

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

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE AREIA DE
SÍLICA BASE COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

KARINE JUSSARA SÁ DA COSTA

MANAUS

2010

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

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE AREIA DE
SÍLICA BASE COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

KARINE JUSSARA SÁ DA COSTA

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

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo.

MANAUS

2010

Dedico este trabalho com muito amor, carinho e gratidão a minha avó Clarice (in memorian),
à minha mãe Socorro, a minha irmã Karol e ao meu companheiro Laércio Júnior que
colaborou nos ensaios e na pesquisa.

“O melhor presente Deus me deu, a vida me ensinou a lutar pelo que é meu...”

(Charlie Brow Jr)

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Em primeiro lugar a Deus, por me dar saúde, amor, paz e sabedoria em todas as etapas da minha vida,

A minha mãe Maria do Perpétuo Socorro por ter me ensinado que não se chega a lugar nenhum sem os estudos! Obrigada mamãe! Agradeço pela ajuda da minha irmã Karol Regina, que me ajudou a moldar corpos de prova aos fins de semana na UFAM! Amo vocês!

Um agradecimento especial ao meu amigo, meu companheiro e parceiro de Laboratório, Laércio Furtado Ferreira Júnior, pelo seu incondicional apoio e auxílio durante todas as fases do Mestrado e pelos inúmeros fins de semana de estudos e moldagem de corpos de prova na UFAM. Muito obrigada por sempre estar ao meu lado e por acreditar nesse sonho junto comigo!

Ao querido professor Dr. Raimundo Vasconcelos, por ter me recebido de portas e janelas abertas, tornando o Mestrado em Engenharia Civil minha segunda casa, minha família;

Ao meu orientador professor Dr. Nilton de Souza Campelo pelo apoio e incentivo à minha participação no Programa de Cooperação Acadêmica entre UFAM e COOPE/UFRJ;

Aos meus colegas do Mestrado, Otávio, Gorett, Eude, Lourival, Caubi, Edsandra, Heraldo, Jurandir, Aleixo, Arlene, Alberto, Rafael, Tuca, Severino, em especial a Samantha, por auxílio nas disciplinas do Mestrado.

À minha grande amiga e fiel companheira de Laboratório Lenize, pela sua amizade, pelo seu carinho e ternura e por sempre me trazer as palavras de Deus que consolaram meu coração, durante os momentos difíceis de nossas vidas. Amo você minha amiga!

À minha amiga e companheira Danielly, a qual levou meu material de pesquisa até o Rio de Janeiro! Obrigada mesmo miga, você é demais!

A ex secretária do Mestrado e minha amiga querida Ivana Reis, por sempre quebrar "árvores" para mim e pelo seu espírito de eterna criança que sempre nos contagiou, e pelas palavras confortantes nos momentos difíceis! Deus te abençoe minha amiga;

Ao Laboratorista Nilson, por sua colaboração durante os ensaios realizados no Laboratório de Materiais;

Ao Otávio Serrão pela ajuda nos ensaios realizados no Laboratório de Pavimentação da UFAM;

Aos técnicos Zeca e Nelson por toda ajuda, carinho e atenção à mim dedicados no LABPAV e a dona Rai por sempre cuidar de todos nós do LABPAV;

Agradeço em especial ao técnico, engenheiro e agora Mestrando Reinaldo por todo o ensinamento à mim repassado, pois ele me ensinou os fundamentos da Pavimentação! Apesar da cara amarrada ele possui um coração cheio de carinho;

Agradeço em especial à Professora Dra Laura Goretti que me recebeu muito bem na COOPE/UFRJ, obrigada por tudo professora;

Agradeço ao Marcos, Álvaro e aos auxiliares: Rodrigo, Léo, Alan e Leandro a todos os técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COOPE/UFRJ por toda carinho! Obrigada.

Agradeço em especial ao meu grande amigo, companheiro e técnico do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COOPE/UFRJ Roberto Vianna, Beto por toda amizade, carinho e atenção! Obrigada meu amigo por tudo;

Agradeço em especial a minha amiga, meu anjo da guarda Ana Maria, por ter me acolhido na noite de Natal e ter me oferecido a sua família como se fosse a minha! Obrigada a Teresa, Letícia, Gabriel, “mamãe” Delminda” e “papai” Texeira vocês são minha Família Carioca!

Agradeço as minhas amigas Elisa e Maiara do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COOPE/UFRJ por todo carinho! Obrigada meninas;

Agradeço em especial a minha amiga Luciane, que me emprestou seu apartamento, me ajudou com palavras de incentivo nos momentos difíceis e por ter me apresentado a Yemci do LabEst da COOPE/UFRJ que se tornou minha grande amiga! Amigas vocês moram no meu coração;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, por todo o apoio e oportunidades em relação ao Mestrado;

Agradeço ao Secretário de Infra-Estrutura do Estado de Roraima Carlos Brígida e ao Chefe do Departamento de Engenharia e Obras Walter Mello por terem entendido a importância da minha qualificação profissional, contribuindo para meu afastamento do trabalho! Obrigada;

Agradeço a Engenheira Fátima, amiga da SEINF, a qual me ajudou durante tantos meses afastada do trabalho muito obrigada minha amiga;

A Capes pela ajuda de custo concedida ao PROCAD.

RESUMO

Esta pesquisa analisa por meio de um estudo experimental, o comportamento mecânico de misturas asfálticas, utilizando o resíduo pó de areia. O objetivo geral desta pesquisa é testar a hipótese que o resíduo pode ser utilizado como *filer* em misturas asfálticas. O resíduo pó de areia foi utilizado como *filer* em mistura asfáltica tipo CBUQ, em substituição ao cimento *Portland* CP II usado na cidade de Manaus. A reutilização destes resíduos industriais traz benefícios ambientais, pois auxilia a questão de deposição destes rejeitos. Todas as misturas foram caracterizadas mecanicamente através dos ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência à Tração estática por compressão diametral, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão axial estática (*creep* estático). Os resultados obtidos demonstraram que a adição do resíduo industrial estudado em mistura asfáltica aumenta o consumo de ligante da mistura. Os resultados dos ensaios mostram desempenho adequado da mistura confeccionada com o pó de areia.

PALAVRAS CHAVE: pavimentos; misturas asfálticas; resíduos industriais; comportamento mecânico.

ABSTRACT

This research analyses, through an experimental project, the mechanical behavior of hot-mix asphalt, with dust of sand. The dust of sand residue was utilized as a filler in hot-mix asphalt, replacing in the Manaus city used material the Portland cement CP II. The general purpose of this work is to test hypothesis that the residue can be use as a filler in hot-mix asphalt.

The reuse of these industrial residues leads to environmental gains; it not only helps to avoid the open-air deposition of this by-product but it also reduces. All the mixtures were characterized mechanically through the testing of Resilient Modulus, Static Tensile Strength, fatigue of diametrical compression under controlled stress and static creep. The results of this research show that the addition of industrial residue in hot-mix asphalt increases the binder consumption. The test results show adequate performance of the mixture made with mud as fillers.

Key-Words: **pavement; asphalt mix; industrial residues; mechanical behavior.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência do agregado e do ligante no desempenho do ligante CBUQ	38
Figura 2: Processo de retirada de rebarbas das peças para embreagem	45
Figura 3: Pilha de seixo rolado no pátio da empresa Konkrex	48
Figura 4: Ensaio de granulometria do fíler não-convencional (pó de areia)	50
Figura 5: Resíduo pó de areia de sílica base no tambor.	51
Figura 6: Equipamento EDX – 720 Energy Dispersive, X Ray Spectrometer, Shimadzu	52
Figura 7: Difratorômetro da Bruker, modelo D8 Focus	54
Figura 8: porta-amostra.	54
Figura 9: Analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer.	55
Figura 10: utilizadas conforme especificação da norma DNER – ME 083/98.	56
Figura 11: Separação por peneira do seixo rolado.	57
Figura 12: Etapas do ensaio de absorção: a) lavagem do seixo na peneira (4,8 mm); b) secagem em estufa até a constância de massa; c) imersão em água por 24 h; d) remoção da água com pano absorvente; e) pesagem do seixo submerso em água; f) secagem em estufa.	58
Figura 13: Etapas do ensaio de Abrasão “Los Angeles”: a) 2.500 g de material passante na peneira # 12,5 mm; b) 2.500 g de material passante na peneira # 9,5 mm; c) carga abrasiva: 4584 + ou – 25; d) máquina “Los Angeles”; e) material retido na peneira # 1,7 mm.	61
Figura 14: Etapas do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso:.....	62
Figura 15: Método de Chapman.....	64
Figura 16: Frasco Le Chatellier.....	66
Figura 17: de penetração realizado no Laboratório de Pavimentos da COOPE/UFRJ.	67
Figura 18: Processo de confecção dos corpos de prova.	72
Figura 19: Volumes para a Densidade Máxima Teórica (DMT).	75
Figura 20: Ensaio de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) no Laboratório de Pavimentos na Coppe/UFRJ.....	78
Figura 21: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência (acoplado ao computador);.....	80
Figura 22: corpo-de-prova com um único LVDT.	80
Figura 23: Corpos-de-prova dentro da câmara.	83
Figura 24: Ensaio de creep estático a) corpo-de-prova com extensômetros diretamente acoplados; b) tela do computador que registra as informações geradas durante o ensaio.	85
Figura 25: Curva granulométrica do seixo rolado.....	88
Figura 26: Curva granulométrica da areia.....	89
Figura 27: Análise química do pó de areia.....	92
Figura 28: Gráfico com o resultado do ensaio de análise química.....	93
Figura 29: Resultado do ensaio de difração de raio x.	94
Figura 30: Composição granulométrica da mistura 1 convencional.	97
Figura 31: Composição granulométrica da mistura 2 não convencional.	98
Figura 32: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 1 convencional 100% cimento: a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume-vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.....	101
Figura 33: - Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 2 não convencional 100% pó de areia: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.....	103

Figura 34: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 3 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.....	106
Figura 35: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 4 não convencional 50% pó de areia e 50% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.....	108
Figura 36: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 5 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.....	110
Figura 37: Comparação entre os parâmetros Marshall entre as misturas não convencionais: a) Densidade aparente (Dap); b) volume de vazios; c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.	114
Figura 38: Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	115
Figura 39: Gráficos para comparação dos parâmetros de RT, MR e MR/RT.....	117
Figura 40: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 1 100% cimento.	119
Figura 41: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 2 100% pó de areia.....	120
Figura 42: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 2 100% pó de areia.	121
Figura 43: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 4 (75% pó de areia e 25% cimento).....	121
Figura 44: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 4 75% pó de areia e 25% cimento.....	122
Figura 45: vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 5 25% pó de areia e 75% cimento.....	122
Figura 46: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 5 (25% pó de areia e 75% cimento).	123
Figura 47: Gráficos de deformação específica máxima de todas as misturas asfálticas.	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas.	37
Quadro 2: Ensaios de caracterização do seixo rolado.	48
Quadro 3: Norma DNIT 031/2006 Especificação de serviços para pavimentos flexíveis.	73
Quadro 4: Composição das misturas asfálticas.	74
Quadro 5: Resultado da massa específica real da areia.	90
Quadro 6: Resultado da massa específica real do cimento Portland.	91
Quadro 7: Resultado da massa específica real do pó de areia.	92
Quadro 8: Composição dos óxidos presentes nesta amostra.	93
Quadro 9: Resultado do ensaio de penetração.	95
Quadro 10: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 1 100% cimento.	119
Quadro 11: 4.7- Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 2 100% pó de areia.	120
Quadro 12: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 4 75% pó de areia e 25% cimento.	121
Quadro 13: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 5 25% pó de areia e 75% cimento.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Malha das peneiras do ensaio de granulometria.	63
Tabela 2: Composição granulométrica do filer, segundo DNER- EM 367/97.	65
Tabela 3: Resultados dos ensaios laboratoriais do seixo rolado.	86
Tabela 4: Resultados dos ensaios de absorção e adesividade.	87
Tabela 5: Resultado do ensaio de granulometria do seixo rolado.	87
Tabela 6: Resultado do ensaio de granulometria da areia.	89
Tabela 7: Composição granulométrica do filer, segundo DNER- EM 367/97.	90
Tabela 8: Composição granulométrica do filer, segundo DNER- EM 367/97.	91
Tabela 9: Composição da mistura 1 convencional.	97
Tabela 10: Composição da mistura 2 não convencional.	98
Tabela 11: Composição das misturas 3, 4 e 5 não convencionais.	99
Tabela 12: Parâmetros Marshall da mistura 1 convencional 100 % cimento.	100
Tabela 13: - Parâmetros Marshall da mistura 2 não convencional 100% pó de areia.	102
Tabela 14: Parâmetros Marshall da mistura 3 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento: ...	104
Tabela 15: Parâmetros Marshall da mistura 4 não convencional 50% pó de areia e 50% cimento. ...	106
Tabela 16: Parâmetros Marshall da mistura 5 não convencional 25% pó de areia e 75% cimento. ...	108
Tabela 17: Teor “ótimo” encontrado para cada mistura asfáltica.	111
Tabela 18: Parâmetros Marshall com o “teor ótimo” de cada mistura asfáltica.	111
Tabela 19: Resultados dos parâmetros de RT, MR e MR/RT.	117
Tabela 20: Valores médio do módulo resiliente e resistência à tração.	119

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AASHTO- American Association of State Highway and Transportation

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI- Asphalt Institute

AP- Asfalto de Petróleo

ASTM- American Society for Testing

CAP- Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR- California Bearing Ratio

CBUQ- Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPE- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DRX- Difractometria de Raio X

EDS- Energy Dispersive X Ray Detector

FCC- Fuji Chemical Corporation

IBP- Instituto Brasileiro de Petróleo

ISSO- International Organization for Standardization

LVDTs- Linear Variable Differential Transformers

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

MR- Módulo de Resiliência

PETROBRAS- Petróleo Brasileiro S.A.

PIM- Pólo Industrial de Manaus

PROCAD- Programa de Cooperação Acadêmica

RBV- Relação Betume/Vazios

REMAN- Refinaria de Manaus

RT- Resistência à Tração

SGC- Compactador Giratório Superpave

TC- Tensão Controlada

UFAM- Universidade Federal do Amazonas

V_v- Volume de vazios

VAM- Vazios do Agregado Mineral

VCB- Vazios com Betume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO.....	22
1.2.1 OBJETIVO GERAL	22
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.2.3 QUESTÕES DE ESTUDO	23
1.3 ESTRUTURA DE TRABALHO	23
2 REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	24
2.2 MATERIAIS PARA MISTURA ASFÁLTICA	25
2.2.1 LIGANTE ASFÁLTICO	25
2.2.2 AGREGADOS	26
2.2.3 <i>FÍLER</i>	28
2.2.4 INTERAÇÕES LIGANTE ASFÁLTICO- <i>FÍLER</i>	30
2.2.5 VARIÁVEIS QUE AFETAM AS MISTURAS ASFÁLTICAS	37
2.2.6 DOSAGEM DE MISTURA ASFÁLTICA	38
2.2.7 MÉTODO MARSHALL.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	43
3.2.1 <i>FÍLER</i> NÃO CONVENCIONAL (PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE)	44
3.2.2 AGREGADO GRAÚDO (SEIXO ROLADO)	46
3.2.3 AGREGADO MIÚDO (AREIA)	48
3.2.4 <i>FÍLER</i> CIMENTO <i>PORTLAND</i>	49
3.2.5 LIGANTE ASFÁLTICO (CAP 50/70)	49
3.3 MÉTODOS UTILIZADOS.....	50
3.3.1 <i>FÍLER</i> PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE.....	50
3.3.2 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO <i>FÍLER</i> PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE	50
3.3.3 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL (<i>CHATELLIER</i>).....	51
3.3.4 ENSAIO DE ANÁLISE QUÍMICA ATRAVÉS DA ESPECTROSCÓPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	52
3.3.5 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X	53
3.3.6 ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER.....	54
3.4 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SEIXO ROLADO	56

3.4.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA DO SEIXO ROLADO	57
3.4.2 ENSAIO DE ABRASÃO <i>LOS ANGELES</i> DO SEIXO ROLADO	60
3.4.3 ENSAIO DE ADESIVIDADE AO LIGANTE BETUMINOSO DO SEIXO ROLADO	61
3.5 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA	62
3.5.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DA AREIA (<i>CHAPMANN</i>)	63
3.6 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO <i>PORTLAND</i>.....	64
3.6.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DO CIMENTO <i>PORTLAND</i> (<i>CHATELLIER</i>).....	65
3.7 LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70	66
3.7.1 ENSAIO DE PENETRAÇÃO	66
3.8 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	67
3.8.1 MÉTODO MARSHALL.....	68
3.8.2 MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA	74
3.9 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICA	76
3.9.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)....	77
3.9.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	79
3.9.3 ENSAIO DE FADIGA.....	82
3.9.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL ESTÁTICO (ENSAIO DE <i>CREEP</i>)	84
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE	86
4.1 RESULTADOS DO AGREGADO GRAÚDO (SEIXO ROLADO).....	86
4.1.2 Massa específica real e aparente	86
4.1.3 Absorção de água e adesividade ao ligante betuminoso.....	87
4.1.4 Abrasão <i>Los Angeles</i>	87
4.1.5 Análise granulométrica	87
4.2 RESULTADOS DO AGREGADO MIÚDO (AREIA)	88
4.2.1 Análise granulométrica	89
4.2.2 Massa específica real.....	90
4.3 RESULTADOS DO FÍLER CONVENCIONAL (CIMENTO).....	90
4.3.1 Análise granulométrica	90
4.3.2 Massa específica real.....	91
4.4 RESULTADOS DO FÍLER NÃO CONVENCIONAL (PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE)	91
4.4.1 Análise granulométrica	91
4.4.2 Massa específica real.....	92
4.4.3 Análise química.....	92
4.4.4 Difração de raios x	93
4.4.5 Ensaio de granulometria a laser	94
4.5 RESULTADOS DO LIGANTE CAP 50/70	95
4.5.1 Ensaio de Penetração ABNT 6576/ 98.....	95
4.6 RESULTADOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	96
4.6.1 Dosagem das misturas asfálticas	96
4.7 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	114

4.7.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	115
4.7.2 Ensaio de Módulo de resiliência	116
4.7.3 Resistência à Fadiga	118
4.7.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL ESTÁTICO (Ensaio de <i>creep</i>).....	124
 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
5.1 CONCLUSÕES	126
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:	128
 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1 INTRODUÇÃO

O cerne da questão ambiental fundamenta-se na sustentabilidade, conforme o conceito adotado no Relatório Brundtland, ou seja, satisfazer as necessidades das gerações presentes sem, contudo, comprometer a sobrevivência das gerações futuras. (FRANKENBERG *et al.* 2003)

Nas duas últimas décadas, as questões ambientais têm exercido uma maior influência nos custos econômicos e a proteção ambiental têm se tornado um importante campo de atuação para governos, indústrias, grupos sociais e indivíduos (STANISSKIS e STASISKIENE, 2003). O desenvolvimento e a produção de produtos sustentáveis é um desafio das indústrias no século 21, à luz da crescente pressão ambiental (MAXWELL e VORST, 2003).

Diante disso, o setor industrial passou a preocupar-se com a introdução do conceito de prevenção, ou seja, reduzir cada vez mais a geração na origem, abandonando a postura essencialmente reativa (TOCCHETTO e PEREIRA, 2004).

Segundo DE MARTINI, a gestão de resíduos industriais deve obedecer a uma sequência de ações, partindo das prioridades: eliminação ou redução da geração na fonte, e passando pela reciclagem e tratamento até chegar à opção da disposição, que teria menor prioridade. É a chamada Hierarquia de Gestão de Resíduos.

A valorização de resíduos industriais, por meio da reciclagem, reutilização, possibilita agregar valor ao resíduo, gerando um retorno financeiro para a indústria, por meio da comercialização desse resíduo para outras empresas, transformando o que antes era resíduo em matéria-prima ou insumo em seu processo produtivo. Desta forma, faz-se necessário pensar em uma política de gestão ambiental para os resíduos industriais, a fim de mudar os conceitos de resíduo de

modo que as alternativas mais adequadas a cada caso possam se viabilizar podendo, quando for o caso, inovar com uso de materiais não-convencionais.

Uma via de utilização de resíduos industriais como materiais/insumos não convencionais encontra-se na Engenharia Civil, mais especificamente na área de pavimentação asfáltica, onde a utilização constante de recursos naturais (exploração de jazidas e derivados de petróleo) traz para este setor, a necessidade de combinar soluções de engenharia e preservação ambiental, uma vez que na pavimentação são empregados grandes volumes de materiais. Desta maneira, pode-se dar destino adequado a resíduos e subprodutos provenientes de processos industriais, tais como - escória de aciaria, areia de fundição, polímeros, elastômeros, entre outros - gerados por diversos tipos de indústrias.

O aproveitamento destes resíduos torna-se vantajoso para as empresas que geram o resíduo, uma vez que as indústrias podem agregar valor ao rejeito e diminuir os gastos com estocagem e tratamento do resíduo. Para a construção, a vantagem seria a queda do preço do material granular, além de poder usufruir de um agregado tecnicamente competitivo.

Vários estudos verificaram a possibilidade de adição de escória de aciaria, tanto na massa asfáltica como para material de base e sub-base, podendo-se destacar nacionalmente as pesquisas de LIMA *et al.* (2000), SILVA *et al.* (2002), ROHDE (2002), CAVALCANTE *et al.* (2003), CASTELO BRANCO (2004) e NÓBREGA *et al.* (2004). No âmbito internacional destacam-se as pesquisas de NOUMAN *et al.* (1992), KANDHAL e HOFFMANN (1998), KHAN e WAHHAB, (1998) e BAGAMPADDE *et al.* (1999). SILVA (2008) verificou o uso de resíduo de ETA como filer em mistura asfáltica na cidade de Manaus.

Como exemplo, também pode-se citar, a utilização de materiais não convencionais em pavimentos asfálticos, no emprego de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F), sendo bastante

atraente para as indústrias geradoras, pois na pavimentação são utilizados grandes volumes de materiais.

Haveria ainda redução de riscos de acidentes ambientais, uma vez que as areias de fundição são altamente poluidoras, mas quando utilizadas em misturas asfálticas tornam-se encapsuladas, deixando de liberar os contaminantes presentes na areia de fundição.

BONET (2002) atestou a viabilidade técnica e ambiental da utilização de Resíduo Areia de Fundição (R.A.F) em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). DE REIS E FERREIRA (2004) estudaram o uso de resíduos (Escória de Aciaria, Areia de Fundição e polímeros) na composição de revestimentos asfálticos ecogênicos do tipo pré-misturado a frio (PMF). Outros estudos incorporando resíduo areia de fundição em misturas asfálticas foram realizados por CIESIELKI e COLLINS (1994), JAVED *et al.* (1994) *apud* STEFENON (2003) e MILLER (1998).

O desempenho de um pavimento é fortemente condicionado pelas características mecânicas que suas camadas exibem. Essas características dependem dos materiais utilizados (solo, agregados, finos e ligantes), da dosagem da mistura em concreto asfáltico (CA), de suas condições de compactação e do processo construtivo. No caso de falha, principalmente no que diz respeito às camadas asfálticas e cimentadas, por serem componentes de alto custo e com importante função estrutural, o insucesso no desempenho de pavimento é marcante.

O aumento do preço dos materiais de construção empregados na pavimentação, a redução dos recursos naturais, a legislação vigente no país e as novas exigências na construção e manutenção de pavimentos rodoviários, incentivam a busca por novas soluções para otimizar a relação custo/benefício na produção do pavimento. Com isto cada vez mais é necessário o estudo da incorporação de resíduos industriais em todos os segmentos da construção civil,

buscando o uso racional dos recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais decorrentes do processo construtivo, além da diminuição do custo e prolongamento da vida útil do pavimento.

Desse modo, este trabalho teve como objetivo o estudo da incorporação do pó de areia de sílica base (areia de fundição regenerada), também conhecida na indústria como areia Shell, na forma de *fíler*, em mistura asfáltica tipo concreto betuminoso usinado a quente (C.B.U.Q) em substituição do cimento *Portland*, com base no método Marshall .

1.1 JUSTIFICATIVA

À medida que aumentam as preocupações com a manutenção e a melhoria da qualidade do ambiente e com a proteção da saúde humana, organizações públicas e privadas vêm crescentemente voltando suas atenções para os impactos ambientais potenciais de suas atividades, produtos ou serviços. O Desenvolvimento sustentável é o grande desafio e objeto de discussão na atualidade, está provocando o redirecionamento no setor produtivo, tanto na definição das ações a serem tomadas nos processos existentes, quanto na concepção de novos produtos.

Desta forma, faz-se necessário pensar em uma política de gestão ambiental para os resíduos industriais, a fim de mudar os conceitos de resíduo de modo que as alternativas mais adequadas a cada caso possam se viabilizar podendo, quando for o caso, inovar com os materiais não-convencionais.

O enfrentamento de tal desafio, implica em uma visão sistêmica do ambiente e da atividade industrial, esta nova visão envolve a otimização de recursos materiais, energia e capital e informação. Esse esforço, objetiva a integração adequada de diferentes empresas, de forma que os resíduos e subprodutos gerados por uma delas possam servir de matérias-primas para

outras, reduzindo a devolução à natureza. Da mesma forma, a sua utilização como matéria-prima reduziria a demanda por recursos naturais.

Partindo do princípio de que nenhum processo produtivo seja 100% eficiente e que sempre, por menor quantidade que seja, existirá corrente residuária, o estudo por alternativas de uso, reuso ou reciclagem e destinação de resíduos industriais, principalmente aqueles classificados como perigosos (classe I), torna-se importante na busca por um equilíbrio entre o viés econômico e ambiental.

Embora ainda não tenha sido instituída no Amazonas, a Lei de Resíduos Sólidos, define diretrizes e normas de prevenção e controle da poluição, assegurando o uso adequado dos recursos ambientais no Estado, a preocupação com a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos das empresas do parque fabril instalado no Amazonas, motivou a Agência Brasileira de Cooperação (ABC), Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA) e Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA) a firmar em 2009, um acordo de cooperação técnica com o objetivo de avaliar as atuais condições de manuseio e gestão de resíduos industriais no Pólo Industrial de Manaus (PIM). (SUFRAMA, 2009)

Os resultados do projeto, intitulado “Estudo para o Desenvolvimento de uma Solução Integrada relativa à Gestão de Resíduos Industriais no PIM”, servirão de base para a formulação de um Plano Diretor, contendo propostas de soluções para o aproveitamento e destinação de resíduos a serem implementadas no parque fabril de Manaus no período de 2011 e 2015. Atualmente, o tratamento de grande parte dos resíduos gerados pelas indústrias do PIM é realizado em Manaus por meio da terceirização, pelas fábricas geradoras, dos serviços de coleta, transporte e destinação final a empresas credenciadas pelos órgãos ambientais no Amazonas. (SUFRAMA, 2009)

No caso dos resíduos classificados como perigosos, o tratamento de parte deles é feito em outros Estados, quando não há empresas locais especializadas na destinação adequada de algum tipo desses resíduos.

Neste sentido buscou neste trabalho estudar uma alternativa para o reaproveitamento de um resíduo industrial denominado aqui pó de areia de sílica base, proveniente do processo de acabamento (retirada de rebarbas) de peças que compõem embreagens de motocicletas. Este resíduo representa um passivo ambiental sem ainda uma alternativa de reaproveitamento que valorize o resíduo tornando-o atrativo para outros processos industriais.

Assim, partindo de estudos que mostram a viabilidade da utilização de resíduos de areia de fundição em misturas asfálticas BONET (2002), BIOLO (2001) e WATANABE *et al.* (2002), e sendo a areia de sílica base, o produto do processo de regeneração da areia de fundição, e o pó de areia o resíduo do processo de utilização da areia de sílica, optou-se por estudar o uso deste resíduo como *filler* em misturas asfálticas tipo CBUQ.

