

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

**COMPORTAMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO TENDO
LODO DA ETA DA CIDADE DE MANAUS COMO FÍLER**

JOSÉ FRANCISCO ALEIXO DA SILVA

**MANAUS
2008**

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

JOSÉ FRANCISCO ALEIXO DA SILVA

**COMPORTAMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO TENDO LODO DA
ETA DA CIDADE DE MANAUS COMO FÍLER**

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,
na área de concentração em Transportes.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Ladislau de Andade

MANAUS
2008

Ficha Catalográfica

Catálogo na fonte pela Biblioteca Central da
Universidade Federal do Amazonas

Silva, José Francisco Aleixo da

S586 Comportamento de concreto asfáltico tendo lodo da ETA da cidade de Manaus como fíler / José Francisco Aleixo da Silva. - Manaus: UFAM, 2008.
180 f.; il. algumas color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2008.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Ladislau de Andade

1. Agregados (Materiais de construção) 2. Lodo de estações de tratamento de água 3. Concreto asfáltico I. Andade, João Bosco Ladislau de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 625.855(811.3)(043.3)

JOSÉ FRANCISCO ALEIXO DA SILVA

**COMPORTAMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO TENDO LODO DA
ETA DA CIDADE DE MANAUS COMO FÍLER**

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,
na área de concentração em Transportes.

Aprovado em 19 de dezembro de 2008

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Bosco Ladislau de Andrade
Universidade Federal do Amazonas

Prof^ª. Dra. Laura Maria Goretti da Motta
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

A Deus por me ter dado a oportunidade e forças e ter permitido a realização de mais este trabalho;

Ao meu pai Moisés Pereira da Silva in memoriam apesar da distância que nos separa, sei que está presente em minha vida espiritualmente;

À minha querida mãe, Cleocy Aleixo da Silva que com seu imenso amor contribuiu para que solidificasse mais uma etapa de minha vida e às minhas adoráveis filhas, companheiras de todas as horas, Sâmya Jezine da Silva e Saadya Jezine da Silva por seu apoio e compreensão dos meus momentos ausentes neste período de estudos e pesquisa;

Aos meus familiares pelo apoio e presença constante;

Ao meu orientador, Dr. João Bosco Ladislau de Andrade que com grande competência e seriedade contribuiu de maneira fundamental para a realização deste trabalho e para meu crescimento profissional;

Aos professores do curso, sem exceção, que de algum modo me auxiliaram na discussão temática e contribuíram para a elaboração deste trabalho;

Aos meus colegas e amigos Arlene Maria Lamêgo da Silva Campos, Edsandra Cavalcante Magalhães e Renato Silva Martins que sabendo das adversidades que passava, principalmente no início do curso, me incentivavam constantemente para que nunca desistisse e desse continuidade ao mesmo;

A professora Dra. Laura Maria Goretti da Motta e toda sua equipe do COPPE que me ajudaram e orientaram quando dos ensaios realizados no laboratório de geotecnia da UFRJ;

A Universidade Federal do Amazonas, pela oportunidade a mim concedida e a FAPEAM pela concessão da bolsa de estudos;

Aos colegas de turma e colaboradores que de alguma forma me ajudaram na elaboração desta

dissertação;

Ao Eng^o Antônio Reinaldo Mesquita da Silva e laboratorista Sr. Francisco de Oliveira Santos, competentes profissionais, que foram peças fundamentais para os meus ensaios no laboratório de pavimentação da UFAM.

