material não somente para dar destino, mas buscando alternativas com potencial para contribuir para a destinação ambientalmente correta gerando benefícios econômicos e sociais para o país. A utilização de borracha de pneu moído na pavimentação asfáltica é destacada, ainda que represente um aumento de custo em relação ao asfalto convencional, pois seu uso pode ser justificado pela economia na manutenção já que prolonga a vida útil do pavimento.

Oda (2000) usou borracha de pneus descartados para incorporar no CAP. Seu trabalho concluiu que dentre os fatores considerados (teor de borracha, tamanho das partículas de

borracha e temperatura de mistura), foi possível confirmar a maior influência do teor de borracha. O fator temperatura de mistura ou sua interação com outro fator se mostrou significativo e o fator que menos afetou os resultados dos ensaios realizados foi o tamanho das partículas de borracha.

Outros resíduos podem ainda ser usados na pavimentação asfáltica como agentes na estabilização do solo e/ou agregados nas misturas asfálticas, como são os casos dos resíduos de Escória de aciara e alto forno, resíduos de granito, areia de fundição, além de resíduos de cortes de outras rochas, utilizadas como constituintes de base e sub-base dos pavimentos.

Com relação às escórias, sua utilização nas indústrias de aglomerantes já ocorre há muitos anos. A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico industrial constituído, basicamente, de aluminossilicatos cálcicos, como resultado da combinação da ganga do minério de ferro com as cinzas do coque e do calcário utilizado no processo siderúrgico da fabricação do ferro fundido ("ferro-gusa"). Esse resíduo é classificado segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como pertencente à Classe II A (MOREIRA, 2006; VELTEN *et al.*, 2006).

Na pavimentação, o primeiro registro de utilização da escória foi nos Estados Unidos, Canadá e Japão nos anos 70. No Brasil o uso de escória de aciaria em pavimentação não é recente havendo trechos executados há cerca de 30 anos (NÓBREGA *et al.*, 2004).

Velten *et al.* (2006) estudaram o uso da escória de alto forno como agente na estabilização química de um solo residual jovem para uso na pavimentação. Os autores observaram que a mistura de escória no nível de 10% com mais 10% de cal fez com que o solo atingisse as exigências mínimas de resistência mecânica para o emprego de misturas solo-cimento como camadas de base de pavimentos rodoviários.

A escória de aciaria é um resíduo resultante da produção do aço em siderúrgicas. Seu uso como agregado em bases e sub-bases de pavimentos pode ser vantajoso em termos técnico, econômico e ambiental, quando comparados aos agregados convencionais. Porém, problemas devido a sua natureza expansiva e a deficiência de critérios técnicos para sua aceitação têm limitado a utilização destes resíduos na pavimentação. A expansão das escórias de aciaria é provocada, principalmente, pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres presentes nesse material (RAPOSO, 2005).

Castelo Branco *et al* (2004) e Nóbrega (2006) estudaram a adição do resíduo de escória de aciaria como agregado em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a

Quente (CBUQ). Seus estudos enfatizaram a possibilidade de uso do resíduo na pavimentação, contanto, dentre outros fatores, que a metodologia de dosagem seja compatibilizada para tornar-se adequada diante da natureza do rejeito.

Reis-Barros (2006) comparou o uso de escórias resultantes da incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) com materiais convencionais usados na construção de pavimentos rodoviários, destacando a importância de estimular a reutilização de resíduos, promover uma economia de recursos naturais e uma diminuição dos custos inerentes ao destino final de resíduos.

Existem ainda diversos outros estudos voltados para o uso de resíduos industriais na pavimentação, pode-se citar como exemplos o uso dos resíduos de corte de rochas ornamentais (RIBEIRO *et al*, 2008), do beneficiamento da pedra-sabão (CONCEIÇÃO *et al*, 2009), do beneficiamento de rochas ornamentais (RIBEIRO *et al*, 2011), da serragem de rochas graníticas (SOUZA, 2003; CARVALHO *et al*, 2006; LUCENA, 2009), da areia verde de fundição (CARNIN *et al*, 2004; KLINSKY, 2007), entre outros.

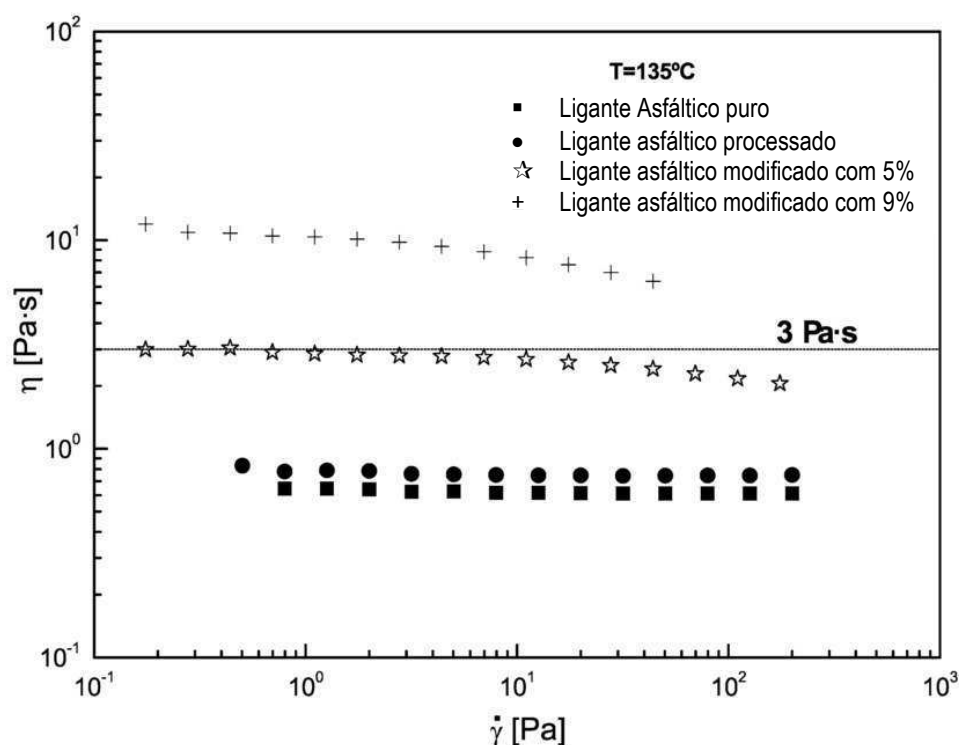
2.2.3.1 Uso do Resíduo de EVA em Misturas Asfálticas

O EVA é um plastômero que tem sido utilizada para a modificação de ligantes asfálticos há mais de 30 anos, a fim de melhorar as características do ligante durante a construção e a sua resistência às deformações de serviço. Para uma utilização em pavimentos asfálticos, recomenda-se que o EVA deve conter um teor de acetato de vinila variável entre 18 e 33% (SAOULA *et al.*, 2009).

García-Morales *et al* (2003) fizeram um estudo das propriedades viscosas do ligante asfáltico modificado com o resíduo de EVA (EVAR) e com o EVA puro em uma ampla gama de temperaturas. Para isso, incorporou EVAR ao CAP em concentrações de polímero variando de 0 a 9% em peso. As amostras foram processadas por 6 h, a 180°C e uma velocidade de rotação de 1200 rpm.

A Figura 4 apresenta os resultados de viscosidade do ligante asfáltico modificado com 5 e 9% de EVAR a 135°C, sendo possível observar que as diferenças de viscosidade entre o ligante asfáltico puro e modificado são pequenas, mostrando que os efeitos de oxidação aparecem mais claramente na região de temperatura baixa e intermediária.

Figura 4 - Curvas de viscosidade a 135°C (GARCÍA-MORALES *et al.*, 2003)



No entanto, estes autores destacam que a viscosidade deve ser mantida suficientemente baixa a esta temperatura a fim de permitir uma fácil aplicação no pavimento. A AASHTO determina que a viscosidade à temperatura de 135°C deve ser menor do que 3 Pa.s. Como observado na Figura 4, o ligante modificado com 5% de EVAR se manteve abaixo do limite mencionado e, portanto, pode ser adequadamente aplicado na construção do pavimento. O que não ocorreu com a mistura com 9% de EVAR.

Garcia-Morales *et al.* (2005), estudaram o comportamento do ligante asfáltico modificado com 5% e 9% de EVAR. Neste estudo os resíduos foram misturados com o CAP 60/70, os resultados mostram o melhor desempenho do ligante modificado, com melhores propriedades mecânicas, além de resolver o problema da eliminação e desperdício do resíduo deste material.

Alencar (2005) fez um estudo das propriedades físico-químicas do CAP modificado com EVA puro e resíduo de EVA proveniente da indústria calçadista. Os ensaios mostraram uma maior consistência do CAP modificado. Já com relação ao Índice de Susceptibilidade Térmica (IST), estes foram mais próximos de zero em relação ao ligante não modificado, indicando que a consistência do ligante tende a permanecer inalterada sobre uma faixa de temperatura maior se comparado ao CAP não modificado. Isso indica que, em climas frios, o ligante asfáltico

permaneceria mais flexível e a resistência à fissuração e ao trincamento seria aumentada. Os resultados também mostraram uma melhoria na deformação permanente.

Num estudo comparativo entre o ligante asfáltico modificado com EVA e o resíduo de EVA, Sauola *et al.* (2009) utilizaram ligante asfáltico modificado com teores de 3, 5 e 7% de EVA puro, e asfalto modificado com resíduo de EVA em teores de 1, 2, 3 e 4%. Foram avaliadas as propriedades físicas dos ligantes modificados, e os resultados de penetração e de ponto de amolecimento são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Características do ligante asfáltico modificado com EVA e resíduo de EVA (SAUOLA *et al.*, 2009)

	EVA (%)			Resíduo de EVA (%)			
	3	5	7	1	2	3	4
Penetração (25°C, 1/10mm)	71	54	48	30	27	24	25
Ponto de Amolecimento (°C)	52	62	67	55	58	62	63

Estes autores observaram uma redução da penetração, um aumento do ponto de amolecimento que conduzem a uma diminuição da susceptibilidade térmica. O estudo do comportamento mecânico dos ligantes asfálticos modificados mostrou que as melhores resistências à deformação permanente são obtidas com 5% de EVA e de 2% de resíduos. Concluindo-se que a introdução do EVA e dos resíduos da sola do calçado na mistura asfáltica é a uma boa solução, econômica e eficiente para a melhoria da resistência a deformações permanentes, podendo ser aplicados em zonas de tráfego intenso, como os corredores de ônibus, as encostas etc.

González *et al.* (2004) também realizaram um estudo comparativo com ligante asfáltico modificado com EVA puro e resíduo de EVA, constatando que, as propriedades viscoelásticas, assim como o grau de penetração dos ligantes asfálticos modificados, são melhorados tanto com o EVA puro quanto com o resíduo de EVA. Destacam-se as boas características viscoelásticas dos ligantes asfálticos modificados com EVA reciclado, provavelmente devido à presença de carbono negro, que atua como um agente de enchimento neste material. De um modo geral, seus estudos indicam que o desempenho do pavimento é particularmente melhorado quando adiciona-se 1% de EVA reciclado ou virgem à mistura asfáltica.

García-Morales *et al* (2006) estudaram a modificação do ligante asfáltico, com três tipos diferentes de resíduos poliméricos EVA, EVA / Polietileno de Baixa densidade (LDPE) e borracha de pneu, todos eles provenientes de instalações de reciclagem de materiais plásticos. Foram realizados ensaios de microscopia óptica, calorimetria modulada e um conjunto de testes reológicos. Os resultados obtidos revelaram que, a borracha do pneu, bem como as suas misturas com outros polímeros podem ser considerados como um modificador interessante do ligante asfáltico em uma ampla gama de temperaturas. A mistura composta de EVA e LDPE mostrou resultados promissores em altas temperaturas em serviço, devido ao desenvolvimento de uma rede de polímero ao longo do ligante modificado, apresentando propriedades mecânicas favoráveis a temperaturas de serviço.

Ildefonso (2007) fez uso do processo seco de mistura asfáltica com o resíduo do EVA, estudando as propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com teores de resíduo de EVA de 0, 1, 2 e 3% e com 0, 2 e 4 horas de envelhecimento. Seus resultados mostraram que a utilização deste resíduo aumentou a resistência das misturas à fadiga e ao desgaste de forma significativa, porém as misturas tornaram-se mais susceptíveis à deformação permanente. O tempo de envelhecimento de curto prazo se mostrou importante, aumentando a resistência das misturas à fadiga e à deformação permanente.

Santos (2007) observou um aumento da viscosidade do ligante com a adição do resíduo de EVA no teor de 7,5%, havendo elevação do ponto de amolecimento em relação ao ligante asfáltico convencional, o que representa um aumento da resistência ao acúmulo da deformação permanente.

2.3 Considerações Finais da Fundamentação Teórica

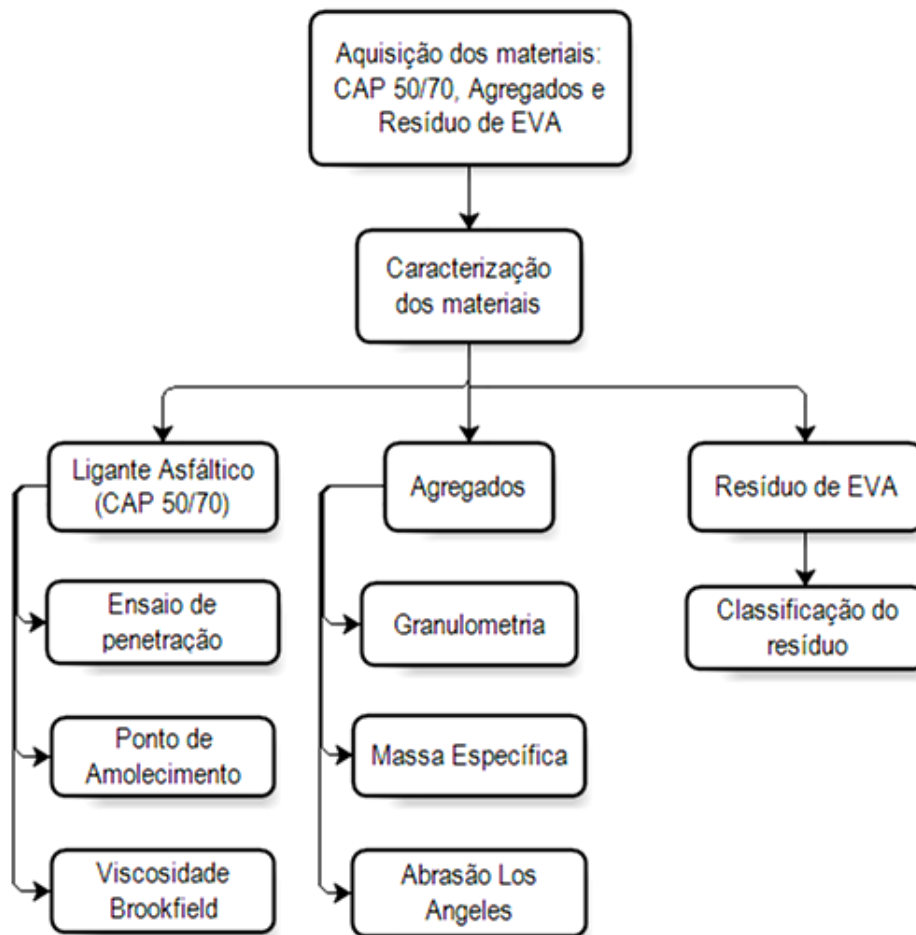
Nesta revisão teórica foi possível observar a importância que tem sido dada à reciclagem dos resíduos industriais diante da magnitude dos aspectos negativos ao meio ambiente que podem ser causados pela sua má disposição ou formas inadequadas de tratamento.

Diversos são os resíduos utilizados na pavimentação asfáltica em diferentes formas de aplicação. Os resíduos da indústria calçadista, com destaque ao resíduo do EVA, objeto de estudo deste trabalho, se mostraram como uma alternativa eficaz, quando comparados aos ganhos às propriedades mecânicas do pavimento quando modificado com o EVA puro, assim como por apresentar uma alternativa ambientalmente mais adequada e fornecer um destino a este resíduo.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, dos ligantes asfálticos e do comportamento mecânico das misturas asfálticas, a metodologia foi seguida conforme mostrado no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Caracterização dos Materiais



O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em etapas. A primeira parte da pesquisa teve o intuito de obter, preparar e classificar os materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados e resíduo de EVA). Essa fase é importante para a exploração e reconhecimento dos materiais para a realização da caracterização mecânica, em que os ensaios serão detalhados posteriormente.

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (*American Society for Testing Materials*), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Ligante Asfáltico

Utilizou-se CAP 50/70 fornecido pela empresa JBR Engenharia, caracterizado pela refinaria de petróleo AB-UN/LUBNOR localizada em Fortaleza-CE. Os resultados desta caracterização são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do CAP

Característica	Resultado	Unidade
Densidade relativa	1,032	n/a
Índice de susceptibilidade térmica	-0,9	n/a
Penetração	56	0,1mm
Ponto de amolecimento	50,2	°C
Ponto de fulgor	>300	°C
Viscosidade Brookfield 135°C	503	cp
Viscosidade Brookfield 150°C	248	cp
Viscosidade Brookfield 177°C	90	cp
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	256	s

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo 1º Grupamento de Engenharia, com sede em João Pessoa-PB. Foram fornecidas amostras de brita 19mm, brita 12,5mm, areia e pó de pedra (Figura 6), o filer utilizado foi a cal hidratada.

Figura 6 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 12,5mm, (c) Areia e (d) Pó de pedra.



3.1.3 Resíduo de EVA

O resíduo de EVA (EVAR) utilizado na pesquisa é oriundo da fabricação de palmilhas de calçados de uma indústria calçadista da cidade de Campina Grande – PB. O material foi fornecido em forma de aparas e colado a uma película de material sintético (Figura 7).

Figura 7 - Resíduo de EVA em forma de aparas



O resíduo foi descolado manualmente do material sintético e cortado em tamanhos menores (Figura 8) para ser triturado e assim obter a granulometria desejada.

Figura 8 - Resíduo de EVA cortado



O tamanho da partícula do resíduo de EVA tem baixa influência sobre as propriedades adquiridas pelo CAP através da modificação (ALENCAR, 2005; GARCÍA-MORALEZ *et al.*, 2006 e BRINGEL, 2008). A granulometria escolhida foi baseada no estudo realizado por Alencar (2005), que utilizou partículas de resíduo de EVA que passam na peneira de #10 (correspondente a 2mm).

Foi utilizado o triturador da marca Primotécnica modelo P1-003 que possui três facas rotativas e duas fixas com três diferentes peneiras para a granulometria desejada, o material triturado foi peneirado de forma a utilizar somente as partículas passantes na peneira #10 (2mm) (Figura 9).

Figura 9 - Resíduo de EVA passante na peneira #10



3.2 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.2.1 Agregados

Os ensaios para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 5:

Tabela 5 - Ensaio para caracterização dos agregados e especificações

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DNIT - ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95
Equivalente de areia	DNIT - ME 054/97
Abrasão "Los Angeles"	DNIT - ME 035/98
Absorção	DNIT - ME 081/98

3.2.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, com peneiras de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm,

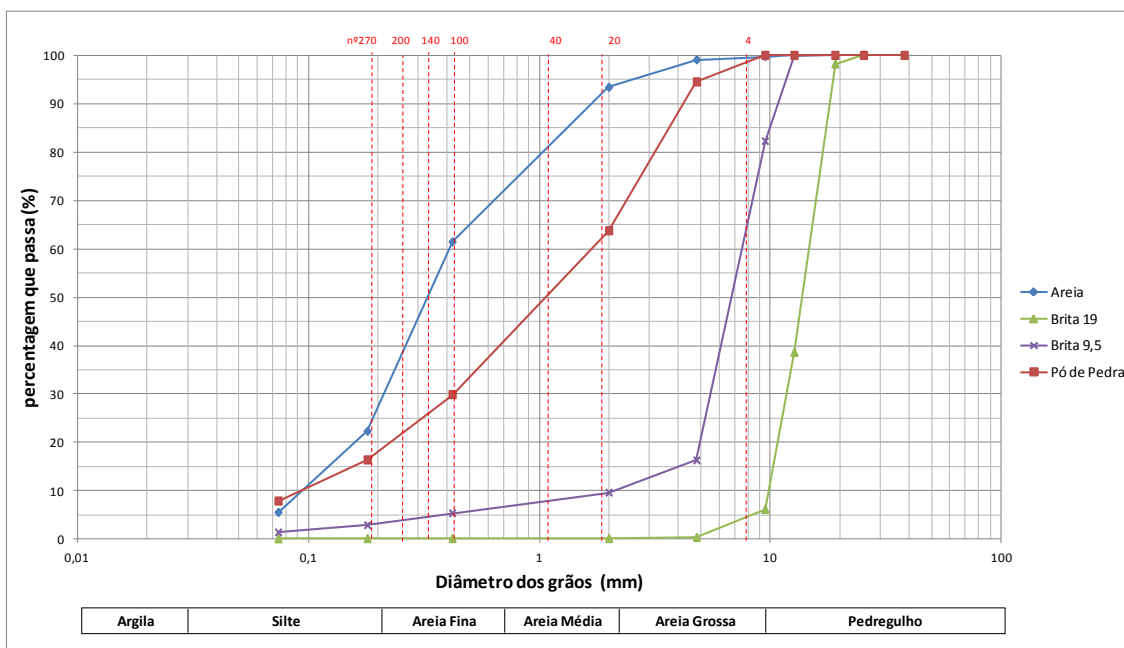
2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente.