Esta integração poderá resultar na diminuição na geração de resíduo, bem como o estabelecimento de uma destinação final adequada para este, de forma a minimizar entradas e saídas (que correspondem à extração de recursos naturais e a geração de resíduos), bem como criar sistemas de reciclagem tão fechados quanto possível avançando no sentido de fazer respeitar os limites de sustentação do planeta, segundo os princípios do desenvolvimento sustentável.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) utilizando resíduo de areia de sílica base como *filler*.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo teve os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliação experimental dos parâmetros de dosagem Marshall dos corpos de prova com diferentes concentrações do resíduo de areia de sílica base.
- b) Avaliação do efeito da adição do resíduo de areia de sílica base sobre as propriedades mecânicas no CBUQ capaz de atender às especificações estabelecidas pelas normas do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT).

1.2.3 QUESTÕES DE ESTUDO

A utilização do resíduo pó de areia de sílica base como *filler* em substituição ao cimento *Portland* em mistura asfáltica tipo CBUQ pelo método Marshall apresentará comportamento aceitável conforme as normas técnicas do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT)?

1.3 ESTRUTURA DE TRABALHO

Este trabalho está dividido em 06 (seis) capítulos. O Capítulo 1 compreende a introdução e a definição dos objetivos do estudo. Os Capítulos 02 (dois) o referencial teórico, 03 (três) materiais e métodos, 04 (quatro) análise dos resultados e 05 (cinco) sugestões para trabalhos futuros e no último capítulo 06 (seis), são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesta pesquisa de mestrado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

Concreto betuminoso, denominado também mistura asfáltica, é uma mistura produzida a quente, em usina apropriada, com características específicas, sendo constituído de agregado mineral graduado, *fíler* e ligante betuminoso, lançado e comprimido a quente (DNER ES 313/97).

Segundo o ASPHALT INSTITUTE (1995) o objetivo do projeto das misturas asfálticas para pavimentação é determinar, dentro dos limites das especificações de projeto, a um custo efetivo, a combinação e graduação de agregados minerais e cimento asfáltico que produza uma mistura que apresente as seguintes características:

- Asfalto suficiente para formar uma espessura adequada de películas de cimento asfáltico em torno do agregado, assegurando a durabilidade do pavimento;
- Estabilidade necessária para satisfazer as exigências do tráfego, sem distorção ou deslocamentos;
- Vazios suficientes na mistura compactada para permitir uma compactação adicional sob o carregamento do tráfego e uma leve expansão do asfalto em virtude do acréscimo de temperatura, sem, no entanto, apresentar exsudação, escoamento e perda de estabilidade;
- Um teor máximo de vazios que possa impedir a permeabilidade prejudicial do ar (envelhecimento) e da umidade (descolamento do asfalto da superfície do agregado) no interior da mistura;

- Trabalhabilidade suficiente para permitir um lançamento eficiente da mistura, sem sacrificar a sua estabilidade e desempenho;
- Superfície com textura e rugosidade que possam fornecer à capa resistência suficiente à derrapagem em condições climáticas desfavoráveis.

2.2 MATERIAIS PARA MISTURA ASFÁLTICA

2.2.1 LIGANTE ASFÁLTICO

BERTOLO (2002) diz que o cimento asfáltico de petróleo é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de revestimentos de pavimentos, podendo ser obtido por destilação de petróleo em refinarias ou do asfalto natural, encontrado em jazidas.

O cimento asfáltico de petróleo recebe o símbolo CAP e o cimento asfáltico natural recebe o símbolo CAN. São semi-sólidos à temperatura ambiente, e necessitam de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento de agregados. Possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos e, sais e álcalis.

Os cimentos asfálticos de petróleo são classificados pelo seu “grau de dureza” retratado no ensaio de penetração ou pela sua viscosidade. A penetração de um CAP é definida como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico, sob condições específicas de carga, tempo e temperatura.

Quanto menor a penetração, “mais duro” é o cimento asfáltico.

O cimento asfáltico pode ser considerado um material viscoelástico, por apresentar comportamento elástico e viscoso simultaneamente, quando submetido a temperaturas intermediárias (BERTOLO, 2002).

Segundo o mesmo autor, em altas temperaturas (acima de 100°C), o cimento asfáltico atua como um fluido viscoso. Em baixas temperaturas (abaixo de 0°C), o cimento asfáltico tornase um sólido elástico.

Durante os serviços de pavimentação, os cimentos asfálticos devem apresentar as seguintes características:

- devem tornar-se suficientemente líquidos para facilitar a mistura com os agregados e o lançamento na pista;
- após o lançamento, devem tornar-se suficientemente sólidos para permitir que as camadas asfálticas resistam às ações das cargas do tráfego, mesmo sob altas temperaturas, sem sofrerem deformações excessivas ou prematuras e sob baixas temperaturas, devem possuir flexibilidade suficiente para impedir a desintegração e/ou aparecimento de trincas nas camadas asfálticas.

2.2.2 AGREGADOS

Os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podem ser naturais ou artificiais. Os primeiros são aqueles utilizados como se encontram na natureza, como o pedregulho e os seixos rolados, ao passo que os segundos compreendem os que necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória e a argila expandida (PINTO, 1998).

Os agregados representam a maior parcela constituinte de um pavimento e no caso das misturas asfálticas, chegando a valores superiores a 90% em peso do conjunto asfalto agregado. Logo, as propriedades dos agregados utilizados nas misturas asfálticas preparadas a quente são muito importantes para o desempenho dos pavimentos.

Defeitos no pavimento, como desagregação e deformação permanente, podem estar diretamente relacionados à escolha inadequada dos agregados. Deste modo, é fundamental que os agregados possuam propriedades geométricas físico-químicas e mecânicas adequadas e que garantam o bom desempenho do pavimento.

Os agregados usados em pavimentação podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos conforme apresentados a seguir:

a) Quanto à natureza das partículas:

Agregados naturais: são constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areias, entre outros.

Agregados artificiais: são aqueles em que os grãos são provenientes de sub-produtos de processo industrial por transformação física e química do material natural: escória de aciaria, argila calcinada, argila expandida, entre outros.

b) Quanto ao tamanho individual dos grãos:

Agregado graúdo: é o material retido na peneira nº 10 (2,0mm): britas, cascalhos, seixos.

Agregado miúdo: é o material que passa na peneira nº 10 (2,0mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,074mm): pó-de-pedra, areia.

Agregado de enchimento ou material de enchimento (*filler*): é o que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,074mm): cal extinta, cimento *portland*, pó de chaminé.

c) Quanto à distribuição ou graduação dos grãos:

Agregado de graduação densa: é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e curva contínua com quantidade de material fino principalmente na peneira nº 200, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

Agregado de graduação aberta: é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e curva contínua, com insuficiência de material fino, principalmente na peneira nº 200, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

Agregado tipo macadame: é aquele que possui partículas de um único tamanho. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo.

2.2.3 FÍLER

Por definição, material de enchimento – *filler* – é um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada (DNER – EM 367/97).

SANTANA (1995) define *filler* de uma maneira mais geral: um material finamente dividido, constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes como, por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento *Portland* etc., que se incorpora à mistura asfáltica. Pode melhorar seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, quando obedecidas as

especificações próprias, onde devem estar incluídos os limites para granulometria e plasticidade.

O *filler* é utilizado como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos e miúdos, contribuindo para fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Em decorrência do pequeno tamanho das partículas e de suas características de superfície, o *filler* age como material ativo, manifestado nas propriedades da interface *filler*/ligante asfáltico, não sendo, portanto, apenas um material inerte, como é apresentado na definição geral do DNER EM 367/97.

A porcentagem do material passante na peneira nº200 (0,075 mm de abertura) tem vários efeitos na densificação de uma mistura particular de agregados graúdos e miúdos, dependendo da granulometria apresentada pelas partículas abaixo desse diâmetro, da forma e da natureza das partículas. A graduação do material, portanto, tem efeito no amolecimento ou enrijecimento da mistura (MOTTA e LEITE, 2000).

Se a maior parte do agregado de enchimento que passa na peneira nº200 (75µm) é relativamente grosso, vai cumprir a função de encher os vazios do esqueleto mineral, decrescendo o índice de vazios e alterando o teor ótimo de ligante asfáltico. A AASHTO (1991) mostra, no entanto, que um *filler* ultrafino, com porcentagem significativa de material menor que 20µm, e até com alguma porção menor que 5µm, pode atuar muito mais no próprio ligante, incorporando-se ao ligante asfáltico e compondo um filme de ligante, envolvendo as partículas de agregados.

Quando a porcentagem de material passante na peneira nº200 aumenta, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura betuminosa aumenta até certo ponto. Acima de um dado nível, quanto maior a porcentagem passante na

peneira nº200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando a capacidade de compactação (MOTTA e LEITE, 2000).

De modo a evitar os danos causados pelo excesso ou pela ausência de *fíler*, MCGENNIS *et al.* (1994), estipulou para as especificações SUPERPAVE de dosagem de misturas betuminosas a razão, em peso, entre o *fíler* e ligante asfáltico, de 0,6 e 1,8 para todo tipo de mistura e estabelecendo valores de relação betume-vazios (RBV) em função do volume de tráfego, relativamente mais baixos do que os critérios tradicionais utilizados no Brasil.

Existe uma correlação entre a proporção de finos menores que 75 µm na mistura e o comportamento do revestimento no pavimento. Contudo, as propriedades físicas do *fíler* que determinam o bom ou mau desempenho no campo devem ser melhor estudadas para o entendimento do mecanismo que governa a contribuição do fino no desempenho global da mistura.

2.2.4 INTERAÇÕES LIGANTE ASFÁLTICO-FÍLER

O uso de *fíleres* é importante para diminuir a desuniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica provenientes de eventuais irregularidades na produção de ligantes asfálticos e na confecção da massa asfáltica (SANTANA, 1995).

Para SANTANA (1995), o *fíler*, além de preencher os vazios, apresenta a propriedade de aumentar a viscosidade – diminuindo a penetração – do ligante asfáltico. O *fíler* ativa o asfalto, espessando-o e encorpendo-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o asfalto correspondente. Simultaneamente, tem-se o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento na resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), no módulo de rigidez e na resistência à tração na flexão.

As propriedades físicas e químicas de cada *fíler* têm efeito direto nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A alteração que cada *fíler* provoca ocorre por meio de mudanças nas propriedades químicas e físicas do ligante, que depende dos seguintes fatores (KAVUSSI e HICKS, 1997):

- Tipo de *fíler*: graduação, forma dos grãos etc.;
- Natureza do *fíler*: sua atividade físico-química, que afeta a afinidade com o ligante asfáltico;
- Concentração do *fíler* na mistura.

PINILLA (1965) propôs uma técnica de determinação da concentração crítica de *fíler* - C_s - a partir da qual o sistema *fíler*/ligante asfáltico deixa de ser viscoso, transformando seu escoamento em não-newtoniano ou plástico. Para dosar misturas betuminosas que se deformam sem ruptura, ou seja, sem comprometer a vida de fadiga, a concentração em volume de *fíler* deve ser igual ou menor que C_s . Quanto maior a concentração volumétrica do sistema *fíler*-betume - C - mais próxima estarão as partículas dos agregados na mistura e menor será o volume de poros; conseqüentemente, mais rígida ficará. SANTANA (1995) recomenda que C seja de 10 a 20% menor do que C_s , definidas pelas expressões:

(2.1)

$$C = \frac{1}{\frac{\%b}{\%f} \times \frac{Df}{Db} + 1}$$

onde:

$\%b$: porcentagem de ligante asfáltico, em peso, na amostra total;

$\%f$: porcentagem de *filer*, em peso, na amostra total;

D_f : densidade do *filer*;

D_b : densidade do ligante asfáltico.

(2.2)

$$C_s = \frac{V_f}{V_f + V_b}$$

onde:

V_f : volume real de *filer*;

V_b : volume de ligante asfáltico nos poros.

CRAUS *et al.* (1978) considerou que entre os vários aspectos físico-químicos da interação *filer*/ligante asfáltico, a intensidade de adsorção (determinada pelo calor da interação) é o mais importante fator de caracterização do *filer* e de seus efeitos no comportamento das misturas betuminosas. A interação depende da composição química do cimento asfáltico e depende, principalmente, das características do *filer*, tais como composição mineralógica, textura superficial e superfície específica. A interação físico-químico relacionada à finura e às características de superfície do *filer* influencia as características de ruptura por fadiga. Ainda segundo CRAUS *et al.* (1978), o aspecto físico-químico está relacionado com a intensidade de

adsorção da interface *filler*-ligante asfáltico, em que maior atividade de superfície contribui significativamente para ligações mais fortes na interface físico-química.

Análise de microscopia de finas seções de misturas asfálticas (ANDERSON *et al.*, 1992) mostrou que, em termos de interação físico-química entre o ligante asfáltico e a superfície do mineral, as propriedades da fração fina dominam, pois os finos estão embutidos no ligante asfáltico. Quanto à superfície específica, os finos apresentam valores acima de $1\text{m}^2/\text{g}$, muito maiores que os dos agregados retidos na peneira n°200.

KAVUSSI e HICKS (1997) destacam, dentre os vários aspectos físico-químicos da interação *filler*-ligante asfáltico, os seguintes fatores:

- tipo de *filler*: graduação, textura superficial, superfície específica, forma dos grãos etc.;
- natureza do *filler*: composição mineralógica e atividade físico-química;
- concentração do *filler* na mistura.

A adição de *filler* em ligantes asfálticos provoca modificações em seu comportamento reológico, através do aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase, associado à natureza rígida do *filler* mineral. Essa modificação no comportamento do ligante asfáltico é distinta da causada por alguns modificadores, como os polímeros e a borracha moída, que apresentam módulo menor que o dos ligantes asfálticos sob temperaturas baixas ou intermediárias (BAHIA, 1995).

Os efeitos da incorporação do *filler* ao ligante asfáltico são mais significativos e favoráveis nas altas temperaturas, aumentando a rigidez do ligante, que tem módulo complexo menor nessa faixa de temperatura. Porém, a baixas temperaturas, o *filler* aumenta ainda mais a rigidez do ligante asfáltico, acarretando redução da capacidade de relaxar tensões (BAHIA 1995).

As propriedades reológicas do mástique resultam da combinação das características elástica, viscoelástica ou viscosa do ligante asfáltico e da natureza elástica do *filer* mineral e, conseqüentemente, afetam as propriedades mecânicas da mistura asfáltica composta por esses materiais. Com isso, o estudo das propriedades reológicas do mástique permite uma avaliação de como esse componente pode afetar as propriedades da mistura asfáltica (BECHARA *et al.*, 2008).

O índice de vazios de Rigden, modificado por Anderson, é um método para analisar o efeito do *filer*. É determinado sob condições padronizadas, em que os vazios resultam em uma máxima densificação do *filer*. Com isso é possível avaliar o teor de ligante asfáltico que irá preencher os vazios e ainda avaliar o volume de ligante em relação ao teor determinado para a mistura (HARRIS e STUART, 1995)

Para MOTTA e LEITE (2000), teoricamente, quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante promove uma lubrificação entre as partículas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o *filer*, menor deve ser a relação *filer*/ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados. A razão ou porcentagem do volume de ligante livre, comparado com o volume total de ligante, tem um efeito significativo na rigidez do mástique.

Segundo MOTTA e LEITE (2000), quanto menor o tamanho da partícula de *filer*, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura. Mas, se por um lado, o enrijecimento melhora as propriedades relativas à resistência à deformação permanente, pode também piorar a resistência à fadiga.

CRAUS *et al.* (1978), seguindo a linha defendida por PUZINAUSKAS, também considera que o *filer* tem dois caminhos de atuação nas misturas asfálticas densas:

- As partículas maiores do *filer* são parte do agregado mineral e preencherão os vazios e interstícios dos agregados graúdos, promovendo o contato pontual entre as partículas maiores e dando maior resistência às misturas;
- As partículas menores do *filer* se misturam com ligante asfáltico, aumentando sua consistência, cimentando as partículas maiores, no que alguns autores chamam de mástique.

A graduação do *filer* afeta a trabalhabilidade, da mesma forma que a graduação do esqueleto mineral, sendo proporcional à relação entre a parte mais graúda e mais miúda do *filer* (menor que 20 μm). Quanto mais pó estiver contido no *filer*, maior seu efeito na trabalhabilidade e no desempenho da mistura total. Isto é atualmente muito importante, pois segundo a AASHTO (1991) é cada vez maior a tendência de se usar como *filer* os finos da coleta de filtros instalados nas usinas.

No comportamento das misturas asfálticas o índice de vazios assume particular importância. A influência da porcentagem de vazios quanto à fadiga pode ser explicada pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem no ligante ou na combinação *filer*/ligante, perdendo características de flexibilidade e provocando, assim, um aumento na resistência à fadiga do material (ROBERT *et al.*, 1996).

SOARES e CAVALCANTE (2001) estudaram seis tipos de *fileres*: areia de campo, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, carbonato de magnésio e cimento *Portland*. Concluiu que, com o aumento do teor de *filer* nas misturas asfálticas, os valores de resistência à tração também aumentaram e, em relação ao teor de ligante de projeto, percebeu que só existe mudança quando se altera o teor de *filer*, sendo que, quanto maior o teor de *filer*, menor o teor de ligante de projeto, ou seja, com diferentes *fileres* utilizados pode ser considerado o mesmo teor de projeto de ligante.

SOUZA *et al.* (1998) utilizaram resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como *fíler* em misturas asfálticas e comparou com misturas com cal e cimento *Portland*. Percebeu que as misturas que tem como *fíler* a cal, apresentaram valores maiores de estabilidade enquanto as misturas com cimento *Portland* apresentaram o menor. O teor de asfalto de projeto foi maior para a cal (6%), depois com o resíduo (5,5%) e o mais baixo para o cimento *Portland* (5%).

MOTTA e LEITE (2000) estudaram o efeito de três tipos de *fileres*: calcário, cimento *Portland* e pó de pedra. Dos *fileres* estudados, o calcário apresentou o menor tamanho de partícula e o cimento *Portland* teve o tamanho intermediário. Foi observado que os corpos-de-prova preparados com *fíler* calcário apresentaram módulos e valores de resistência à tração superiores aos obtidos com os demais *fileres*, que apresentam granulometria mais grossa. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram o efeito da granulometria do *fíler* na rigidez da mistura betuminosa, pois quanto menor o tamanho de partícula do *fíler*, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

FARIAS (2005) estudou a influência da utilização de *fíler* proveniente da britagem de concreções lateríticas e da cal e concluiu que a origem da laterita e o tipo de *fíler* utilizado influenciaram decisivamente nas propriedades mecânicas das misturas. As amostras com *fíler* laterítico apresentaram comportamento superior por aquelas com o *fíler* cal, em relação à resistência à tração, a relação módulo de resiliência e resistência à tração (MR/RT) e resistência à fadiga; embora o tipo de *fíler* não tenha influenciado a resistência à deformação permanente. O único ensaio para o qual o *fíler* cal resultou em melhor comportamento da mistura foi o ensaio de desgaste Cântabro.

2.2.5 VARIÁVEIS QUE AFETAM AS MISTURAS ASFÁLTICAS

São inúmeras as variáveis que influenciam as propriedades de uma mistura, capacidade de distribuir tensões (rigidez), estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga. Estas propriedades são apresentadas por MONISMITH *et al.* (1989), conforme apresentado no Quadro 2.1.

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	granulometria; rigidez do asfalto; grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	textura superficial do agregado; granulometria; rigidez do asfalto; grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e a ação abrasiva do tráfego	teor de ligante; granulometria; grau de compactação; sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Habilidade da mistura deformar sob carregamento repetido sem romper	granulometria; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	granulometria; tipo de agregado; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água
Atrito	Habilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	textura do agregado e resistência ao polimento; granulometria; teor de ligante
Permeabilidade	Habilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	Granulometria; teor de ligante; grau de compactação

Quadro 1: Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas.

(Fonte: Monismith *et al.*, 1989)

Como o comportamento das misturas asfálticas é dependente das características dos agregados e do ligante (características de deformabilidade plástica e de fadiga), torna-se evidente a importância da seleção destes materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. A Figura 2.1 apresenta uma tentativa de quantificação do percentual de influência de agregados e ligante para cada uma das patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

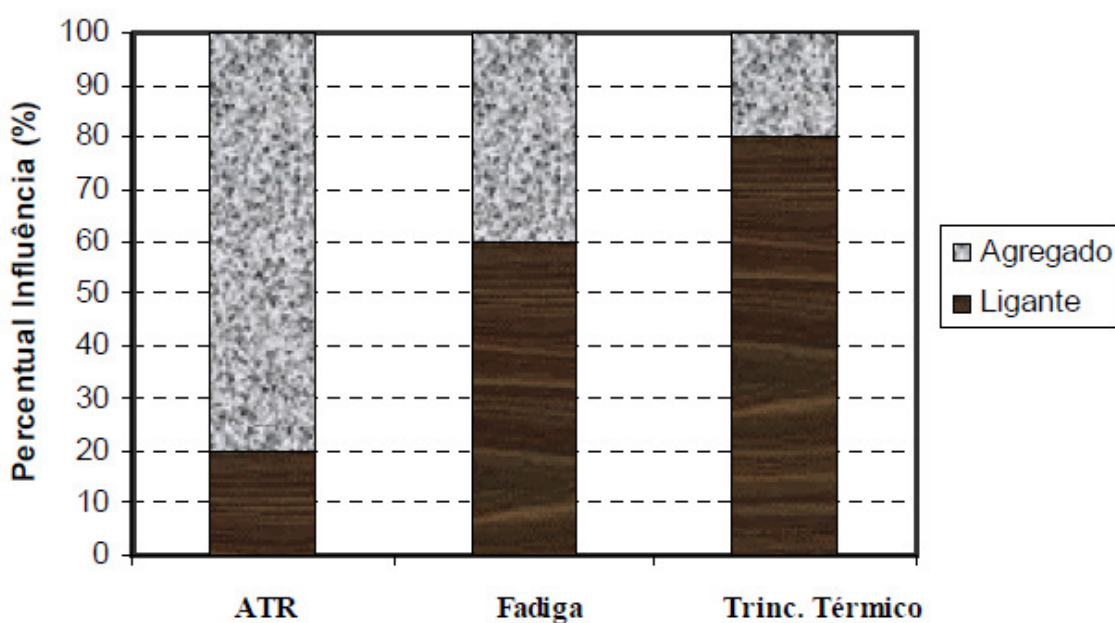


Figura 1: Influência do agregado e do ligante no desempenho do ligante CBUQ

(Fonte: FHWA 2002 in WESSELING, 2005)

2.2.6 DOSAGEM DE MISTURA ASFÁLTICA

O projeto de um concreto asfáltico para pavimentação constitui em um estudo de seleção e dosagem dos materiais constituintes, com a finalidade de enquadrá-los economicamente nas especificações estabelecidas (SENÇO, 2001).

Os principais métodos de projeto são:

Método Marshall: É baseado nas medidas de Estabilidade e Fluência Marshall, além de propriedades volumétricas da mistura.

Método Hubbard-Field: Este ensaio foi um dos primeiros a avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas. O ensaio consiste em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova quando forçado através de um orifício circular, sendo que esta carga é considerada o valor da estabilidade Hubbard-Field. O ensaio acarreta um tipo de ruptura correspondente ao cisalhamento.

Método Hveem: O método Hveem realiza uma análise de densidade/vazios e estabilidade. Também é determinada a resistência da mistura ao inchamento em água. O método Hveem possui duas vantagens reais. Primeiramente, o método de compactação pulsante em laboratório é vista pelos técnicos como a melhor simulação do adensamento que ocorre com o CBUQ em campo. Segundo, o parâmetro de resistência, a estabilidade Hveem, é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento. Este mede a capacidade de um corpo de prova resistir à deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada (MOTTA *et al.*, 2000).

Método triaxial de Smith: O termo triaxial refere-se à condição em que a pressão de suporte é aplicada ao longo da superfície lateral do corpo de prova cilíndrico, enquanto cargas axiais são aplicadas em sua base. Esse tipo de ensaio é geralmente aplicado para as classes de materiais que se apresentam plásticos no estado natural.

Metodologia SUPERPAVETM: O sistema é baseado em testes de compactação laboratorial e testes de desempenho. A compactação em laboratório é realizada com o auxílio do Compactador Giratório Superpave (SGC). Este sistema, diferente de qualquer outro procedimento de projeto, estima a interação entre as propriedades dos materiais e

propriedades estruturais da mistura visando prever propriedades de desempenho de pavimentos (MOTTA *et al.*, 2000).

Cada um desses métodos possui critérios próprios que objetivam o estabelecimento de relações entre os ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, sob condições usuais de serviço.

2.2.7 MÉTODO MARSHALL

O método Marshall foi originalmente desenvolvido na década de 1930 por Bruce G. Marshall do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Mississippi, EUA – *Mississippi State Highway Department* (SIDDIQUI *et al. apud* OGURTSOVA *et al.*, 1999).

Este método foi idealizado por seu autor para a determinação da quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizada numa mistura em concreto asfáltico. O critério usado por Marshall, para a obtenção desse parâmetro, baseava-se nos resultados da estabilidade, obtidos num ensaio de compressão diametral.

A simplicidade, rapidez de execução e o baixo custo dos equipamentos requeridos pelo ensaio Marshall, proporcionaram a propagação e a adoção do método por diversos organismos rodoviários do mundo, inclusive no Brasil.

O Método Marshall, mais utilizado no Brasil, consiste inicialmente em estabelecer uma composição granulométrica de agregado que se enquadre numa faixa especificada. Em seguida, procura-se determinar a quantidade de cimento asfáltico que, misturado ao agregado, proporcione uma boa mistura, ou seja, satisfazendo os requisitos das especificações. A dosagem de misturas asfálticas é feita considerando-se valores admissíveis empíricos para a estabilidade e fluência. A estabilidade pode ser definida como a capacidade da mistura em

deformar-se (plasticamente) sob ação das cargas. A fluência pode ser definida como a deformação lenta sofrida pela mistura compactada quando submetida a uma tensão constante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental desta pesquisa contempla a dosagem de cinco misturas asfálticas em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Cada mistura asfáltica é composta por agregado graúdo, agregado miúdo, *filler* e CAP (cimento asfáltico de petróleo).

O agregado graúdo foi caracterizado através dos ensaios de granulometria, densidades real e aparente, absorção de água e desgaste por abrasão “*Los Angeles*”, enquanto o agregado miúdo foi caracterizado quanto à granulometria e densidade real e densidade aparente. Esses ensaios realizaram-se no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) e no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Amazonas.

Após o ensaio de granulometria dos agregados que compõem as cinco misturas, foi utilizada a faixa C da norma DNIT 031/2006-ES, que trata de especificação de serviço para pavimentos flexíveis. Através do Método Marshall, o qual é amplamente utilizado no Brasil, variou-se a porcentagem de *filler* nas misturas asfálticas.

A primeira mistura é a que denominou-se de convencional, foi confeccionada utilizando o *filler* convencional cimento CII da Nassau. Nas demais misturas, denominadas de não convencionais, foram confeccionadas com o *filler* pó de areia de sílica base proveniente do processo industrial da Fuji Chemical Corporation (FCC).

De acordo com a Metodologia Marshall as misturas asfálticas foram caracterizadas quanto à estabilidade Marshall, fluência Marshall e resistência à tração (RT) no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

Por meio do Programa de Cooperação Acadêmica entre UFAM e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa COOPE/UFRJ, foram realizados ensaios de caracterização do *fíler* (pó de areia e cimento *Portland*) no Laboratório de Estruturas (LabEst) e ensaios mecânicos nas misturas asfálticas no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COOPE/UFRJ. Os ensaios de caracterização realizados foram: granulometria a laser, composição química e difração de raios-x.

As misturas asfálticas em estudo foram caracterizadas mecanicamente pelos ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Tração Estática por Compressão Diametral (RT), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão axial estático (*creep* estático), no Laboratório de Pavimentos na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COOPE).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais constituintes das misturas asfálticas utilizados nesta pesquisa foram: *fíler* não convencional (pó de areia de sílica base), agregado graúdo (seixo rolado), agregado miúdo (areia), *fíler* convencional (cimento) e ligante asfáltico (CAP 50/70).