RESUMO

O concreto betuminoso usinado a quente é uma mistura constituída de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante betuminoso, misturados a quente em usina apropriada, devendo ser espalhados e comprimidos a quente. O revestimento de concreto betuminoso consiste de uma ou mais camadas, construídas sobre uma base devidamente preparada para o seu recebimento. Este trabalho tem por objetivo gerar alternativas para a pavimentação local, com a utilização de materiais regionais e não convencionais na mistura asfáltica, em substituição aos elementos tradicionais. Para tanto, utilizou-se o lodo, resíduo gerado na Estação de Tratamento de Água – ETA, da Ponta do Ismael, na cidade de Manaus/AM, responsável pelo tratamento da água do rio Negro, que abastece a cidade de Manaus. Atualmente, estes resíduos são lançados no igarapé do Franco, ocasionando prejuízos ao meio ambiente. O resíduo da ETA foi utilizado como fíler no concreto asfáltico usinado a quente – CBUQ, em substituição ao material tradicionalmente usado nesta região, ou seja, o cimento *Portland*. Foi feita uma análise comparativa entre as misturas betuminosas, convencional e alternativa, com os dois tipos de fíleres, utilizando o mesmo teor ótimo da mistura com o CAP-50/70. Foram moldados corpos de prova de CBUQ e analisados os resultados concernentes à estabilidade *Marshall*, fluência a 60 °C e compressão diametral uniaxial estática, módulo de resiliência e vida de fadiga, todos a 25 °C. Os resultados dos ensaios mostram desempenho adequado da mistura confeccionada com o lodo como fíler, comparado à mistura convencional, confeccionada com cimento *Portland*.

PALAVRAS – CHAVE: lodo; fíler; mistura asfáltica.

ABSTRACT

This paper has the objective of generating alternatives for the local paving, with the utilization of regional and non-conventional material in the asphaltic mixture, replacing the traditional elements. In order to do so, the sludge, which is a residue generated in the *Estação de Tratamento de Água-ETA* (Water Treatment Station – WTS), at Ismael's Creek (*Ponta do Isamel*), in Manaus City, the responsible for the water treatment from the Negro River, which provides water for Manaus City. Nowadays, these residues are casted in the Franco's *Igarapé* (Franco's River), entailing losses to the environment. The ETA residue was utilized as a filler in the heated-machined asphaltic concrete – CBUQ, replacing the region's traditionally used material, the Portland cement. A comparative analysis between the bituminous, conventional and alternative mixtures was made, with the two kinds of fillets, utilizing the same tenor of CAP-50/70. CBUQ bodies were molded and analyzed the results concerning the Marshall stability, flow at 60 0C static uniaxial and diametral compression, resilient modulus and fatigue life of all at 25 0C. The test results show adequate performance of the mixture made with mud as fillers, compared to the conventional mix, made with Portland cement.

Key Words: **Sludge; filler; asphaltic mixture**

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 1 - Formas de redução de volume de lodo.....	13
Figura 2 – Célula unitária do NaCl.....	19
Figura 3 – Tensões em um pavimento.....	27
Figura 4 – Cargas atuantes em um pavimento.....	28
Figura 5 - Seção transversal típica de pavimento flexível.....	29
Figura 6 – Seção transversal típica de um pavimento rígido.....	30
Figura 7 – Agregado graúdo: seixo rolado.....	60
Figura 8 – Agregado miúdo: areia de jazida.....	60
Figura 9 – Ensacamento dos agregados (seixo e areia).....	64
Figura 10 – Secagem dos agregados (seixo e areia).....	64
Figura 11 – Fluxograma da produção do lodo da ETA da Ponta do Ismael.....	65
Figura 12 – Vista parcial dos flotores da ETA 2.....	69
Figura 13 – Coleta do lodo na ETA 2.....	69
Figura 14 – Lodo destorroado no mão de gral.....	69
Figura 15 – Lodo calcinado a 300 °C.....	69
Figura 16 – Amostra lavada e secada após passar na máquina <i>Los Angeles</i>	73
Figura 17 – Método <i>Chapman</i>	75
Figura 18 – Ensaio <i>Le Chatelier</i> do cimento <i>Portland</i>	77
Figura 19 - Ensaio <i>Le Chatelier</i> do lodo da ETA.....	78
Figura 20 - Microscópio eletrônico de varredura.....	80
Figura 21 – Amostra do lodo da ETA pulverizado (pó).....	81
Figura 22 – Ensaio de viscosidade <i>Saybolt Furol</i>	84