A Tabela 6 e a Figura 10 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Tabela 6 - Granulometria dos agregados

Quantidade passante acumulada (%)					
Peneira	Peneira (mm)	Brita 19	Brita 9,5	Areia	Pó de Pedra
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	98,24	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	38,60	99,95	100,00	100,00
3/8"	9,5	6,15	82,26	99,76	100,00
N° 4	4,8	0,33	16,27	99,09	94,52
N° 10	2,0	0,11	9,61	93,40	63,75
N° 40	0,42	0,11	5,32	61,45	29,88
N° 80	0,18	0,09	2,85	22,29	16,38
N° 200	0,074	0,06	1,38	5,50	7,87

Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados



3.2.1.2 Absorção e Densidade dos Agregados Graúdos

A determinação da absorção e da densidade dos agregados graúdos foi realizada segundo o método de ensaio DNIT-ME 081/98.

Foram separadas amostras de 3.000g de brita 19mm e 2.000g de brita 9,5mm sendo, em ambas, desprezado todo o material passante na peneira 4,8mm através do peneiramento a seco. Cada amostra foi lavada para retirada de pó e impurezas e colocadas em estufa a 110°C por 4 horas. Após ser resfriada à temperatura ambiente, cada amostra foi colocada em imersão à temperatura ambiente por 24 horas (Figura 11).

Figura 11 - Brita 19mm em imersão



Após este tempo o material foi retirado e seco superficialmente para verificar a massa úmida. Em seguida colocado em um recipiente para verificação da massa submersa (Figura 12).

Figura 12 - Verificação da massa submersa da brita 19mm



Logo após essa verificação, o material foi colocado novamente em estufa por mais 4 horas, resfriado à temperatura ambiente e verificada sua massa seca, para posteriormente obter a densidade aparente e a absorção dos agregados.

3.2.1.3 Massa Específica do Agregado Miúdo

A determinação da massa específica do agregado miúdo foi realizada com a areia e o pó de pedra, segundo a norma NM 52/2002 que estabelece o método para determinação da massa específica real e aparente do agregado miúdo.

Foram utilizadas duas amostras de 500g de agregado miúdo que passa na peneira de 4,8mm e fica retido na peneira de 0,074mm. O material foi colocado imerso em água e deixado em repouso por um período de 24 horas. Em seguida foi colocado em uma superfície plana submetendo-o à ação de uma corrente de ar, secando-o de maneira uniforme (Figura 13).

Figura 13 - Secagem do material



Para verificação do estado do agregado como saturado superfície seca, prossegue-se com a secagem até que os agregados não fiquem mais fortemente unidos entre si. Coloca o agregado miúdo num molde tronco-cônico e compacta-se sua superfície suavemente com a haste de compactação com 25 golpes (Figura 14-a). Levanta-se verticalmente o molde e observa-se se o agregado conserva a forma do molde (Figura 14-b), isso acontece se ainda houver umidade superficial.

Figura 14 - (a) Molde tronco-cônico e haste de compactação (b) Agregado miúdo na forma do molde.



(a)



(b)

Continua-se a secagem e repete-se o procedimento até que o cone de agregado miúdo desmorone ao se retirar o molde. Neste momento, o agregado terá chegado à condição de saturado superfície seca (Figura 15).

Figura 15 - Agregado na condição saturado superfície seca



Pesou-se 500g de amostra e em seguida colocou-se no picnômetro cuidadosamente, registrando a massa do conjunto. Colocou-se, então, água destilada no picnômetro até cobrir a amostra de agregado.

O picnômetro foi mantido durante 1 hora em um banho a temperatura constante de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Em seguida, completou-se o picnômetro com água (Figura 16) e então foi determinada a massa do picnômetro mais amostra mais água.

Figura 16 - Picnômetro com amostra submersa em água



O agregado miúdo foi retirado do frasco e seco em estufa a $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ até a constância de sua massa. Após esse processo, foi realizada a determinação da massa específica aparente do agregado miúdo.

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles

Esse ensaio, conforme norma DNER-ME 035/98, consiste em obter certa quantidade de agregado, cinco ou dez quilos, satisfazendo a determinada granulometria, e submetê-la a choques e desgastes durante a rotação de um tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm. O efeito é intensificado pela presença de doze bolas de aço e o ensaio é concluído após 500 ou 1.000 rotações a depender da faixa granulométrica. Após ser submetido às rotações, o material é peneirado e o desgaste é aferido pela razão entre a quantidade de material que passou na peneira de 1,7mm após o ensaio e a quantidade total colocada inicialmente no tambor (Figura 17).

**Figura 17 - (a) Material de faixa B que ficou retido na peneira 12,5mm e 9,5mm e
(b) Resíduo Obtido após abrasão**



(a)



(b)

3.2.2 Resíduo do EVA

3.2.2.1 Classificação do Resíduo

Para que um resíduo seja disposto adequadamente é necessário que sua composição química seja determinada segundo os procedimentos sugeridos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Essa norma estabelece os critérios adotados para a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e à saúde pública.

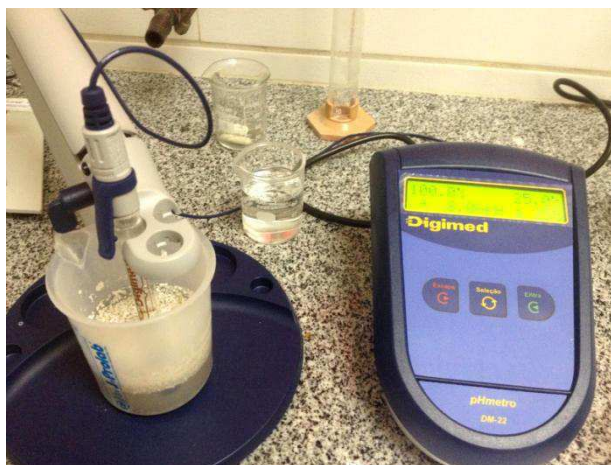
Portanto, com o objetivo de classificar ambientalmente o resíduo de EVA foram utilizados os seguintes procedimentos de obtenção de extrato lixiviado (NBR 10005/04) e solubilizado (NBR 10006/04) de resíduos sólidos.

As amostras foram preparadas no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos (LABGER), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da UFCG e enviadas para análise no Fundo de Apoio à Mineração (FUMINERAL) em Goiás-GO. Foi utilizado EVA triturado passante na peneira 2,0mm conforme utilizado na incorporação no CAP.

Primeiramente, foi preparada amostra para obtenção de extrato lixiviado com o intuito de verificar se o resíduo é classificado como Perigoso ou Não-Perigoso. Para isso primeiramente foi realizada a determinação da solução de extrato, foi utilizada uma amostra de resíduo de 5,0g adicionando-se posteriormente 96,5mL de água destilada, levando a agitação por 5min. Após esse período foi verificado o pH da amostra para determinação da solução de extração (Figura 18). Como o pH foi $>5,0$ adicionou-se mais 3,5mL de HCl 1 N e a solução foi novamente

homogeneizada a 50°C durante 10min. Após esse período foi lido novamente o pH e utilizada a solução de extração 1 que é composta por: 5,7mL de ácido acético glacial e 64,3mL de NaOH 1,0N dissolvidos em água até completar 2L.

Figura 18 - Determinação do pH da amostra de EVA



Após a escolha da solução, pesou-se 100g de resíduo de EVA e a amostra foi transferida para o frasco de lixiviação com a solução de extração n°1 (Figura 19).

Figura 19 - Amostra para obtenção de extrato lixiviado



O frasco foi colocado sob agitação em um agitador de frascos a 30 ± 2 rpm por um período de 18 ± 2 hs. Após esse período, a amostra foi filtrada e enviada para análise dos metais.

O ensaio de obtenção do extrato solubilizado serve para classificar o resíduo entre Inerte ou Não-Inerte, caso ele seja Não-Perigoso. Para isto, foi separada uma amostra de 125g de

resíduo, adicionando-se 500mL de água destilada e agitando-o por 5min. Em seguida, adicionou-se mais 500mL de água destilada e a amostra foi separada e colocada em repouso por um período de 7 dias a 25°C. Após esse período a amostra foi filtrada (Figura 20) e o extrato obtido enviado para análise dos metais.

Figura 20 - Amostra sendo filtrada após o período de 7 dias



Os metais analisados foram: Alumínio (Al), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Chumbo (Pb), Cromo (Cr) e Ferro (Fe).

3.2.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

3.2.3.1 Mistura do CAP com o Resíduo de EVA

Conforme dados da BRASKEM (2010), a temperatura ideal para modificar o CAP com o polímero EVA é de 150°C. Essa temperatura de mistura não deve exceder 200°C para que as características do EVA não sejam prejudicadas. Já Kalantar *et al.* (2012), sugerem que a temperatura de mistura não ultrapasse os 185°C, pois, caso contrário, o CAP poderia oxidar. O tempo de mistura deve ser suficiente para obtenção de uma mistura homogênea através da dispersão do resíduo plástico no interior da matriz.

Bringel (2008) verificou que misturas com teores de EVA abaixo de 4% não tinham mudanças significativas comparando-as com o ligante convencional e misturas com teores de EVA acima de 6% apresentavam-se extremamente viscosas, tornando-se inadequadas para utilização.

Portanto, para o processo de produção do CAP modificado com EVAR foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72 (Figura 21). O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 160°C. Adicionou-se o EVAR em teores de 2, 3, 4 e 5% e a mistura foi agitada em 544 rotações por minuto (rpm), por 2 horas (ALENCAR, 2005), após adição de todo o resíduo. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 21 - Misturador do CAP ao EVAR



Foram realizados novamente os ensaios de caracterização física das amostras de CAP no laboratório da UFCG com o intuito de verificar as propriedades tanto para o CAP 50/70 puro quanto para o modificado com diferentes teores de resíduo de EVA. Na Tabela 7 estão inseridas as normas adotadas para a realização dos ensaios.

Tabela 7 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP

Ensaio	Métodos
Viscosidade Brookfield	NBR 15184/2007
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010

3.2.3.2 Ensaio de Penetração

A consistência de um CAP no estado semi-sólido é medida por meio do ensaio de penetração (Figura 22), que é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. O ensaio é regido pela norma DNIT-ME 155 (2010) que classifica o CAP quanto a sua dureza. Ele consiste em determinar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha padronizada penetra verticalmente, durante 5 segundos em uma amostra de CAP a uma temperatura de 25°C. A massa total da agulha é de 100g.

Figura 22 - Penetrômetro



3.2.3.3 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento (Figura 23) é uma medida que faz referência ao ponto de fusão do CAP, que não é bem definido, pois os CAPs amolecem gradualmente. É medido empiricamente através de uma correlação entre a temperatura no qual o CAP amolece sob certas condições e atinge uma determinada condição de escoamento (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O ensaio é regido pela DNIT ME 131/2010. O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada pesando em média 3,50g, atravessa um anel também padronizado e cheio com o material betuminoso, percorrendo uma distância de 25,4mm, sob condições especificadas. O ponto de amolecimento refere-se à média das

temperaturas em que as duas esferas envolvidas pelo CAP deslocam-se para baixo e tocam a placa de fundo (Figura 24).

Figura 23 - Amostra no banho d'água



Figura 24 - Verificação da medida do ponto de amolecimento do CAP



3.2.3.4 Viscosidade Brookfield

Medidas de viscosidade são importantes na caracterização dos CAPs puros e modificados, pois fornecem informações sobre as propriedades de processamento, mistura e lançamento do CAP, até sua aplicação em serviços de pavimentação. O ensaio para determinar a viscosidade dos ligantes asfálticos foi realizado em um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+ acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL como mostrado na Figura 25. O equipamento tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes

asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

Figura 25 - Viscosímetro rotacional tipo Brookfield



A viscosidade é medida através do torque necessário para rotacionar uma haste de prova (*spindle*) imersa na amostra de asfalto. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007 utilizando o *spindle* 21, considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 10rpm, respectivamente.

3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

A metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) foi desenvolvida pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), um programa de pesquisa dos Estados Unidos. Sua finalidade é atender e minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade (KENNEDY *et al.*, 1994). Segundo Cominsky *et al.* (1994), o objetivo desta metodologia é desenvolver uma mistura econômica de ligante asfáltico e agregado que alcance um nível de desempenho compatível com as demandas de tráfego, ambiente e estrutura do pavimento.

Esta é uma metodologia ainda em fase de testes no Brasil, onde é mais difundida a dosagem Marshall. A maior diferença entre as dosagens Marshall e Superpave é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall a compactação é realizada por impacto, na

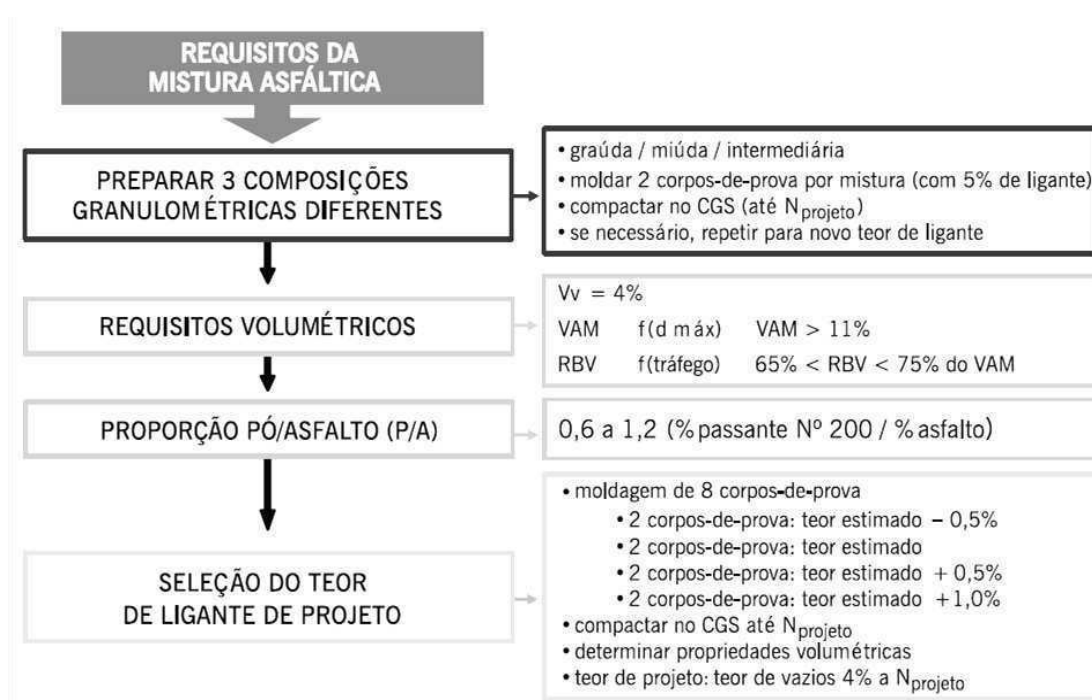
Superpave esta é por amassamento. O procedimento consiste, basicamente, em estimar o teor de projeto de CAP através da fixação do volume de vazios, conhecendo-se a granulometria dos agregados disponíveis. Outra diferença é a forma de escolha da granulometria, que na metodologia Superpave inclui os conceitos de pontos de controle e zonas de restrição (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Segundo “Superpave MIX DESIGN - ASPHALT INSTITUTE”, os pontos de controle funcionam como faixas através dos quais as gradações devem passar e variam dependendo do tamanho máximo nominal da composição de agregados. Já a zona de restrição, segundo Bernucci *et al.* (2007), é uma medida empírica que forma uma região em que aconselha-se que a curva granulométrica não deveria passar, pois pode fazer com que a mistura se torne bastante frágil e dependa do ligante para ter resistência ao cisalhamento.

Neste trabalho, a dosagem Superpave e seu resultado, o teor de projeto de CAP, serão tratados como metodologia, pois sua aplicação e seu resultado final estão ligados aos ensaios mecânicos realizados nos corpos-de-prova confeccionados. O teor de projeto de CAP foi utilizado para os diferentes teores de EVA incorporados ao CAP, admitindo-se este ser o mesmo para os diferentes tipos de CAP modificados.

O Fluxograma da Figura 26 (BERNUCCI *et al.*, 2007) ilustra a dosagem em questão, e os detalhes são apresentados a seguir.

Figura 26 - Fluxograma da Dosagem Superpave (BERNUCCI *et al.*, 2007)



O primeiro passo da dosagem Superpave compreendeu a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis (Brita 19mm, Brita 12,5mm, Areia, Pó de Pedra e Fíler). Foram uma graúda (ou superior), uma intermediária e uma miúda (ou inferior) dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de restrição (Figuras 27 a 29).

As curvas granulométricas superior, intermediária e inferior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 8. O Tamanho Nominal Máximo (TMN) do agregado para as curvas foi de 19mm, 19mm e 25mm para as curvas superior, intermediária e inferior, respectivamente.