3.2.1 FÍLER NÃO CONVENCIONAL (PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE)

A Fuji Chemical Corporation (FCC) do Brasil Ltda. está localizada no Pólo Industrial de Manaus (PIM), em uma área total de 30.700 m² de área, 7.527 m² de área construída. Iniciou suas atividades em maio de 1999, sendo sua primeira entrega realizada no dia 23 de junho do mesmo ano para a Moto Honda da Amazônia Ltda.

A FCC é fabricante de sistema de embreagem para duas rodas, peça importante para motocicletas, triciclos e quadriciclos, a qual garante sempre a performance e desempenho de seus produtos, que são produzidos com alta tecnologia e rigoroso controle do Sistema da Qualidade, visando com isso conquistar a satisfação de seus clientes.

O conjunto de embreagem para as duas rodas é composto de sistema multi-disco; disco de fricção; sistema de centrífuga; peças fundidas de alumínio e peças metálicas. Seus principais clientes são a Moto Honda da Amazônia Ltda e a Yamaha Motor da Amazônia Ltda.

O resíduo pó de areia de sílica base é proveniente do processo de retirada de rebarbas das peças de embreagem. A Figura 3.1 ilustra este processo.

A areia de sílica base é um tipo de areia regenerada, que pode ser ou não utilizada em fundição. Segundo a American Foundry Society esta areia pode ser também chamada de areia base, areia de sílica base (sem misturas). A areia de sílica base é vendida pela Amazon Sand, empresa que regenera a areia de fundição.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 2: Processo de retirada de rebarbas das peças para embreagem

Podemos observar na figura: 2-a) vista geral das peças; 2-b) vista frontal da peça com rebarbas; 2-c) peças colocadas dentro do equipamento; 2-d) colocação de dois copos de areia de sílica base para retirada de rebarbas de 400 peças.

Após o processo de retirada de rebarbas, inicia-se o processo de retirada do pó de areia de dentro do equipamento. Os procedimentos para a retirada do pó de areia de sílica base são:

- abertura do compartimento de contenção do exaustor;

- retirada da lata de contenção do pó de areia de sílica base;
- embalagem do pó de areia retirado do exaustor.

De acordo com dados fornecidos pela Empresa FCC a média de pó de areia gerado por dia é de 126 quilos (Kg/dia). Em 2008 a Empresa gerou por mês 5,41 quilos (Kg/mês) de pó de areia e em 2009 atingiu 3,8 quilos (Kg/mês).

Para esta pesquisa de Mestrado, o resíduo pó de areia de sílica base foi coletado na FCC, embalado e transportado até o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas. Este material foi posteriormente seco, homogeneizado e quarteado para o início dos ensaios laboratoriais na UFAM. O pó de areia de sílica base foi utilizado nas misturas asfálticas como *filler* mantendo sua granulometria original, não sendo utilizado nele nenhum tipo de moagem o destorroamento.

De acordo com a norma DNIT 031/2006 a qual trata da especificação de serviço para pavimentos flexíveis, cita que o *filler* a ser utilizado na mistura asfáltica deve ser constituído por minerais finamente divididos, estando de acordo com a granulometria da norma DNER EM 367/97.

3.2.2 AGREGADO GRAÚDO (SEIXO ROLADO)

O agregado graúdo utilizado foi o seixo rolado, devido à escassez de material pétreo no Estado do Amazonas, além disso, o seixo rolado é encontrado facilmente no mercado local.

Para trabalharmos com outras opções de agregado graúdo, na primeira etapa utilizou-se a brita, mas a mesma não passou no ensaio de adesividade ao ligante betuminoso, de acordo com a norma DNER-ME 078/94, demonstrando a brita ser bastante alcalina.

Segundo Bernucci *et al.* (2006) este tipo de agregado é chamado de hidrófilo, quando ocorre um deslocamento da película de ligante asfáltico da superfície do agregado utilizado, no caso desta pesquisa, a brita, tornou-se inaceitável seu uso em misturas asfálticas. Sendo assim, o seixo rolado foi utilizado em substituição à brita.

As características do seixo rolado são:

- ✓ forma das partículas: arredondada (não lamelar)
- ✓ textura superficial: lisa (não rugosa)

Tais características influenciam na trabalhabilidade e na resistência ao atrito e também ao cisalhamento das misturas asfálticas. Apesar disso, o seixo rolado mostrou um melhor desempenho no ensaio de adesividade ao ligante, quando comparado com o desempenho da brita, e também uma baixa absorção (não poroso).

Este material foi doado pela Konkrex, a qual extrai o seixo rolado do Rio Japurá, através de balsas, no interior do Estado do Amazonas. A coleta do agregado graúdo foi realizada em Agosto de 2009, no pátio da empresa Konkrex.

Para obter-se uma amostra mais representativa, o seixo foi coletado em diversos pontos da pilha. A Figura 3 mostra a pilha de seixo rolado.

Após a coleta do seixo rolado, o mesmo foi colocado em sacos de estopa num total de 200 kg, e em seguida foi armazenado no pátio externo ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas (LABPAV). O Quadro 3.1 mostra os ensaios de caracterização física do seixo rolado.

Ensaio	Método
Massa específica aparente	DNER-ME 195/97
Massa específica real	DNER-ME 195/97
Absorção	DNER-ME 195/97
Desgaste por Abrasão <i>Los Angeles</i>	DNER-ME 035/98
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/94

Quadro 2: Ensaio de caracterização do seixo rolado.



Figura 3: Pilha de seixo rolado no pátio da empresa Konkrex.

3.2.3 AGREGADO MIÚDO (AREIA)

O agregado miúdo utilizado foi a areia, a qual foi extraída de jazidas localizadas na BR-174 que liga o Estado do Amazonas ao Estado de Roraima. Este material foi doado pela empresa Konkrex. A coleta do agregado miúdo foi realizada em Agosto de 2009, no pátio da empresa Konkrex.

Para obtermos uma amostra mais representativa, assim como o seixo, a areia foi coletada em diversos pontos da pilha onde a mesma encontrava-se. Após a coleta a areia foi colocada em sacos de estopa num total de 200 kg. Esta areia foi armazenada no pátio externo ao

Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal do Amazonas (LABPAV).

As granulometrias foram realizadas através de peneiramento manual.

3.2.4 *FÍLER CIMENTO PORTLAND*

Segundo BALBO (2007) um dos objetivos de uma mistura asfáltica é possuir vazios (com ar) suficientes e não excessivos. A finalidade do *fíler* é preencher os vazios existentes na mistura asfáltica.

O *fíler* usado na composição das misturas asfálticas foi o cimento *portland* CP-II da Nassau. Este material foi obtido no comércio local do Estado do Amazonas. A embalagem do cimento foi devidamente protegida por um saco plástico para evitar umidade. O material foi armazenado na parte interna do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas.

O cimento foi submetido aos ensaios de caracterização exigidos na norma DNIT031/2006-ES que especifica serviços para pavimentos flexíveis.

3.2.5 LIGANTE ASFÁLTICO (CAP 50/70)

O ligante asfáltico utilizado na confecção das misturas asfálticas foi o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70. O ligante foi doado pela refinaria da Petrobrás Isaac Sabá localizada no distrito industrial de Manaus no Estado do Amazonas.

3.3 MÉTODOS UTILIZADOS

3.3.1 FÍLER PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE

De acordo com a norma DNIT 031/2006 a qual trata da especificação de serviço para pavimentos flexíveis, cita que o fíler a ser utilizado na mistura asfáltica deve ser constituído por minerais finamente divididos, estando de acordo com a granulometria da norma DNER EM 367/97.

O fíler não convencional utilizado nesta pesquisa foi o pó de areia, proveniente do processo industrial da empresa FCC.

3.3.2 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO FÍLER PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE

A norma DNER-EM 367/97, a qual apresenta as características exigidas para material de enchimento para misturas betuminosas. A Figura 4 mostra as peneiras utilizadas neste ensaio.



Figura 4:Ensaio de granulometria do fíler não-convencional (pó de areia).

Através do ensaio de granulometria foi comprovado que o *filer* não convencional, o pó de areia, tem sua faixa granulométrica estando em conformidade com a norma DNER – ME 083/98, possibilitando sua utilização como *filer* em substituição ao cimento *Portland*. O mesmo foi utilizado sem nenhum tipo de moagem prévia, sendo utilizado conforme coletado no tambor de coleta da indústria FCC, conforme a Figura 5.



Figura 5: Resíduo pó de areia de sílica base no tambor.

3.3.3 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL (*CHATELLIER*)

A norma DNER-ME 085/94 apresenta os procedimentos para determinação da massa específica do *filer*.

Optou-se por colocar 60 gramas (g) de pó de areia no frasco *Le Chatellier*, por ser desconhecido seu comportamento como material de enchimento.

Foram realizadas leituras do nível de querosene no frasco *Le Chatellier*, antes e após a adição do pó de areia. Através da média de três resultados obteve-se o valor da massa específica real, expressa g/cm^3 .

3.3.4 ENSAIO DE ANÁLISE QUÍMICA ATRAVÉS DA ESPECTROSCÓPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O espectrômetro por fluorescência de raios-X é um instrumento que determina qualitativamente e quantitativamente os elementos químicos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da incidência de raios-X que excitam as camadas eletrônicas da amostra. Durante esta excitação, os elétrons transitam pelos orbitais e um fóton pode ser emitido do átomo. Essa luz fluorescente é característica de cada elemento de sua composição, pois, para cada elemento, teremos fótons de energia diferentes (BELMONTE, 2005). A técnica de fluorescência de raios-X é não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pós, etc.

Nesta pesquisa o fíler não convencional o pó de areia foi submetido a análise química feito em equipamento EDX – 720 Energy Dispersive, X Ray Spectrometer, Shimadzu do LabEst (COPPE/UFRJ), o tempo de análise da amostra é cerca de 8 minutos.

O equipamento faz análises de sódio a urânio, possui tubo de Rh (ródio) e resfriamento com nitrogênio líquido. Para a determinação da composição química do pó de areia foi seca e posteriormente prensada para formação de um disco.

A Figura 6 abaixo mostra o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 6: Equipamento EDX – 720 Energy Dispersive, X Ray Spectrometer, Shimadzu.

3.3.5 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X

Nos ensaios de difração mais comumente empregados, o comprimento de onda do feixe incidente de raios X é mantido constante. Pelas medições dos ângulos de difração, as distâncias interplanares e intensidades de difração das fases cristalográficas podem ser determinadas. Os dados gerados pelo ensaio são compilados em difratograma, onde a intensidade dos picos de difração está relacionada com os respectivos ângulos de difração, que variam no decorrer da análise.

A difração de raios X foi empregada para caracterização de fases cristalinas presentes nos resíduo de pó de areia. O equipamento utilizado na análise foi o difratômetro D8 Focus-Bruker do LabEst (COPPE/UFRJ, com radiação monocromática de cobre ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), operando a 35 kV e 40 mA. A amostra foi masserada com o auxílio de almofariz de porcelana. Em seguida, a amostra foi compactada e colocada em porta amostra de vidro.

Para difração de raios X, a amostra foi masserada com o auxílio de almofariz de porcelana. Em seguida, a amostra foi colocada em uma pastilha a mesma foi moldada em porta-amostra com uma cavidade de 20 mm de diâmetro e 2 mm de altura, com o auxílio de uma lâmina de vidro. Após a moldagem, o porta-amostra foi acoplado no difratômetro para o início da análise.

O equipamento utilizado para análise da amostra foi o difratômetro da Bruker, modelo D8 Focus do LabEst (COPPE/UFRJ), com radiação monocromática de cobre ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), operando a 30 kV e 40 mA, com varreduras de velocidade angular de $0,05^\circ$ por segundo e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg (2θ) de 10° e 70° . A Figura 7 mostra este equipamento utilizado neste ensaio.

Os feixes de raios passavam por uma fenda de 0,6 mm (divergente), após a difração ocasionada pela amostra, o feixe passava por outra fenda de 0,6 mm (anti-scatter), em seguida por filtro de níquel (filtro $k\beta$) e por fim, por outra fenda de 0,1 mm (detector slit).

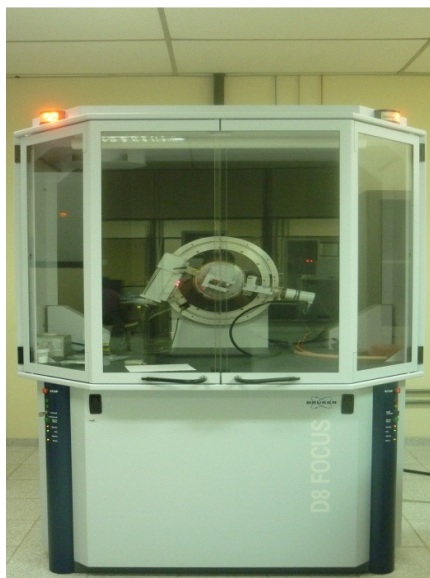


Figura 7:Difratômetro da Bruker, modelo D8 Focus



Figura 8:porta-amostra.

3.3.6 ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER

A análise de distribuição a laser baseia-se no princípio (difração Fraunhofer) de que, quanto menor o tamanho da partícula, maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas (DAL MOLIN, 2007). Neste método, um conjunto de lentes,

detectores foto-elétricos e um microprocessador irão captar a intensidade da energia espalhada e transformá-la em distribuição volumétrica das partículas, assumindo-se, a princípio, que as partículas têm formato esférico (RAWLE, 2002 apud FLORÊNCIO, 2006).

A análise foi feita via úmida, para facilitar a separação das partículas no meio, empregou-se desaglomeração física por meio de agitação por bomba e/ou por ultra-som, sem que houvesse a quebra de partículas.

Os ensaios com as amostras de cimento e pó de areia foram realizados via analisador de partículas a laser (Malvern Mastersizer) no Laboratório de Estruturas – LabEst (COPPE/UFRJ) e foram conduzidos com lente 100 (0,5 – 180 μm). Álcool etílico absoluto P.A. foi usado como meio suspensor para o cimento, e água destilada para o pó de areia, juntamente com ultra-som, durante 60 segundos. A Figura 9 abaixo mostra o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 9:Analisador de partículas a laser Malvern Martersizer.

3.4 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SEIXO ROLADO

Bernuci *et al.* página 51(2006) citam que a distribuição granulométrica é uma das mais importantes características físicas, pois a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção de tipos de misturas asfálticas.

A análise granulométrica do seixo rolado foi realizada de acordo com a norma DNER – ME 083/98, sendo o resultado a média de três análises granulométricas realizadas no Laboratório de Pavimentação da UFAM. A Figura 10 mostra a seqüência de peneiras utilizadas neste ensaio:



Figura 10: utilizadas conforme especificação da norma DNER – ME 083/98.

As granulometrias foram realizadas por meio do processo de peneiramento manual. Após o peneiramento o seixo foi separado por peneira, permitindo assim que todas as misturas sejam moldadas com as frações exatas de cada peneira, conforme mostra a Figura 11 abaixo:



Figura 11: Separação por peneira do seixo rolado.

3.4.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA DO SEIXO ROLADO

Entende-se como absorção o aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos vazios por água, expresso como porcentagem de sua massa seca.

O ensaio verifica a absorção do agregado após 24 horas de imersão em água, expresso em porcentagem, permitindo determinar o cálculo das massas específicas real, aparente e efetiva do agregado graúdo, de acordo com a norma DNER-ME 195/97. A Figura 3.10 mostra as etapas realizadas durante este ensaio.

A absorção é obtida pela Equação 3.1:

(3.1)

$$a = \frac{B-A}{C} \times 100 \text{ expressa em porcentagem (\%)}$$

C

Onde:

a = absorção do agregado

A = massa do agregado seco em gramas (g)

B = massa do agregado na condição saturada superfície seca em gramas (g)

C = massa do agregado imerso em água em gramas (g)



Figura 12: Etapas do ensaio de absorção: a) lavagem do seixo na peneira (4,8 mm); b) secagem em estufa até a constância de massa; c) imersão em água por 24 h; d) remoção da água com pano absorvente; e) pesagem do seixo submerso em água; f) secagem em estufa.

De acordo com Bernuci *et al.* (2006) a massa específica na condição seca chamada de G_{sa} é a mesma massa específica aparente na condição seca da DNER-ME 195/97. Ela é expressa em g/cm^3 , conforme mostra a Equação 3.2 abaixo:

(3.2)

$$Gsa = \frac{A}{A - C}$$

Onde:

Gsa= massa específica aparente seca

A= massa do agregado seco em gramas (g)

C= massa do agregado imerso em água em gramas (g)

Já a massa específica na condição de superfície saturada seca chamada de Gsb é a mesma massa específica real na condição saturada seca da DNER-ME 195/97. Ela é expressa em g/cm³, conforme mostra a Equação 3.3 abaixo:

(3.3)

$$Gsb = \frac{A}{B - C}$$

Onde:

Gsb= massa específica do agreg

A= massa do agregado seco em gramas (g)

B= massa do agregado na condição saturada superfície seca em gramas (g)

C= massa do agregado imerso em água em gramas (g)

A massa específica efetiva é a média da massa específica aparente e da massa específica real, pois ela é quem mais se aproxima com o que acontece em campo.

3.4.2 ENSAIO DE ABRASÃO *LOS ANGELES* DO SEIXO ROLADO

A resistência à abrasão do agregado graúdo foi determinada no Laboratório de Materiais (LABEM) da UFAM. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma acima citada. A graduação utilizada foi a B, cuja carga abrasiva é de $4584 \pm 25\text{g}$ (11 esferas). Os equipamentos utilizados e o procedimento são detalhados na norma DNER-ME 035/98.

Esta norma prescreve que o valor encontrado deve ser igual ou inferior a 50%. A Figura 13 mostra o ensaio realizado. Calcula-se a abrasão “*Los Angeles*” pela Equação 3.4 abaixo:

(3.4)

$$A_n \leq \frac{mn - mn'}{mn} \times 100$$

Onde:

A_n = abrasão “*Los Angeles*” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina

$m_{n'}$ = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm)



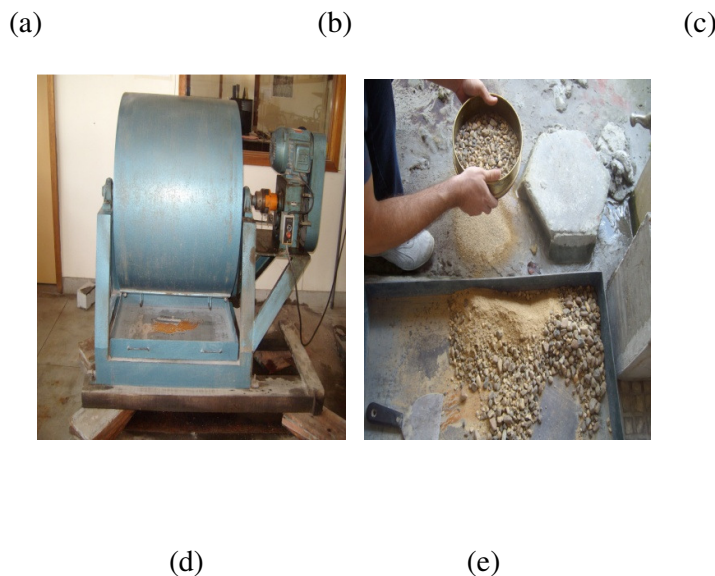


Figura 13: Etapas do ensaio de Abrasão “Los Angeles”: a) 2.500 g de material passante na peneira # 12,5 mm; b) 2.500 g de material passante na peneira # 9,5 mm; c) carga abrasiva: 4584 + ou – 25; d) máquina “Los Angeles”; e) material retido na peneira # 1,7 mm.

3.4.3 ENSAIO DE ADESIVIDADE AO LIGANTE BETUMINOSO DO SEIXO ROLADO

De acordo com a norma DNER-ME 078/94 realizou-se o ensaio de adesividade ao ligante betuminoso, utilizando o CAP 50/70. Na primeira etapa foi realizado o ensaio tanto na brita quanto no seixo rolado, porém a brita não apresentou resultado satisfatório, apresentando um total de descolamento da película que envolve a brita após as 72 horas especificadas pela norma.

Ao realizarmos o mesmo ensaio com o seixo rolado, o mesmo apresentou resultado satisfatório, ou seja, não houve nenhum deslocamento da película betuminosa ao final das 72 horas especificadas pela norma. A Figura 14 mostra as etapas realizadas neste ensaio.

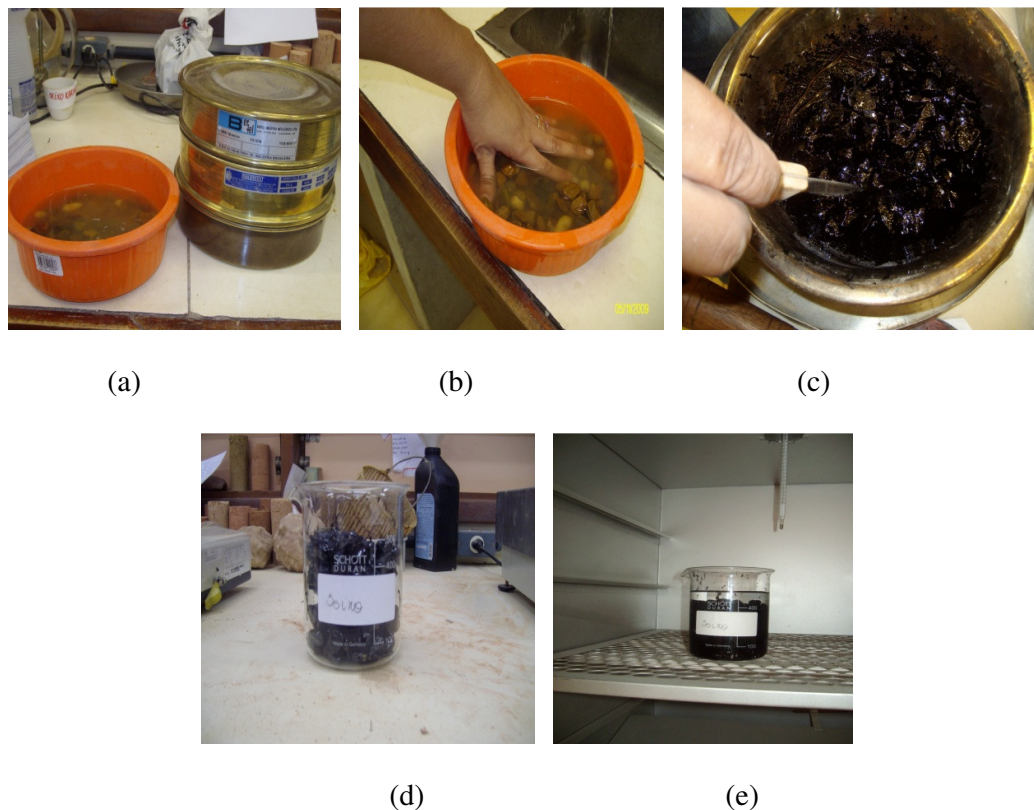


Figura 14: Etapas do ensaio de adesividade ao ligante betuminoso:

a) 500 gramas de seixo retido na peneira 12,7 mm; b) seixo coberto com água destilada, durante 1 minuto e levado à estufa, a 100 °C, por 2 horas; c) derramado sobre o agregado 17,5 g de CAP 50/70, já previamente aquecido a 120 °C, e misturado até um completo envolvimento do agregado com o ligante; d) mistura deixada em repouso até que o ligante esfriasse; e) mistura colocada na estufa, a 40 °C, recoberta por água destilada, durante 72 horas.

De acordo com Bernuci *et al.* (2006) *apud* Pinto (1998) a expressão densidade, de uso comum na engenharia, refere-se à massa específica. Para os demais ensaios utilizaremos o termo densidade em vez de massa específica.

3.5 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA

A análise granulométrica da areia foi realizada de acordo com a norma DNER – ME 083/98, através do resultado da média de três análises granulométricas realizadas no Laboratório de

Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas. O ensaio de granulometria foi realizado através do processo de peneiramento manual. A Tabela 1 mostra as peneiras utilizadas neste ensaio.

Tabela 1: Malha das peneiras do ensaio de granulometria.

Peneira	
	abertura
polegadas	(mm)
3/8"	9,5
4	4,8
10	2
40	0,42
80	0,18
200	0,074

3.5.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DA AREIA (*CHAPMANN*)

O ensaio de massa específica real foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 194/98 colocando-se cerca de 500 g de areia material, previamente seca em estufa, no frasco de *Chapman*, com já água até a marca de 200 cm³. Agitou-se o conjunto areia mais água, a fim de eliminar as bolhas de ar. A Figura 15 mostra este ensaio realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas. A massa específica real do agregado miúdo foi calculada pela Equação 3.5 abaixo:

(3.5)

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm^3

L = leitura no frasco *Chapman* (volume ocupado pelo conjunto água+areia).



Figura 15: Método de Chapman.

3.6 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO *PORTLAND*

A análise granulométrica do cimento foi realizada de acordo com a norma DNER – ME 083/98, através do resultado da média de três análises granulométricas realizadas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas.

De acordo com a norma DNER EM 367/97, o material a ser usado como *fíler* na mistura asfáltica deve estar dentro da granulometria da Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Composição granulométrica do filer, segundo DNER- EM 367/97.

Peneira (polegada)	Abertura (mm)	% em massa passando
40	0,42	100
80	0,18	95-100
200	0,074	65-100

3.6.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA REAL DO CIMENTO *PORTLAND* (*CHATELLIER*)

O ensaio de massa específica real foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 085/94 colocando-se 50 g de cimento *Portland* no frasco *Le Chatellier*. Colocou-se querosene no frasco, o qual ficou em banho de água em temperatura constante de 25 ° C. Antes e após a adição do cimento *Portland* fez-se a leitura inicial e final, que representa o volume do querosene deslocado pelo cimento *Portland*.

A massa específica real é expressa g/ cm³ e foi obtida através da Equação 3.6.

$$\mu = \frac{\text{massa do material}}{\text{volume do líquido deslocado}} \quad (3.6)$$



Figura 16: Frasco Le Chatellier.

3.7 LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70. O mesmo provém da refinaria da Petrobrás Isaac Sabá localizada no distrito industrial de Manaus no Estado do Amazonas.

3.7.1 ENSAIO DE PENETRAÇÃO

O ensaio de Penetração seguiu os procedimentos da norma da ABNT 6576/ 98 e foi realizado no Laboratório de Pavimentos da Geotecnia na Coppe/UFRJ.

Esperou-se a estabilização do ligante CAP 50/70 na temperatura de 25°C, em seguida o mesmo foi colocado no prato do penetrômetro. A agulha, carregada com 100g, foi posicionada na superfície da amostra, logo após 5 segundos da sua liberação foi anotada a penetração, conforme mostra a Figura 17. Foram realizados três ensaios. O resultado deste ensaio é a média destes valores.

Este é um ensaio tradicional que mede a consistência do CAP no estado semi-sólido, caracterizando assim a dureza do ligante, pois quanto menor a penetração, maior a sua dureza. Com o aumento da profundidade de penetração, o asfalto altera seu comportamento de rígido e frágil para flexível e dúctil.



Figura 17: de penetração realizado no Laboratório de Pavimentos da COOPE/UFRJ.

3.8 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Após os ensaios de granulometria dos agregados graúdo, miúdo e do fíler (cimento e pó de areia), foram definidas as composições granulométricas dos agregados para utilização em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

Campos (2008) afirma que as percentagens de diversos agregados, adequadas para a mistura, representam os primeiros dados a serem levados em conta na calibração das usinas de asfalto.

A faixa utilizada nesta pesquisa foi a faixa C do DNIT, definida pela norma de especificação de serviço ES-031/2006. Com a faixa estabelecida iniciou-se o procedimento experimental de

dosagem das misturas asfálticas a primeira foi a que denominamos de convencional, que utilizou como fíler o cimento CP II da Nassau na mistura asfáltica, e a não convencional, que utilizou como fíler o pó de areia, objeto principal de estudo nesta pesquisa.

Esta faixa C utilizada nesta pesquisa foi encontrada através do método das tentativas onde foram traçadas as curvas representativas das misturas calculadas a partir da distribuição granulométrica de cada componente da mistura asfáltica.