Tabela 8 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Areia	Pó de Pedra	Fíler (Cal)
Superior	6%	35%	14%	43%	2%
Intermediária	15%	35%	6%	42%	2%
Inferior	26%	34%	0%	40%	0%

Figura 27 - Curva Granulométrica Superior

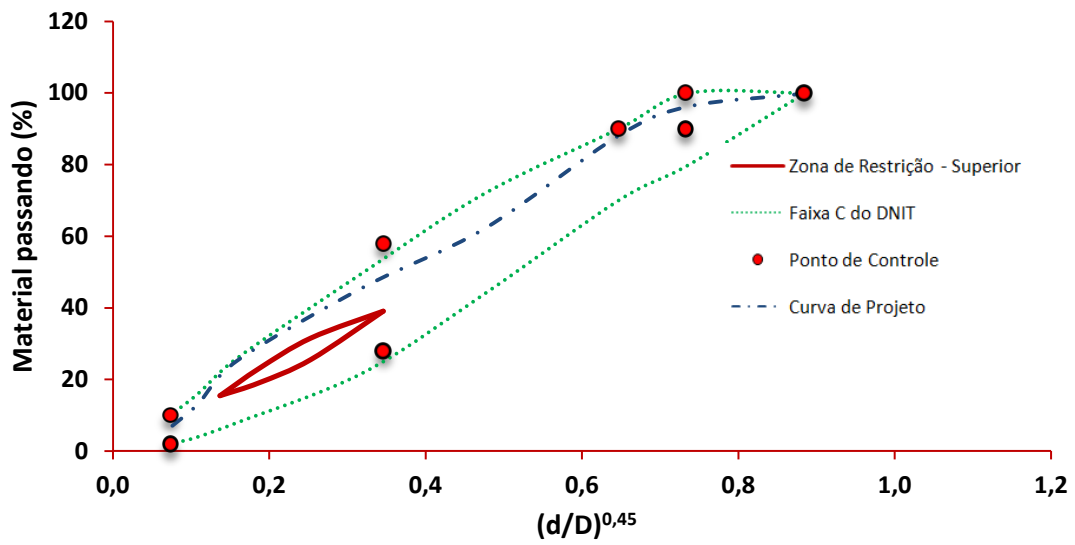


Figura 28 - Curva Granulométrica Intermediária

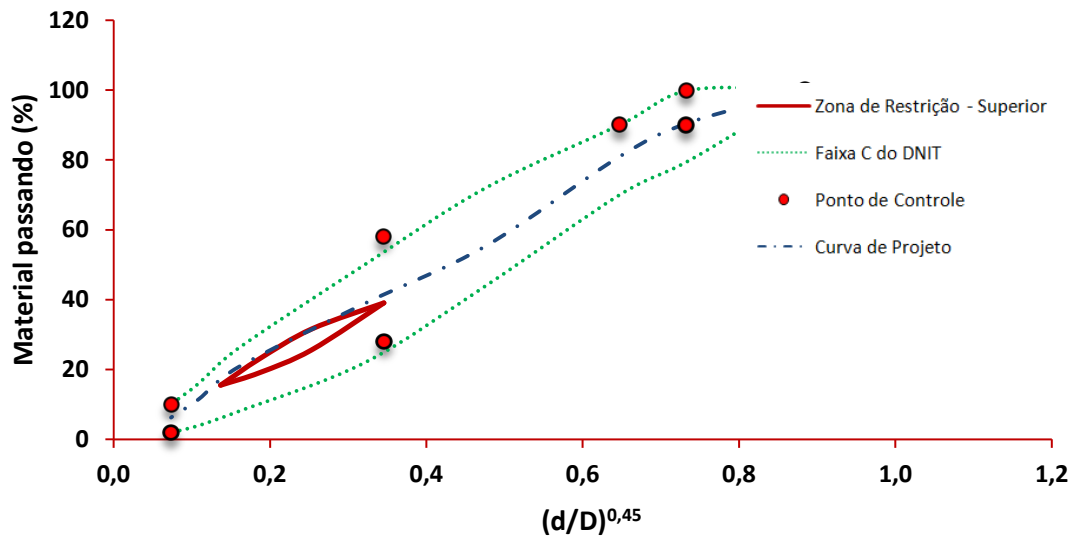
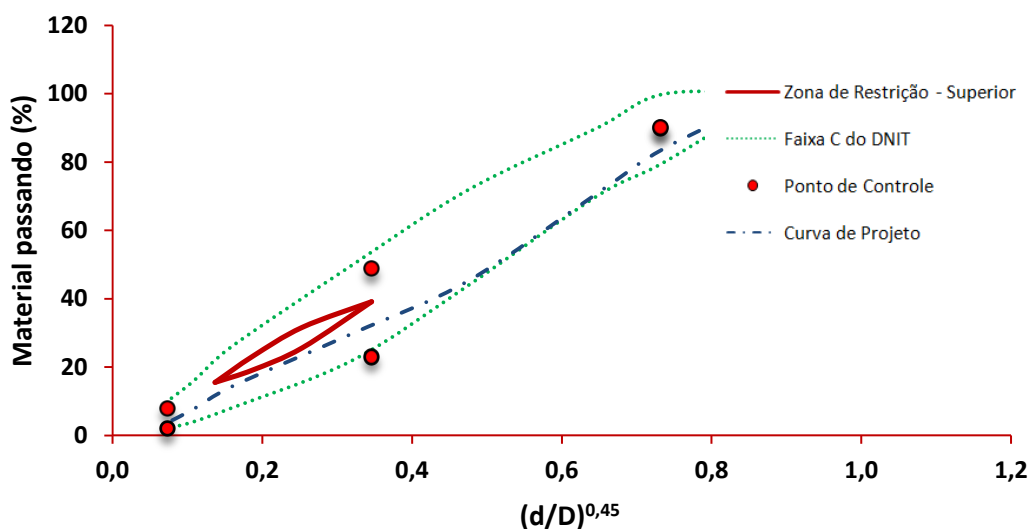


Figura 29 - Curva Granulométrica Inferior



A premissa principal da dosagem SUPERPAVE é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros do projeto. Caso isso não ocorra nas misturas experimentais feitas inicialmente, é realizada uma estimativa do teor de ligante que deverá atender esta exigência. Por este método, é facultado ao projetista escolher qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, melhor atende os critérios das propriedades volumétricas especificadas para o projeto.

3.2.4.1 Compactação dos Corpos de Prova

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório (Figura 30), segundo a norma ASTM D 6925-09 (*Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*).

Figura 30 - Compactador Giratório Superpave



A determinação do Volume de vazios depende da Densidade Máxima Teórica da mistura asfáltica (DMT) e da densidade aparente do corpo de prova compactado. A DMT, segundo Bernucci *et al.* (2007), é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica, sendo a razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com ligante asfáltico e total de ligante asfáltico.

A determinação da Gmm pode ser realizada segundo o método americano ASTM D 2041-00. A Figura 31 ilustra o equipamento utilizado neste ensaio.

Figura 31 - Equipamento para ensaio de determinação da Gmm



O objetivo final do *Rice Test* é a determinação de uma combinação e graduação de agregados econômica (dentro dos limites especificados) e do teor de ligante asfáltico correspondente, de modo a obter uma mistura com as seguintes características (MANUAL DE ASFALTO, 1989):

- Ligante asfáltico suficiente para assegurar um pavimento durável;
- Estabilidade suficiente que satisfaça a demanda de tráfego sem distorções ou deslocamentos;
- Vazios, em quantidade suficiente na mistura compactada total, de modo a permitir a expansão térmica do ligante asfáltico e agregados nas temperaturas de verão, contudo, em pequena quantidade que evite efeitos danosos do ar e da umidade; e
- Trabalhabilidade suficiente que permita a colocação adequada da mistura sem segregação.

Para a realização do ensaio pesa-se, inicialmente, 1.500 g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5 mm) ou 2.500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 19,0 mm) em um recipiente metálico de peso conhecido. Em seguida, este é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta. É então aplicada uma pressão de vácuo no recipiente de 30 mmHg, por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante. Logo após esse período é restabelecida a pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, é pesado imerso. A G_{mm} é determinada por:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(C-B)} \quad (1)$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa do recipiente metálico imerso em água (g);

C = massa do recipiente + amostra imerso em água (g).

Com os dados de Massa Específica Real e Aparente dos agregados, do ligante e a massa específica máxima medida da mistura (G_{mm}), calculada a partir do *Rice Test*, é feita a determinação do teor de ligante inicial para confecção dos corpos de prova.

Primeiramente é feito o cálculo da massa específica efetiva da composição de agregados (G_{se}) considerando a máxima absorção de ligante pelos vazios dos agregados:

$$G_{se} = G_{sb} + F_a \times (G_{sa} - G_{sb}) \quad (2)$$

Onde:

G_{sb} = Massa específica aparente da composição de agregados (g/cm^3);

F_a = Fator de absorção;

G_{sa} = Massa específica real da composição de agregados (g/cm^3).

O segundo passo consiste em calcular o volume de ligante absorvido (V_{la}):

$$V_{la} = \frac{P_{ag} \times (1 - Vv)}{\left(\frac{P_l + P_{ag}}{G_l + G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (3)$$

Onde:

P_{ag} = percentual de agregados na mistura (em massa) dado por $(1 - P_l)$;

Vv = Volume de vazios (%);

P_l = Teor de ligante (% em massa);

G_l = Massa específica do ligante (g/cm^3).

Após isso, é calculado o volume de ligante efetivo (V_{le}), dado por:

$$V_{le} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(TMN) \quad (4)$$

Onde:

TMN = Tamanho máximo nominal de peneira para a composição dos agregados.

O passo seguinte consiste em calcular a massa de agregado (M_{ag}):

$$M_{ag} = \frac{P_{ag} \times (1 - Vv)}{\left(\frac{P_l + P_{ag}}{G_l + G_{se}}\right)} \quad (5)$$

A estimativa do teor de ligante inicial é feita então, de acordo com a Equação 6.

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}} \right] \quad (6)$$

Conforme citado em Bernucci *et al.* (2007), os corpos de prova podem ser compactados em diferentes números de giro conforme o volume de tráfego considerado. Neste caso, foi considerado o tráfego médio a alto, desta forma, considerou-se $N_{inicial} = 8$ giros, $N_{projeto} = 100$ giros (no qual V_v deve ser igual a 4%) e $N_{máximo} = 160$ giros no compactador giratório. O $N_{inicial}$ e o $N_{máximo}$ servem apenas para avaliar a compactabilidade da mistura. O $N_{projeto}$ deve atender aos 4% de V_v e é usado para selecionar o teor de ligante da mistura.

A compactação é realizada no compactador giratório com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de $1,25^\circ$ conforme a premissa do Superpave. A mistura, ainda não compactada, permanece em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Foi calculado um P_{li} para cada curva granulométrica, porém, os valores foram próximos uns dos outros e por isso admitiu-se um único valor inicial tentativa para o prosseguimento da dosagem. Para o teor de ligante inicial foi calculado o valor de 4,9% e foram moldados 18 corpos de prova (Figura 32), para fazer a verificação do volume de vazios obtido, sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois corpos-de-prova para N_i , dois para N_p e dois para N_m .

Figura 32 - Corpos de prova no teor estimado de 4,9% de CAP



Além do Vv, são avaliados critérios como Gmb corrigida conforme Tabela 9, o percentual de VAM (Volume de Agregado Mineral) que deve ser de 13,0% no mínimo, e RBV (Relação Betume Vazios) que deve estar entre 65 e 75%.

Tabela 9 - Gmb corrigidas e critérios

Gmb corrigida, %Gmm	Critério
%Gmm @ Nicial	< 89
%Gmm @ Nprojeto	96
%Gmm @ Nmáximo	< 98

A %VAM é dado pela Equação 7:

$$VAM = 100 - \frac{\%Gmm @ N_{projeto} \times Gmm \times Pag}{Gsb} \quad (7)$$

Os corpos de prova apresentados na Figura 32 foram medidos, e suas propriedades volumétricas foram avaliadas (Tabela 10).

Tabela 10 – Tabela de resumo da compactação das misturas tentativas

Mistura tentativa	% Ligante	%Gmm Nicial	%Gmm Nprojeto	%Gmm Nmáximo	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	4,9	91,87	97,41	97,55	2,6	12,48
Intermediária	4,9	90,78	96,77	97,35	3,2	12,13
Superior	4,9	88,68	96,29	96,18	3,7	13,48

Não sendo encontrado o volume de vazios de 4% com este teor inicial, faz-se uma estimativa do teor de ligante que alcançaria os 4% de Vv (Equação 8):

$$P_{l,estimado} = P_{li} - [0,4 \times (4 - Vv)] \quad (8)$$

A curva que se encaixou nas premissas de %VAM, %RBV e da %Gmm foi a curva Superior, no Nprojeto, conforme Tabela 11. Portanto as demais etapas da compactação foram realizadas utilizando a granulometria da curva Superior, mostrada anteriormente na Figura 27 e detalhada na Tabela 8, assim como o novo teor de ligante estimado.

Tabela 11 – Resumo das informações das misturas tentativas para Vv=4% no Nprojeto

Mistura tentativa	Ligante tentativa (%)	Ligante estimado (%)	VAM (%)	RBV (%)	%Gmm Ninicial	%Gmm Nmáximo
Inferior	4,9	4,2	12,6	68,30	90,46	96,13
Intermediária	4,9	4,5	12,2	67,22	90,01	96,57
Superior	4,9	4,8	13,5	70,46	88,39	95,88

O novo teor calculado foi de 4,8%. Com isso, consideram-se outros três teores, além do teor estimado: teor estimado \pm 0,5% e + 1%, de onde são moldados mais 6 corpos de prova para cada teor (Figura 33).

Figura 33 - Compactação com os teores de 4,3%, 4,8%, 5,3% e 5,8% em Ni, Np e Nm



Nesta etapa, ainda, não foi possível encontrar o volume de vazios de 4%, então, a partir da curva Teor de CAP em função do volume de Vazios (Figura 34), foi estimado um novo teor de 5,06% que atendesse a este critério, e novamente foram moldados seis corpos de prova. Estes foram compactados para a verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada e a confirmação do valor de 4% de Volume de Vazios (Figura 35).

Figura 34 - Estimativa do teor de projeto de CAP

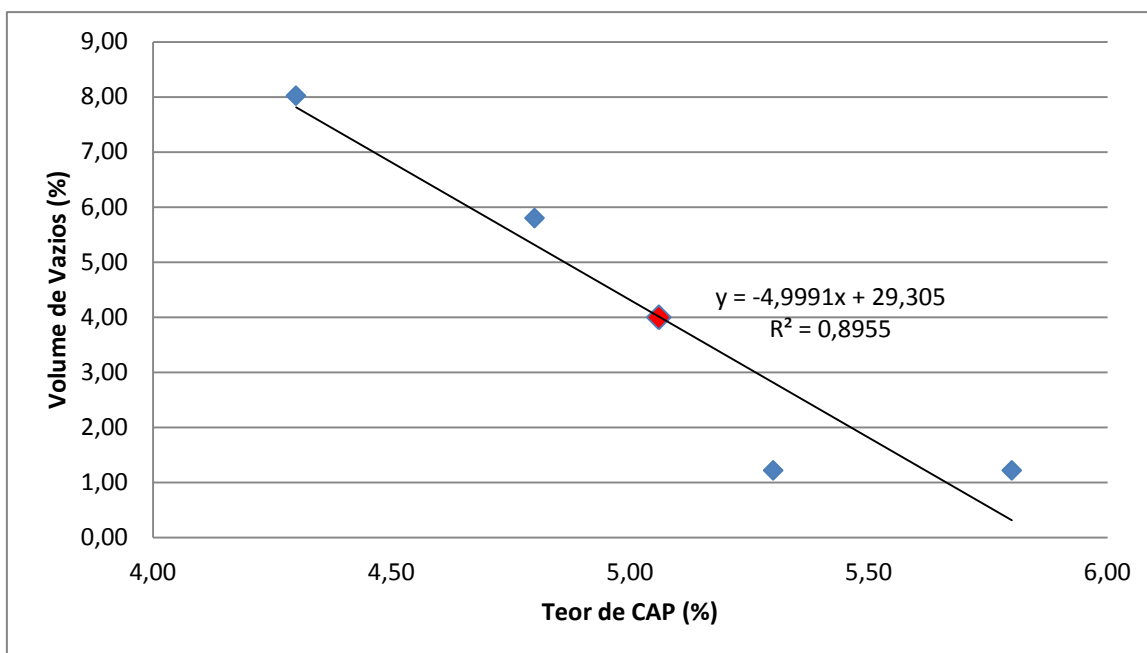


Figura 35 - Corpos de prova moldados no teor de projeto de 5,06% de CAP e 4% de Vv



3.2.5 Caracterização Mecânica

No comportamento das misturas asfálticas, diversos são os fatores envolvidos, portanto, para conhecer melhor o comportamento deste material são necessárias investigações acerca das variáveis envolvidas em seus diversos níveis.

São considerados fatores todos os parâmetros que possam influenciar o resultado destes ensaios, podendo cada um destes assumir diversos valores, os quais são conhecidos por níveis. Para determinação destes fatores e níveis, foi realizado um Planejamento Experimental Fatorial, para, posteriormente, ser aplicado aos ensaios mecânicos e a análise dos resultados.

3.2.5.1 Planejamento experimental fatorial

Quando os experimentos envolvem diversos fatores que são divididos em diferentes níveis, estes são denominados esquemas fatoriais. Os fatores são as variáveis independentes ou preditoras, e os níveis são aqueles fixados segundo o interesse da pesquisa (RODRIGUES, 2009). Segundo Peralta-Zamora (2009), a principal vantagem da aplicação do planejamento fatorial está em permitir avaliar o efeito de um grande número de variáveis simultaneamente, com um número reduzido de experimentos. Isto ocorre devido às combinações entre os diferentes fatores e níveis das variáveis investigadas, que em cada réplica, são testadas todas as combinações possíveis (BARROS NETO *et al.*, 1996).

Button (2005) destaca como vantagens da utilização das técnicas estatísticas do planejamento fatorial:

- redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- determinação da confiabilidade dos resultados;
- realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

De acordo com Rodrigues (2009), esse tipo de planejamento normalmente é representado por N^k , sendo k o número de fatores em estudo e N seus níveis. Desta forma, o caso mais simples de combinação é aquela em que cada fator k está presente em dois níveis (2^k), ou seja, em um experimento com k fatores e dois níveis, são realizados $2 \times 2 \times \dots \times 2$ (k vezes) = 2^k observações da variável resposta. Os níveis são costumeiramente codificados com os sinais (+) e (-). Cunico *et*

al. (2008) ressaltam que, em um planejamento fatorial, as réplicas, ou repetições de experimentos são importantes na determinação do erro experimental na resposta do estudo.

Quando se trata de um fatorial 2^2 sem repetições, observa-se a dificuldade de se efetuar inferência sobre as respostas obtidas. Desta forma, adicionam-se pontos centrais no espaço experimental, estes pontos são representados por (0) e podem fornecer informações sobre o comportamento das respostas, além de evidenciar a qualidade da repetibilidade do processo (RODRIGUES, 2009).

O denominado Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) que adiciona pontos axiais ao fatorial, além dos centrais, permite uma melhor abrangência dos fatores e análise de resíduos (MATEUS *et al.*, 2001). Os níveis de pontos axiais são do tipo $\pm\alpha$ onde $\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}}$.

Neste caso, a região de estudo é maior com um menor número de ensaios a serem realizados, sendo possível calcular o erro experimental quando se toma o cuidado de repetir pelo menos três vezes, a condição do ponto central, indispensável para avaliar a reprodutibilidade do processo. É possível, ainda, elaborar um modelo matemático que, se validado estatisticamente, pode ser usado para a obtenção da superfície de resposta e através desta análise determinar as condições otimizadas.

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

3.2.5.1.1 Variáveis Independentes

Fatores

Há diversos fatores envolvidos no processo de dosagem e caracterização misturas asfálticas, como o teor e o tipo de ligante asfáltico, a granulometria do agregado, o tempo de envelhecimento, a energia de compactação, a granulometria e o teor de resíduo, entre outros (ILDEFONSO, 2007). Porém, para que o experimento fosse exequível, fez-se necessário considerar apenas os fatores mais importantes e, portanto, a partir de estudos realizados em misturas asfálticas por outros pesquisadores, foram selecionados os fatores teor de resíduo e tempo de envelhecimento.

i. Teor de resíduo

Essa variável teve como objetivo verificar a quantidade de EVA a ser incorporada no ligante asfáltico.

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

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

Níveis

Para os fatores indicados no item anterior foram estudados cinco níveis de teor de resíduo e cinco tempos de envelhecimento. Os critérios de escolha foram baseados na literatura técnica.

3.2.5.1.2 Variáveis Dependentes

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

- Resistência à tração por compressão diametral estática;
- Módulo de Resiliência;
- Dano por umidade induzida (Lottman).

Todos os ensaios foram realizados em corpos-de-prova moldados segundo a dosagem Superpave. Com base na literatura, e seguindo os preceitos do planejamento experimental com DCCR, os níveis dos teores de resíduo escolhidos para a pesquisa foram: 0%, 2%, 3%, 4% e 5% (p/p) e os tempos de envelhecimento de 0h, 2h, 3h, 4h e 5h. Incluindo os pontos centrais e axiais (Tabela 12).

Tabela 12 - Condições experimentais para os fatores e níveis propostos

Variável	Código	-1,41	-1,00	0,00	+1,00	+1,41
EVA (%)	X1	0	2	3	4	5
Envelhecimento (h)	X2	0	2	3	4	5

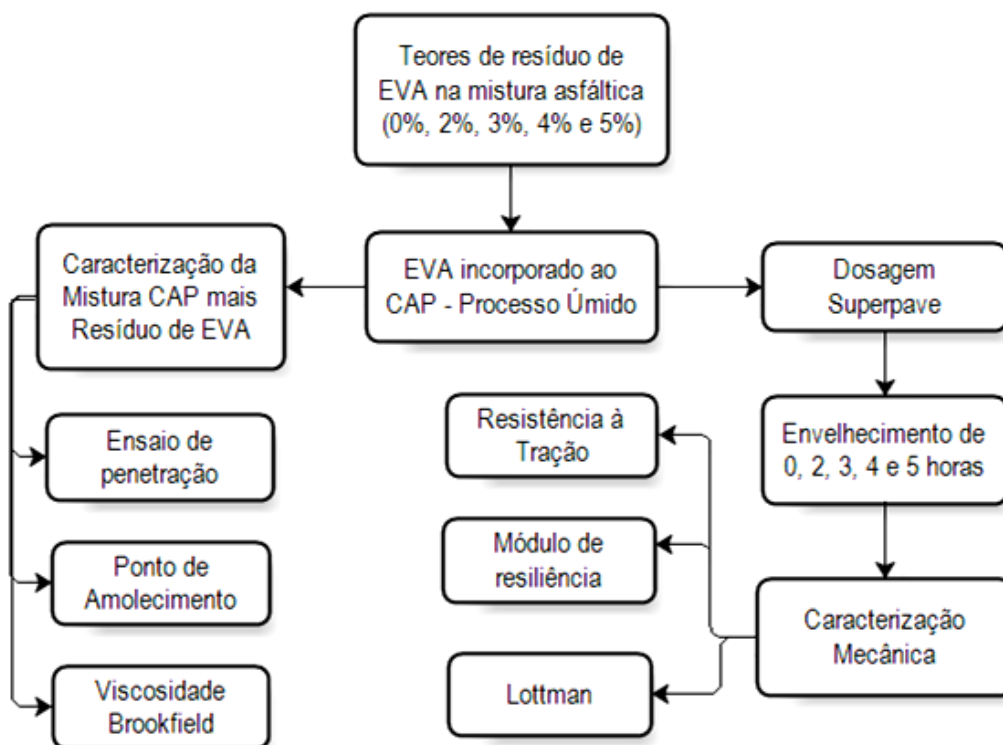
O delineamento fatorial é do tipo $2^2 + 3$ Pontos Centrais + 4 Rotacionais, e resulta numa matriz de 11 ensaios como mostrado na Tabela 13. Os ensaios mecânicos foram feitos com duas repetições para cada condição experimental.