3.8.1 MÉTODO MARSHALL

Através do método de dosagem mais usado mundialmente, o método Marshall, que faz referência ao engenheiro Bruce Marshall o qual desenvolveu a aparelhagem e método na década de 1940, foram moldados os corpos-de-prova desta pesquisa.

Este método é normatizado pela DNER ME 043/95 que apresenta todos os procedimentos e aparelhagens utilizados para a determinação das propriedades mecânicas dos corpos-de-prova (CP's), que são a Estabilidade Marshall e a Fluência Marshall. O valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade.

Por Estabilidade, entende-se o valor da força vertical máxima aplicada que leva a amostra (comprimida diametralmente) à ruptura, medida em quilos, já Fluência é o valor da deformação vertical sofrida pela amostra imediatamente antes da ruptura, medida em centésimos de polegada ou em milímetros (BALBO 2006).

De acordo com WESSELING *apud* ASPHALT INSTITUTE (1995) as etapas para o processo de moldagem de corpos-de-prova de misturas betuminosas através do Método Marshall serão descritas abaixo:

- 1) preparação e separação de material granular para a confecção de no mínimo de 15 corpos-de-prova (3 para cada teor de ligante);

- 2) estimativa da percentagem de ligante de projeto (tentativa em busca do “teor ótimo”)
- 3) moldagem por compactação dinâmica, com o equipamento de Marshall dos ternos de corpos-de-prova com os teores de ligante estimados;
- 4) extração dos corpos-de-prova dos moldes cilíndricos e cura, ao ar livre, durante 24 horas;
- 5) pesagem de cada corpo de prova (massa específica aparente seca e massa específica aparente úmida, submersa em água). Com estes valores, foram determinados os elementos para o cálculo das relações volumétricas da dosagem: a densidade aparente do corpo-de-prova γ_{ap} (relação entre sua massa e seu volume), a porcentagem de vazios (relação entre o volume de vazios VV (%) e o volume total da amostra compactada) e a relação betume-vazios RBV (%), que é a relação entre o volume de vazios agregado, preenchidos por betume e a relação vazios do agregado mineral volume agregado mineral VAM (%); e vazios cheios de betume VCB (%).
- 6) imersão dos corpos-de-prova em banho-maria, a 60°C, durante 30 minutos, após as amostras são imediatamente submetidos ao ensaio Marshall, para determinação de suas características mecânicas (Estabilidade e Fluência);
- 7) tomados os valores dos índices físicos citados no item 6 juntamente com os valores das características mecânicas do item 7, são lançados graficamente γ_{ap} , VV(%),RBV (%), Estabilidade e Fluência, em ordenadas, em função dos teores de ligante considerados para cada corpo-de-prova. De acordo com o método das tentativas descrito por Senço (2001) o processo de seleção do teor de ligante do projeto consiste em: a) definir um teor de ligante que leva à maior estabilidade possível;
- ; b) definir o teor de ligante que leva à maior densidade aparente; c) definir o teor de betume que leva a uma porcentagem de vazios de 4%; d) definir o teor de ligante que conduz a uma RBV de 80 %. O cruzamento destas informações resultou no que denominamos de “teor ótimo”, ou seja, o teor de ligante de projeto.

Os corpos-de-prova foram moldados com soquete dinâmico (duplo) Marshall. Cada face do corpo-de-prova foi compactada com 75 golpes.

Conforme a Metodologia Marshall descrita anteriormente, foram confeccionados diversos corpos de prova no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas para avaliar a resistência mecânica dos mesmos. As etapas do processo de confecção dos corpos-de-prova estão ilustradas na Figura 18:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)



(m)

Figura 18: Processo de confecção dos corpos de prova.

A Figura 18, demonstra o processo de confecção dos corpos de prova: a) Separação de material granular dos corpos-de-prova; b) pesagem do material granular para os corpos-de-prova; c) “teor ótimo” de asfalto (CAP 50/70) para cada mistura; d) controle da temperatura da mistura asfáltica; e) mistura dos agregados e asfalto, mantendo-se a temperatura da mistura; f) colocação da mistura asfáltica no molde cilíndrico previamente aquecido; g) compactação da mistura asfáltica com 75 golpes do soquete Marshall por face do corpo de prova; h) retirada dos moldes cilíndricos para esfriarem e posterior extração dos corpos-de-prova dos moldes cilíndricos; i) extrusão do corpo de prova, retirando-os do molde metálico; j) realização de medidas do diâmetro e altura do corpo de prova com paquímetro (3 medidas de cada); k) colocação dos corpos de prova em banho-maria a 60°C, por 40 minutos; l) realização do ensaio de Estabilidade e da Fluência na prensa do aparelho Marshall.

Para a mistura asfáltica convencional (mistura 1) composta de seixo, areia, CAP 50/70 e fíler convencional, cimento CP II, foram moldados dois corpos-de-prova para cada teor de projeto com os valores de 3,5%, 4%, 4,5%, 5% e 5,5 % de CAP 50/70 na determinação do teor de ligante do projeto. O teor de ligante do projeto que obedeceu aos valores limite do Quadro 3

abaixo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 que especifica os serviços para pavimento asfáltico, foi o teor de 4,5. Para a confirmação do teor “ótimo” da mistura 1 convencional, foram moldados mais 3 corpos-de-prova com o teor de 4,5%.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação (Binder)
Porcentagem de Vazios %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75-82	65-72
Estabilidade, mínima, (Kgf) 75 golpes	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por Compressão Diametral estática a 25 °C, mínima, Mpa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Quadro 3: Norma DNIT 031/2006 Especificação de serviços para pavimentos flexíveis.

Para as demais misturas não-convencionais (mistura 2, mistura 3, mistura 4, mistura 5) resolveu-se não adotar o mesmo teor de ligante do projeto da mistura convencional, pois os corpos-de-prova moldados com o teor de ligante do projeto de 4,5% utilizando o pó de areia, pois o mesmo fica fora dos parâmetros descritos nas etapas para o processo de moldagem de corpos-de-prova de misturas betuminosas através do Método Marshall. Assim sendo, foram moldados diversos corpos-de-prova, com o objetivo de obtermos o teor “ótimo” para as misturas não-convencionais para as demais misturas não-convencionais (mistura 2, mistura 3, mistura 4, mistura 5).

O teor de ligante do projeto que obedeceu aos valores limite do Quadro 4, já mencionado, pertencente à norma DNIT 031/2006 que especifica os serviços para pavimento asfáltico, o teor “ótimo” encontrado foi 4,9 %.

O Quadro 3.5 abaixo mostra como foi realizado de forma gradativa, a substituição do o cimento *Portland* (fíler convencional) pelo pó de areia (fíler não convencional):

Composição das Misturas Asfálticas	
Mistura Convencional	Mistura 1
Componente	100 % cimento
Mistura Não Convencional	Mistura 2
Componentes	100 % pó de areia
Mistura Não Convencional	Mistura 3
Componentes	75% pó de areia e 25 % cimento
Mistura Não Convencional	Mistura 4
Componentes	50 % pó de areia e 50 % cimento
Mistura Não Convencional	Mistura 5
Componentes	25 % pó de areia e 75% cimento

Quadro 4: Composição das misturas asfálticas.

3.8.2 MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA

Segundo Bernucci *et al.*(2006), a massa específica máxima teórica, tradicionalmente denominada densidade máxima teórica (sigla DMT no Brasil), é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica e é descrita na Figura 19 abaixo. Esse parâmetro é definido na norma de dosagem de misturas asfálticas ABNT NBR 12891.



Figura 19: Volumes para a Densidade Máxima Teórica (DMT).

FONTE: Livro de Pavimentação Asfáltica, 210p. 2007 (Bernucci *et al* 2006).

A DMT ou a Gmm calculam: o percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado (G_{se}), teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica.

A massa específica máxima teórica tem formulação teórica, onde a equação que define a DMT é função das massas específicas reais dos componentes da mistura asfáltica e da proporção com que cada um dos componentes participa na mistura total. A determinação da DMT é comumente realizada através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica, no caso desta pesquisa levou-se em consideração o seixo rolado, areia, ligante CAP 50/70, o *fíler* cimento e o *fíler* pó de areia. O ensaio de massa específica (correspondente numericamente à densidade) nesses agregados é feito segundo as normas: DNER- ME 195/97 para o seixo rolado (agregado graúdo), DNER-ME 194/98 para a areia (agregado miúdo) e para o cimento CP II (*fíler* convencional) e pó de areia de sílica base (*fíler* não convencional).

Com os resultados das massas específicas reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A Equação 3.7 abaixo apresenta o cálculo da DMT através das massas e das massas específicas reais dos materiais constituintes da mistura asfáltica:

(3.7)

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{\%Ga} + \frac{\%Ag}{Gag} + \frac{\%Am}{Gam} + \frac{\%f}{Gf}}$$

Onde:

%a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica .

%Ag, %Am e %f = porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

Ga, Gag, Gam e Gf = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

Nesta pesquisa foi utilizada para o agregado graúdo (seixo) a massa específica efetiva, a qual foi obtida através da média entre sua massa específica real e sua massa específica aparente, conforme proposto por Pinto (1996).

Para o agregado miúdo (areia) e para o *fíler* (cimento e pó de areia), foi utilizada a massa específica real de cada um destes materiais, fornecida através de ensaios já descritos.

3.9 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICA

As misturas asfálticas desta pesquisa foram caracterizadas mecanicamente através dos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão axial estático (creep estático).

3.9.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

Em 1943, o professor Lobo Carneiro desenvolveu no estado do Rio de Janeiro o ensaio de compressão diametral para determinação indireta da RT, conhecido no exterior como Brazilian Test. O ensaio é normatizado pela DNER ME 138/94 que apresenta os procedimentos deste ensaio.

De acordo com Bernucci *et al.*(2006), este ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. A resistência a tração por compressão diametral (RT), geralmente expressa em MPa, é calculada pela Equação 3.8:

(3.8)

$$\sigma_r = \frac{2f}{\pi DH}$$

Onde:

σ_r = resistência à tração, kgf/cm²;

F = carga de ruptura, kgf;

D = diâmetro do corpo de prova, cm;

H = altura do corpo de prova, cm.

O ensaio de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) foi realizado no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal do Amazonas e o mesmo foi repetido no Laboratório de Pavimentos na Coppe/UFRJ para obtenção das forças

resultantes a serem utilizadas nos ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral e fadiga. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25°C.

Os corpos-de-prova moldados para o ensaio de RT foram denominados de corpos-de-prova “virgens” e os corpos-de-prova que foram submetidos ao ensaio de RT e também submetidos ao ensaio de módulo de resiliência, foram denominados de “pós-módulo”, pois com os resultados do ensaio de tração estática e o de módulo de resiliência, serão apresentados mais adiante as relações MR/RT das misturas asfálticas desta pesquisa.

Segundo BALBO (2007) a relação entre o valor de módulo de resiliência e a resistência à tração do material tem sido empregada simultaneamente em projetos e dosagens, em especial, de misturas asfálticas. Este parâmetro mostra que, quanto menor a relação MR/RT, melhor deva ser o comportamento da mistura asfáltica quanto à flexibilidade.

Quanto mais rígido se apresenta um material, maior é a sua capacidade como camada de reter esforços em si mesma, aumentando o efeito de placa da camada, conseqüentemente induz a maiores tensões de tração no material em questão.

A Figura 20 mostra o ensaio de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) realizado no Laboratório de Pavimentos na COOPE/UFRJ.

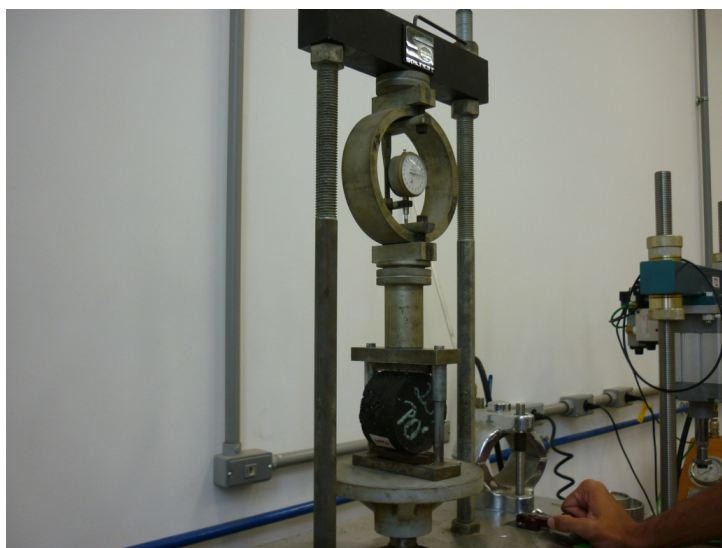


Figura 20: Ensaio de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) no Laboratório de Pavimentos na Coppe/UFRJ.

3.9.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Segundo BALBO (2007), Módulo de Resiliência (MR) é a capacidade dos materiais de pavimentação de não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga causadora das deformações.

WESSELING (2005) diz que o termo deformação resiliente passou a significar a deformação recuperável dos pavimentos quando submetidos a carregamentos repetidos, isto, como uma forma de distingui-la daquelas que ocorrem em outras estruturas onde as cargas não são repetidas tão aleatoriamente quanto à frequência, duração e intensidade como a do tráfego de veículos. O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é um ensaio que simula em laboratório, o que acontece em campo: o comportamento mecânico da mistura asfáltica na zona onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) baseia-se nas recomendações da norma DNER-ME 133/94. O valor do módulo resiliente é expresso em Mega Pascal (MPa) determinado pela relação entre a tensão de tração (σ_t) normal ao plano vertical diametral e a deformação específica resiliente nesse plano (ϵ_{tr}), como mostra a Equação 3.9 abaixo:

$$(3.9) \quad MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_{tr}}$$

Na determinação do módulo de resiliência das misturas asfálticas desta pesquisa, foram realizados ensaios de compressão diametral ou tração indireta de cargas repetidas no Laboratório de Pavimentos de Geotecnia da COPPE/UFRJ, conforme mostra a Figura 21 e 22:



Figura 21: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência (acoplado ao computador);



Figura 22: corpo-de-prova com um único LVDT.

Primeiramente determinou-se a resistência à tração dos corpos-de-prova, descrito anteriormente. Aplicou-se 200 vezes uma carga vertical repetida (F) no plano diametral vertical nos corpos-de-prova cilíndricos regulares que possuíam aproximadamente as dimensões de: 100 mm de diâmetro e alturas variáveis, moldados conforme a Metodologia Marshall, de modo a se obter uma tensão (t) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C e o coeficiente de Poisson adotado 0,30.

O Módulo de Resiliência (MR) de cada corpo-de-prova é obtido através do valor médio de três fases de aplicação de carregamento, que varia de 5 a 10 golpes por fase, de acordo com a porcentagem de variação estabelecida para os valores obtidos nos deslocamentos resilientes, medidos por dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer* ligados a um microcomputador que contam com um sistema eletrônico de aquisição de dados que converte as leituras realizadas pelos LVDTs em valores digitais e transfere-as para um microcomputador onde é feita a visualização dos resultados. Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada mistura desta pesquisa, totalizando a medição de nove valores de MR. Adota-se o MR a partir do valor médio entre estes nove valores. A frequência de aplicação de carga é de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e a duração da aplicação de carga é de 0,10 segundo e 0,90 segundos de repouso de descarregamento. A partir dos valores obtidos da carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis, calculou-se o Módulo de Resiliência (MR) por meio da Equação 3.10 abaixo:

(3.10)

$$MR = \frac{P}{\Delta x H} (0,9976\mu + 0,2692)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

P = carga vertical repetida aplicada no corpo-de-prova, N;

Δ = deslocamento elástico registrado para aplicações da carga (P), mm

H = altura do corpo-de-prova, mm;

μ = coeficiente de Poisson.

3.9.3 ENSAIO DE FADIGA

BALBO (2006) afirma que o fenômeno de fadiga relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura (para dado modo de solicitação), pouco a pouco desenvolvam alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais, gerando um processo de microfissuração progressiva, culminando no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material.

A fadiga de uma mistura asfáltica é causada pelo carregamento repetido ocasionado pela passagem de veículos. A camada de revestimento asfáltico é solicitada à flexão causando a ruptura por trincamento desse revestimento.

O ensaio de fadiga pode ser realizado ou a deformação controlada (DC) ou a tensão controlada (TC). Este ensaio não é normatizado, porém, no Brasil, ele é amplamente utilizado devido a sua simplicidade na execução dos ensaios.

Nesta pesquisa de Mestrado, o ensaio de compressão diametral (Brazilian Test) foi realizado a tensão controlada (TC), no Laboratório de Pavimentos de Geotecnia da COOPE/UFRJ. Previamente os corpos-de-prova foram colocados dentro de uma câmara com sistema de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato, mantidos a 25 °C, conforme mostra a Figura 23 abaixo:



Figura 23: Corpos-de-prova dentro da câmara.

Para a determinação da vida de fadiga dos corpos-de-prova desta pesquisa, foi utilizado o mesmo sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência. O corpo-de-prova é submetido a um estado de tensões biaxial, onde as seções verticais do corpo-de-prova ficam sujeitas a esforços de compressão, e as seções horizontais, ficam sujeitas a esforços de tração. Os corpos-de-prova foram submetidos a vários níveis de tensão (7.5, 10, 15, 20, 25, 30 e 40% da resistência à tração média da mistura). A vida de fadiga da mistura asfáltica é determinada a partir do número de aplicações da carga (N) que conduz ao trincamento total e ruptura num plano vertical. Durante a o ensaio, deformação de tração aumenta até sua ruptura por fadiga. A vida de fadiga de misturas asfálticas pode ser expressa pelas Equações 3.11 e 3.12 abaixo:

(3.11)

$$N = K \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^n$$

(3.12)

$$N = K \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n$$

Onde:

N = vida de fadiga;

ϵ_r = deformação específica resiliente;

$\Delta\sigma$ = diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra;

K, n = constantes a partir dos resultados obtidos no laboratório.

3.9.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL ESTÁTICO (ENSAIO DE *CREEP*)

O ensaio de compressão axial estático, mais conhecido por *creep* estático, é um ensaio bastante simples, utilizado no Brasil para estudo da deformação permanente de misturas asfálticas.

Segundo Bernucci *et al.*(2006), o ensaio consiste da aplicação ao longo do tempo de uma carga de compressão estática e contínua em um corpo-de-prova moldado com metodologia Marshall.

Este ensaio utiliza o mesmo equipamento do ensaio de compressão diametral e foi no Laboratório de Pavimentos da Geotecnia da Coppe/UFRJ. O corpo-de-prova é colocado em posição axial e o carregamento é vertical de compressão, daí a denominação brasileira de ensaio de compressão uniaxial. Esse carregamento foi aplicado através do friso de carga superior e distribuídos por toda a superfície de contato com o corpo-de-prova.

As deformações permanentes são medidas através dos corpos-de-prova, submetidos a um carregamento de compressão estático e contínuo durante uma hora. Após este período, descarrega-se o corpo-de-prova e aguarda-se um tempo de 15 minutos para a estabilização das deformações viscosas. Utilizou-se neste ensaio a temperatura de 40 °C e a tensão aplicada 0,1 MPa .

A Figura 3.21 abaixo mostra um corpo-de-prova submetido a este ensaio no Laboratório de Pavimentos da Geotecnia da Coppe/UFRJ:



(a)

(b)

Figura 24: Ensaio de creep estático a) corpo-de-prova com extensômetros diretamente acoplados; b) tela do computador que registra as informações geradas durante o ensaio.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais das cinco misturas asfálticas realizadas nesta pesquisa, sendo uma mistura de referência, a qual utiliza o fíler convencional (cimento), denominada de mistura 1 convencional e as demais misturas não convencionais (mistura 2, mistura 3, mistura 4 e mistura 5), utilizam o fíler não convencional, o pó de areia de sílica base.

Visando analisar o comportamento mecânico destas misturas asfálticas, são apresentados os resultados dos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração (R_t), Módulo de Resiliência (M_r), Resistência à Tração (R_t) após Módulo de Resiliência (M_r), Resistência à Fadiga e ensaio de Compressão Axial Estático (*Creep* estático).

4.1 RESULTADOS DO AGREGADO GRAÚDO (SEIXO ROLADO)

4.1.2 Massa específica real e aparente

As massas específicas real, aparente e efetiva do agregado graúdo, seixo rolado, foram obtidas através dos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas. Os resultados desses ensaios encontram-se na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3: Resultados dos ensaios laboratoriais do seixo rolado.

Ensaio	Método	Resultados
Massa específica aparente	DNER-ME 195/97	2,58 g/cm ³
Massa específica real	DNER-ME 195/97	2,66 g/cm ³
Massa específica efetiva	DNER-ME 195/97	2,62 g/cm ³

4.1.3 Absorção de água e adesividade ao ligante betuminoso

O seixo rolado desta pesquisa apresentou baixa absorção de água, devido a sua superfície lisa. Quanto ao ensaio de adesividade ao ligante betuminoso o seixo apresentou resultado satisfatório quanto à adesividade, apesar de o seixo rolado possuir forma arredondada e não rugosa. Os resultados encontram-se na Tabela .

Tabela 4: Resultados dos ensaios de absorção e adesividade.

			DNER-ME	
Absorção			195/97	1,92%
Adesividade	ao	ligante	DNER-ME	adesividade
betuminoso			078/94	satisfatória

4.1.4 Abrasão *Los Angeles*

O seixo rolado apresentou 40% de desgates por abrasão *Los Angeles*, estando dentro das especificações da norma 031/2006 do DNIT que limita em valor igual ou inferior a 50 o desgaste por abrasão destinado ao uso do concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ).

4.1.5 Análise granulométrica

Outro importante ensaio realizado foi o de granulometria. O resultado encontra-se na Tabela 5

Tabela 5: Resultado do ensaio de granulometria do seixo rolado.

Peneira polegada (")	Abertura (mm)	% massa	
		Retida	passando
3/4 "	19,1	0	100
1/2 "	12,7	10,83	89,17

3/8 "	9,5	17,18	71,99
4	4,8	47,52	24,47
10	2,0	21,06	3,41
40	0,42	3,28	0,13
80	0,18	0,07	0,06
200	0,074	0,03	0,03

Com base na tabela acima e analisando o gráfico abaixo (Figura 25), verifica-se que o seixo rolado possui 76 % de sua fração constituída de material grosso e 24 % de material fino.

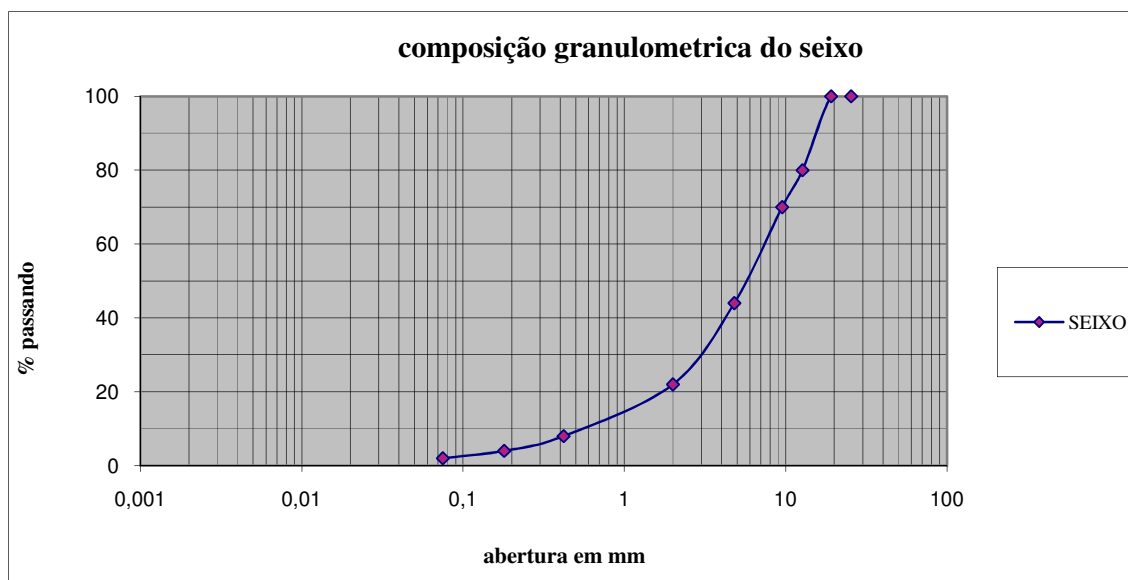


Figura 25: Curva granulométrica do seixo rolado.

4.2 RESULTADOS DO AGREGADO MIÚDO (AREIA)

As características físicas do agregado miúdo, areia, foram obtidas por meio dos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas.

4.2.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado segundo a norma DNER-ME 083/98. O resultado da granulometria da areia encontra-se na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6: Resultado do ensaio de granulometria da areia.

Peneira "	Abertura (mm)	% massa	
		retida	passando
4	4,8	0,37	99,63
10	2,0	2,02	97,61
40	0,42	36,43	61,18
80	0,18	43,79	17,39
200	0,074	14,82	2,57

As três primeiras peneiras representam uma fração de 39 % de areia classificada como areia grossa e 58 % deste material foi classificada como areia fina. Este resultado está ilustrado na Figura 26 abaixo:

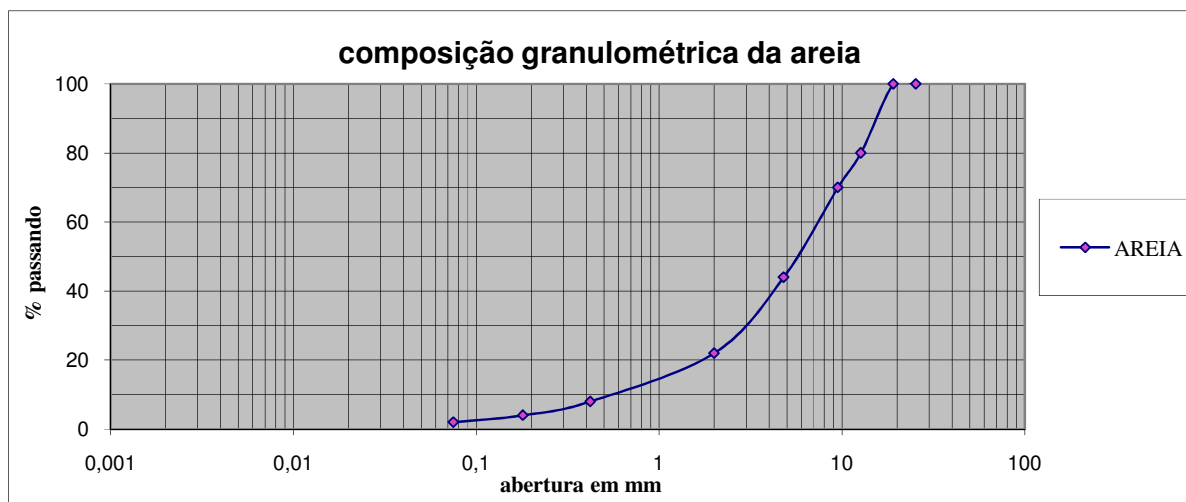


Figura 26: Curva granulométrica da areia.

4.2.2 Massa específica real

Para o cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT) foi realizado o ensaio de massa específica real, estabelecido pela Norma DNER-ME 194/98. O resultado encontra-se no Quadro 5 abaixo:

Ensaio	Método	Resultado
Massa específica real	DNER-ME 194/98	2,63 g/cm ³

Quadro 5: Resultado da massa específica real da areia.

4.3 RESULTADOS DO FÍLER CONVENCIONAL (CIMENTO)

4.3.1 Análise granulométrica

Nesta pesquisa foi utilizado como fíler convencional o cimento Portland CII. Na Tabela 7 encontra-se o resultado do ensaio da granulometria realizada de acordo com a norma DNER-EM 367/97.

Tabela 7: Composição granulométrica do fíler, segundo DNER- EM 367/97.

Peneira	Abertura	% em massa passando
40	0,42	100
80	0,18	99,83
200	0,074	87,51

O resultado apresentado satisfaz as condições da norma supra citada, na qual estabelece que o *fíler* deve ter entre 65% a 100% em peso passando pela peneira 0,075mm.

4.3.2 Massa específica real

Para o cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT) foi realizado o ensaio de massa específica real, estabelecido pela Norma DNER-ME 085/94 através do Método *Le Chatellier*.

O resultado encontra-se no Quadro 6 abaixo:

Ensaio	Método	Resultado
Massa específica real	DNER-ME 085/94	3,03 g/cm ³

Quadro 6: Resultado da massa específica real do cimento Portland.

4.4 RESULTADOS DO FÍLER NÃO CONVENCIONAL (PÓ DE AREIA DE SÍLICA BASE)

4.4.1 Análise granulométrica

Na Tabela 8 encontra-se o resultado do ensaio da granulometria realizado de acordo com a norma DNER- EM 367/97.

Tabela 8: Composição granulométrica do filer, segundo DNER- EM 367/97.

Peneira	Abertura	% em massa passando
40	0,42	100
80	0,18	95
200	0,074	76,25

A norma acima citada estabelece que o material de enchimento (*filer*) deve ser finamente dividido, logo o resultado acima mostrou-se bastante satisfatório para a finalidade de filer em CBUQ.

4.4.2 Massa específica real

Através da norma DNER-ME 085/94 pelo Método *Le Chatellier* foi realizado o ensaio de massa específica real. O resultado encontra-se no Quadro 7 abaixo:

Ensaio	Método	Resultado
Massa específica real	DNER-ME 085/94	2,65 g/cm ³

Quadro 7: Resultado da massa específica real do pó de areia.

4.4.3 Análise química

Para a determinação dos elementos químicos presentes no resíduo pó de areia, uma amostra deste material foi submetido à análise química realizado no equipamento EDX – 720 Energy Dispersive, X Ray Spectrometer, Shimadzu do Laboratório de Estrutura (LabEst) da COPPE/UFRJ. A Figura 27 abaixo ilustra o resultado deste ensaio:

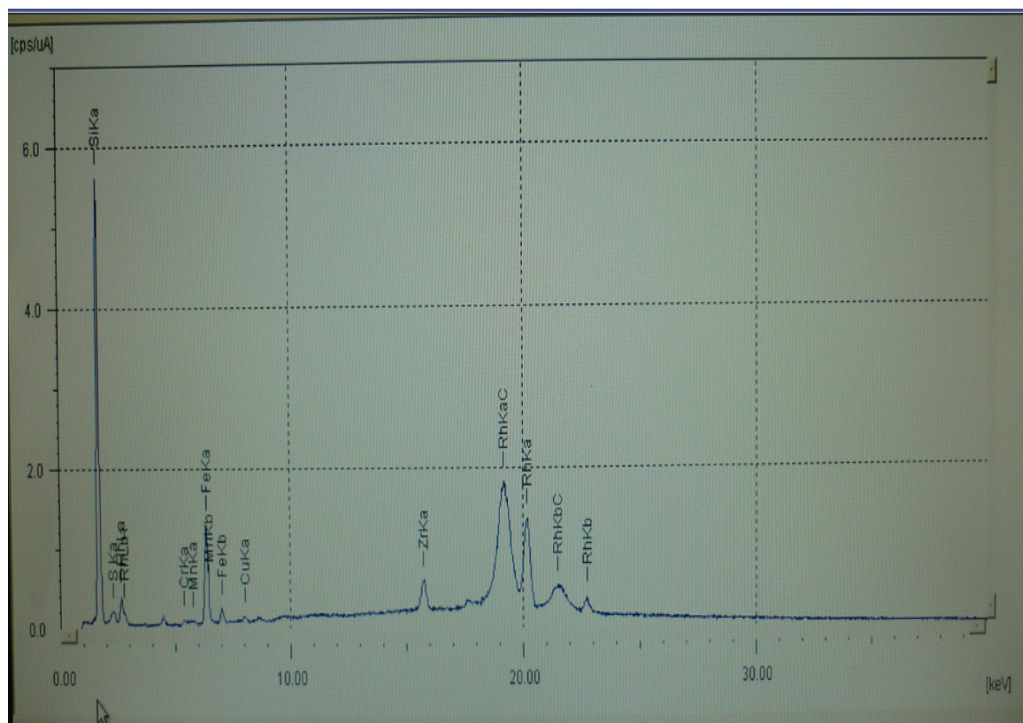


Figura 27: Análise química do pó de areia.

Por se tratar de um resíduo proveniente da areia, uma alta concentração de sílica (SiO_2) já era esperada neste resultado, conforme pode ser visto na figura 28 abaixo.

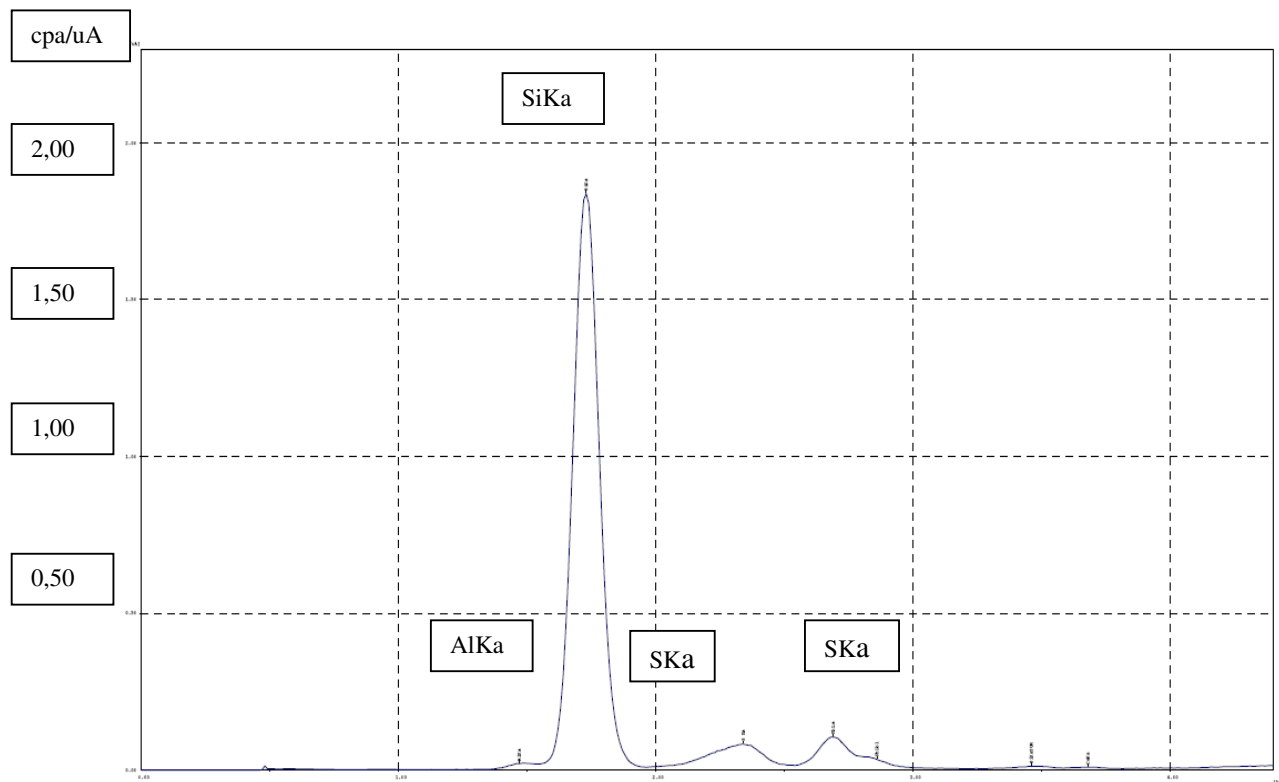


Figura 28: Gráfico com o resultado do ensaio de análise química.

O Quadro 8 mostra o resultado deste ensaio.

Principais Óxidos	SiO_2	93,678%	Al_2O_3	3,974%	SO_3	1,660%	Fe_2O_3	0,407%
-------------------	----------------	---------	-------------------------	--------	---------------	--------	-------------------------	--------

Quadro 8: Composição dos óxidos presentes nesta amostra.

O resíduo pó de areia mostra ser um resíduo com potencial a ser usado em outras áreas da engenharia, como na incorporação de argamassas e em cerâmica vermelha.

Campos (2008) afirma que a sílica também é responsável pela propriedade de contração durante a secagem das peças cerâmicas e formadora de fase vítrea. Os elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , são elementos característicos das massas para produção da cerâmica vermelha.

4.4.4 Difração de raios x

Através do difratômetro da marca Bruker, modelo D8 Focus do Laboratório de Estrutura (LabEst) da COPPE/UFRJ, foi realizado o ensaio de Difração de raio x, na amostra do resíduo pó de areia.

Como já era esperado, o mineral de estrutura cristalina encontrado nesta amostra foi o Quartzo apresentando picos bem definidos deste mineral na escala 2 theta (θ). Em termos de óxidos, o mineral Quartzo é expresso em sílica (SiO_2). A Figura 29 ilustra o difratograma abaixo com os picos de Quartzo presentes na amostra:

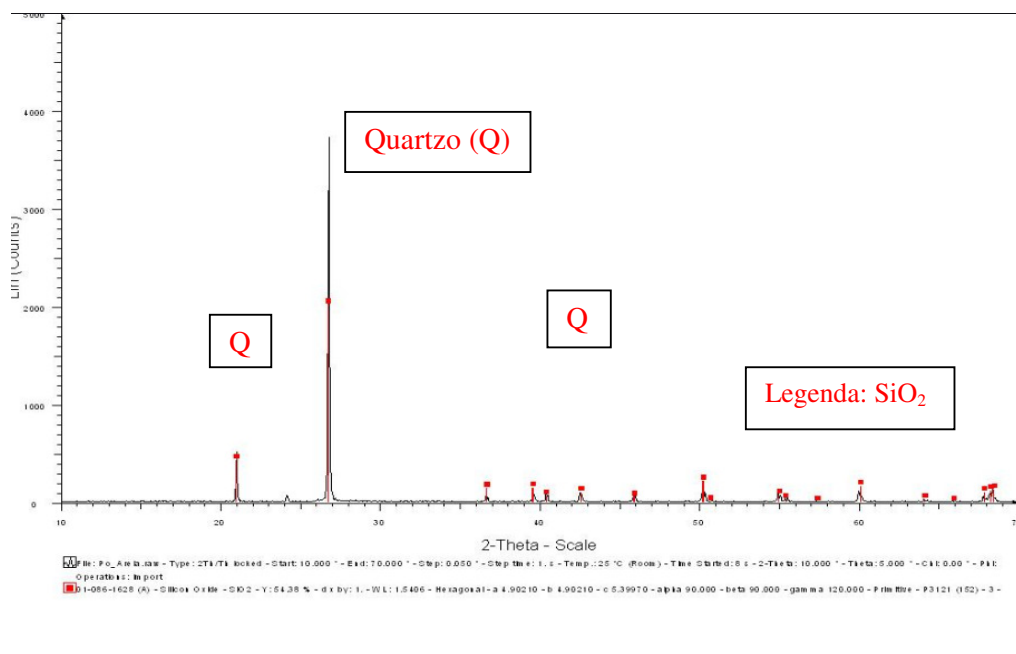


Figura 29: Resultado do ensaio de difração de raio x.

4.4.5 Ensaio de granulometria a laser

Através do analisador de partículas a laser (Malvern Mastersizer) do Laboratório de Estruturas (LabEst) da COPPE/UFRJ, foi realizado o ensaio de Granulometria a laser nas amostras de cimento e pó de areia. Como meio suspensor foi utilizado para a amostra de cimento Álcool

etílico absoluto P.A. e água destilada para o pó de areia, juntamente com ultra-som, durante 60 segundos.

Com relação à granulometria a laser, verifica-se que o cimento CP II apresenta tamanho médio de partículas (D50) igual a 20,47 μ m, e ainda que 10% de suas partículas (D10) tem o tamanho de 4,19 μ m e 90% (D90) de 63,323 μ m.

Verifica-se que o pó de areia possui tamanho médio de partículas (D50) igual a 40,116 μ m, 10% de suas partículas (D10) igual a 3,629 μ m e 90% (D90) a 133,482 μ m, possuindo assim partículas maiores que o cimento empregado.

4.5 RESULTADOS DO LIGANTE CAP 50/70

4.5.1 Ensaio de Penetração ABNT 6576/ 98

Foi realizado no Laboratório de Pavimentos da Geotecnia na COPPE/UFRJ. O ensaio de Penetração seguiu os procedimentos da norma. No ensaio foram anotadas as três medidas individuais de penetração. O resultado final foi encontrado a partir da média desses três valores encontrados durante este ensaio.

Bernucci *et al.* (2006) diz que a consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. O Quadro 9 mostra o resultado deste ensaio:

CAP 50/70	Penetração 1	Penetração 2	Penetração 3	Média
"Virgem"	60	60	65	62
Cimento CP II	51	50	50	50
Pó de areia	49	50	50	50

Quadro 9: Resultado do ensaio de penetração.

A incorporação do cimento e do pó de areia no CAP 50/70 diminuiu o valor da penetração do ligante asfáltico. Segundo Medina e Motta (2005) afirmam que a partir de ensaios de deformação permanentes aplicados em misturas asfálticas, tem-se verificado que a resistência à deformação permanente é maior quanto menor for o valor de penetração do ligante asfáltico. Os resultados acima mostram que as três análises realizadas com o CAP 50/70 estão dentro das especificações estabelecidas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), que consta na nova Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) de 2005.

4.6 RESULTADOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.6.1 Dosagem das misturas asfálticas

A análise granulométrica do material é de grande importância para a execução dos ensaios dos materiais desta pesquisa, visto que é o primeiro passo para a elaboração dos corpos de prova. Sobretudo, são estabelecidas faixas granulométricas para a mistura visando a melhor compactação dos agregados com o maior aproveitamento de agregados.

Todas as misturas asfálticas desta pesquisa foram enquadradas na faixa C do DNIT conforme a norma 031/2006 que trata das especificações de serviço para pavimentos flexíveis. Esta faixa granulométrica é indicada para misturas de agregados a serem aplicados em camadas de rolamento de revestimentos asfálticos.

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam as composições granulométricas dos agregados das misturas 1 convencional e da mistura 2 não convencional. Observa-se que as misturas 1 e 2 foram compostas com a mesma quantidade de agregados, mas com *filler* diferente. A mistura 1 convencional utilizou como *filler* o cimento CP II da Nassau, enquanto a mistura 2 utilizou o

filer não convencional pó de areia. As Figuras 30 e 31 ilustram o resultado das curvas granulométricas da mistura 1 e 2 respectivamente.

As misturas não convencionais (mistura 3, 4 e 5) possuem a mesma proporção de agregados que a mistura 2, apenas o que difere uma da outra é a quantidade e tipo de *filer* conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Composição da mistura 1 convencional.

Peneira		Seixo		Areia		Cimento		composição	Faixa C
nº	mm	% pass.	0,62	% pass.	0,33	% pass.	0,05	agregados	(DNIT)
3/4"	19,1	100	62	100	33	100	5	100	100
1/2"	12,7	89,17	55,2854	100	33	100	5	93,29	80 - 100
3/8"	9,5	71,99	44,6338	100	33	100	5	82,63	70 - 90
4	4,8	24,47	15,1714	99,63	32,8779	100	5	53,05	44 - 72
10	2	3,41	2,1142	97,61	32,2113	100	5	39,33	22 - 50
40	0,42	0,13	0,0806	61,18	20,1894	100	5	25,27	8 - 26
80	0,18	0,06	0,0372	17,4	5,742	99,83	4,9915	10,77	4 - 16
200	0,075	0,03	0,0186	2,58	0,8514	87,51	4,3755	5,25	2 - 10

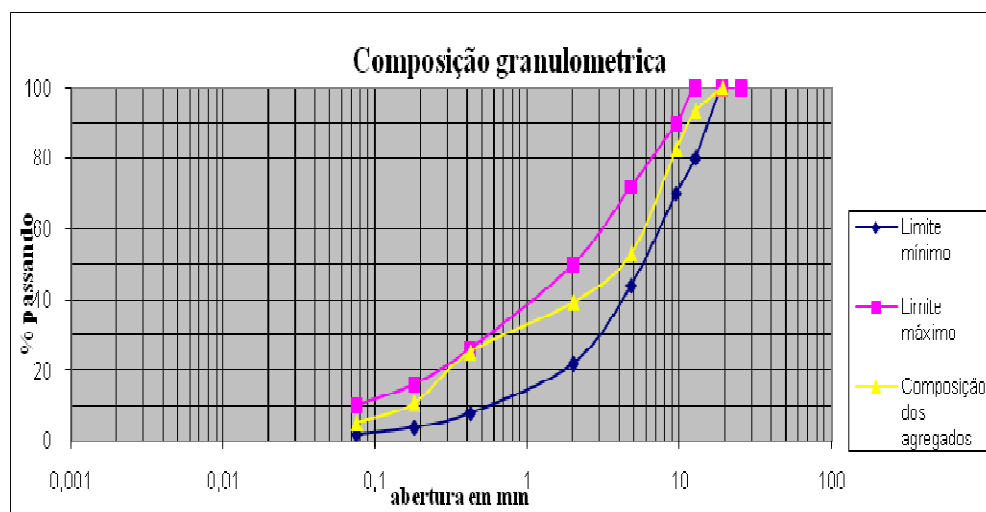


Tabela 10: Composição da mistura 2 não convencional.

Peneira		Seixo		Areia		Pó de Exaustão		composição	Faixa C
nº	mm	% pass.	0,62	% pass.	0,33	% pass.	0,05	agregados	(DNIT)
3/4"	19,1	100	62	100	33	100	5	100	100
1/2"	12,7	89,17	55,2854	100	33	100	5	93,29	80 - 100
3/8"	9,5	71,99	44,6338	100	33	100	5	82,63	70 - 90
4	4,8	24,47	15,1714	99,63	32,8779	100	5	53,05	44 - 72
10	2	3,41	2,1142	97,61	32,2113	100	5	39,33	22 - 50
40	0,42	0,13	0,0806	61,18	20,1894	100	5	25,27	8 - 26
80	0,18	0,06	0,0372	17,4	5,742	95	4,75	10,53	4 - 16
200	0,075	0,03	0,0186	2,58	0,8514	76,25	3,8125	4,68	2 - 10

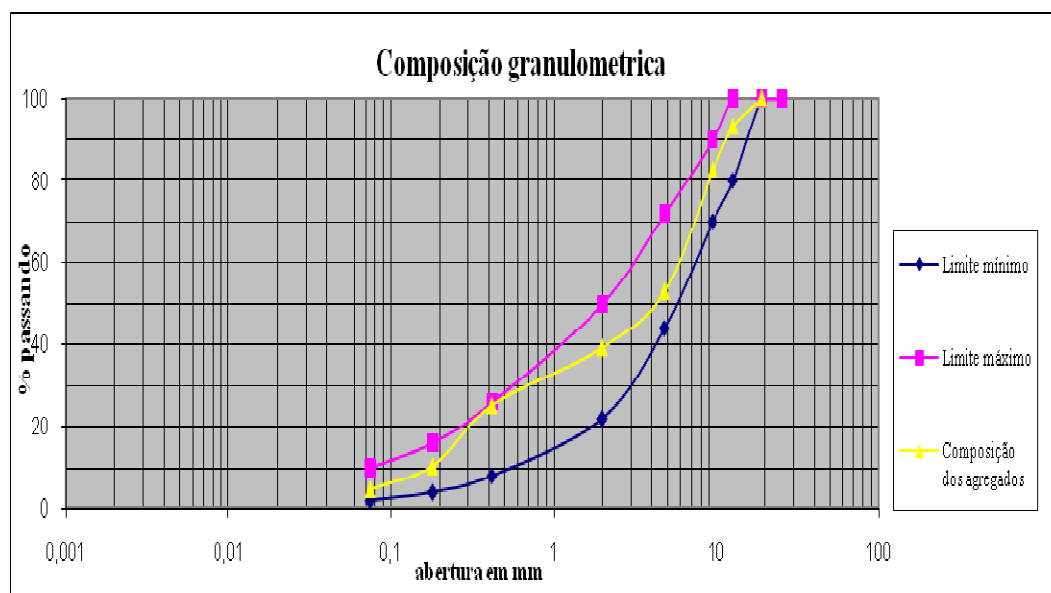


Tabela 11: Composição das misturas 3, 4 e 5 não convencionais.

Mistura	Seixo	Areia	Cimento	Pó de areia
Mistura 3	62%	33%	75%	25%
Mistura 4	62%	33%	50%	50%
Mistura 5	62%	33%	25%	75%

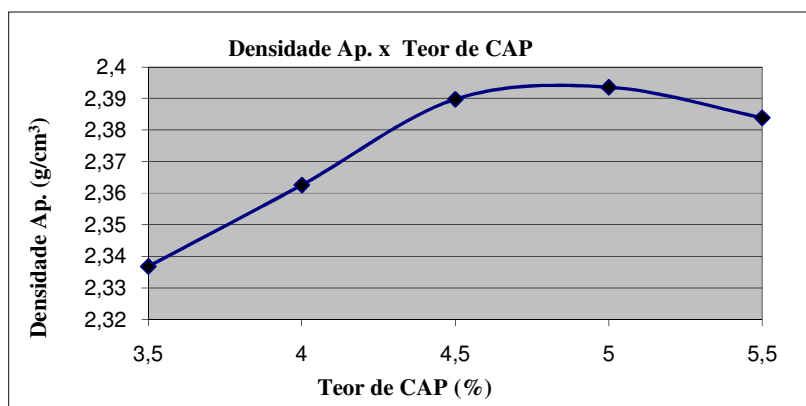
A dosagem Marshall é utilizada com o objetivo de determinar o “teor ótimo” de ligante asfáltico (CAP 50/70) para a composição dos corpos de prova, através dos parâmetros obtidos nesta dosagem que são: Densidade aparente (Dap), Volume de vazios (Vv), Vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), estabilidade e fluência Marshall.

Foi acrescentado gradualmente nas dosagens o ligante asfáltico (CAP 50/70), nos teores de 3,5%, 4%, 4,5%, 5% e 5,5 %, para as misturas 1 convencional e mistura 2 não convencional. As demais misturas não convencionais (mistura 3, 4 e 5) utilizaram teores variando de 4%, 4,5% e 5,5% com a finalidade de encontrar o teor “ótimo” de projeto para cada mistura.

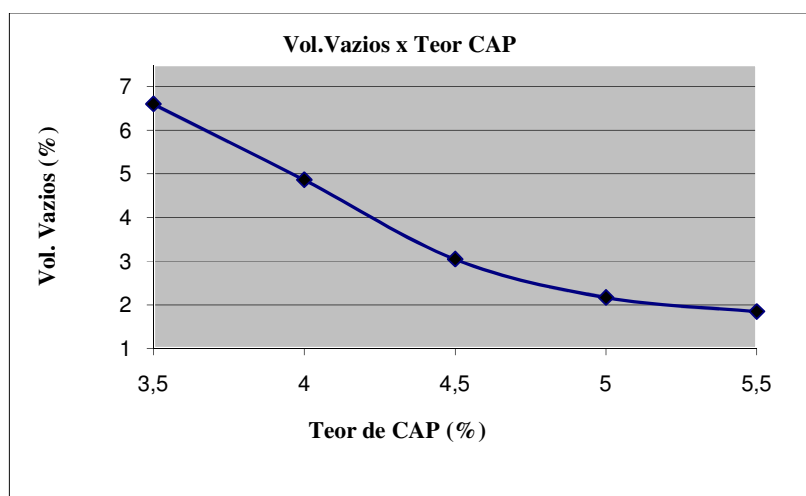
As Tabelas 12 e 13 mostram os valores dos parâmetros obtidos na dosagem Marshall. As Figuras 32 e 33 representam graficamente os resultados da mistura 1 convencional e mistura 2 não convencional respectivamente.

Tabela 12: Parâmetros Marshall da mistura 1 convencional 100 % cimento.

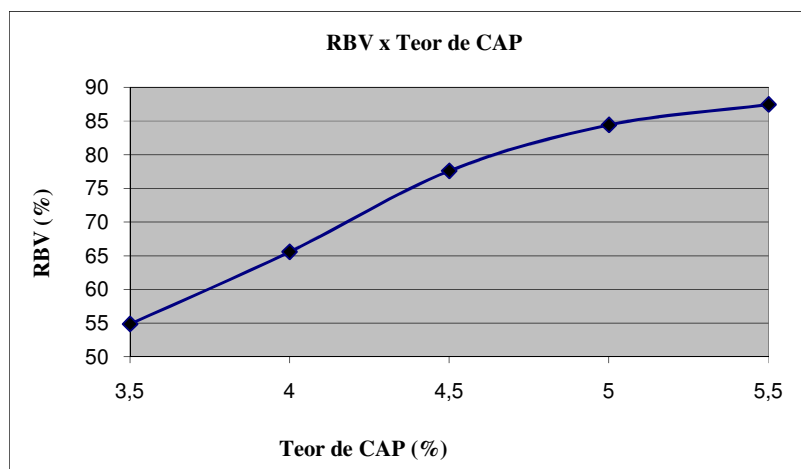
CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
3,5	2,34	6,6	54,86	541,51	2,1
4	2,36	4,86	65,57	795,73	2,6
4,5	2,39	3,05	77,58	797,6	3,9
5	2,39	2,17	84,39	719,93	4
5,5	2,38	1,85	87,43	685,12	4,4



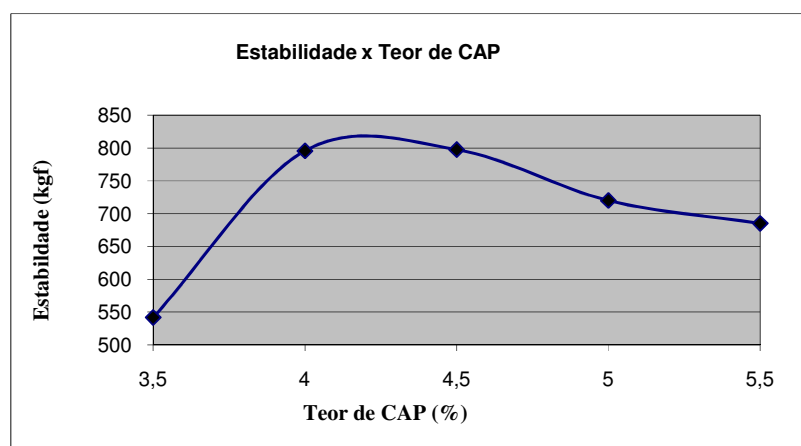
(a)



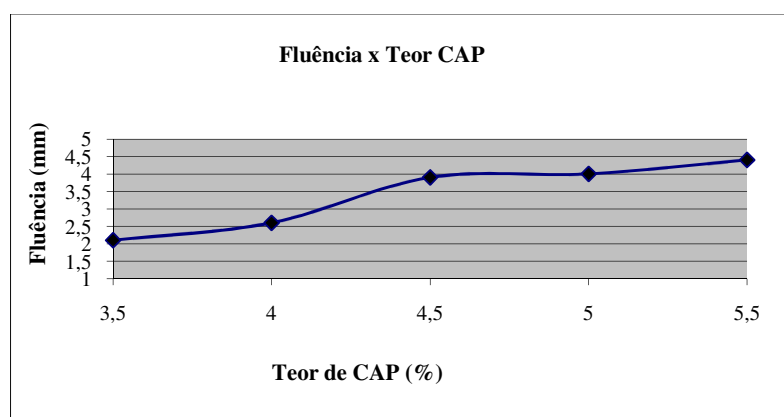
(b)



(c)



(d)

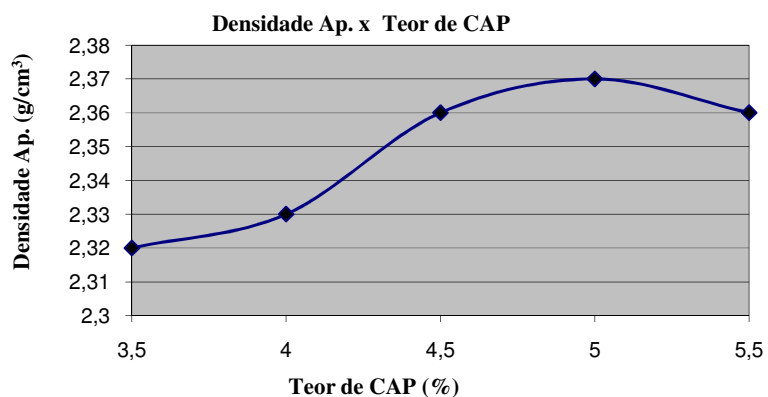


(e)

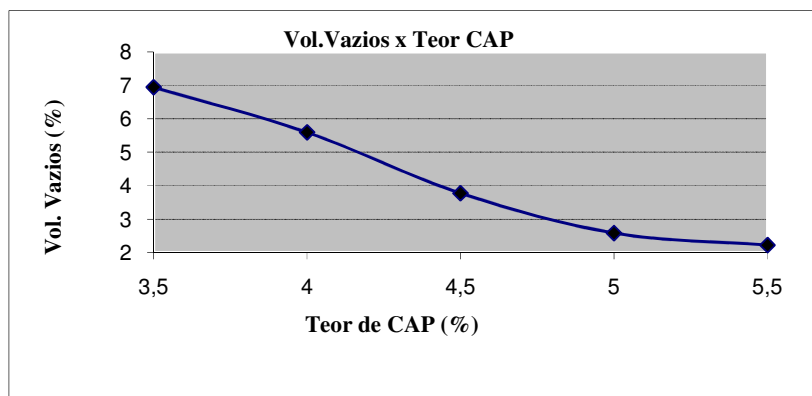
Figura 32: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 1 convencional 100% cimento: a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume-vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

Tabela 13: - Parâmetros Marshall da mistura 2 não convencional 100% pó de areia.