Tabela 13 - Matriz de ensaio corrido

Condição Experimental	EVA (%)	Envelhecimento (h)	EVA (%)	Envelhecimento (h)
1	-1	-1	2	2
2	+1	-1	4	2
3	-1	+1	2	4
4	+1	+1	4	4
5	+1,41	0	5	3
6	-1,41	0	0	3
7	0	-1,41	3	0
8	0	+1,41	3	5
9	0	0	3	3
10	0	0	3	3
11	0	0	3	3

No fluxograma da Figura 36 são apresentados os ensaios realizados a partir da mistura do CAP com o resíduo de EVA.

Figura 36 - Caracterização mecânica

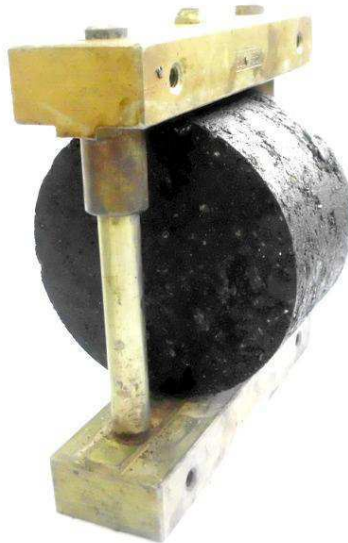


3.2.4.1 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral também denominado de *Brazilian Test* constitui um arranjo simples que permite impor um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga. O ensaio é bastante empregado na atualidade para a medida da resistência à tração indireta de amostras de concretos asfálticos (BALBO, 2007).

O ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral (Figura 37) foi realizado segundo a norma ME 138/94 do DNIT com a moldagem dos corpos-de-prova realizada no compactador giratório. Para realização destes ensaios serão moldados corpos-de-prova com teores de projeto de CAP obtidos por meio da metodologia de Dosagem Superpave.

Figura 37 - Posicionamento do corpo-de-prova para ensaio de Resistência à Tração



A aplicação de carga acontece progressivamente com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1\text{mm/s}$ até que se dê a ruptura por separação das duas metades do corpo-de-prova segundo o plano diametral de carga (Figura 38).

Figura 38 - Ruptura do corpo-de-prova por tração



3.2.4.2 Determinação do Módulo de Resiliência

A interação carga-estrutura, com suas consequências sobre a deformação e ocorrência de campos e gradientes de tensões nas camadas dos pavimentos devem ser estudadas levando em consideração. Que, tal estrutura constitui um conjunto de camadas superpostas, respondendo monoliticamente aos esforços aplicados pelos veículos (BALBO, 2007).

O módulo de resiliência é a capacidade de um material de não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga. Este parâmetro é usado na formalização de análises de

sistemas de camadas dos materiais de pavimentação. De acordo com BALBO (2007), o módulo resiliente pode ser determinado em campo por meio da interpretação de deformações ocorridas durante provas de cargas e em laboratório é determinado pela relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida. Os ensaios comumente realizados em laboratório na determinação do módulo resiliente de misturas asfálticas e cimentados são: ensaio de compressão diametral ou ensaio de tração indireta (*Brazilian test* – DNER – ME 138/94), ensaio de tração na flexão (dobramento) e ensaio triaxial dinâmico (confinamento).

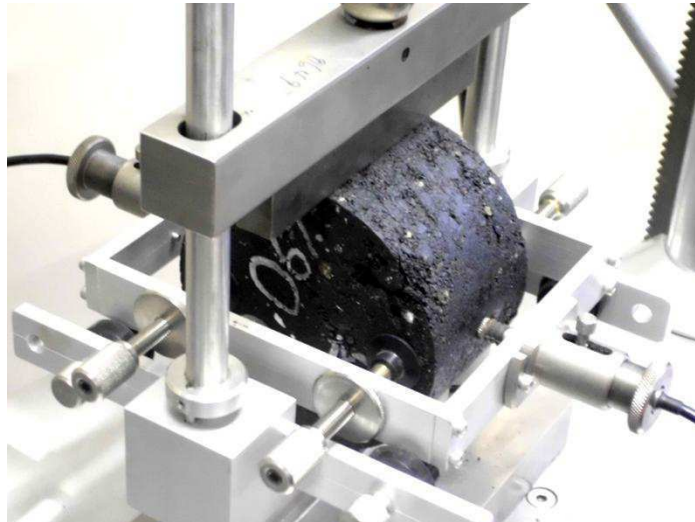
O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo Método de Ensaio (ME 135/10) normatizado pelo DNIT. Sendo obtido diretamente com auxílio do *software* UTS003 1.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25 (Figura 39), que obtém o módulo total, que é, em geral, cerca de 30% maior que o MR.

Figura 39 - Prensa UTM-25 utilizada no ensaio de Módulo de Resiliência



O MR é dado pela relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical e a sua deformação recuperável correspondente à tensão aplicada. O corpo-de-prova é colocado na base da prensa preso a um suporte e conectado a dois transdutores mecanoeletromagnéticos tipo LVDT (*linear Variable Differential Transformer*) de contato (Figura 40).

Figura 40 - Ensaio de Módulo de Resiliência



O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações, durante o carregamento repetido, em potencial elétrico, cujo valor é registrado no microcomputador. Uma pré-calibração é necessária, a fim de se correlacionar as deformações com os valores dos registros.

3.2.4.3 Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida – Lottman Modificado

Os danos em misturas asfálticas causados pela umidade afetam o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos, além de evidenciar problemas de adesividade do agregado-ligante asfáltico. O ensaio consiste na avaliação de misturas asfálticas quanto a sua suscetibilidade à água, e é uma adaptação do procedimento da AASHTO T 283 baseado no trabalho de R. P. Lottman e um trabalho posterior de D. G. Tunnicliff e R. R. Root (BERNUCCI, *et al.*, 2007) para os corpos de prova preparados segundo a dosagem Superpave.

O primeiro passo consiste em colocar o CP em um recipiente com água destilada e aplicar o vácuo a uma pressão de 250-650mmHg por um período de 5 a 10 minutos (Figura 41). Após esse tempo, deixa a mostra em repouso na água por mais de 5 a 10 minutos sem aplicação de vácuo.

Figura 41 - Ensaio de Lottman

Após a aplicação do vácuo, retira o CP e este é envolvido em um saco plástico, adicionando 10ml de água e coloca-o em uma geladeira a 10°C (simulando a condição extrema de mínima temperatura que se pode alcançar na região Nordeste) por um período de 16hs. Após esse período, coloca-se o CP em imersão a 60°C por um período de 24 ± 1 h. Ao retirar, deixa-se o CP ainda envolto no saco plástico submerso em água a 25°C para estabilização da temperatura.

Realiza-se então, o ensaio de Resistência à Tração no CP após o condicionamento (Figura 42), e encontra-se RTu e calcula-se a Resistência à Tração Retida por umidade induzida (RRT), que é a razão entre RT e RTu. O critério para aceitação de uma mistura asfáltica é dado em porcentagem de propriedade retida, que para a AASHTO é de 80% e para ASTM é de 70%.

Figura 42 - Rompimento do corpo-de-prova após o condicionamento

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. São apresentados os resultados da caracterização física dos agregados, do EVA, do CAP 50/70 e do CAP modificado com EVA, além dos resultados da caracterização mecânica das misturas com CAP modificado em diferentes porcentagens de EVAR e utilizando-se diferentes tempos de envelhecimento.

4.1 Caracterização Física dos Agregados

4.1.1 Granulometria

Na Tabela 14 estão inseridas as densidades aparente e real e a absorção dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 14 - Densidade e absorção dos agregados

Agregado	Densidade Aparente	Densidade Real	Absorção (%)
Brita 19mm	2,75	2,76	0,21
Brita 12,5mm	2,76	2,80	0,46
Areia	2,54	2,55	0,08
Pó-de-Pedra	2,49	2,54	0,72

Os valores de densidade real e aparente dos agregados foram realizados com duas repetições, e se encontraram dentro os valores reportados na literatura para cada tipo de material. Esses dados foram utilizados na determinação do teor de projeto de CAP na dosagem Superpave.

Vasconcelos e Soares (2003) destacaram os diferentes métodos de determinação de densidade real e aparente dos solos, tendo em vista a influência destes no cálculo das dosagens de misturas asfálticas. Os principais problemas levantados durante a execução do ensaio que podem influenciar diretamente nos resultados são o controle de temperatura, a observação da condição de SSS (Superfície Saturada Seca) e a pesagem do picnômetro completo com água.

A absorção da brita 19mm foi de 0,21% e de 0,46% para a brita 12,5mm. A norma 031/2006 ES do DNIT para pavimentos flexíveis não cita valores de absorção para os agregados. No entanto, a absorção de ligante asfáltico pelo agregado pode influenciar positivamente no fenômeno da adesividade, se a absorção ocorrer em pequena magnitude, melhora o intertravamento mecânico da mistura; por outro lado, se a absorção for muito alta, há diminuição da espessura da película de ligante asfáltico sobre o agregado, tornando a mistura mais suscetível à ação deletéria da água e aumento do consumo de CAP. As principais propriedades dos agregados em relação ao processo da absorção são a porosidade, a distribuição do tamanho dos poros e a composições química e mineral do agregado (Gouveia *et al.*, 2004).

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos. A brita 19mm apresentou desgaste Los Angeles igual a 37,06% e a brita 12,5 de 44,50%, valor abaixo da especificação do DNIT 031/2006 ES, que recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%. Portanto, as britas utilizadas nesta pesquisa atenderam ao critério estabelecido.

4.2 Resíduo de EVA

4.2.1 Classificação do Resíduo

Os metais analisados nos ensaios de Lixiviação e de Solubilização e os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Metais analisados e concentrações

Análise	Pb (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Cr (mg/l)	Al (mg/l)
Lixiviação	< 0,10	< 0,10	< 0,10	43,80	< 0,10	< 0,10	< 1,00
Valor Limite	1,00	0,10	0,02	5,00	0,30	5,00	0,82
Solubilização	< 0,10	< 0,10	< 0,10	2,37	< 0,10	< 0,10	< 1,00
Valor Limite	0,01	0,10	0,02	5,00	0,30	0,05	0,20

O menor valor possível de ser lido no equipamento é de 0,10mg/l, por isso os teores que possuem valor < 0,10mg/l não significam, necessariamente, que o elemento esteja dentro do limite estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004), apenas que eles se encontram em concentrações inferiores a estas e que não é possível quantificá-las. Observa-se que o zinco (Zn) encontra-se, para lixiviação, em concentração de 43,80, porém, conforme Silva (2012), o limite para alumínio (Al) é de 5,00mg/l.

Em se tratando da classificação dos resíduos conforme NBR 10004 (ABNT, 2004) observa-se que, o limite máximo da concentração de zinco (Zn) estabelecido por esta norma, para uma substância submetida ao processo de lixiviação é bastante inferior ao encontrado na amostra. Para que um resíduo seja classificado como perigoso, ele deve apresentar pelo menos um metal com teores acima do estabelecido. Observa-se na Tabela 15 que os teores de zinco para o resíduo de EVA de uma indústria do setor calçadista da cidade de Campina Grande são extremamente elevados se comparados com o limite estabelecido pela norma, chegando a teores de 43,8mg/l, além de que o alumínio também encontra-se em concentrações superiores ao limite máximo, fato que leva ao enquadramento do resíduo de EVA na Classe I, ou seja, trata-se de um resíduo perigoso.

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), a periculosidade de um resíduo apresenta-se em função de suas propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas, podendo apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. O contato com o zinco (Zn) oferece danos ao organismo como, por exemplo, tosse, febre, náusea e vômitos.

O zinco está entre os metais normalmente utilizados como agentes interfaciais para compatibilização envolvendo elastômeros e termoplásticos, como por exemplo, os copolímeros em bloco, como é o caso do EVA. O sistema de vulcanização origina uma série de reações complexas, envolvendo aceleradores, enxofre, ZnO e outros componentes. Destaca-se a reação entre o óxido de zinco e o acelerador como a principal etapa da reação de vulcanização (JANSEN e SOARES, 2000).

De acordo com Vedoy (2006), esses agentes também são aditivos adicionados ao composto de EVA para diminuir a temperatura de decomposição do agente de expansão, e o óxido de zinco, além de ser um dos tipos mais comuns e eficientes dos agentes, é aplicado em quantidades que variam de 2 a 5phr na matriz do EVA.

Ildefonso (2007) e Cultri e Alves (2008) afirmaram que o resíduo do EVA era classificado como pertencente à Classe II B (não-inerte), diferentemente do resíduo utilizado nesta pesquisa, considerando-o um material atóxico, não biodegradável, porém de baixa periculosidade, podendo conter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água e não biodegradável. De acordo com Ildefonso (2007), com esta classificação, recomenda-

se que o resíduo seja aterrado ou incinerado, neste último caso com o risco de liberação de gases tóxicos, como CO₂, CO, fumaça, hidrocarbonetos e possibilidade de traços de acroleína.

Outros trabalhos também estudaram um tipo de resíduo antes tratados como não-perigoso ser classificado como perigoso, como por exemplo na pesquisa de Silva (2012) que classificou o resíduo domiciliar da cidade de Campina Grande-PB como Classe I, tóxico para o meio ambiente e a saúde pública, devendo ser destinado e tratado como tal.

Necessita-se de uma maior preocupação com o descarte inadequado, forma de tratamento e destino do resíduo do EVA em aterros para resíduos classificados como não-perigosos, uma vez que o potencial de toxicidade do Zinco pode comprometer o ambiente no qual está inserido, causando sérios problemas ambientais.

Ao inserir o resíduo do EVA no cimento CAP, que é um material impermeável, o resíduo poderia ficar encapsulado e desta maneira não poluir o ambiente. Porém, estudos voltados para esta perspectiva devem ser desenvolvidos a fim de analisar ainda a periculosidade do manuseio deste material para aplicação na pavimentação.

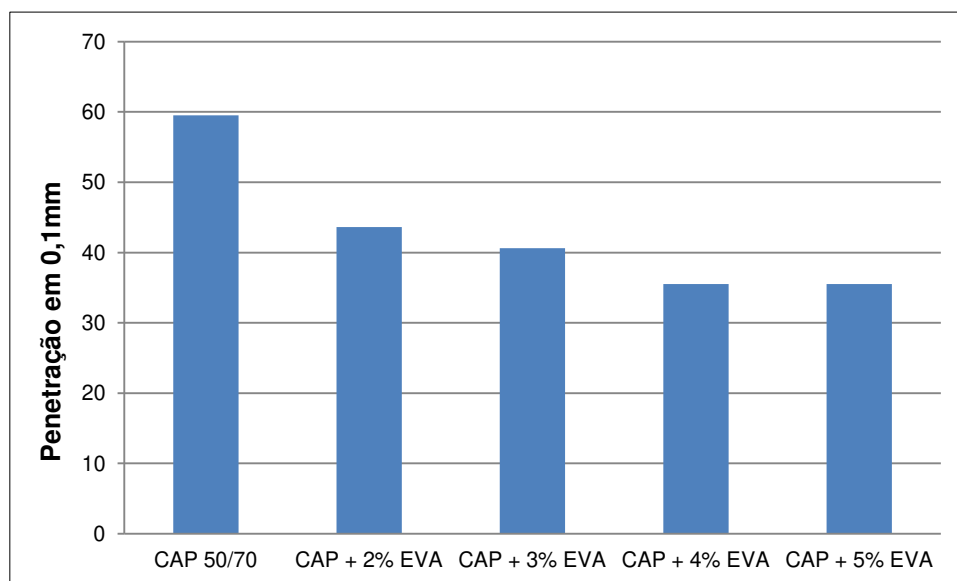
4.3 Caracterização do CAP

4.3.1 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência dos materiais asfálticos. O comportamento previsto é que a adição do resíduo de EVA torne o ligante mais consistente, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de EVA nas misturas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16 e no gráfico da Figura 43.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de penetração

Amostra	CAP Puro	2% EVA	3% EVA	4% EVA	5% EVA
Penetração (0,1mm)	59,5	43,6	40,6	35,5	35,5

Figura 43 - Resultados do ensaio de penetração

O CAP em seu estado puro foi caracterizado segundo a sua consistência através do ensaio de penetração em 50/70, o que representa que a penetração média na amostra esteve entre a faixa entre 50 e 70 décimos de milímetro. À medida que houve o acréscimo do teor de EVAR incorporado no ligante asfáltico, foi possível perceber a diminuição da penetração, e conseqüentemente, o aumento da consistência do CAP, tornando-o mais duro. No teor de 5% de EVAR a penetração média foi de 35,5 décimos de milímetros.

Comparando-se os resultados dessa pesquisa com aqueles obtidos por Sauola *et al.* (2009), verifica-se a tendência da diminuição da penetração do CAP frente ao aumento do teor de EVAR no ligante asfáltico. Sauola *et al.* (2009) observaram ainda, que, o grau de penetração do CAP modificado com o resíduo do EVA, é bem menor se comparado ao CAP modificado com EVA puro nas mesmas proporções. Portanto pode-se dizer que o resíduo do EVA aumenta a consistência do CAP mais significativamente do que o polímero puro.

Panda e Mazundar (1999) enfatizaram a influência da temperatura de mistura para a produção do CAP modificado com 5% de EVA puro na penetração do ligante asfáltico. Eles mostraram a influência do aumento da temperatura de mistura na diminuição da penetração do CAP, com a mesma porcentagem do EVA. Estes autores também verificaram a diminuição da penetração do ligante modificado com resíduo do EVA frente ao aumento do teor de resíduo na modificação do CAP.

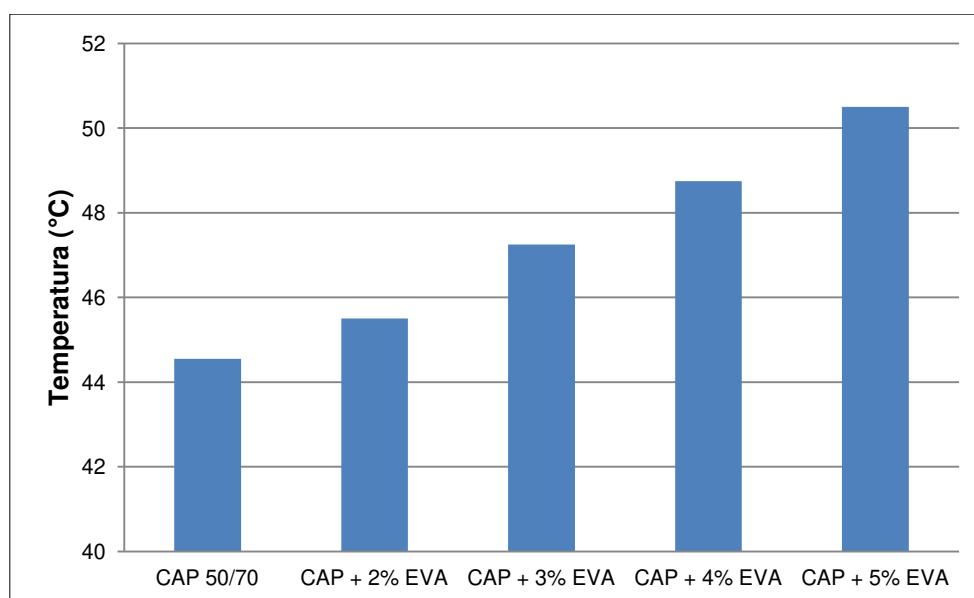
4.3.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento consiste no valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. A Tabela 17 apresenta os resultados de ponto de amolecimento (Método do Anel e Bola). A Figura 44 ilustra o efeito do teor de EVAR no ponto de amolecimento do ligante modificado com EVAR.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento

Amostra	CAP Puro	2% EVA	3% EVA	4% EVA	5% EVA
Ponto de Amolecimento (°C)	44,50	45,50	47,25	48,75	50,5

Figura 44 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento (°C)

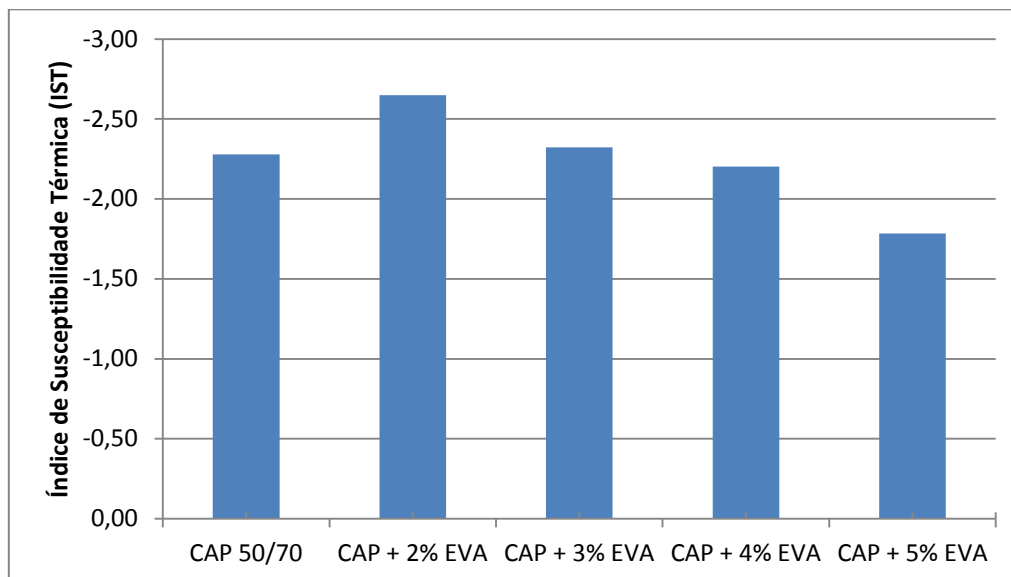


O ponto de amolecimento para a amostra de CAP puro foi de 44,5°C, sendo observado um aumento da temperatura gradual e proporcional ao aumento do teor de EVAR, chegando a atingir 50,5°C para o teor de 5% de EVAR. Desta forma, observou-se um aumento da viscosidade do ligante asfáltico com a adição do resíduo de EVA, havendo elevação do ponto de amolecimento, o que representa um aumento da resistência ao acúmulo da deformação permanente das misturas modificadas (SANTOS *et al.*, 2008).