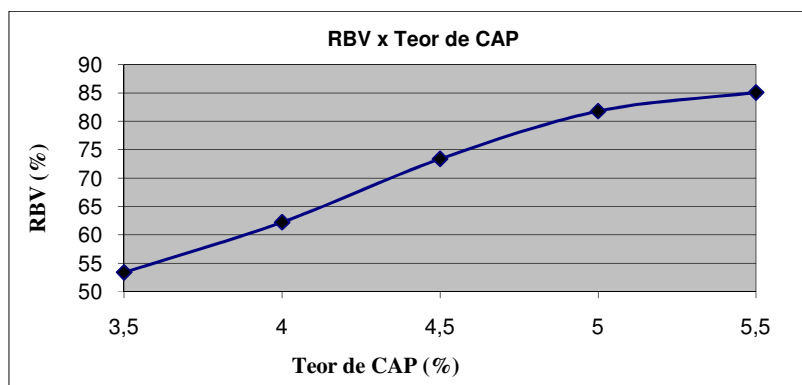
CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
3,5	2,32	6,95	53,36	899,86	2,8
4	2,33	5,6	62,21	680,59	2,8
4,5	2,36	3,78	73,37	918,93	2,8
5	2,37	2,59	81,79	949,85	3,35
5,5	2,36	2,23	85,1	795,63	2,9



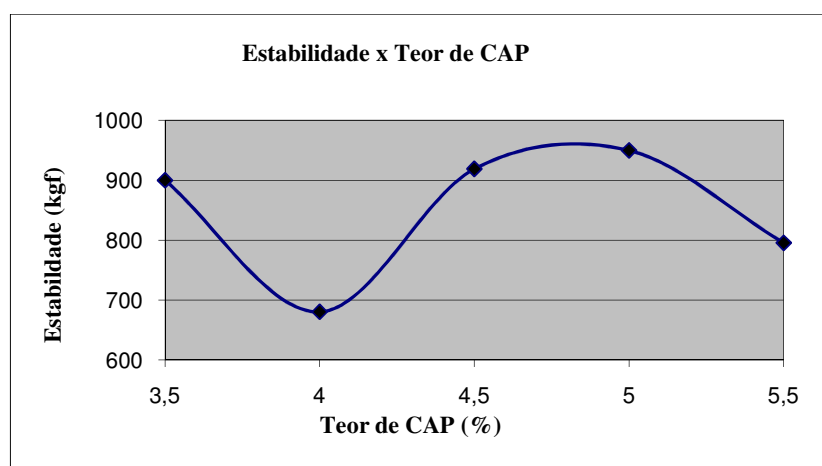
(a)



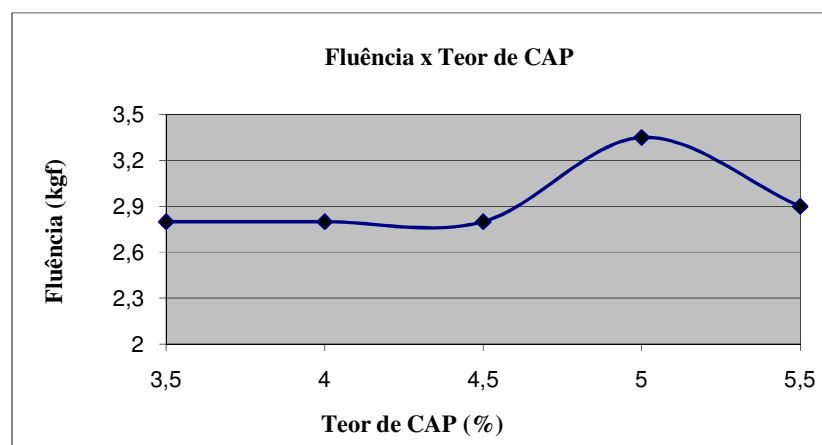
(b)



(c)



(d)



(e)

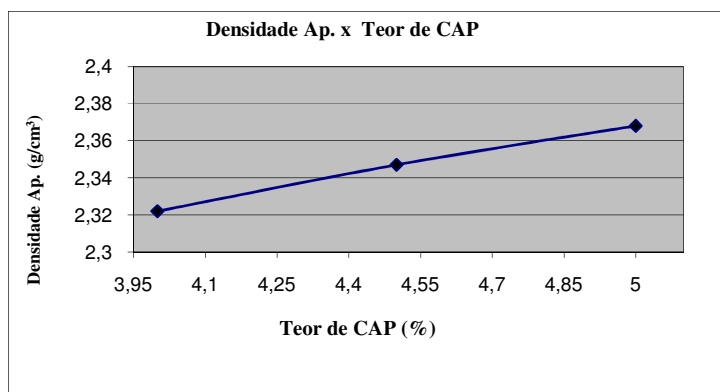
Figura 33: - Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 2 não convencional 100% pó de areia: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

As misturas não convencionais misturas 3, 4 e 5 possuem a mesma proporção de agregados que a mistura 2, apenas o que difere uma da outra é a quantidade e tipo de *fíler* conforme mostra a Tabela 4.8.

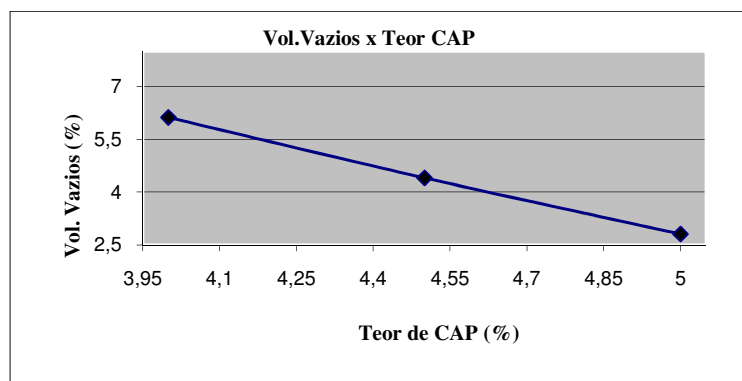
As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam composições granulométricas dos agregados das misturas 3, 4 e 5 não convencionais. As Figuras 34, 35 e 36 ilustram o resultado das curvas granulométricas das misturas 3, 4 e 5 não convencionais.

Tabela 14: Parâmetros Marshall da mistura 3 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento:

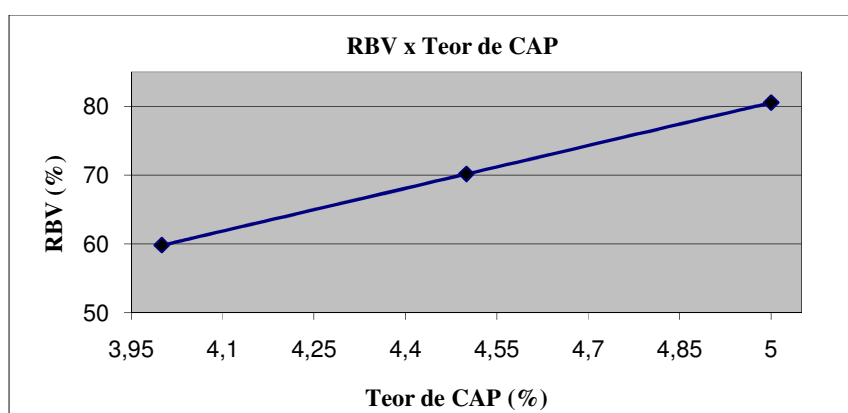
CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
4	2,32	6,12	59,81	650	3,18
4,5	2,35	4,40	70,16	642,50	2,38
5	2,37	2,81	80,52	565,6	2,9



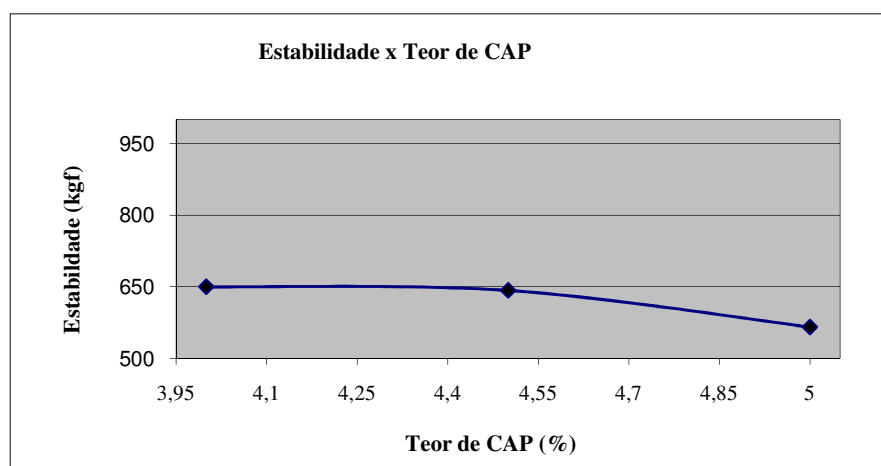
(a)



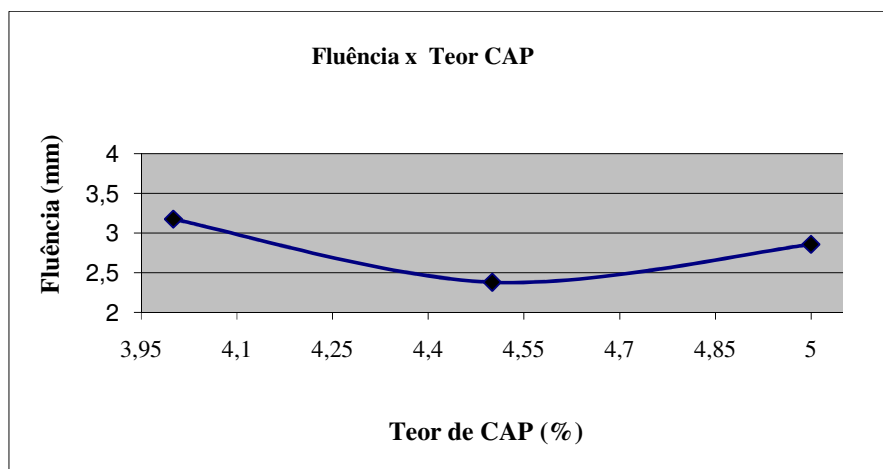
(b)



(c)



(d)

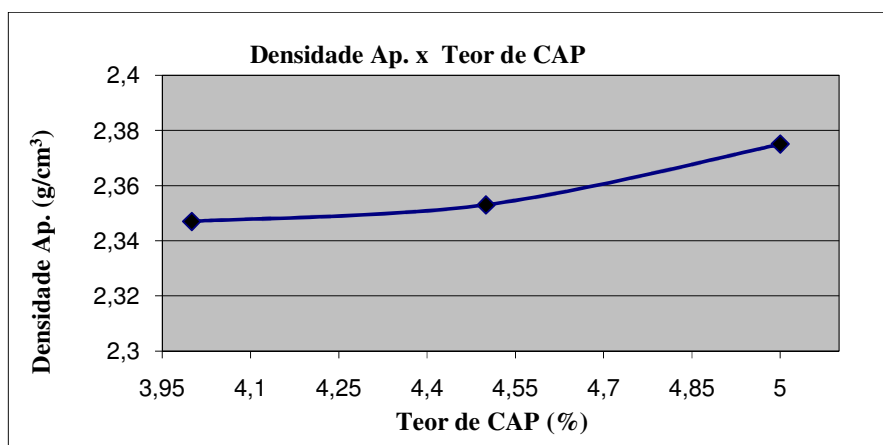


(e)

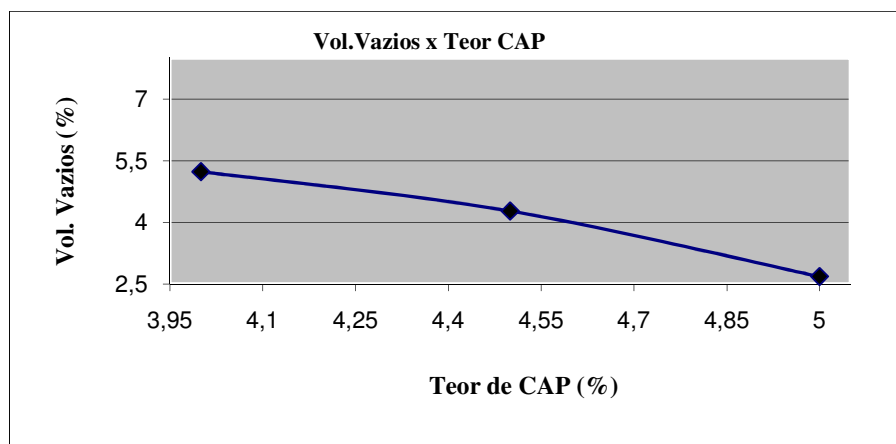
Figura 34: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 3 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

Tabela 15: Parâmetros Marshall da mistura 4 não convencional 50% pó de areia e 50% cimento.

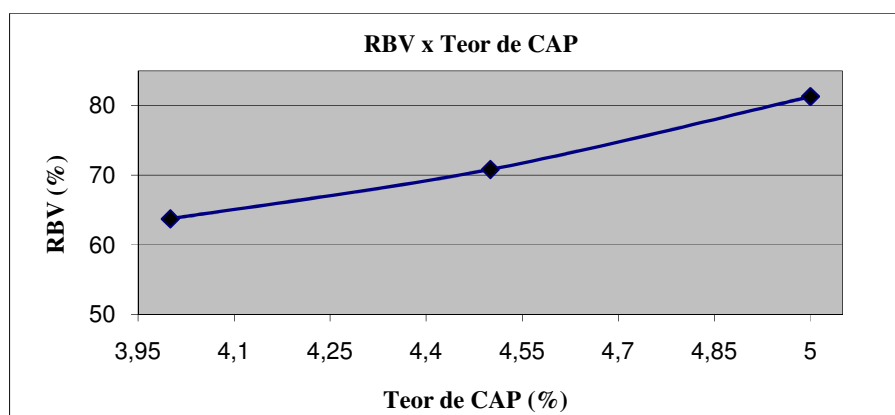
CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
4	2,35	5,23	63,74	624,70	3,18
4,5	2,35	4,28	70,83	741,4	2,86
5	2,38	2,68	81,3	590,79	2,9



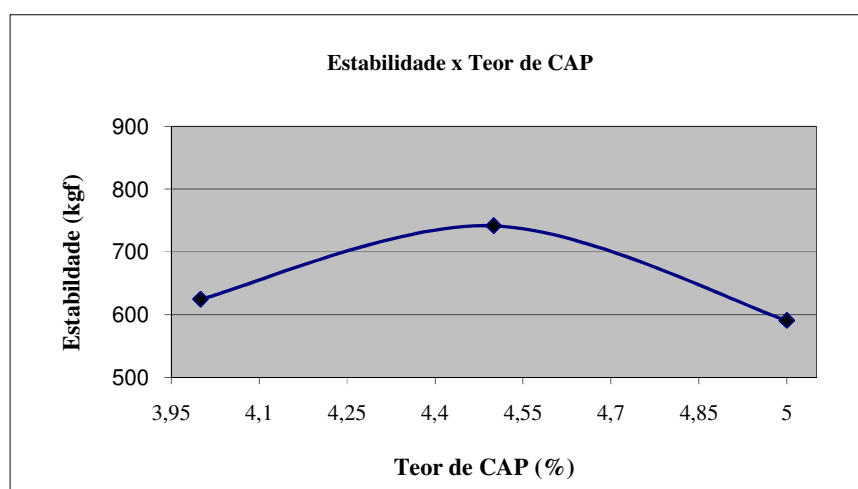
(a)



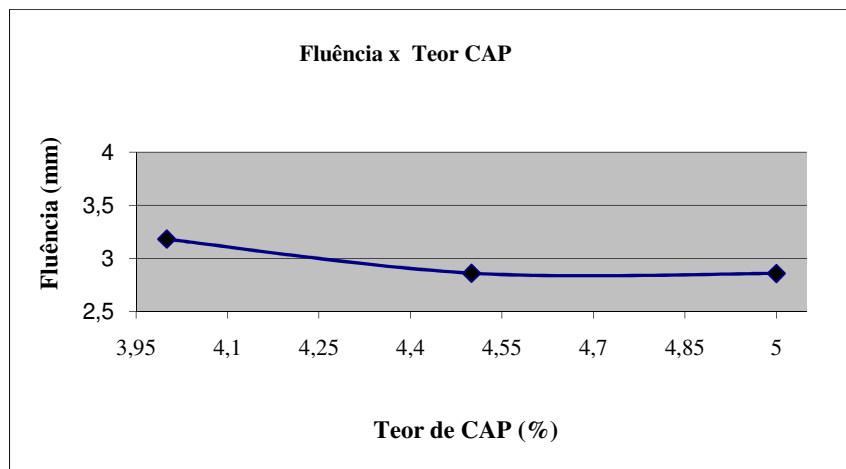
(b)



(c)



(d)

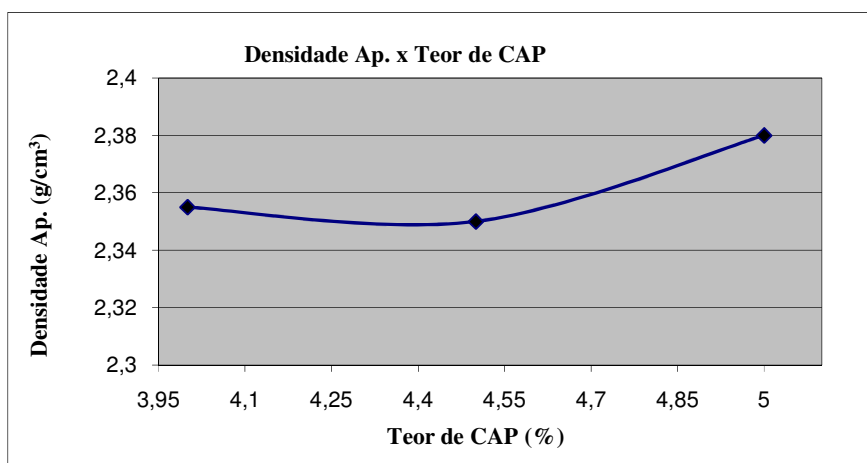


(e)

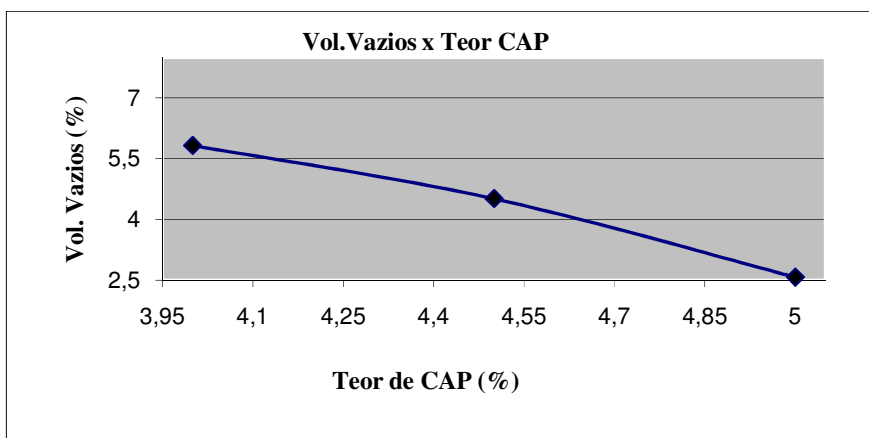
Figura 35: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 4 não convencional 50% pó de areia e 50% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

Tabela 16: Parâmetros Marshall da mistura 5 não convencional 25% pó de areia e 75% cimento.

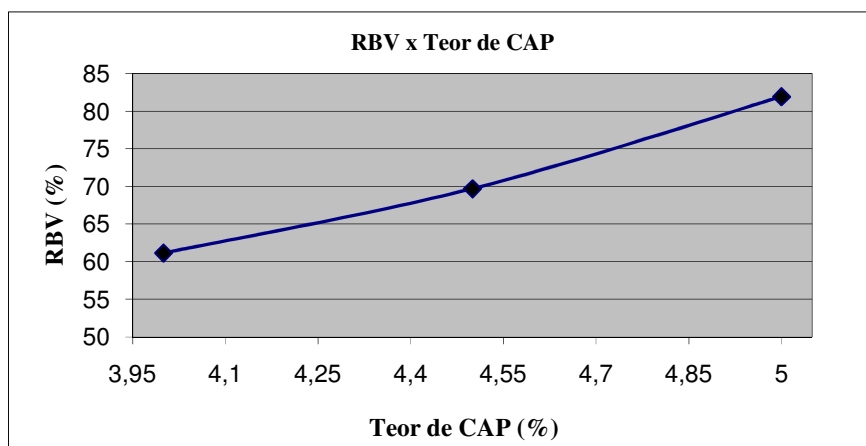
CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
4	2,36	5,82	61,14	642,51	3,18
4,5	2,35	4,51	69,69	760,2	3,18
5	2,38	2,57	81,93	811,98	3,2



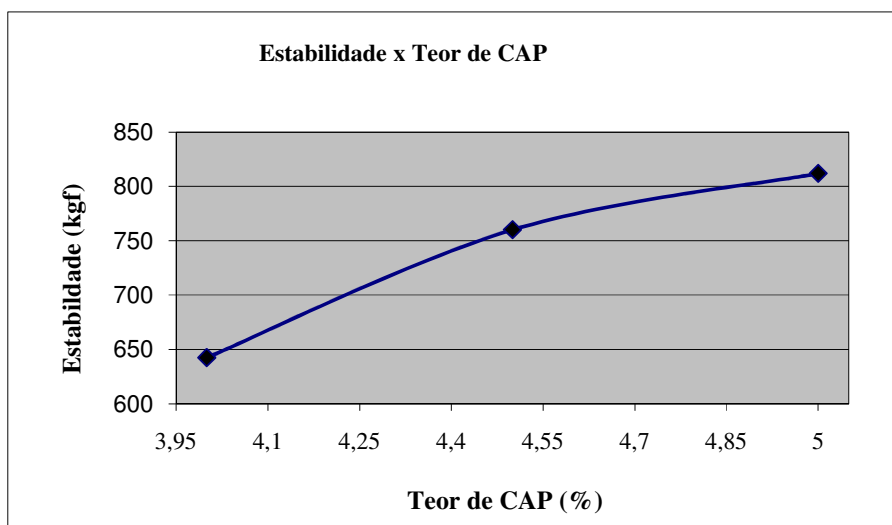
(a)



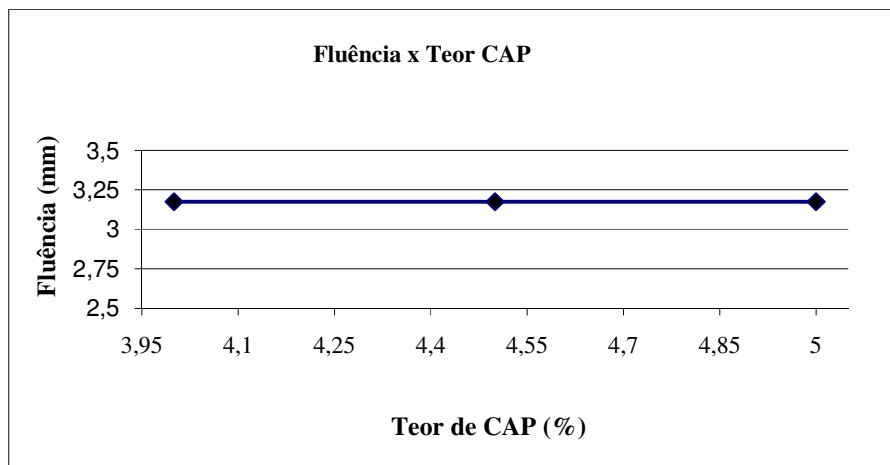
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 36: Gráficos dos parâmetros Marshall da mistura 5 não convencional 75% pó de areia e 25% cimento: (a) densidade aparente (Dap); b) volume de vazios (Vv); c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

O “teor ótimo” de cada mistura foi determinado a partir da fórmula do livro Manual de Técnicas de Pavimentação, (SENSO, 2001, pg. 178), a qual utiliza parâmetros Marshall. Os parâmetros são obtidos através dos gráficos que contêm os parâmetros Marshall e são eles: a máxima (maior) estabilidade, a máxima (maior) densidade aparente, volume de vazios (Vv) correspondente a 4 % e uma relação betume-vazios (RBV) correspondente a 80 %.

Foi encontrado o teor de projeto de 4,5% para a mistura 1 convencional que utilizou o cimento *Portland* e para as demais misturas não convencionais misturas 2, 3, 4 e 5 que utilizou o pó de areia o valor encontrado foi de 4,9%. Estes valores encontrados conduziram aos parâmetros volumétricos da norma 031/2006 do DNIT que estabelece os seguintes valores a serem obtidos para o ensaio Marshall: volume de vazios (Vv): de 3 % a 5 %, relação betume/vazios (RBV): de 75 % a 82 %, estabilidade Marshall mínima de 500 kgf e valores para fluência Marshall de 2,5 mm a 4,5 mm.

A mistura 1 obteve o menor consumo de ligante (4,5%), já as misturas não convencionais, tiveram um consumo maior de ligante (4,9%), obtendo 0,4 % de diferença entre os teores de ligante, isto se deve as características de absorção e textura superficial do pó de areia, por ser mais fino, há um maior consumo de ligante, podendo a maior parte do ligante estar sendo

absorvida pelo resíduo e não sendo utilizado para impermeabilizar e unir os agregados na mistura. Apesar disso, não houve um enrijecimento das misturas asfálticas confeccionadas com o pó de areia.

Tabela 17: Teor “ótimo” encontrado para cada mistura asfáltica.

Mistura	<i>Fíler</i>	Teor de CAP 50/70
Mistura 1	100% cimento	4,5%
Mistura 2	100% pó de areia	4,9%
Mistura 3	75% pó 25% cimento	4,9%
Mistura 4	50% pó 50% cimento	4,9%
Mistura 5	25% pó 75% cimento	4,9%

A Tabela 18 abaixo mostra os valores médios dos parâmetros Marshall com o teor ótimo das misturas asfálticas desta pesquisa.

Tabela 18: Parâmetros Marshall com o “teor ótimo” de cada mistura asfáltica.