Este resultado também confere com os estudos de Panda e Mazumdar (1999), González *et al.* (2004) e Sauola *et al.* (2009) para CAP modificado com EVAR e EVA. Evidenciando o aumento da temperatura de amolecimento do CAP modificado frente ao aumento do teor de EVAR.

Os resultados para o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) podem ser observados na Figura 45:

Figura 45 - Índice de Susceptibilidade Térmica



Conforme os estudos de Alencar (2005), os resultados para o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) foram mais próximos de zero em relação ao ligante não modificado para os teores de 4 e 5% de EVAR, indicando que a consistência do ligante tende a permanecer inalterada sobre uma faixa de temperatura maior se comparada ao CAP não modificado. Isso indica que o ligante permanece mais flexível e resistente à fissuração mesmo em climas frios.

D'Antona e Frota (2011) ressaltam que, uma das propriedades adquiridas pelos ligantes modificados com polímeros, é a redução da susceptibilidade térmica, além de apresentar melhor coesão do ligante asfáltico e adesão aos agregados e maior resistência ao envelhecimento. Estas alterações contribuem para uma maior estabilidade em suas propriedades tornando o ligante asfáltico mais elástico ou mais duro, refletindo em maior resistência à fadiga e à deformação permanente. Em seu trabalho de ligantes asfálticos modificados com o EVA puro, assim como Luo e Chen (2011), também observaram menor valor no ensaio de penetração e maior temperatura para o ponto de amolecimento, relativo ao CAP convencional, dando isso como indicativo de maior consistência e, portanto, menor suscetibilidade à deformação permanente.

Diversos outros trabalhos, enfatizam que, no caso dos ligantes asfálticos modificados com polímero, observa-se uma diminuição do IST, evidenciados pela diminuição do grau de penetração do CAP e aumento do ponto de amolecimento. Tal propriedade, como já discutida,

demonstra um aumento da resistência à deformação permanente e melhores condições de rolamento durante a vida de serviço do pavimento, e ainda, conseqüentemente, aumenta a vida útil do pavimento (GARCÍA-MORALES *et al.*, 2004; LUCENA *et al.*, 2004; PINHEIRO e SOARES, 2005; TOMÉ *et al.*, 2005; DANTAS *et al.*, 2007).

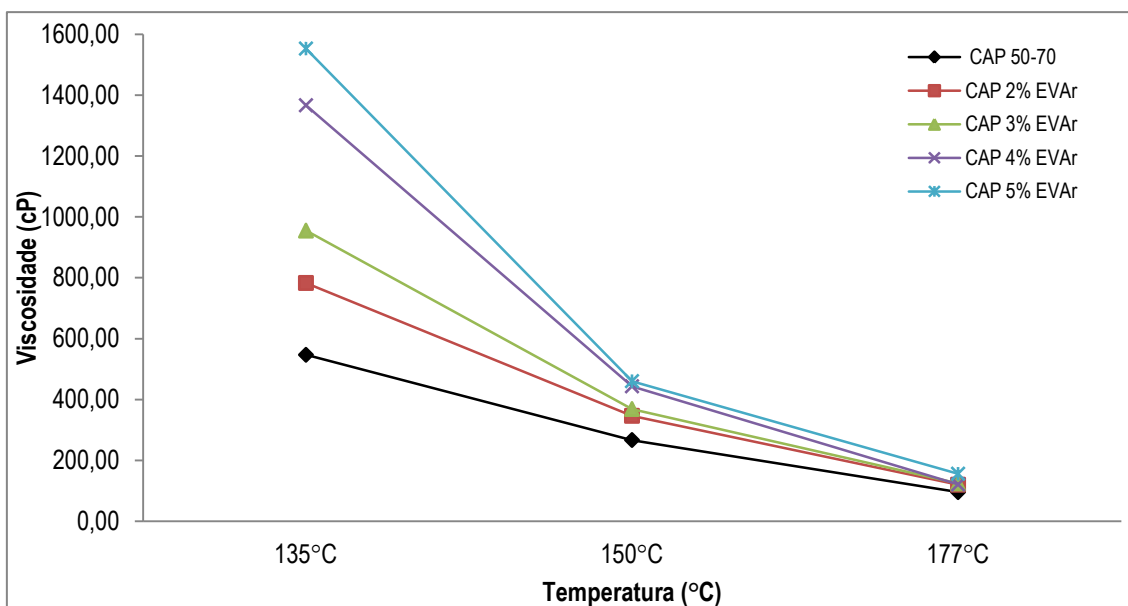
4.3.3 Viscosidade Brookfield

O ensaio de viscosidade Brookfield foi realizado com o spindle 21 tanto no CAP puro 50/70 quanto nos modificados. Os resultados do ensaio de viscosidade rotacional com CAP puro e modificado com teores de 2, 3, 4 e 5% de EVAR são mostrados na Tabela 18 e no gráfico da Figura 46. É possível observar o aumento da viscosidade do CAP diante do aumento do teor de EVAR. A maior viscosidade apresentada pelo CAP modificado deve-se, à presença do resíduo do copolímero no teor de 5%.

Tabela 18 - Resultados da viscosidade rotacional

Temperaturas (°C)	Viscosidade Rotacional (cP)				
	CAP Puro	2% EVAR	3% EVAR	4% EVAR	5% EVAR
135°C	546,50	782,50	954,50	1366,25	1552,50
155°C	266,50	346,00	368,50	443,00	460,00
177°C	95,25	199,75	124,0	120,50	755,75

Figura 46 - Viscosidade do CAP puro e modificado com EVA



À baixa temperatura (135°C), a adição do resíduo polimérico produz um aumento significativo na viscosidade em relação ao CAP puro, como era de se esperar. De um modo geral, os resultados mostraram que os ligantes modificados por EVAR apresentam valores de viscosidade mais altos em relação ao ligante puro.

Já à temperaturas de 177°C, o comportamento do asfalto não tem grandes discrepâncias entre os diferentes teores, assim como em relação ao CAP puro. Os resultados mostraram que a 135°C o ligante original tem a mais baixa viscosidade e o asfalto modificado com resíduo de EVA em 5% têm a mais elevada, o que é uma característica típica de adição de polímero termoplástico ao ligante (ALENCAR, 2005; GARCIA-MORALES *et al.*, 2005; ZATTERA *et al.*, 2005; BRINGEL *et al.*, 2008).

O EVA, devido a sua natureza alifática (em virtude da existência de sequências atilênicas de elevado peso molecular), se solubilizou nas frações saturadas do asfalto modificando o escoamento do material (BRINGEL *et al.*, 2008). A adição do resíduo de EVA forneceu uma maior rigidez ao asfalto, representando um acúmulo de resistência à deformação permanente.

É importante destacar que, neste trabalho não foi utilizado agente compatibilizante entre o CAP e o EVAR, sendo observado a elevadas temperaturas, a separação de fase entre a matriz do ligante asfáltico e do resíduo. Este fato influencia o comportamento da viscosidade do ligante a elevadas temperaturas (155°C e 177°C), onde o ligante passa a trabalhar independente do

EVAR, e pode-se afirmar que este fato influenciou no comportamento da viscosidade do ligante, não havendo mais distinção entre os diferentes teores de EVAR na modificação.

O valor de viscosidade dos ligantes modificados a 135°C não ultrapassou 3.000 mPa.s (AASHTO MP1, 1998). Esse critério é exigido para não dificultar os processos de bombeamento, bem como, o manuseio e a aplicação na pista. Desta forma, todos os ligantes avaliados neste estudo podem ser utilizados na pavimentação.

Domingos (2012) ressalta que, o aumento da viscosidade depende, via de regra, do tipo e da proporção do modificador, bem como da interação entre o modificador e o ligante asfáltico de base. Ele verificou que, em relação a outros modificadores (PPA, Elvaloy, SBS, PE), o CAP modificado com 8% de EVA foi o que apresentou maior viscosidade rotacional (2.940cP) à 135°C e à 177°C. Evidenciando a influência deste tipo de polímero no aumento da viscosidade do ligante modificado.

O tipo de curva normalmente obtida a partir do ensaio de viscosidade rotacional para asfaltos modificados com o polímero EVA foi caracterizada por Polacco (2006), que possui a característica de não possuir regiões distintas, sendo uma curva mais gradual de diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura, assim como pode-se observar na Figura 46. Esse tipo de comportamento também pode ser observado em asfaltos modificados com PE e SBS.

4.4 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos desta pesquisa foram realizados segundo as onze condições experimentais apresentadas na Tabela 13, de forma que a partir desta matriz de ensaios é possível obter uma superfície de resposta contendo as demais combinações entre os diferentes teores de EVA e os diferentes tempos de envelhecimento.

De acordo com a matriz de ensaio corrido, apresentada na Tabela 13 do Capítulo 3, para cada uma das onze condições experimentais foram moldados 6 corpos de prova, segundo a dosagem Superpave, onde dois corpos de prova foram destinados ao ensaio de Resistência à Tração (RT), dois para o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) e outros dois para o Lottman. Ao todo, foram moldados 66 corpos de prova para a etapa de caracterização mecânica, além de mais 6 corpos de prova para a caracterização da mistura nas condições normais conforme a metodologia Superpave, sem modificação por resíduo de EVA e com 2 horas de envelhecimento. Os resultados sem o tratamento estatístico são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios mecânicos na matriz de ensaios do planejamento fatorial

Condição	Amostra		RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT	RTu (MPa)	Lottman (RTu/RT) (%)
	EVA (%)	Envelhec. (h)					
Superpave	0	2h	1,54	6.093,7	3.948,7	0,88	56,8%
1	2%	2h	1,41	6.821,2	4.853,7	1,06	75,1%
2	4%	2h	1,38	7.076,0	5.139,3	0,92	67,1%
3	2%	4h	1,70	8.730,5	5.130,5	0,86	50,5%
4	4%	4h	1,77	8.065,5	4.547,7	0,96	54,0%
5	5%	3h	1,71	9.126,0	5.350,3	0,79	46,3%
6	0%	3h	1,34	7.425,2	5.526,0	1,15	85,6%
7	3%	0h	1,24	4.628,2	3.735,8	0,81	65,6%
8	3%	5h	1,72	9.595,0	5.570,9	0,90	52,2%
9	3%	3h	1,51	8.644,0	5.733,4	0,97	64,4%
10	3%	3h	1,40	7.218,7	5.167,8	1,00	71,4%
11	3%	3h	2,08	6.926,0	3.335,2	0,76	36,7%

A seguir são apresentadas as superfícies de resposta para cada variável dependente e a interpretação dos resultados. Todos os gráficos e análises foram obtidas através do *Software STATISTICA 7*.

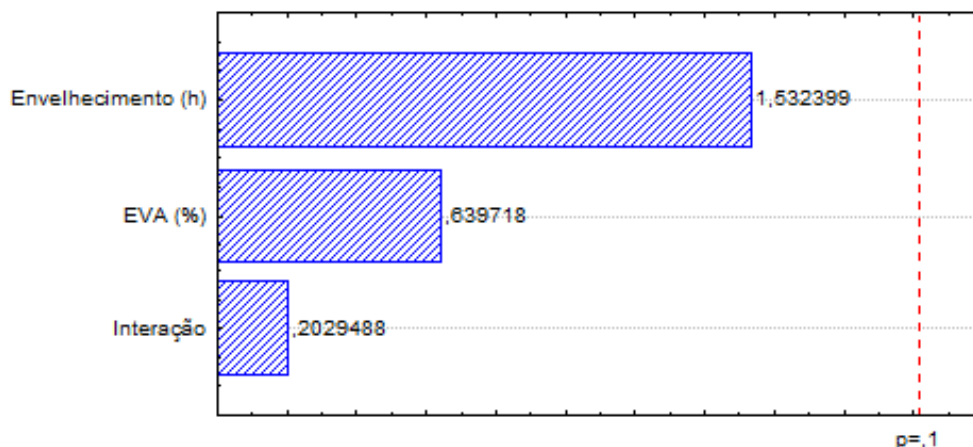
De um modo geral, devido à variabilidade dos resultados, os ensaios não alcançaram o nível de significância para formulação de um modelo estatístico que pudesse simular o comportamento das variáveis. Pode-se perceber este fato observando-se a discrepância entre os valores dos ensaios mecânicos nas condições de 9 a 11 da Tabela 19. Neste caso, a repetição do ponto central serve justamente para evidenciar a qualidade da repetibilidade do processo e calcular os erros obtidos para as estimativas de teste do modelo estatístico.

Os modelos ajustados para os ensaios mecânicos, portanto, não foram significativos nem preditivos, sugerindo apenas um indicativo do comportamento mecânico das misturas em relação à variação do percentual de EVA e dos tempos de envelhecimento.

4.4.1 Resistência à Tração

O Diagrama de Pareto faz uma comparação quantitativa dos fatores que mais contribuem para uma determinada ocorrência, neste caso, os fatores são EVA (%) e Envelhecimento (h) e a interação dos dois. Os efeitos cujos retângulos estiverem à direita da linha divisória devem ser considerados no modelo matemático.

Figura 47 - Diagrama de Pareto para RT



Através do Diagrama de Pareto é possível verificar que para o nível de significância de 90%, nenhuma das variáveis mostrou influência significativa. Ou seja, nenhuma variável (Envelhecimento, Teor de EVA e interação das duas) ultrapassou a linha de significância dos 10%. Porém, ainda assim, é possível dizer que dentre as variáveis observadas, o Tempo de Envelhecimento foi a que representou maior contribuição na variabilidade dos resultados, ou seja, influenciou mais na Resistência à Tração, do que a adição do resíduo de EVA.

Com relação à análise de variância (ANOVA) (Tabela 20), verifica-se que a Resistência à Tração não atinge o nível satisfatório do coeficiente de determinação para o nível de 10%, o poder de explicação do modelo (R^2) é de apenas 50%.

Tabela 20 - ANOVA Resistência à Tração

ANOVA – $R^2=0,504$				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor P
EVA (%)	0,025	1	0,409	0,550
Envelhecimento (h)	0,144	1	2,348	0,186
Interação	0,003	1	0,041	0,847
Erro	0,306	3		
Total	0,616	6		

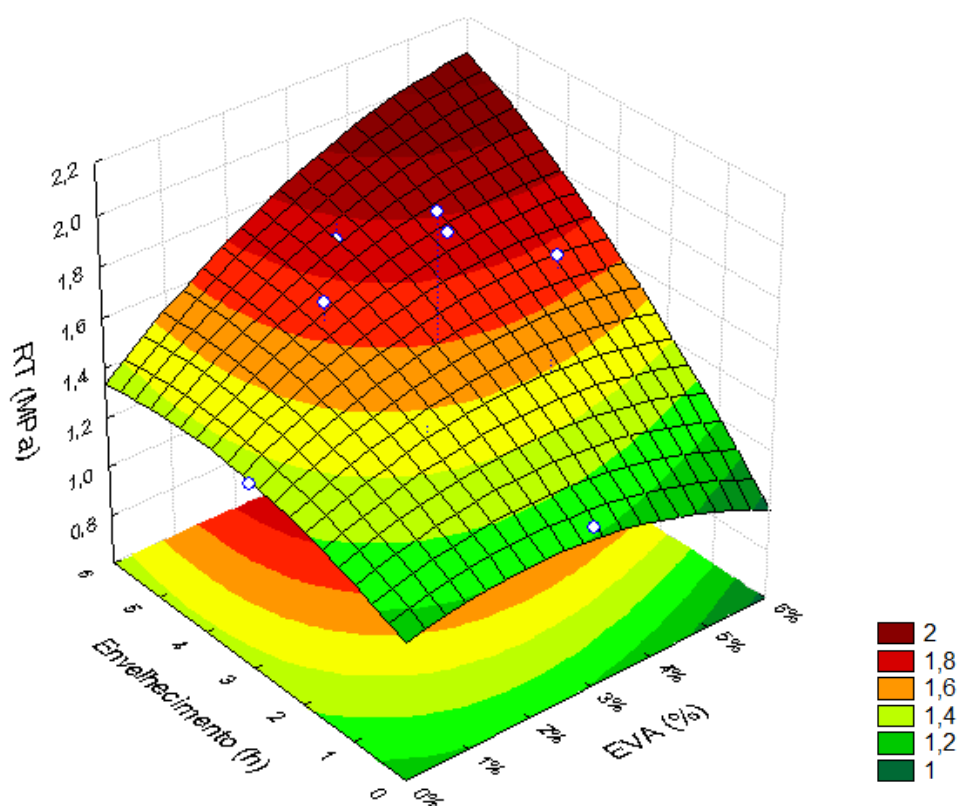
R^2 = Poder de explicação do modelo (%)

F = Significância global do modelo

Valor P = 100-P = confiança do modelo

Este fato, mostra que não é possível prever o comportamento da variável Resistência à Tração através da variação dos teores de EVA e tempos de envelhecimento da amostra. Na Figura 49 está apresentada a superfície de resposta do delineamento fatorial.

Figura 48 - Superfície de resposta da Resistência à Tração



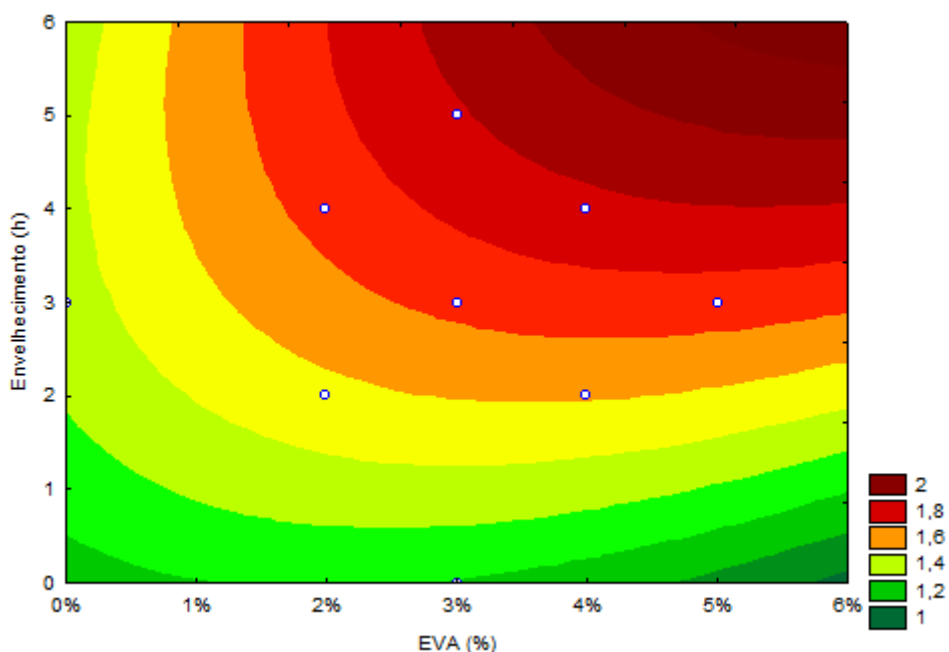
Na superfície dos resultados mostrada acima observa-se que todas as misturas atenderam ao requisito do DNIT 031/2006 que preconiza o valor mínimo de RT em 0,65MPa para aplicação em camadas de rolamento.

Observando o comportamento da RT em relação somente à adição de EVAR (simulando não haver envelhecimento), observou-se uma sutil diminuição da RT com o incremento do EVAR, o que também foi observado por Ildefonso (2007) no CAP modificado com EVAR, neste caso por via seca.

Já em relação ao aumento dos tempos de envelhecimento (simulando CAP sem modificação), nota-se um aumento mais notável da RT, também observado por Ildfonso (2007), o que de acordo com Bernucci *et al.* (2007), nem sempre representa uma vantagem, já que o ligante também perde sua flexibilidade, ou seja, aumenta seu módulo de resiliência. Tal fato será discutido mais adiante. Esses resultados demonstram o que foi observado no Diagrama de Pareto (Figura 47) em que a resistência das misturas modificadas é mais susceptível ao envelhecimento.

Cabe ressaltar ainda que, normalmente as misturas com proporções mais acentuadas de finos, curvas próximas ao limite superior da Faixa Granulométrica, como a curva utilizada neste estudo, tem um incremento menor da RT. Outra maneira de se verificar a interação entre as variáveis na RT é através do gráfico da Figura 49, em que os resultados são apresentados na forma de curvas de nível:

Figura 49 - Curvas de nível das variáveis EVA (%) e Envelhecimento (h) para RT



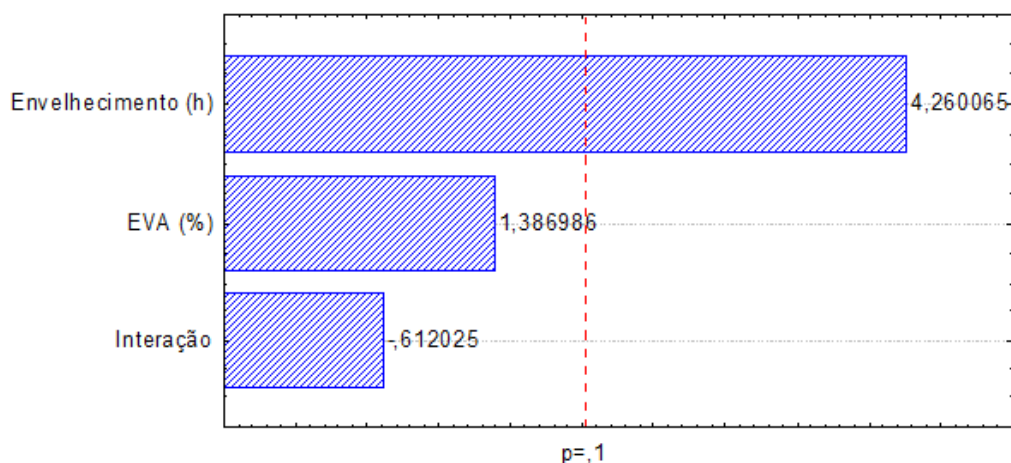
Comparando o valor de RT para o CAP puro nas condições normais, somente para as misturas acima de 3% de EVAR e 3 horas de envelhecimento, foi possível observar um aumento mais significativo no valor da Resistência à Tração. Com relação à interação das duas variáveis (% EVAR e Envelhecimento), observa-se um aumento expressivo na Resistência à Tração para os níveis de 3% a 6% de EVA e para 3 e 6 horas de envelhecimento, obtendo-se valores característicos de uma mistura de asfalto-borracha (BERNUCCI *et al.*, 2007), para 5 horas de

envelhecimento, atinge valores acima de 2,0MPa, sendo característico de misturas de módulo elevado (EME). Esse aumento da RT indica ganho da capacidade estrutural das misturas modificadas e envelhecidas.

4.4.2 Módulo de Resiliência

Com relação ao Módulo de Resiliência, a variável que se mostrou significativa foi o Envelhecimento ao nível de 90% de significância, o que pode ser observado no Diagrama de Pareto (Figura 51), ou seja, o tempo de envelhecimento tem uma maior influência nos resultados de MR do que a porcentagem de EVAR. Esse fato é destacado por Bernucci et al (2007), que quanto maior o envelhecimento, maior o Módulo de Resiliência.

Figura 50 - Diagrama de Pareto para MR



Através da ANOVA (Tabela 21) observa-se o nível de significância de 10% para o tempo de envelhecimento, 85% das variáveis podem ser explicadas pelo modelo, e que apenas a variável envelhecimento atinge o nível de confiança do modelo, porém, ainda não as torna significativa ao nível de 90%.

Tabela 21 - Valores da ANOVA

ANOVA – R ² =0,853				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor P
EVA (%)	1086139	1	1,924	0,227
Envelhecimento (h)	10246452	1	18,148	0,008
Interação	211485	1	0,375	0,567
Erro	2823002	3		
Total	19196667	6		

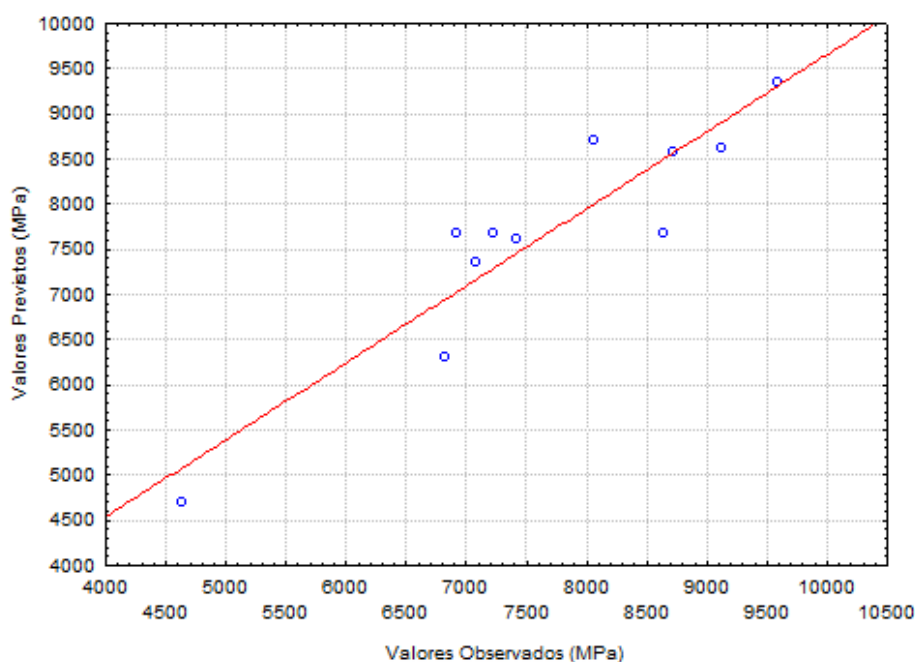
R^2 = Poder de explicação do modelo (%)

F = Significância global do modelo

Valor P = 100-P = confiança do modelo

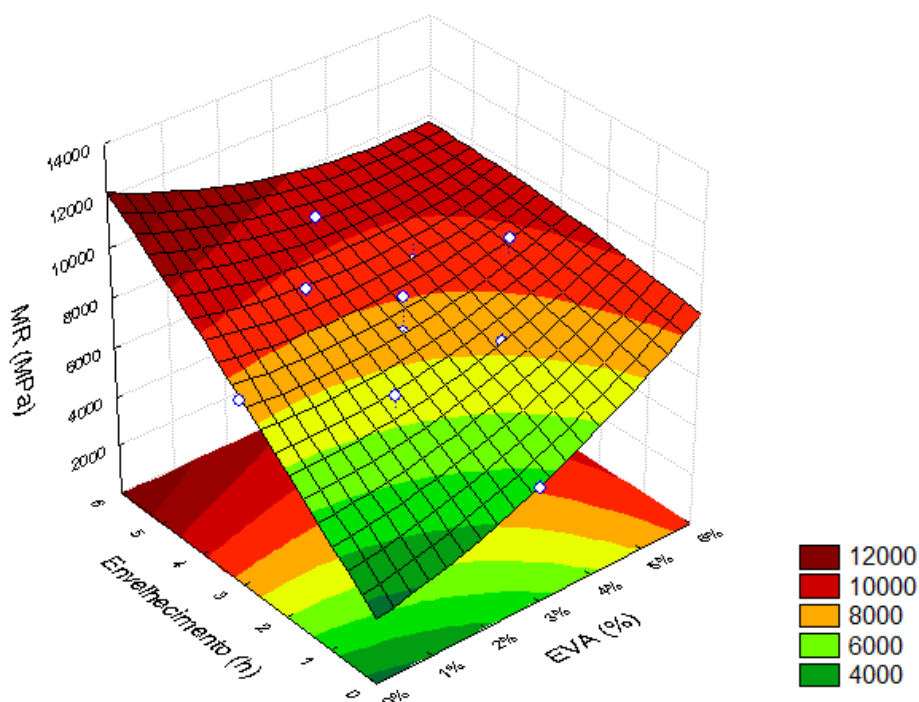
No gráfico dos valores Observados *versus* Previstos (Figura 51) é possível verificar que os valores estimados seguem uma tendência em relação aos previstos, um pouco mais próxima do que no caso da RT.

Figura 51 - Valores observados *versus* previstos para MR



A superfície de resposta encontrada para a variável Módulo de Resiliência, variando-se a quantidade de resíduo de EVA na mistura asfáltica e os tempos de envelhecimento, é mostrada na Figura 52. De acordo com Bernucci *et al.*, (2007), os valores típicos de MR para misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Para o ligante puro nas condições de moldagem padrão, a nível de comparação, o módulo encontrado foi de 6.093,75MPa. Os valores encontrados para as misturas asfálticas modificadas e envelhecidas ultrapassam o intervalo citado.

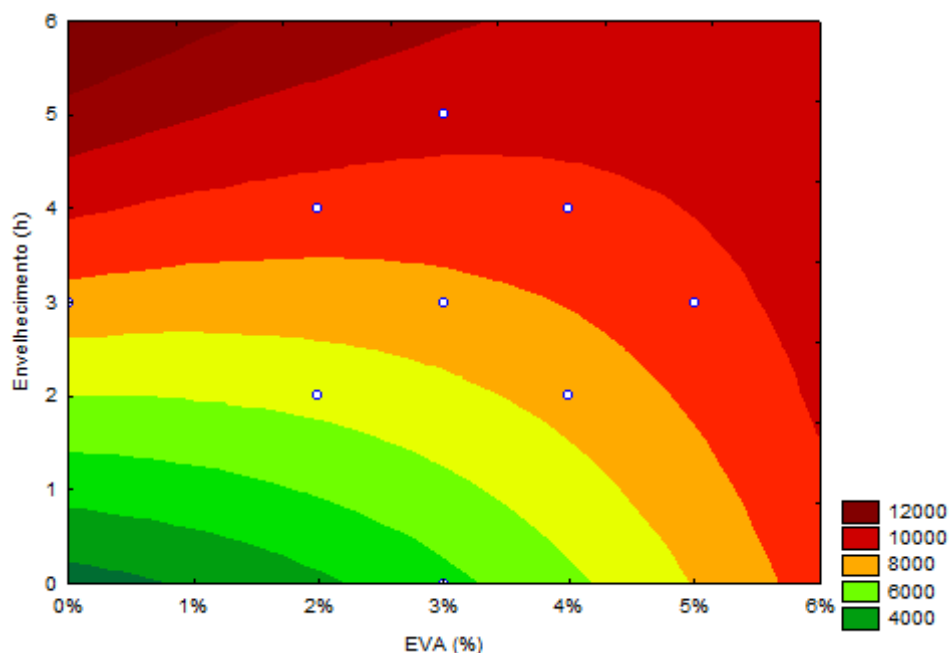
Figura 52 - Superfície de resposta para MR



O tempo de envelhecimento, conforme comprovado no Diagrama de Pareto, tem grande influência no valor do MR, pois aumenta expressivamente com seu incremento, alcançando níveis de 12.000MPa, o que caracteriza uma mistura bastante rígida. Observando apenas a variável EVA, nota-se um aumento do Módulo de Resiliência com o incremento do resíduo. Esse fato foi destacado por Balbo (2007), pois o CAP com baixas concentrações de polímero sofre um aumento na coesão e elasticidade, e o emprego do polímero tipo EVA aumenta consideravelmente o MR da mistura asfáltica, conforme pode ser observado nos resultados encontrados.

Já as misturas modificadas e envelhecidas, apresentaram um crescimento do MR proporcional ao acréscimo do teor de resíduo de EVA e aumento do tempo de envelhecimento, o que pode ser melhor visualizado nas curvas de nível da Figura 54. Até 3% de EVAR na mistura e 2 horas de envelhecimento, o MR é menor do que aquele encontrado para a mistura com o CAP puro nas condições normais de compactação, mostrando que para o incremento de 1 e 2% de EVAR a mistura perde um pouco de sua resistência.

Figura 53 - Curvas de nível para MR



Valores a partir de 12.000MPa (observado para misturas com CAP puro com 6 horas de envelhecimento) são característicos de misturas com módulo elevado (EME), que destinam-se exclusivamente à camada de base, pois contribuirão para que a estrutura se comporte como um pavimento semi-rígido do ponto de vista de deformabilidade, havendo elevada resistência à formação de trilhas de roda. No Brasil, as pesquisas com objetivo de produzir misturas EME utilizam ligante modificado com EVA (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A análise do módulo de resiliência não pode ser feita de forma direta uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base (DAVID, 2006).

Outra justificativa plausível para os altos valores de módulo seria a influência do teor de fíler mineral na rigidez da mistura. Tal fato foi analisado por Spetch *et al.* (2004) variando o teor de fíler em misturas asfálticas e dois diferentes ligantes asfálticos, CAP 50/60 e asfalto-borracha. A rigidez das misturas, medida através do ensaio de módulo de resiliência, indicou que a adição de fíler aumenta de maneira bastante expressiva os valores de MR e diminui os valores de RT.

Afirmar que quanto maior o valor do Módulo de Resiliência, melhor o desempenho da mistura asfáltica, não é bem verdade. As misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura

por carregamento estático, flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras.

Para Balbo (2007), quanto mais rígido se apresenta um material, maior é a sua capacidade de reter esforços em si mesmos, isso necessariamente induz maiores tensões de tração. Não há ganho proporcional em um aumento expressivo de MR sem o devido incremento da resistência, por isso estuda-se a relação entre as variáveis MR e RT.

Segundo Vasconcelos (2004), alguns pesquisadores acreditam que quanto menor a relação MR/RT, maior será a vida de fadiga obtida pela mistura. Além disso, foi observado, a partir da análise dessa relação, que misturas com distribuição granulométrica enquadrada na Faixa C do DNIT tendem a apresentar uma menor vida de fadiga.

Essa relação apresenta uma ideia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura asfáltica, onde misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. A superfície com a relação MR/RT está mostrada na Figura 55 e as curvas de nível na Figura 56.

Figura 54 - Relação MR/RT das misturas asfálticas

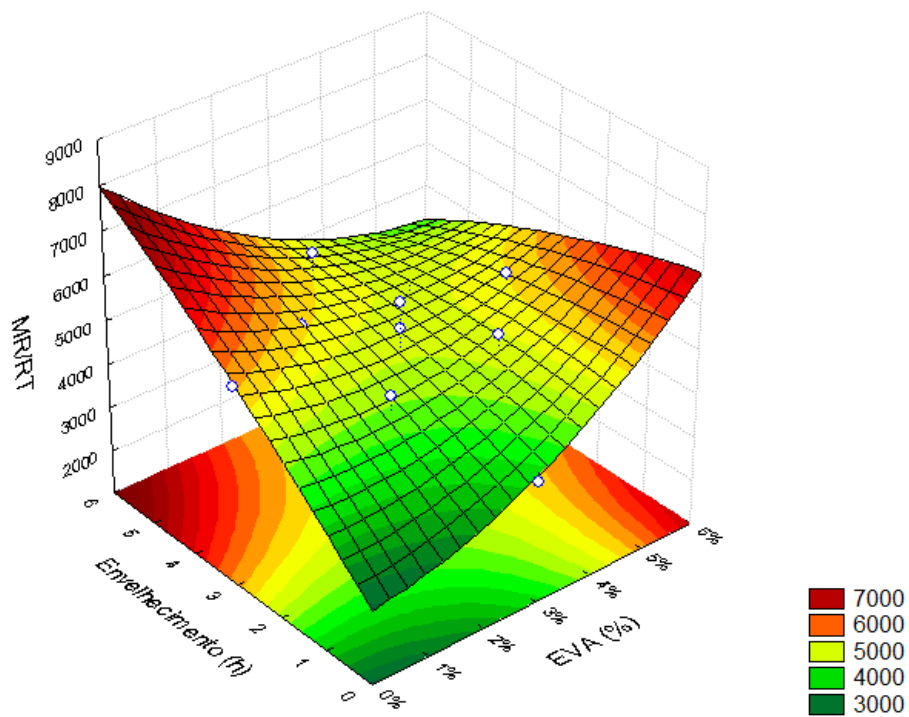
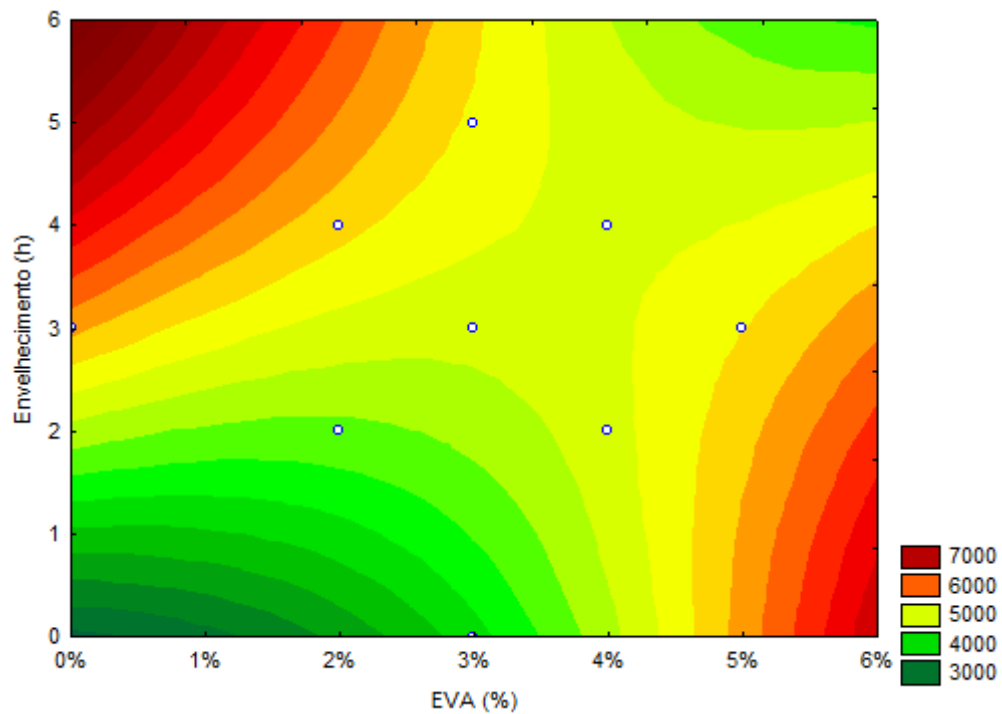


Figura 55 - Curvas de nível para a relação MR/RT



Percebe-se um aumento da relação MR/RT tanto com o incremento do EVA quanto do tempo de envelhecimento. E as misturas envelhecidas e modificadas (6% e 6h), apresentam

uma relação quase constante em relação ao ligante asfáltico puro não envelhecido na faixa de 3.000 a 4.000.

De acordo com Furlan *et al.* (2007), as misturas com relações MR/RT da ordem de 3.000 com granulometrias enquadradas na faixa C do DNIT representam materiais que são flexíveis enquanto possuem uma boa resistência à tração, com resistência à fadiga adequada.