Mistura	CAP (%)	Dap	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
Mistura 1	4,5%	2,39	3,15	76,98	765,73	2,63
Mistura 2	4,9%	2,35	3,68	78,55	688	3,1
Mistura 3	4,9%	2,36	3,45	76,68	622	2,8
Mistura 4	4,9%	2,36	3,37	77,13	658	3,0
Mistura 5	4,9%	2,37	3,0	79,28	729	3,2

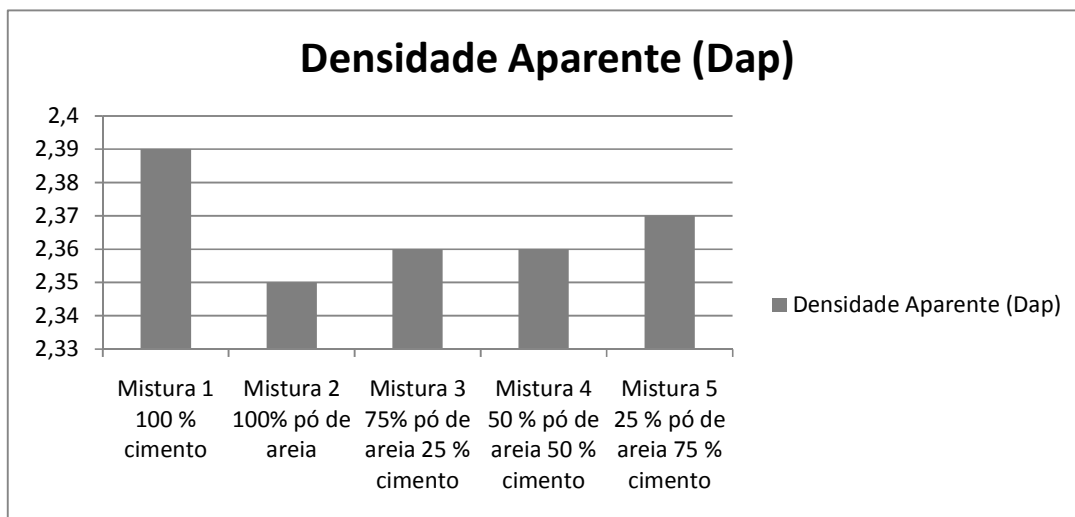
Observou-se que todas as misturas atenderam a norma do DNIT 031/2006 quanto ao volume de vazios, relação betume-vazios, estabilidade e fluência Marshall.

A **mistura 1** apresentou uma densidade aparente maior do que a **mistura 2**, sendo mais densa. Quanto aos vazios, a **mistura 2** apresentou uma maior quantidade de vazios, aumentando a relação betume-vazios da **mistura 2** em relação a **mistura 1**. Valores elevados de RBV diminuem a Estabilidade da mistura asfáltica, o que aconteceu com a **mistura 2**. No caso da **mistura 2** que obteve um RBV de 78,55 %, diminuiu sua Estabilidade se comparada com a **mistura 1**. A mistura 2 devido ao acréscimo de ligante reduziu a interação entre os componentes da mistura, com conseqüente queda de resistência.

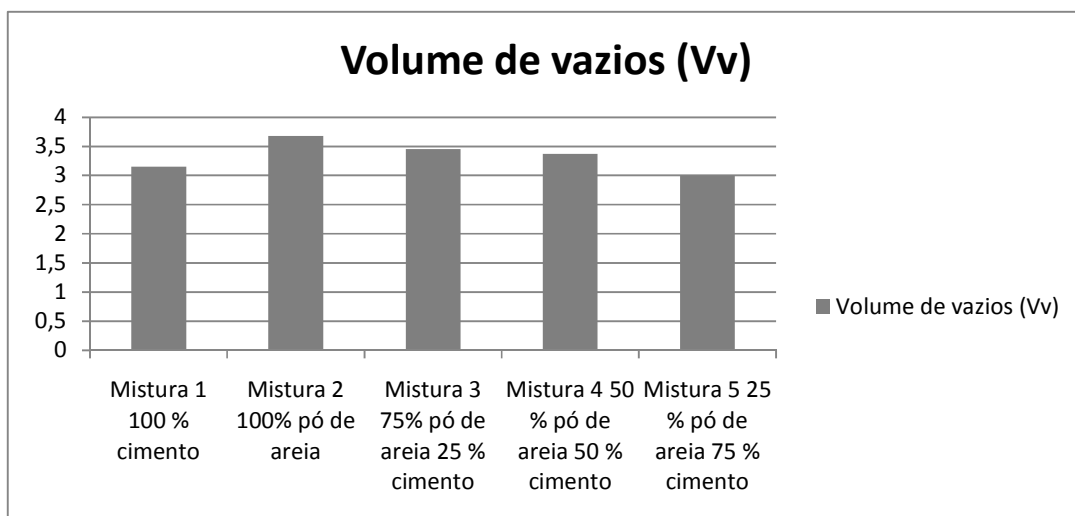
A **mistura 5** foi a que apresentou uma maior densidade aparente, sendo a mais densa entre as misturas não convencionais. A **mistura 5** utilizou 75 % de pó de areia na mistura asfáltica.

Quanto aos vazios, a **mistura 2** apresentou uma maior quantidade de vazios, aumentando sua relação betume-vazios em relação as demais misturas não convencionais (A relação betume-vazios da **mistura 2** diminuiu sua Estabilidade, quando comparada com a mistura 1).

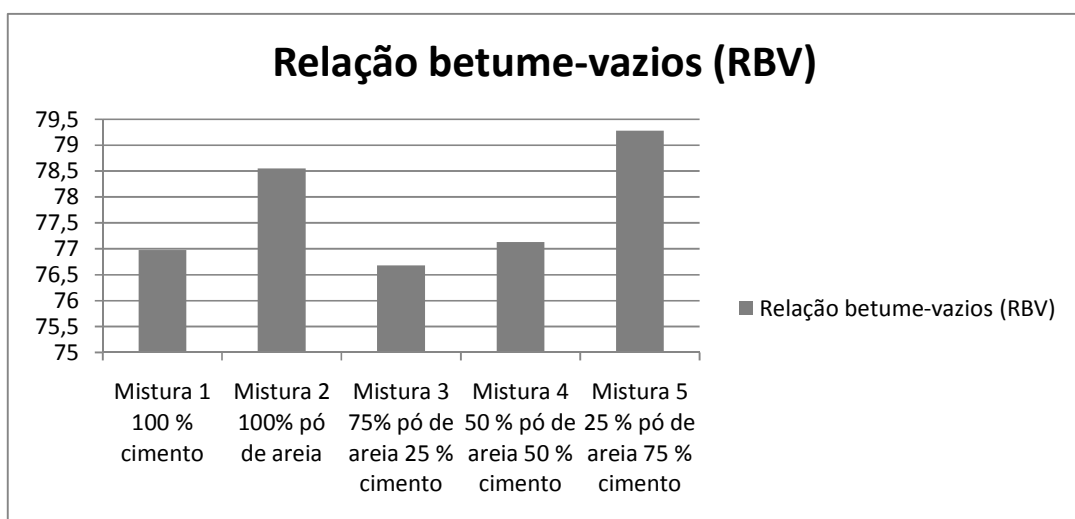
No tocante à estabilidade, as misturas confeccionadas com o pó de areia diminuíram a estabilidade das misturas não convencionais, mesmo assim todas as misturas apresentaram valores dentro da norma DNIT 031/2006 que estabelece um valor mínimo para a Estabilidade de 500 Kgf. A **mistura 5** (25% pó de areia e 75% cimento) e a **mistura 2** (100% pó de areia) apresentaram bom desempenho quanto à estabilidade convencional, devido ao maior consumo de ligante destas misturas asfálticas. Os valores de fluência das misturas não convencionais foram superiores ao da mistura convencional, o que caracteriza um maior consumo de ligante destas misturas. A Figura 37 ilustra graficamente os parâmetros volumétricos de todas as misturas asfálticas.



(a)



(b)



(c)

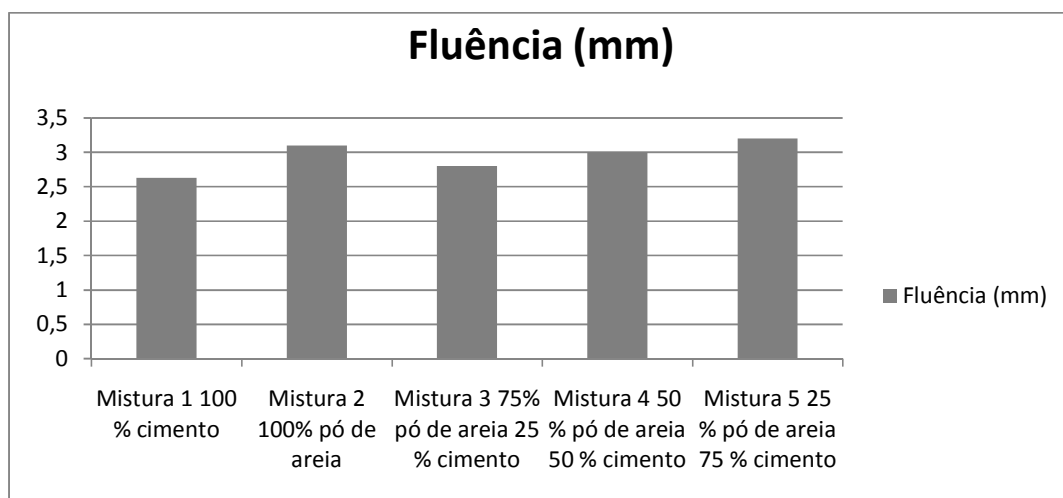
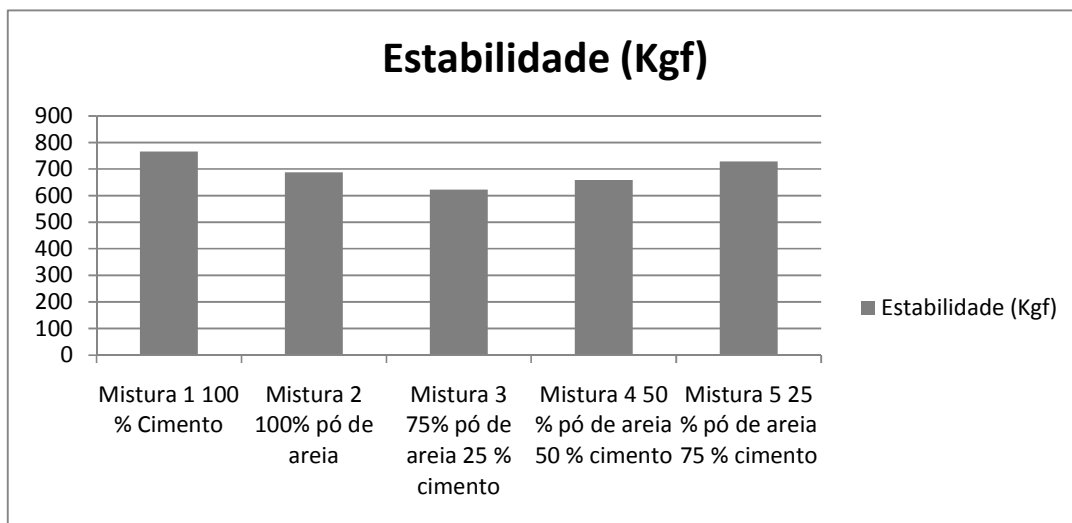


Figura 37: Comparação entre os parâmetros Marshall entre as misturas não convencionais: a) Densidade aparente (Dap); b) volume de vazios; c) relação betume vazios (RBV); d) estabilidade; e) fluência.

4.7 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas desta pesquisa, resultou dos ensaios de tração indireta (compressão diametral), módulo de resiliência e fadiga.

4.7.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Todas as misturas asfálticas desta pesquisa apresentaram valores acima do valor mínimo da norma do DNIT 031/2006 que estabelece como limite mínimo o valor de **0,65 MPa** a serem obtidos para o ensaio de resistência à tração para mistura asfáltica do tipo CBUQ. Todos os resultados a serem apresentados são bons porque a vida de fadiga é função da resistência à tração.

Na Figura 38 está representado o resultado obtido no ensaio de resistência à tração realizado nas cinco misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

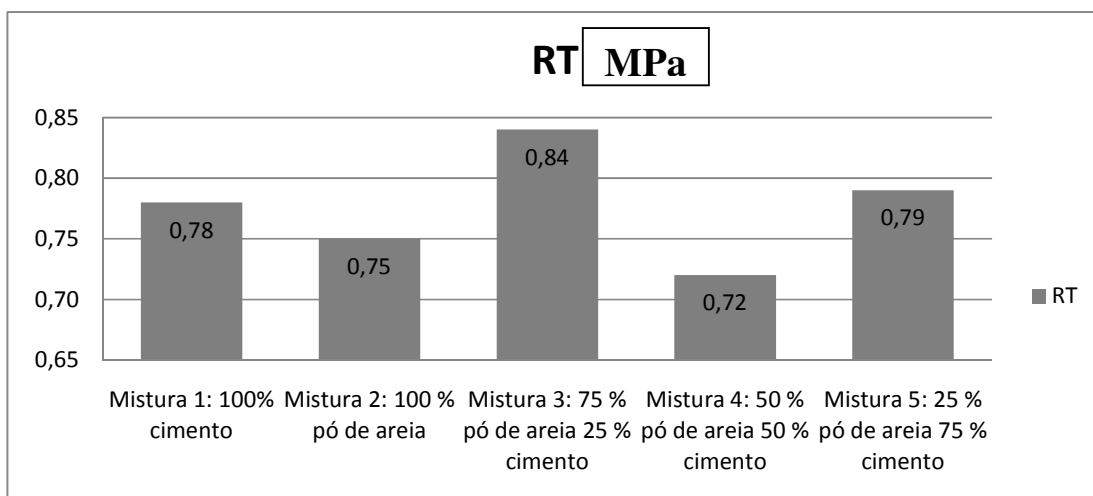


Figura 38: Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

A mistura que apresentou a melhor resistência à tração foi a **mistura 3** (75% pó de areia e 25 % cimento), apesar de ter apresentado resultados inferiores aos das misturas não convencionais quanto a relação betume-vazios, estabilidade e fluência. Houve um ganho de resistência de 7,14 % entre a **mistura 1** convencional e a **mistura 3** não convencional, apesar da mistura 1 apresentar um menor volume de vazios. Verificou-se que a diminuição dos valores de resistência à tração das misturas não convencionais ocorreu devido ao aumento do consumo de ligante nestas misturas.

A **mistura 1** convencional e a **mistura 5** apresentaram bom desempenho no ensaio de resistência à tração. O ganho de resistência foi devido aos baixos valores de volume de vazios destas misturas. A **mistura 4** (50% pó de areia e 50 % cimento) foi a que apresentou o menor valor de resistência à tração entre todas as misturas.

Entre as misturas não convencionais, a **mistura 5** (25% pó de areia e 75% cimento) e a **mistura 2** (100% pó de areia) apresentaram melhor desempenho quanto à resistência à tração, devido estas misturas apresentarem-se com maior densidade e com menos vazios.

4.7.2 Ensaio de Módulo de resiliência

A interação carga-estrutura, com suas conseqüências sobre a deformação e ocorrência de tensões nas camadas dos pavimentos, faz-se necessário abordá-la dentro do conceito de que essa estrutura possui um conjunto de camadas superpostas, com diferentes propriedades (elásticas, plásticas...) e espessuras, respondendo individualmente aos esforços (estáticos e dinâmicos) aplicados pelos veículos. O concreto asfáltico de petróleo (CAP) tem comportamento visco-elástico devido ele ser um material dependente da temperatura, pois quando submetido ao frio, ocorre uma maior retração térmica, resultando na fissuração do CAP, já quando submetido ao calor (que geralmente ocorre em nossa região), ocorre uma oxidação tornando o CAP mais viscoso e quebradiço.

O módulo de resiliência e a resistência à tração influenciam no dimensionamento do pavimento e na dosagem da mistura asfáltica. A Tabela 19 mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e a relação módulo resiliente e resistência à tração indireta (MR/RT) para melhor análise do comportamento mecânico das misturas asfálticas desta pesquisa.

Tabela 19: Resultados dos parâmetros de RT, MR e MR/RT.

Mistura	RT (MPa)	MR	MR/RT
Mistura 1: 100% cimento	0,78	3459	4435
Mistura 2: 100 % pó de areia	0,75	2934	3912
Mistura 3: 75 % pó de areia 25 % cimento	0,84	2559	3046
Mistura 4: 50 % pó de areia 50 % cimento	0,72	2706	3758
Mistura 5: 25 % pó de areia 75 % cimento	0,79	2901	3672

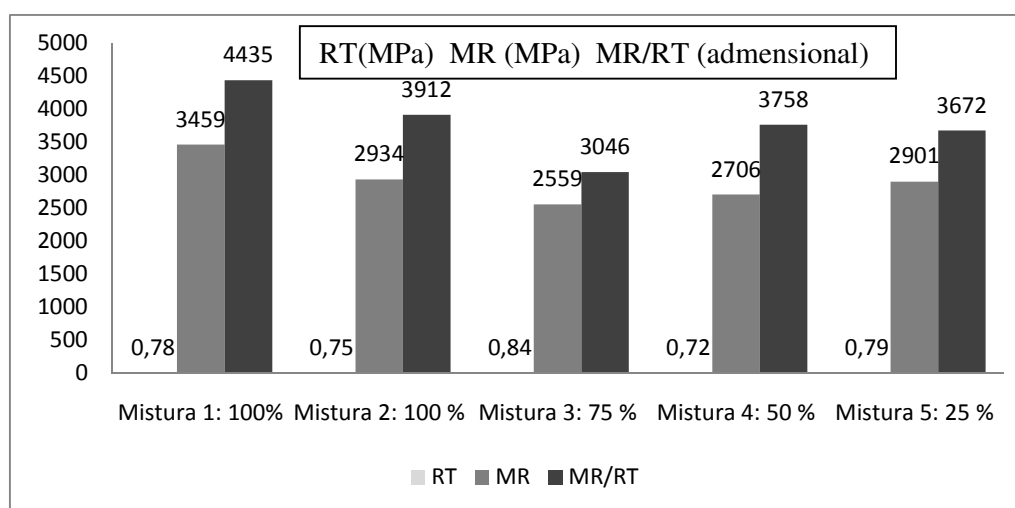


Figura 39: Gráficos para comparação dos parâmetros de RT, MR e MR/RT.

A relação módulo de resiliência (MR) e resistência à tração indireta (MR/RT) tem servido como parâmetro de análise para avaliar o comportamento de misturas asfálticas relativo à vida de fadiga. A relação MR/RT permite inferir o comportamento das misturas asfálticas em relação ao trincamento, tendo sido utilizada como um indicador de flexibilidade com a capacidade de suporte das misturas, quando se tem valores baixos dessa relação pode haver

uma melhora no comportamento mecânico das misturas, pois pode indicar maior flexibilidade unida a uma boa resistência à tração.

Verifica-se na figura 39 que o valor do módulo de resiliência apresentou um decréscimo com o aumento da adição do pó de areia como *filler* nas misturas asfálticas não convencionais, podendo ser um indicativo de misturas flexíveis, alcançando o valor de 2901 MPa para a mistura 5 e de 2934 MPa para a mistura 2, quando comparadas com a mistura 1 que alcançou um valor de 3459 a qual utilizou o cimento como *filler*. O valor do módulo de resiliência da mistura 2 não convencional, diminuiu cerca de 16% em relação a mistura 1 convencional, sugerindo maior vida de fadiga para as misturas não convencionais.

A relação MR/RT das misturas asfálticas não convencionais também apresentaram valores menores para quando comparadas com a mistura 1 convencional,

A mistura 1 convencional e a mistura 2 não convencional apresentaram maiores valores de módulo de resiliência, sendo misturas mais rígidas.

Entre as misturas não convencionais, a mistura 2 e a mistura 5 apresentaram maior módulo de resiliência, podendo caracterizar estas misturas como rígidas, porém estas misturas podem desenvolver deformações permanentes, pois o aumento do módulo de resiliência deixa o material mais suscetível ao trincamento por fadiga.

4.7.3 Resistência à Fadiga

A seguir são apresentadas as características de resistência à fadiga das cinco misturas asfálticas estudadas. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, com valores de carga aplicados de 7,5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40% da resistência a tração.

As curvas de fadiga das misturas estão expressas em função da solicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica resiliente. Estão representadas nas Figuras 40,41,42,43,44,45 e 46 as curvas de fadiga em função das solicitações das misturas 1, 2, 4 e 5.

Para a aquisição das curvas de fadiga foi utilizado o valor médio do módulo resiliente e resistência máxima à tração estática de cada mistura. A Tabela 20 mostra estes valores utilizados:

Tabela 20: Valores médio do módulo resiliente e resistência à tração.

Mistura	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Mistura 5
Módulo resiliente médio da amostra (MPa)	3398	2889	2561	2737	2916
Resistência máxima à tração estática (MPa)	0,78	0,75	0,84	0,72	0,79

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
13768	5,91	10,15	10	75,0	0,74	0,0000230	0,31	13725
13769	5,87	10,15	10	74,5	0,74	0,0000230	0,31	24291
13770	5,90	10,15	20	149,7	1,40	0,0000459	0,62	5115
13771	5,83	10,15	20	147,9	1,38	0,0000459	0,62	4004
13772	5,85	10,14	15	111,2	1,06	0,0000344	0,47	10922
13773	5,85	10,16	30	222,8	2,04	0,0000689	0,94	1078
13774	5,84	10,14	40	296,0	2,69	0,0000918	1,25	388
13775	5,84	10,14	7,5	55,5	0,57	0,0000172	0,23	60693
13776	5,87	10,15	7,5	55,8	0,57	0,0000172	0,23	78031

Quadro 10: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 1 100% cimento.

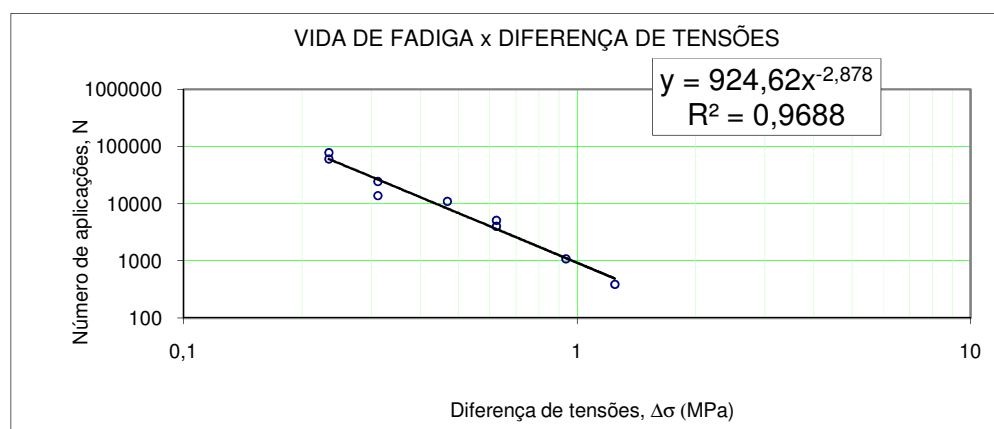


Figura 40: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 1 100% cimento.

cimento.

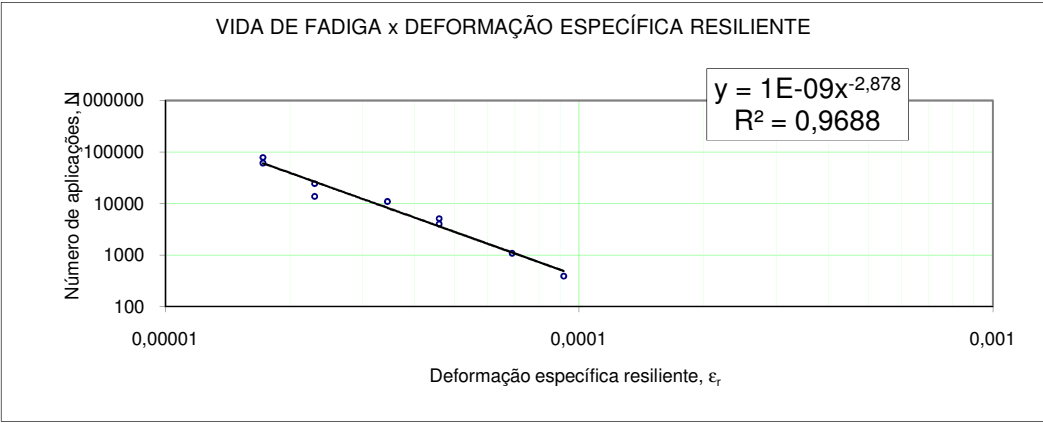


Figura 4.17- Gráfico vida de fadiga *versus* deformação resiliente da mistura 1 100% cimento.

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
13828	5,87	10,15	7,5	53,7	0,55	0,0000195	0,22	60420
13829	5,84	10,15	10	71,2	0,71	0,0000260	0,30	74994
13830	5,81	10,15	10	70,9	0,71	0,0000260	0,30	29846
13831	5,84	10,15	15	106,8	1,02	0,0000389	0,45	4914
13832	5,96	10,15	15	109,0	1,04	0,0000389	0,45	3800
13833	5,83	10,15	20	142,2	1,33	0,0000519	0,60	5251
13834	5,82	10,15	20	142,0	1,33	0,0000519	0,60	3428
13835	5,84	10,14	30	213,5	1,96	0,0000779	0,90	736

Quadro 11: 4.7- Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 2 100% pó de areia.

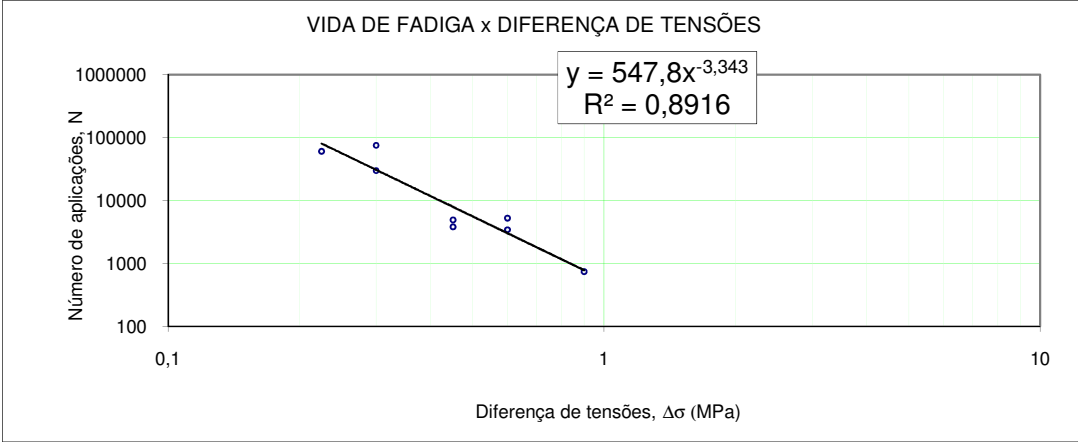


Figura 41: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 2 100% pó de areia.

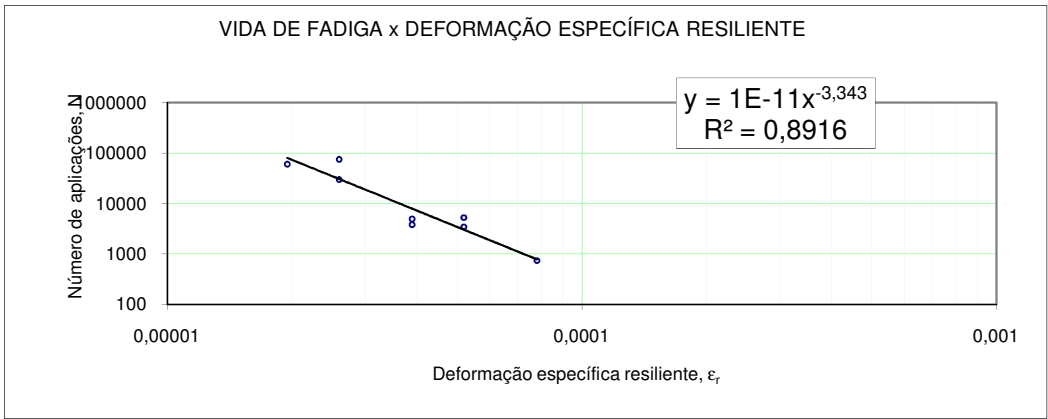


Figura 42: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 2 100% pó de areia.

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
13788	5,74	10,17	10	67,3	0,67	0,0000263	0,29	17392
13789	5,56	10,15	10	65,1	0,65	0,0000263	0,29	41176
13790	5,81	10,15	15	102,0	0,98	0,0000395	0,43	6355
13791	5,71	10,14	15	100,2	0,96	0,0000395	0,43	8390
13792	5,80	10,16	20	136,0	1,28	0,0000526	0,58	2226
13793	5,81	10,15	20	136,1	1,28	0,0000526	0,58	6631
13794	5,76	10,15	30	202,3	1,86	0,0000789	0,86	2060
13795	5,71	10,14	40	267,2	2,43	0,0001052	1,15	417
13796	5,79	10,16	10	67,9	0,68	0,0000263	0,29	38143

Quadro 12: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 4 75% pó de areia e 25% cimento.

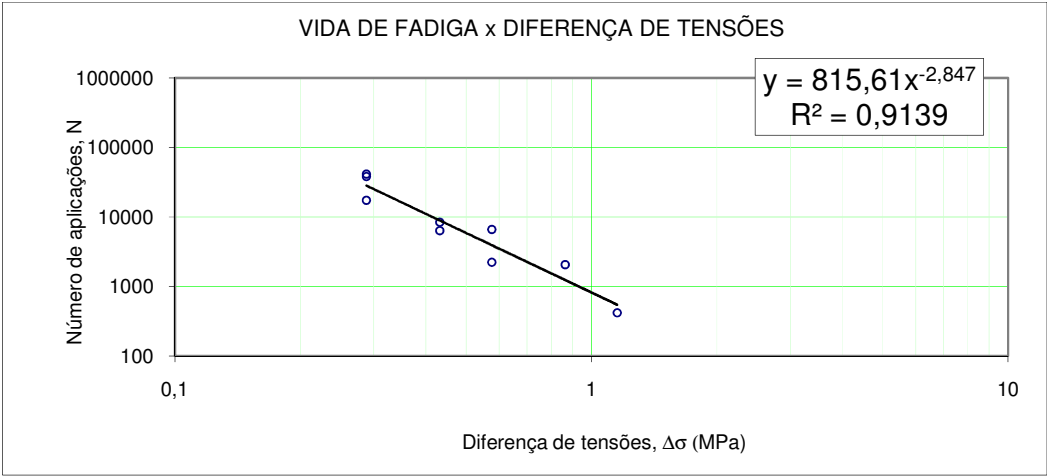


Figura 43: Gráfico vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 4 (75% pó de areia e 25% cimento).

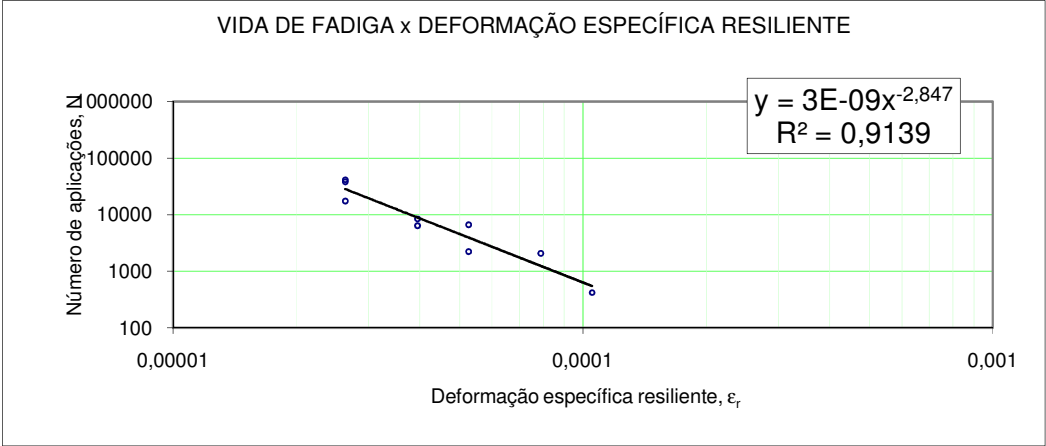


Figura 44: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 4 75% pó de areia e 25% cimento.

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm²)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
13808	5,75	10,17	10	74,0	0,85	0,0000271	0,32	278575
13809	5,77	10,17	15	111,4	1,17	0,0000406	0,47	22749
13810	5,68	10,16	15	109,6	1,16	0,0000406	0,47	59326
13811	5,81	10,16	20	149,4	1,49	0,0000542	0,63	8775
13812	5,70	10,15	20	146,5	1,47	0,0000542	0,63	5854
13813	5,86	10,16	15	113,0	1,18	0,0000406	0,47	13690
13814	5,75	10,17	30	222,1	2,11	0,0000813	0,95	1269
13815	5,74	10,15	40	295,0	2,73	0,0001084	1,26	614

Quadro 13: Resultados do ensaio de fadiga para os corpos de prova da mistura 5 25% pó de areia e 75% cimento.

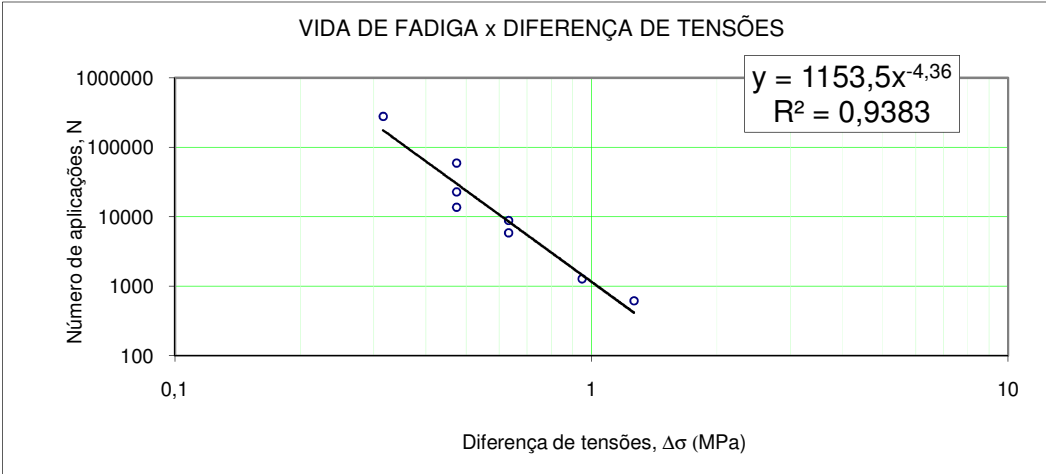


Figura 45: vida de fadiga versus diferença de tensões da mistura 5 25% pó de areia e 75% cimento.

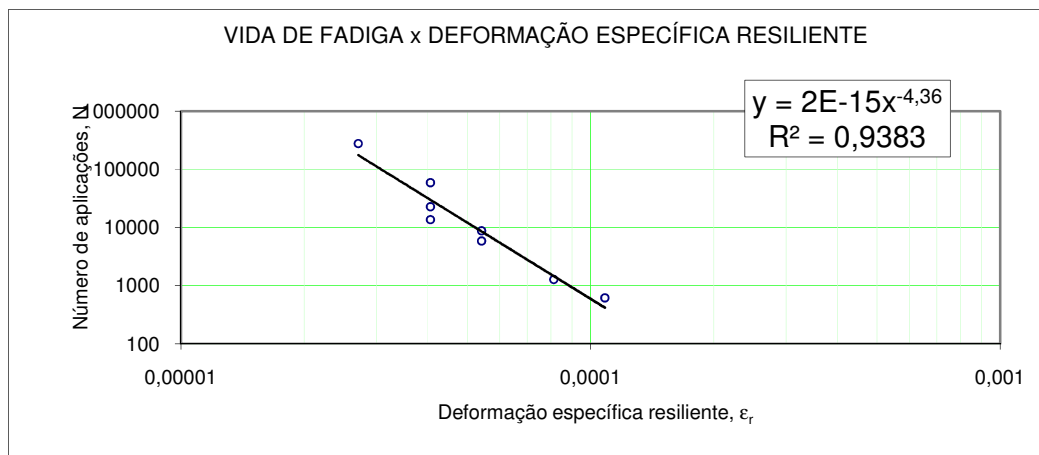


Figura 46: Gráfico vida de fadiga versus deformação resiliente da mistura 5 (25% pó de areia e 75% cimento).

O ensaio de fadiga tem como finalidade realizar uma comparação entre misturas asfálticas. Entre a mistura 1 e a mistura 2, as curvas apresentaram pontos próximos, havendo um paralelismo entre a inclinação das retas, logo a mistura 1 sugere a priori uma maior vida de fadiga. Observou-se que, em todas as misturas asfálticas em que o fíler não convencional pó de areia foi adicionado, as curvas de vida de fadiga apresentaram inclinações transladando entre as misturas não convencionais.

A comparação entre a curva da mistura 1 (fíler 100% cimento) e mistura 2 (fíler 100% pó de areia) apresentem rigidez ou módulo de resiliência próximos. A mistura 1 obteve o maior valor de MR, demonstrando ser uma mistura mais rígida, absorvendo mais tensões, o que gera também tensões de tração maiores.

A inclinação da curva da mistura 5, dada pela constante n , é maior que as das demais misturas asfálticas (convencional e não convencionais), sugerindo um tempo de vida de fadiga maior, também apresentando maior número de golpes nos diferentes níveis de tensão aplicados.

O valor do MR da mistura 3 é 12% menor que o MR da mistura 5, podendo ser considerados próximos, assim é possível comparar suas curvas de fadiga e verificar que, para uma mesma diferença de tensões, as duas misturas apresentam vida de fadiga semelhantes. Tanto para baixas quanto para altas diferenças de tensões, a mistura 5 tende a apresentar uma maior vida

de fadiga comparada às demais misturas. Misturas com maiores valores de módulo de resiliência absorvem tensões, confirmando para a mistura 5 maior tempo de vida de fadiga. Como as tensões são proporcionais aos módulos, a mistura 5 está ligeiramente mais rígida que as demais misturas. Por ter módulo de resiliência maior, esta mistura vai absorver mais tensões.

As misturas 3 e 5 apresentaram valores de RT superior das demais misturas, o que pode ser associado a uma maior resistência à fadiga.

Pode ocorrer que, as misturas 5 e a mistura 3 tenham a mesma vida de fadiga, dependendo de diversos fatores, pois o que geralmente acontece é que o ensaio de fadiga não produz, na maioria das vezes, durante sua execução, as condições às quais os materiais estão sendo submetidos em pista, como por exemplo: forma de aplicação de cargas, temperaturas variáveis, heterogeneidade dos materiais e morfologia dos defeitos que se manifestam, dando margem a inúmeras dúvidas difíceis de esclarecer.

Contudo, uma avaliação mais profunda pode ser equivocada, uma vez que as misturas apresentam módulos diferenciados, distribuindo as tensões de maneira diferente.

4.7.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL ESTÁTICO (Ensaio de *creep*)

São apresentados a seguir, os resultados e análises referentes ao ensaio de *creep* estático, conforme procedimento comentado no capítulo 3. A Figura 4.24 ilustra a deformação específica *versus* cada mistura, para melhor análise dos resultados encontrados no ensaio de *creep* estático.

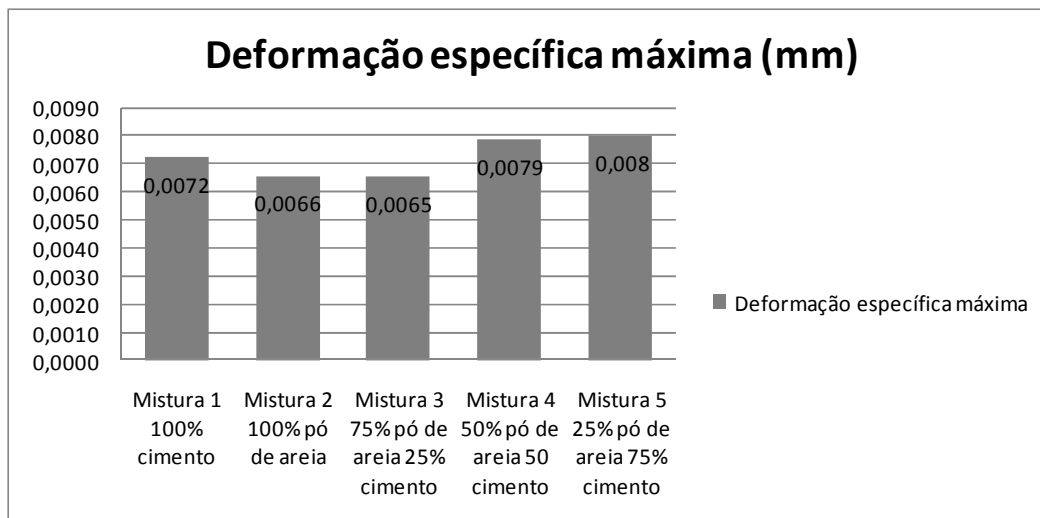


Figura 47: Gráficos de deformação específica máxima de todas as misturas asfálticas.

Observou-se que quanto maior a adição de pó de areia na mistura asfáltica menor é o valor obtido de deformação permanente. Nesta pesquisa, todas as misturas foram confeccionadas com o CAP 50/70 e todas apresentaram o mesmo valor de penetração (50) contribuindo para valores menores de deformação permanente.

Para as misturas não convencionais, a mistura 3 apresentou deformação menor que a mistura 1 convencional. A mistura 5 apresentou o maior valor de deformação permanente entre todas as misturas.

Na análise do comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente pelo ensaio de *creep* estático, MOTTA et al., 1996b, adota como um dos critérios misturas que apresentem deformações inferiores a 2% da altura ou 0,02 mm/mm como adequadas. Nesta pesquisa todas as misturas submetidas ao ensaio de *creep* estático apresentaram deformações menores que esse limite de 2%, logo todas as misturas apresentam-se adequadas dentro deste critério.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível concluir que de modo geral sobre as misturas não convencionais que utilizaram o *filler* pó de areia:

- **Quanto a Dosagem Marshall**, todas as misturas asfálticas, atenderam as especificações da norma do DNIT 031/2006 quanto aos parâmetros de volume de vazios (Vv), relação betume-vazios (RBV), estabilidade e fluência Marshall.
- **Quanto a Resistência à tração**, todas as misturas asfálticas, apresentaram valores acima do valor mínimo da norma do DNIT 031/2006 que estabelece como limite mínimo o valor de **0,65 MPa** a serem obtidos para o ensaio de resistência à tração para mistura asfáltica do tipo CBUQ, ou seja a mistura 1 igual a 0,78Mpa, a mistura 2 0,75Mpa, a mistura 3 de 0,84MPa, mistura 4 igual a 0,72Mpa e a mistura 5 valor de 0,79 MPa.
- **Quanto ao Módulo de resiliência** foi verificado que dependendo da porcentagem da adição do pó de areia como *filler* nas misturas asfálticas não convencionais o valor do módulo de resiliência apresentam leve aumento na rigidez.
- **Quanto à Vida de fadiga** foi verificado que dependendo da porcentagem da adição do pó de areia como *filler* nas misturas asfálticas não convencionais as curvas de vida de fadiga apresentaram maior vida de fadiga.
- **Quanto à Deformação permanente**, todas as misturas submetidas ao ensaio de *creep* estático apresentaram deformações menores que esse limite de 2%, logo todas as misturas apresentam-se adequadas dentro deste critério.

De modo específico pode-se concluir sobre o desempenho das misturas asfálticas não convencionais:

- A **mistura 2** que utilizou 100% pó de areia apresentou uma mistura com boa densidade, contribuindo para o bom desempenho no ensaio de resistência à tração, que aliado a granulometria fina do *fíler* pó de areia, contribuiu para um “leve” aumento na rigidez, por ser fino, certa parte do pó de areia incorpora ao CAP, aumentando a rigidez desta mistura. Quando comparada com os demais valores de módulo das misturas asfálticas. Sendo assim o *fíler* pó de areia contribuiu para o valor do módulo melhorando a deformação permanente, evitando o deslocamento do material da mistura, pelo melhor entrosamento da mistura.
- O menor valor encontrado a partir da razão entre os parâmetros módulo de resiliência e resistência à tração da **mistura 3** não convencional que utilizou 50% de pó de areia e 50% de cimento simultaneamente na mistura, pode ter contribuído para a vida de fadiga, pois baixa rigidez evita elevadas absorções de tensões as quais levam ao trincamento prematuro do revestimento asfáltico. Outro fator que sugere a melhora na fadiga e o desgaste superficial foi o consumo de 4,90% de ligante, superior 0,4% a mais do que o ligante consumido na **mistura 1** convencional. Esta mistura também apresentou bom desempenho quanto à deformação permanente.
- A **mistura 5** que utilizou 25% pó de areia e 75% cimento, foi a mistura que apresentou grandes melhorias nas propriedades estudadas nesta pesquisa. Houve um melhor entrosamento entre os agregados, o pó de areia e o cimento, tornando a mistura densa e com menos volume de vazios, aumentando a estabilidade da mistura. O valor da razão entre os parâmetros módulo de resiliência e resistência à tração pode ter contribuído para a vida de fadiga.

Os resultados mostraram que tecnicamente é possível a utilização do pó de areia como *fíler* não convencional, mesmo que em porcentagens menores do que o cimento CP II.

Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para a utilização do resíduo pó de areia, como matérias primas em aplicações mais nobres, como em argamassas e cerâmicas,

contribuindo para a minimização dos impactos ambientais ocasionados pela falta de destinação correta desses resíduos sólidos industriais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

As sugestões para a continuidade da pesquisa com o resíduo pó de areia são:

- Confeccionar misturas asfálticas utilizando como agregado graúdo a brita, para aumento da resistência à tração e ao cisalhamento;
- Realizar o ensaio de microscopia eletrônica de varredura;
- Realizar algum tipo de moagem do pó de areia de sílica base (exemplo moinho de bolas), para estudos de caracterização de fíleres, para melhor definição de limites máximos e mínimos da fração do *fíler* em misturas asfálticas;
- Utilizar o programa computacional FEPAVE da COOPE/UFRJ para melhor análise de vida de fadiga e deformações permanentes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall**. ABNT 12891/1993, página 80.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT 6576/1998, página 71.

AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials. **Handbook of hot-mix paving**. 1991.

ANDERSON, D.A.; Bahia, H.U; Dongre, R. (1992). *Rheological properties of mineral filler-asphalt mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists, v. 42, p 37-66.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types**. Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 141p. 1995.

BAGAMPADDE, U.; WAHHAB, H. I. A. A.; AIBAN, S. A. *Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia*. Journal of Materials in Civil Engineering, p. 30-35. 1999.

BAHIA, H. U. (1995). *Critical Evaluation of Asphalt Modification Using Strategic Highway Research Program Concepts*. Transportation Research Record, Washington, n. 1488, p. 82-88.

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica**. Editora Oficina de textos. 558 p, 2007.

BECHARA, M. F.; Faxina, A. L.; Fabbri, G. T. P.; Gigante, A. C.; Nascimento, D. R. (2008) **Propriedades Reológicas de Mástiques Asfálticos a Altas Temperaturas**. 39ª Reunião Anual de Pavimentação. Recife/PE.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2007.

BERTOLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. São Carlos, 2002. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. 197p.

BELMONTE, E. P. **Espectroscopia por fluorescência de raios x por reflexão total: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo**. Dissertação de Mestrado em Ciências de Energia Nuclear. Universidade federal do Rio de Janeiro, COOPE. Rio de Janeiro, 2005.

BIOLO, S.M. **Utilização da areia de fundição na fabricação de blocos cerâmicos**. Passo Fundo, 2001. TCC (Trabalho de Conclusão do Curso de Especialista em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura/Universidade de Passo Fundo/RS.

BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (R.A.F.). Incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ.** Florianópolis, 2002. 131p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado.** Rio de Janeiro, 2004. 135p. Dissertação de Mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CAVALCANTE, V. T. F. et al. **Caracterização Mecânica de Mistura Asfáltica com Utilização de Escória de Aciaria como Agregado.** In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Anais..., v.1, p. 91-104. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

CAMPOS, C.S.L.M.A. **O Efeito da temperatura de queima no agregado sintético de argila calcinada, aplicado em concreto asfáltico.** Amazonas, 2008. 159 p. Dissertação de Mestrado. UFAM Universidade Federal do Amazonas.

CIESIELSKI, S. K.; COLLINS, R. J. *Recycling and use of waste materials and byproducts in highway construction.* National Cooperative Highway Research, Program Synthesis of Highway Practice 199. Transportation Research Board. Washington. 1994.

Collins, R. J. and S. K. Ciesielski. *Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction.* National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.

CRAUS, J.; Ishiai I.; Sides A. (1978). *Guidelines for use of dust in hot-mix asphalt concrete mixtures.* Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists. v. 56, pp. 492-516.

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura.** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Capítulo 14:. Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON). v. 1. 1ª Edição. Editor Geraldo C. Isaia. São Paulo, 2007.

DE MARTINI, J.L.C.; FIGUEIREDO, M.A.G.; GUSMÃO, A. C de. **Redução de Resíduos Industriais como produzir mais com menos.** Rio de Janeiro, Fundação Bio Rio, 2005.

DE REIS, R. M. M.; FERREIRA, E. M. **Revestimento Asfáltico Ecogênico.** In: ICONGRESSO INTERAMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. Anais, Porto Alegre, RS. 12p. 2004.

DE SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Editora PINI Ltda. 746 p, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 035/98. **Agregados determinação da abrasão Los Angeles** . 6p. 1998.

DNER EM 036/95. **Recebimento e aceitação de cimento Portland comum e cimento Portland de alto forno.** 10p, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente ensaio Marshall.** 11 p. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 078/94. **Agregado graúdo adesividade a ligante betuminoso**. 3 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 079/94. **Agregado adesividade a ligante betuminoso**. 4 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 083/98. **Agregados análise granulométrica**. 5 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 084/95. **Agregado miúdo determinação da densidade real**. 3 p. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 085/94. **Material finamente pulverizado determinação da massa específica real**. 4 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 133/94. **Misturas betuminosas determinação do módulo de resiliência**. 5 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 138/94. **Misturas betuminosas determinação da resistência à tração por compressão diametral**. 4 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 194/98. **Agregados determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman**. 4 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER ME 195/97. **Agregados determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo**. 6p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Especificação de material. DNER EM 367/97. **Material de enchimento para misturas betuminosas**. 3p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação** - 2 ed. Rio de Janeiro. 320p. (IPR. Publ., 697). 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico**: DNIT-ES 031/2006. Rio de Janeiro, 2006.

DNER-EM 367/97. **Material de enchimento para misturas betuminosas**. Departamento Nacional de Estradas De Rodagem. Rio de Janeiro, 1997.

FRANKENBERG C. L. C. et al (2003). **Gestão Ambiental Urbana e Industrial**. Porto Alegre: EDIPUCRS,, 1ª ed. 2003, 418 p

Harris, B. M.; Stuart, K. D. 1995. *Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – Association of Asphalt Paving Technologists, Volume: 64, p.54-95.

KANDHAL, P. S.; HOFFMANN, G. L. *Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalts mixtures*. Transportation Research Record, Washington, D.C., nº 1583, p.28-36, 1998.

Kavussi, A.; Hicks, R.G. (1997). *Properties of bituminous mixtures containing different fillers*. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists.

KHAN, M.; WAHHAB, H. I. A. A. *Improving slurry seal performance in eastern SaudiArabia using steel slag*. Construction and Building Materials, v.12, n 4, p. 195-201, 1998.

LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V.; ALBERNAZ, C. A. V. **Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria**. In. Reunião de Pavimentação Urbana, 10º., 2000, Uberlândia. Anais..., Rio de Janeiro: ABPv, 2000.

MAXWELL, D.; VAN DER VORST, R. – *Developing sustainable products and services*. Journal of Cleaner Production, London, v. 11, n. 8, p. 883-895, dez. 2003.

MEDINA, J.M.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos. 570p, 2005.

MCGENNIS, R.B.; Anderson, T.M.; Kennedy, T.W.; Solaimanian, M. (1994). *Background of Superpave asphalt mixture design and analysis*. Asphalt Institute Report FHWA-SA-95-003.

MILLER, E. *Use of waste foundry sand in hot-mix asphalt*. M.Sc. Thesis, University of Wisconsin-Madison. Wisconsin, EUA. 1998.

MONISMITH, C. L.; FINN, F. N.; VALLERGA, B. A. **A comprehensive asphalt concrete design system**. Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches. Philadelphia: William Garter Jr., Ed, ASTM STP 1041. p.39-71. 1989.

MOTTA, L. M. G. *et al.* **Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução comentada, IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, 41p. 2000.

MOTTA, L.M.G.; LEITE, L.F.M. (2000). **Efeito do filer nas características mecânicas das misturas asfálticas**. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte. p. 1007-1017, Gramado-RS. 19-23 novembro de 2000.

NÓBREGA, L. M. *et al.* **Uso da escória como agregado em misturas asfálticas tipo CBUQ**. In: XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Anais..., v.1, p. 22-25. Florianópolis, SC. 2004.

NOUMAN, A. A. *et al.* **The use of the steel slag in asphaltic concrete**. ASTM – SpecialTechnical Publication. n 1147, Philadelphia, PA, USA. p. 3-18, 1992.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN, S.; COELHO, V. **Concreto Asfáltico**. Boletim Técnico n.8. 2.ed. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, 1999. 151p.

Pesquisas Rodoviárias.

PINILLA, A. 1965. **O sistema filer-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas**. Conselho Nacional de Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

PINTO, S. **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico: Conceituação e Dosagem**. Departamento de Engenharia de Fortificação – IME Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 81p. 1998.

RAWLE, A. **The importance of Particle Size Analysis in the Pharmaceutical Industry**. Malvern. Spring Lane South, p.1-43, 2002.

ROBERT, F.L.; HANDHAL, P. S., BROWN, E.R. (1996). **Hot-Mix Asphalt materials**, Mixture Design and Constitution, Seon Edition NARA Education Foundation Ian ham. Maryland.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial**. Porto Alegre, 2002. 94p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SANTANA, H. (1995). **Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e definições de Fíler em Misturas Asfálticas**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá. Associação Brasileira de Pavimentação.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 2, Ed. Pini, São Paulo, 2001.

SILVA, E. A.; MENDONÇA, R. L.; DOBELE, C. H. M. **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP. In: Anais..., 16º Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro. 2002.

SOARES, J.B.; CAVALCANTE, V.T.F. (2001). **O efeito do tipo e teor de filer nas propriedades mecânicas das misturas asfáltias**. Anais da 33ª Reunião anual de Pavimentação. Florianópolis – SC.

SOUZA, J.N.; RODRIGUES, J.K.G.; SOUZA NETO, P. N. (1998). **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concreto asfáltico usinado a quente**. Federação das Indústrias do Estado do Ceará – IEL. Disponível em <http://www.sfiec.org.br>.

Staniskis, J.K.; Stasiskiene Z. (2003). **Promotion of cleaner production investments: internacional experience**. Journal of Cleaner Production, 11, p. 619-628, 2003.

STEFENON, F. **Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado à quente**. Porto Alegre, 2003. 101p. Dissertação de Mestrado – Modalidade Profissionalizante. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TOCCHETTO M. R. L e PEREIRA L. C. (2004). **Qualidade Ambiental e Ecoeficiência: nova postura para indústrias de alto impacto.** Disponível em http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./gestao/index.html&conteudo=./gestao/artigos/qualidade_amb.html. Acesso em 19.8.2009.

WATANABE, F. A.; GEMELLI, E.; FOLGUERAS, M.V. **Utilização de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto**, parte I: Propriedades mecânicas e microestruturais do concreto. In: Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul, 2002, Joinville. Anais. Joinville: 2002.

WESSELING, Diego Henrique. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: PPGE/UFRGS, 2005. n p.143