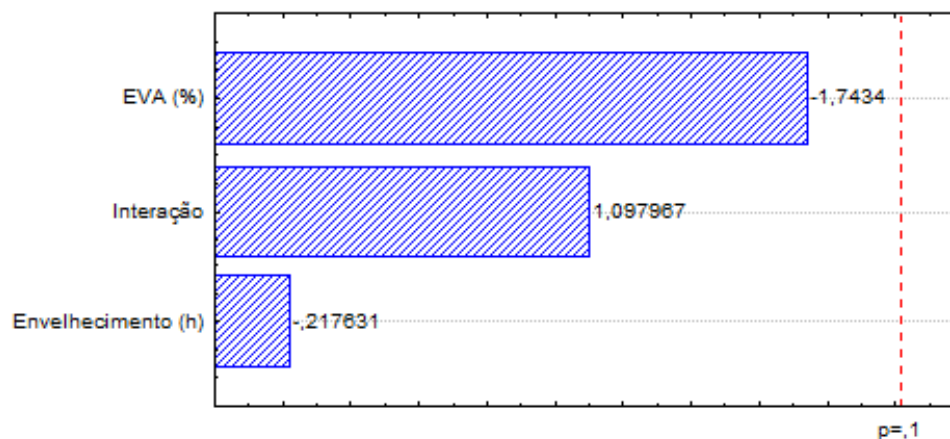
A mistura contendo o CAP com 5% de resíduo de EVAR e 2 horas de envelhecimento, assim como aquela confeccionada sem o uso do modificador com 0% de EVA e 4 horas de envelhecimento, por exemplo, apresentam valores muito altos na relação MR/RT, significando que possuem um módulo muito alto com baixa capacidade de resistência à tração, se tornando misturas bastante rígidas, e sem capacidade estrutural, se tornando mais frágeis e quebradiças e podendo romper facilmente. Já as misturas com um acréscimo proporcional de EVAR e envelhecimento (2% e 2h, 3% e 3h...), apresentam a relação MR/RT na faixa dos 3.000, caracterizando misturas com boa resistência à fadiga, ou seja, essas misturas apresentam menor potencial de desenvolver deformação permanente nas trilhas de roda.

4.4.3 Resistência ao Dano por Umidade Induzida – Lottman

A análise da perda da resistência por umidade é feita pela relação entre as resistências à tração de amostras com condicionamento (saturação, resfriamento e aquecimento em água) e amostras sem condicionamento. Sendo dada pela relação (em porcentagem) entre a RTu das amostras condicionadas e a RT das amostras não condicionadas, denominada Resistência Retida à Tração (RRT). Os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras com condicionamento (RTu), bem como a resistência retida à tração, RRT, são apresentados mais adiante.

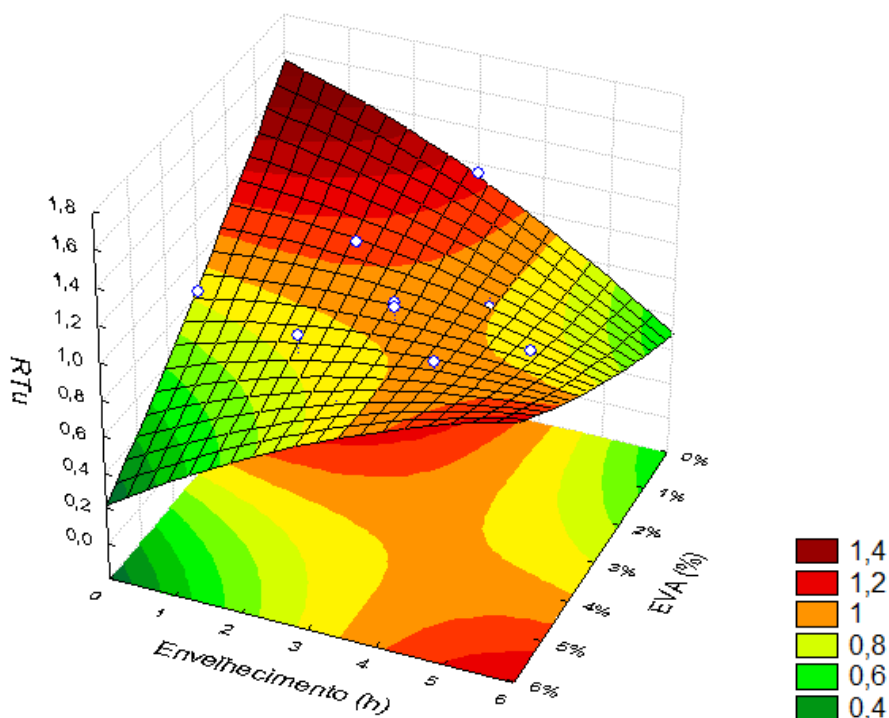
As amostras condicionadas não apresentaram fatores com significância ao nível de 10% (Figura 57), porém a variável que se mostrou mais influente nos resultados foi a porcentagem de resíduo de EVA.

Figura 56 - Diagrama de Pareto para Lottman



Na Figura 58 observa-se que houve um decréscimo nos valores de RTu em comparação aos de RT, vistos na Figura 49, demonstrando uma perda de resistência após o condicionamento. As misturas com até 5% de EVAR e 5h de envelhecimento, atenderam a resistência à tração limite preconizado pela ES 031/2006 do DNIT, de 0,65MPa. Apenas as misturas com 6% de resíduo de EVA e 0h de envelhecimento e 0% de resíduo de EVA e 6h de envelhecimento, ficaram abaixo do limite estabelecido.

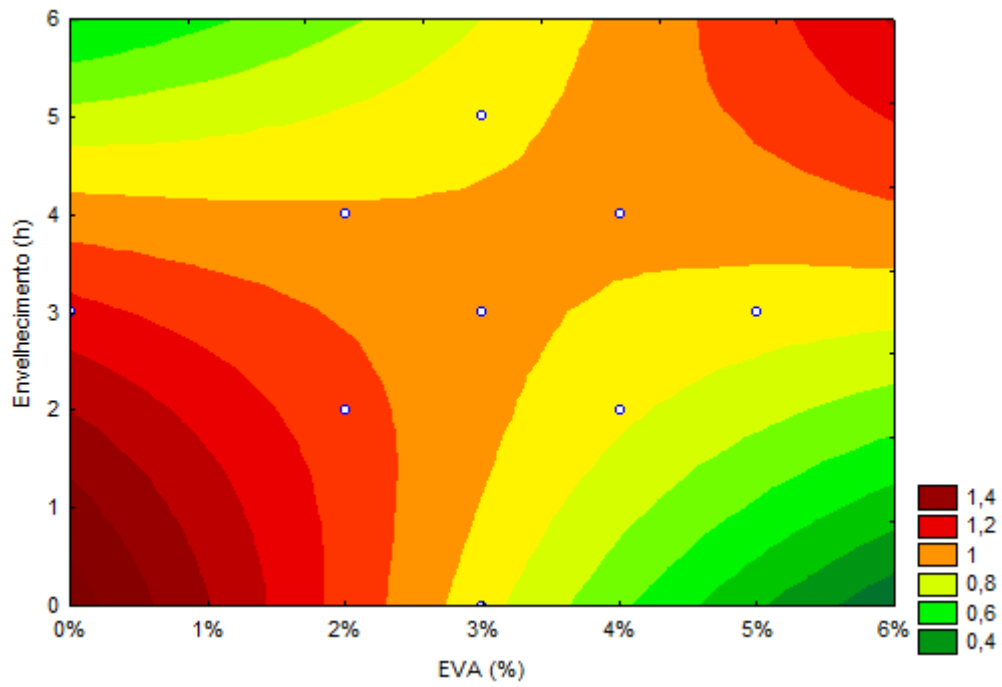
Figura 57 - Superfície de Resposta para Lottman



De Cezaro Júnior (2008), destacou que o bom desempenho nos ensaios de dano por umidade induzida pode ser em parte atribuído às características volumétricas das misturas e a adição da cal hidratada como fíler mineral, pois ele age como agente melhorador de adesividade em misturas asfálticas. Na dosagem Superpave, foi utilizada a cal hidratada com fíler, na quantidade de 2% para os agregados.

O envelhecimento do ligante também é um dos fatores que tornam o asfalto mais resistente ao descolamento da película pela ação da água, já que no processo de envelhecimento há alteração nas características dos asfaltos, como por exemplo, o aumento da viscosidade. Entretanto, deve-se destacar que o envelhecimento altera as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tornando-as mais quebradiças ou frágeis, como foi discutido anteriormente, e este processo pode acarretar em defeitos prematuros nas camadas de rolamento (DE CEZARO JÚNIOR, 2008). Nas curvas de nível da Figura 61 é possível visualizar as regiões em que foram verificados os baixos índices de RTu.

Figura 58 - Curvas de Nível para Lottman



Em relação à resistência à tração retida (RRT), esse parâmetro pode ser observado nas superfícies da Figura 60 e curvas da Figura 61.

Figura 59 - Superfície de resposta da RRT

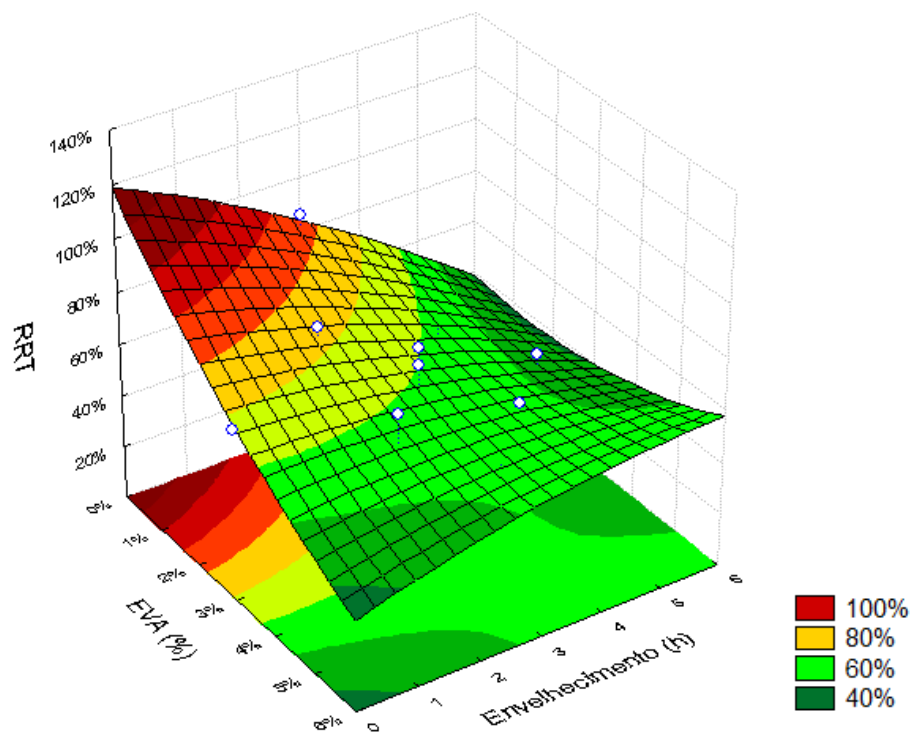
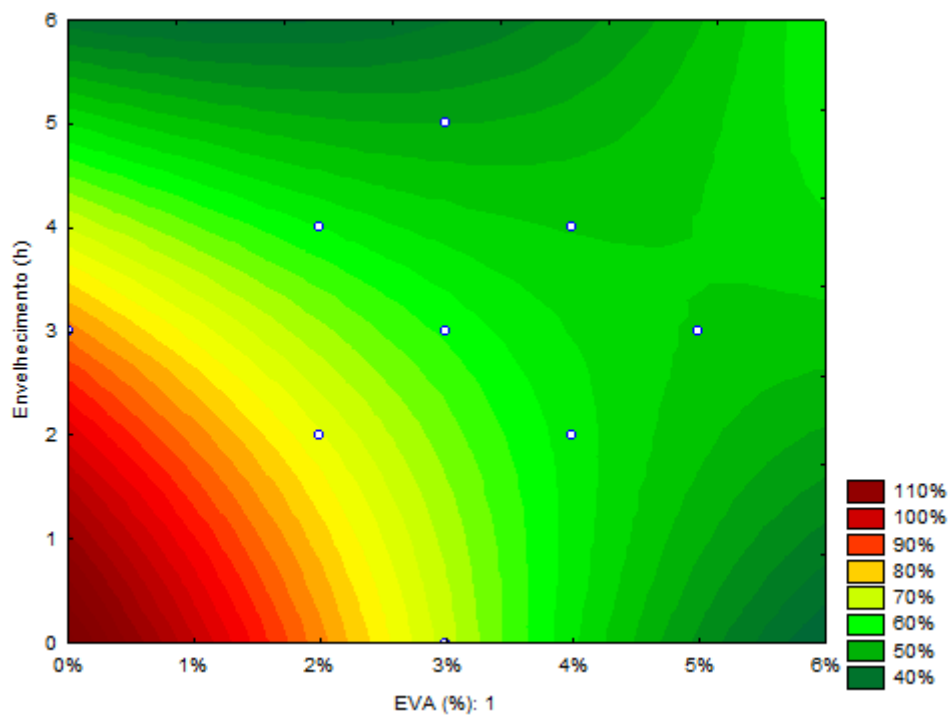


Figura 60 - Curvas de nível da RRT



O critério de definição da suscetibilidade de uma mistura asfáltica preconizado pela AASHTO T283/89 é de RRT 70%, na versão AASHTO T283/99 compatibilizada para o método Superpave o critério é RRT 80%.

As misturas que obtiveram o melhor desempenho foram aquelas com 1% de resíduo de EVA e até duas horas de envelhecimento, que não apresentam perda de Resistência à Tração após o condicionamento. Apenas as misturas com até 2% de EVAR e até 3 horas de envelhecimento atenderam ao critério da RRT de 70% preconizado pela AASHTO.

Os demais teores indicam perda de resistência de mais de 30% quando submetidos ao condicionamento, destacando que essas misturas estão mais suscetíveis ao dano por umidade, podendo causar problemas de desagregação dos agregados.

5.0 CONCLUSÕES

Um dos principais fatores que se pode destacar nesta pesquisa foi o fato do resíduo do EVA ter sido classificado como um resíduo perigoso (Classe I). Este fato faz com que todo processo de descarte deste material precise ser revisto devido à sua toxicidade e à sua periculosidade ao ser descartado de forma inadequada.

A utilização do resíduo de EVA pode ser considerada uma alternativa adequada e interessante tanto do ponto de vista econômico, por apresentar boas propriedades ao ligante asfáltico, quanto ambiental por promover um reaproveitamento deste resíduo.

De um modo geral, o ligante modificado com o resíduo do EVA apresentou comportamento satisfatório e dentro das faixas aceitáveis pelas normas brasileiras de uso na pavimentação, tendo também, grande influência nos resultados, o aumento dos tempos de envelhecimento. As análises dos dados obtidos permitiram extrair ainda as seguintes conclusões específicas:

Penetração e Ponto de Amolecimento

O CAP modificado com EVAR proporcionou um aumento da penetração, tornando-o mais duro. Houve aumento também, do ponto de amolecimento, indicando que, diante de variações térmicas, o ligante asfáltico permanece mais flexível, aumentando a faixa de trabalhabilidade deste material, e uma maior resistência à deformação permanente. Portanto, a adição do EVA promove a melhoria da durabilidade dos pavimentos.

Viscosidade Rotacional Brookfield

Observou-se aumento da viscosidade do CAP com o incremento do resíduo de EVA, e os ligantes com 5% de EVAR se mantiveram dentro do limite estabelecido pela AASHTO, podendo ser utilizado na pavimentação. Os resultados experimentais mostraram que, o ligante asfáltico puro possui características reológicas dentro dos parâmetros especificados e que a modificação com o resíduo do EVA promove um aumento da viscosidade do ligante, semelhante ao comportamento que ocorre quando o mesmo é modificado com um polímero termoplástico.

Classificação Ambiental do Resíduo

A realização dos testes de lixiviação e de solubilização para enquadramento dos metais conforme a NBR 10004/04 permitiu a obtenção de dados com teores acima do estabelecido em ambos os testes para os elementos alumínio e zinco. Portanto, preconiza-se seu enquadramento na Classe I, uma vez que o potencial de toxicidade do Zinco pode comprometer o ambiente no qual está inserido, causando sérios problemas ambientais.

Ensaio Mecânicos para as misturas asfálticas

O planejamento fatorial foi determinante no que se refere ao cálculo do número de ensaios e na combinação entre as variáveis. As superfícies de resposta não apresentaram um modelo significativo nem preditivo sugerindo apenas um indicativo do comportamento das variáveis estudadas.

O ensaio de RT atendeu aos requisitos mínimos do DNIT em todos os diferentes teores e tempos de envelhecimento estudados. Os altos valores de MR estão ligados à obtenção de módulo total por parte do equipamento, ainda assim são adequados. Porém, no ensaio Lottman e na relação MR/RT apenas os teores com 1%1h, 2%2h e 2%3h atenderam os requisitos da AASHTO e os critérios do Superpave, delimitando o uso do resíduo do EVA nestes teores.

Observou-se que, o resíduo do EVA não atuou melhorando a resistência ao envelhecimento, diferentemente das misturas modificadas por polímero, visto a grande influência que os tempos de envelhecimento tiveram nos resultados dos ensaios mecânicos.

Então, pode-se concluir que para o resíduo de EVA da indústria calçadista da cidade de Campina Grande, com a granulometria de 2,00mm e incorporado nas condições de tempo, temperatura e velocidade deste trabalho, as misturas que atenderam a todos os requisitos foram as com até 2% de resíduo de EVA e com até 3 horas de envelhecimento conseguindo um bom comportamento da mistura asfáltica.

5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas

A utilização do resíduo do EVA da indústria calçadista deve ser visto tanto sobre a ótica da reologia, quanto dos aspectos mecânicos de dosagem e misturas. Como sugestões para futuras pesquisas nesta área indica-se:

- Utilização de uma granulometria mais fina e/ou agente compatibilizante, como por exemplo, óleo extensor, que promova uma maior homogeneização do ligante modificado;
- Estudar mais teores na faixa entre 0 e 2% de resíduo de EVA para melhor caracterização mecânica dentro das faixas aceitáveis pelo DNIT;
- Realizar ensaios de Ductilidade, ensaios reológicos e Vida de fadiga para melhor caracterização do CAP;
- Realizar estudos sobre o resíduo, seus impactos ambientais sendo classificado como perigoso e formas adequadas de tratamento;
- Realizar ensaios químicos que possam avaliar a influência do resíduo de EVA classificado como perigoso no ligante asfáltico;
- Estudar a mistura do CAP com resíduo de EVA proveniente de outras fontes, assim como comparação com o CAP modificado com EVA puro;
- Verificar a viabilidade de execução de um trecho experimental utilizando a tecnologia do asfalto modificado com resíduo de EVA;

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO MP1 – Specification for performance graded asphalt binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T-283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. Washington, USA, 1989

ABETRE – Associação Brasileira das Empresas de Tratamento de Resíduos. Perfil do setor de tratamento de resíduos. Diógenes Del Bel. Março de 2012.

ABNT/MB 827 (2001) Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade absoluta. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 12235 (1992) Armazenamento de resíduos sólidos perigosos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

ABNT NBR 10004 (2004) Resíduos Sólidos – Classificação, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

ABNT NBR 10005 (2004) Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

ABNT NBR 10006 (2004) Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP

ABNT NBR 15184 (2004) Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

ABICALÇADOS. Indústria de Calçados do Brasil. 2012

ABIPLAST. O perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico. 2009.

AMBIENTE BRASIL. <http://www.ambientebrasil.com.br> Acessado em 22/01/2013 às 20:52hs.

ALENCAR, Ana Ellen V. Estudo das propriedades do cimento asfáltico de petróleo modificado por copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), 103f. 2005. Dissertação. Departamento de

Química Orgânica e Inorgânica. Universidade Federal do Ceará. Orientadora: Sandra de Aguiar Soares.

ALENCAR, A. E. V.; TOMÉ, L. G. A.; RODRIGUES, F. O. ; COSTA, F.M.L.L. ; CUNHA NETO, A. A; PEDROSA, D. A. ; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Estudo comparativo sobre o efeito do envelhecimento nas propriedades de ligantes asfálticos modificados por EVA, elvaloy e SBS. In: 20 Encontro de Asfalto, 2010, Rio de Janeiro-RJ. 20 Encontro de Asfalto, 2010.

ARAÚJO, E. M.; CARVALHO, HECKER, L.; FOOK, M. V. L.; ALMEIDA, J. R. M. D. E. Propriedades Mecânicas de Blendas de PS/Resíduo de Borracha-Influência da Concentração, Granulometria e Método de Moldagem. *Polímeros, Brasil*, v. 7, n. 3, p. 45-52, 1997.

ASTM D6925 - 2009 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.

ASTM D2041 / D2041M - 00 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projetos e restauração. Oficina de textos. São Paulo, 2007. 558p.

BARROS, R. A. ; ANDRADE, E. O. ; VASCONCELOS, A. C. F. ; GESINALDO, A. C. . PRÁTICAS DE SUSTENTABILIDADE EMPRESARIAL NO APL CALÇADISTA DE CAMPINA GRANDE PB: UM ESTUDO DE CASO. *Revista Gestão Industrial*, v. 6, p. 157-177, 2010.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1996. 299p.

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

BORBA, E.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial dos ligantes modificados com borracha. In: Cricte 2003, 2003, Itajaí - SC. Anais do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2003. p. 1-5.

BRASIL. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Nº 258 de 26 de Agosto de 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, n. 147, 03 de agosto de 2010. Seção 1, pág 3.

BRASKEM. Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila HM728. Folha de dados, revisão 4, 2010.

BRINGEL, R.M.; ALENCAR, A. E. V.; NASCIMENTO, D. R.; COSTA, E. F.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Thermo-Rheological Behavior of Modified Bitumens Adding Virgin and Waste Polymers. In: 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2008, Copenhagen, Dinamarca. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress- ASPHALT ROADS FOR LIFE, 2008.

BUTTON, S. T. Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados. 2005. <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila.pdf>. Acessado em Março de 2012.

CAMBOIM, K. Estudo sistemático da utilização de borracha e de seus resíduos para modificação de asfaltos oriundos de petróleos brasileiros. 103p. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. 2004. Orientador: Ariosvaldo Alves Barbosa Sobrinho e Shiva Prasad.

CARNIN, R. L. P. ; PIRATH ; CUNHA ; PEREIRA . Parte 1: Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Material de Infra-Estrutura para Pavimentação e Agregado em Misturas Asfálticas. In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 2004, Curitiba. GEOSUL 2004. Curitiba: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Universidade Federal do Paraná, 2004. v. IV.: p. 165-173.

CARVALHO, M. R. S. ; RIBEIRO, R. C. C. ; CARRISSO, R. C. C. . Utilização do Rejeito do Corte de Granito em Pavimentação Asfáltica. In: XIV Jornada de Iniciação Científica do CETEM, 2006, Rio de Janeiro. JIC 2006. Rio de Janeiro: CETEM, 2006.

CASTELO BRANCO, V. T. F. ; MOTTA, L. M. G. ; SOARES, J. B. . O Efeito da Heterogeneidade do Agregado de Escória de Aciaria nas Propriedades de Misturas Asfálticas. In: XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET, 2004, Florianópolis. XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET, 2004.

CHEN, J.S., LIAO, M.C., SHIAH, M.S. Asphalt modified by styrene– butadiene–styrene triblock copolymer: Morphology and model. J Mater Civil Eng, 2002.

CONCEIÇÃO, M. N. ; RIBEIRO, R. C. C. ; CORREIA, J. C. G. . Estudos preliminares da utilização de resíduos oriundos do beneficiamento da pedra sabão em pavimentação asfáltica. In: VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2009, Fortaleza. VII SRON. Fortaleza, 2009.

COMINSKY, R. J.; HUBER, G. A.; ANDERSON, M. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC 1994.

CORBETT, L. W., Refining processing of asphalt cement. TRB, Transportation Research Record 999 (1984).

CULTRI, C. N. . A Importância da Visão Sistêmica na Gestão Ambiental das Indústrias Calçadistas de Franca. In: I Congresso Brasileiro de Sistemas, 2008, Ribeirão Preto. I Congresso Brasileiro de Sistemas - Despertando a Consciência para a visão sistêmica: Perspectivas para o século XXI. v. 1.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA-ZAMORA, P.; VOLPATO, N. Planejamento Fatorial: Uma Ferramenta Estatística Valiosa para a Definição de Parâmetros Experimentais Empregados na Pesquisa Científica. Visão Acadêmica, Curitiba, v.9, n.1, Jan. - Jun./2008

DANTAS, T. N. C. ; DANTAS NETO, A. A. ; MOURA, M. C. P. A. ; LIMA, C. K. M. ; FELIX, G. B. . Utilização de resíduo industrial polimérico na obtenção de asfalto modificado. In: 4 PDPetro, 2007, Campinas - SP. CDRom do 4 PDPetro. Natal - RN: ABPG, 2007. p. 4.3.0278-1.

DANTONA, D. M. ; FROTA, C. A. . Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus - AM. Polímeros (São Carlos. Impresso), v. 21, p. 13-18, 2011.

DARIVA, J. J., LUCA, S. J., RUPENTAL, G., Gerenciamento de Resíduos Sólidos das Industrial Calçadista do Município de Três Coroas – RS. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

DAVID, D., Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsinado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2006

DE CEZARO, T. J. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ES 031/2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 054/97. Areia - Equivalente de Areia. Rio de Janeiro: IPR, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 081/98. Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT - ME 084/95 – Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 131/2010. Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT - ME 135/10 – Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT - ME 138/94 - Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 155/2010 - Material asfáltico - determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010.

DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *Transportes (Rio de Janeiro)*, v. 20, p. 15-22, 2012.

FIGUEROA-INFANTE, A. S.; FONSECA-SANTANILLA, E. B.; REYES-LIZCANO, F. A. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Physicochemical and Micromorphological Evaluation of Asphalt Modified with Recycled Materials*. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 13 (1): 45-70, enero-junio de 2009.

FILHO, R. S. P., MÉLO, A. B., BARBOSA, N. P. A Reciclagem de Resíduos da Indústria de Calçados (EVA) na Execução de Painéis de Vedação na Construção Civil: Avaliação de Desempenho. In: *II Encontro Temático Meio Ambiente e Educação Ambiental*, 2003.

FLOHR, L. ; BRENTANO, D. M. ; CARVALHO-PINTO, C. R. S. ; MACHADO, V. G. ; MATIAS, W. G. . Classificação de resíduos sólidos industriais com base em teste ecotoxicológicos utilizando *Daphnia magna*: uma alternativa.. *Biotemas*, Florianópolis, v. 18, n.2, p. 7-18, 2005.

FRANÇA, P. X. N., LEITE, V. D. Desenvolvimento Econômico X Desenvolvimento Sustentável: Conflito Representado nas Micro e Pequenas Indústrias de Calçados da Cidade de Campina Grande – PB. *Revista Eletrônica de Ciências – v. 1, n -1 – jan e jun de 2008*. Páginas 75 a 88.

FURLAN, A. P. ; IWANAGA, F. I. ; GIGANTE, A. C. ; FABBRI, G. T. P. . Influência do modo de preparo e do tipo de filer nas propriedades das misturas asfálticas densas. In: *XXI Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2007, Rio de Janeiro - RJ. *Panorama Nacional da Pesquisa e Ensino de Transportes*, 2007. p. 1-12.

GARCIA-MORALES, M.; PARTAL P.; NAVARRO, F. J.; MARTÍNEZ-BOZA, F. GALLEGOS, C. GONZÁLEZ, N. GONZÁLEZ, O. MUÑOZ, M. E Viscous properties and microstructure of recycled EVA modified bitumenq. *Fuel* 2003.

GARCIA-MORALES, M.; PARTAL P.; NAVARRO, F. J.; GALLEGOS, C.. Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen. *Fuel* 2006.

GARDIN, J. A. C.; FIGUEIRÓ, P. S.; NASCIMENTO, L. F. . Logística Reversa de Pneus Inservíveis: discussões sobre três alternativas de reciclagem para este passivo ambiental. *Gestão e Planejamento - Revista do Programa de Pós-Graduação em Administração*, v. 11, p. 212-231, 2010.

GIOVARINI, C. Polymer Modified Betumen. Asphaltenes and Asphalts. Chapter 16. Elsevier Science. 1994. Pages 381-400.

GONZÁLEZ, O.; MUÑOZ, M. E.; SANTAMARÍA, A.; GARCÍA-MORALES, M.; NAVARRO, F. J.; PARTAL, P. Rheology and stability of bitumen/EVA blends. 2004. Polymer Journal. 2365-2372.

GOUVEIA, L. T. ; FURLAN, A. P. ; PARREIRA, A. B. ; FERNANDES JÚNIOR, J. L. ; FABBRI, G. T. P. . Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade.. In: XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004, Florianópolis. XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004. v. 1. p. 138-149.

ILDEFONSO, J. S. Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA) Descartado pela Indústria Calçadista em Misturas Asfálticas (Processo Seco). 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes (São Carlos) - Universidade de São Paulo.

JANSEN, P. ; SOARES, B. G. . Efeito do EVALSH nas propriedades mecânicas e na cinética de vulcanização de misturas entre NBR e EVA. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, 2000, São Pedro- São Paulo. 14° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, 2000. p. 50301-50309.

KALANTAR, Z, N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A.. A review of using waste and virgin polymer in pavement. Construction and Building Materials, Volume 33, August 2012, Pages 55-62.

KAZMIERCZAK, C. S. ; KERN, A. P. ; SANTOS, I. S. S. ; RAMIRES, M. V. V. ; SILVA, H. C. . Resíduos de contrafortes termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista. In: Vanderley Moacir John; Janaíde Cavalcante Rocha. (Org.). Coletânea HABITARE - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 1ed.Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003, v. 4, p. 124-175.

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E.; HUGHES, C. S.; QUINTUS, H, V.; MOULTHROP, J. S. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) - The Product of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC.

KLINSKY, L. M. G. ; FABBRI, G.T.P. . Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos lateríticos

argilosos. In: Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2007, Rio de Janeiro. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, 2007.

KRAEMER, M. E. P. . Resíduos industriais e a questão ambiental associada à contabilidade aplicada ao ambiente natural . Monografias Com, Argentina - Buenos Aires, 2006.

LAGARINHOS, C. A. F. . Reciclagem de pneus: análise do impacto ambiental através da logística reversa. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 291p. 2012. São Paulo – SP.

LARSEN, M. B.; SCHULTZ, L.; Glarborg, P.; JENSEN, L. S.; JOHANSEN, K. D.; FRANDSEN, F.; HENRIKSEN, U. (2006) Devolatilization characteristics of large particles of tyre rubber under combustion conditions. Fuel, v. 85. p. 1335-13454.

LEAL, A. F. ; RIOS, F. R. A. . Utilização de Resíduos de Calçados Estireno Butadieno (SBR) na Produção de Elementos de Construção. In: UFCG;FINEP. (Org.). Resíduos Industriais na Construção de Habitação de Interesse Social. 1ª ed. Campina Grande: Gráfica e Editora Agenda, 2010, v. 01, p. 01-173.

LEAL, C. L. D. ; PINTO, M. S. P. ; BARRETO, C. R. N. ; MANSUR, R. U. . Mistura Asfáltica Morna Produzida com Asfalto Borracha. In: 40ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação, 2010, Rio de Janeiro. 40ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2010. v. Único.

LEITE, L. M. F. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. 1999. 266f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, C. K. M. Estudo da incorporação de resíduo industrial polimérico ao CAP. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN.

LIMA, C. S. Caracterização de Ligantes Asfálticos Modificado com Borracha de Pneu e Aditivo. 2008. Dissertação (Mestrado em Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Jorge Barbosa Soares.

LUCENA, L. C. F. L. Verificação da Influência de Resíduos Industriais como Fíler em Misturas Asfálticas sob o Efeito da Presença D'Água. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Orientador: John Kennedy Guedes Rodrigues.

LUCENA, M. C. C. ; SOARES, S. A. ; SOARES, J. B. ; LEITE, L. M. . Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt. *Materials Research* (São Carlos. Impresso), v. 7, p. 529-534, 2004.

LUO, W.; CHEN, J. (2011). Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer. *Construção e Materiais de Construção*, 25 (4), 1830-1835. doi: 10.1016/j.conbuildmat.

MANUAL DO ASFALTO. Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.

MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A.. Viabilidade de uso do delineamento composto central. *Acta Scientiarum*. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1537-1546, 2001.

MEDINA, J; & MOTTA, L. M. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MONTAGNOLI, R.M.; MANCINI, S. D.; PRESTES, S.M.D. Avaliação da Reciclabilidade de Resíduos de EVA da Indústria Calçadista. In: XXII Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2010, Bauru-SP. Anais em CD-ROM. São Paulo-SP: Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP, 2010. p. 6642-6645.

MOREIRA, C. C. Características e Desempenho das Escórias de Alto Forno Como Agregado Para Utilização em Camadas Granulares De Pavimentos. 2006. In: 37ª Reunião Anual de Pavimentação 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária 37ª RAPv/11º ENACOR. Goiânia – GO.

MOREIRA, V. X. Utilização de resíduo de EVA em composições de borracha nitrílica. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Bluma Guenther Soares

MOROSINE, F. M.; OLIVEIRA, A. G.; SANTANA, T. N.; MACIEL, M.; BERTASOLE, N.; LIMA, R. M. Inventário dos Resíduos Industriais do Município de Campina Grande-Paraíba-Brasil. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. Campo Grande – MS.

NEGRÃO, D. P. Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos. 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NÓBREGA, L. M.; CAMPOS, L. E. P.; SOARES, J. B. Uso da escória como agregado em misturas asfálticas tipo CBUQ. In: XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET, 2004, Florianópolis, 2004. v. 01. p. 01-10.

NÓBREGA, L. M.. Caracterização Mecânica de Mistura Asfálticas Utilizando Escória de Ferroliga de Manganês como Agregado. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Bahia. Orientador: Jorge Barbosa Soares.

NORMA MERCOSUL 52 (2002) Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. Brasil.

ODA, Sandra. Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: José Leomar Fernandes Júnior.

OLIVEIRA, A. K. R. XIX Salão de Iniciação Científica - UFRGS. Reaproveitamento de Resíduos de EVA da Indústria Calçadista em Formulações de Borracha. 2007. (Encontro).

OLIVEIRA, C. R. ; RIBEIRO, S. J. ; GOMES, C. A. ; SILVA, G. . Experimentos em Misturas Asfálticas com Adição de Borracha Moída de Pneus. In: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. 2009.

OLIVEIRA, M. G.; VIRGOLINO, M. H. ; GOMES, A. C. O. ; SOARES, B. G. . Caracterização das propriedades reológicas e dinâmicas de composições de borracha natural com resíduo de EVA.. Polímeros (São Carlos. Impresso), v. 14, p. 301-306, 2004.

PANDA, M.; MAZUMDAR, M. . Engineering Properties of EVA-Modified Bitumen Binder for Paving Mixes. 1999. Journal of Materials in Civil Engineering. 131-137.

PEREIRA, C. A.. Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias dos Estados de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes. 2010. Tese (Doutorado em

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Agência Nacional do Petróleo. Orientador: Jorge Barbosa Soares.

PEREIRA, C. A.; SOARES, J. B.; PONTES FILHO, I. D. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. . Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. Transportes (Rio de Janeiro), v. 20, p. 65-74, 2012.

Pesquisa CNT de rodovias 2011: relatório gerencial. – Brasília :CNT:SEST:SENAT, 2011. 328 p.

PETROBRAS, 2013. Site:
[http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ3dLA_2CbEdFAFe2Wp0!/.](http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ3dLA_2CbEdFAFe2Wp0!/)
Acessado em 14 de janeiro de 2013 às 16:25.

PINHEIRO, J. H. M. ; SOARES, J. B. . Realização e acompanhamento de dois trechos experimentais com asfalto-borracha no estado do Ceará. Transportes (Rio de Janeiro), v. XIII, p. 57-66, 2005.

PINTO, S. (2003). Site: http://www.cargaecia.com.br/arquivo/maio2003/index_tendencia-php copolímeros de etileno-acetato de vinila – EVA. Polímeros, Brasil. v 15, n. 1.p 73-78, 2005.

POLLACO, G.; BERLINCIONI, S.; BIONDI, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. European Polymer Journal. England: v.41, p.2831-2844, 2005.

RAPOSO, C. O. L. Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação. 2005. Dissertação de mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

REIS-BARROS, J. Estudo da Utilização de Escórias de RSU na Construção de Pavimentos. Diss. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

RIBEIRO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G.; Saint Martin, C. M. M. Utilização do Rejeito Oriundo do Corte de Rochas Ornamentais como Agregado Mineral em Pavimentação Asfáltica. In: VII Jornada Luso Brasileira de Pavimentação, 2008, São Paulo. VIIJLBP. São Paulo: VII JLBP, 2008.

RIBEIRO, R. C. C.; CONCEIÇÃO, M. N. . Avaliação mecânica e acústica do pavimento asfáltico formado com resíduos de rochas ornamentais. In: Congresso Internacional de Infraestrutura de Transportes, 2011, São Paulo. Andit. São Paulo: Coninfra, 2011

ROCHA, T L A; CRESPO, J. S.; ZATTERA, A.J. ; ZENI, M. Caracterização e reaproveitamento de resíduos de SBR na indústria calçadista. In: VIII Congresso Brasileiro de Polímeros, 2005, Águas de Lindóia. CBPOL 2006. São Carlos: ABPol, 2005. v. 1.

RODRIGUES, D.; RODRIGUES, G.; LEAL, J. E. ; PIZZOLATO, N. D. Logística Reversa - Conceitos e Componentes do Sistema. In: XXII ENEGEP, 2002, Curitiba. XXII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002. p. 01-08.

RODRIGUES, M. I.. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos – 2ª Ed. Campinas – SP. Casa do Espírito Amigo fraternidade Fé e Amor, 2009. 358p.

SANTOS, A.O.J. ; CUNHA, M. B. ; FERNANDES JR.,J. L. . Avaliação de Ligantes Asfálticos Modificados por Resíduos Poliméricos (EVA) da Indústria Calçadista. In: SIICUSP 2008 - Simpósio Internacional de Iniciação Científica DA USP, 2008, São Paulo. Anais do SIICUSP 2008. São Paulo : USP, 2008.

SANTOS, P. T. A., BEZERRA, A. F. C., SALES, J. L., NETO, L. J. A., LIMA, M. S., SILVA, T. R. G. Aproveitamento de Resíduos Coureiros de Indústria Calçadista em Campina Grande-PB. In: 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos / 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos, 2010.

SAOULA, S.; MOKHTAR, K.; HADDADI, S.; GHORBEL, E. (2009). Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste. Physics Procedia, 1319-1326.

SERRANO, C. L. R. Uso de Resíduo de SBR Proveniente da Indústria de Calçados em Composições de SBR. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Orientador: Carlos Arthur Ferreira. 170p. Porto Alegre, 2009.

SILVA, A. L. S. ; GONELLA, L. B. ; CANTO, L. B. ; OLIVEIRA, R. V. B. ; ANDRADE, M. Z. ; ZATTERA, Ademir José . Reciclagem e Reaproveitamento de Resíduos Industriais de EVA. In: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006, Ijuí, RS. XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006.

SILVA, A. S. Avaliação da Toxicidade dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. Orientadora: Veruschka Escarião Dessoles Monteiro. 2012. Campina Grande – PB.

Site: <http://www.consulpav.com/ar2003/index.html>. Acessado em 05 de março de 2012.

Site: <http://www.essencis.com.br/imprensa/essencial-news/2010/o-que-e-feito-com-os-materiais-usados-na-fabricacao-dos-calçados>. Acessado em 07 de novembro de 2012.

SOUSA, J. D. F. Reaproveitamento de resíduos sólidos classe 1 de curtumes, fábricas de calçados e artefatos. Projeto de Pesquisa. Franca, 2006.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; SOUZA NETO, P. N.. Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados à Quente. Interação (Campina Grande), Campina Grande, v. 02, p. 13-17, 2003.

SPETCH, L. P. Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 279p. Porto Alegre.

TOMÉ, L. G. A.; LIMA, C. S.; SOARES, J. B.; VALLENTIN, A. E. A.; LUCENA, M. C. C. Influência do Elvaloy na Modificação de Cimentos Asfálticos Oriundos de Petróleos Brasileiros. In: XIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005, Recife. XIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005.

TORMENTO, L. A. Elastômeros para Calçados. 2012. Matéria Técnica. Paper V77-0413 – Pg 43-46. Rubber Division.

VASCONCELOS, K. L. ; SOARES, J. B. Influência dos Métodos de Ensaio para Determinação das Densidades Real e Aparente de Agregados na Dosagem de Misturas Asfálticas. In: 34ª Reunião Anual de Pavimentação, 2003, Campinas. Anais da 34ª Reunião Anual de Pavimentação, 2003.

VASCONCELOS, K. L., Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e SUPERPAVE com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE, 2004.

VELDOY, D. R. L. Compostos de EVA modificados com Resinas Hidrocarbônicas. Dissertação de mestrado submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 93p. Orientadora: Maria Madalena de Camargo Forte. 2006. Porto Alegre – RS.

VELTEN, R.Z. ; SANT'ANA, A. P. ; LIMA, D. C. ; SILVA, C. H. C. ; CARVALHO, C. A. B. ; COUTO, L. G. ; MACHADO, C. C. . Caracterização Mecânica de Misturas Solo-Escória de Alto-Forno Granulada Moída para Aplicações em Estradas Florestais. Revista Árvore, Viçosa - MG, v. 30, n.2, p. 235-240, 2006.

VIEIRA, E. A.; Barbosa, A.S. Gestão ambiental na indústria de calçados: uma ferramenta para reduzir custo e agregar valor. Têcnico (Novo Hamburgo), Pg. 70-74, 2011.

ZATTERA, A. J.; BIANCHI, O.; ZENI, M.;

FERREIRA, C. A. Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila – EVA. Polímeros, Brasil. v 15, n. 1.p 73-78, 2005.