Figura 23 – Ensaio <i>Marshall</i>	86
Figura 24 – Corpo de prova rompido no ensaio <i>Marshall</i>	86
Figura 25 – Material no agitador (ensaio <i>Rice</i>).....	87
Figura 26 – Retirada do ar da mistura (ensaio <i>Rice</i>).....	87
Figura 27 – Ensaio de resistência à tração.....	88
Figura 28 – Diagrama do tempo de duração do carregamento e repouso para um CP	90
Figura 29 – Deslocamentos lidos pelos LVDTs.....	92
Figura 30 – Equipamento para realização do ensaio de módulo de resiliência.....	92
Figura 31 – Câmara do ensaio de MR e fadiga.....	93
Figura 32 – Gráfico de fadiga: diferença de tensões (tração) e vertical (compressão).....	94
Figura 33 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	102
Figura 34 – Difratoograma dos elementos químicos presentes no lodo da ETA.....	102
Figura 35 – Porcentagem em peso dos elementos químicos.....	102
Figura 36 – Porcentagem da composição dos óxidos presentes na amostra.....	102
Figura 37 – Difratoograma da amostra de lodo da ETA.....	103
Figura 38 – Composição granulométrica dos agregados.....	104
Figura 39 – Gráfico da relação temperatura x tempo (viscosidade <i>Saybolt Furol</i>).....	105
Figura 40 – Evolução da curva: densidade aparente x teor de CAP (ensaio <i>Marshall</i>).....	106
Figura 41 – Evolução da curva: volume de vazios x teor de CAP (ensaio <i>Marshall</i>).....	107
Figura 42 – Evolução da curva: RBV x teor de CAP (ensaio <i>Marshall</i>).....	107
Figura 43 – Evolução da curva: estabilidade x teor de CAP (ensaio <i>Marshall</i>).....	108
Figura 44 – Evolução da curva: fluência x teor de CAP (ensaio <i>Marshall</i>).....	108
Figura 45 – Evolução da curva de densidade aparente (RT).....	111

Figura 46 – Evolução do volume de vazios (RT).....	111
Figura 47 – Evolução da estabilidade (RT).....	112
Figura 48 – Evolução da fluência (RT).....	112
Figura 49 – Evolução do ensaio de compressão diametral com adição de lodo da ETA na mistura betuminosa.....	114
Figura 50 – Evolução do módulo de resiliência - MR com adição de lodo da ETA na mistura betuminosa.....	116
Figura 51 – Evolução da vida de fadiga x diferença de tensões de CBUQ com 100 % de cimento.....	118
Figura 52 – Evolução da vida de fadiga x diferença de tensões de CBUQ com 100% de lodo.....	118
Figura 53 – Evolução da vida de fadiga x deformação específica resiliente de CBUQ com 100 % de cimento.....	119
Figura 54 – Evolução da vida de fadiga x deformação específica resiliente de CBUQ com 100 % de lodo.....	119

LISTA DE QUADROS

página

Quadro 1 – Fatores que influem nas deformações permanentes (D.P.) das misturas para concreto asfáltico.....	42
Quadro 2 – Origem dos materiais utilizados na mistura betuminosa.....	63
Quadro 3– Relação temperatura x tempo (viscosidade <i>Saybolt Furol</i>).....	105
Quadro 4 – Resultados do ensaio <i>Rice</i>	109
Quadro 5 – Valores obtidos no ensaio <i>Marshall</i> com 5 % de teor de asfalto (teor ótimo).....	110
Quadro 6 – Valores médios dos resultados dos ensaios por compressão diametral.....	113
Quadro 7 – Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.....	115
Quadro 8 – Resultados obtidos no ensaio de fadiga.....	117

LISTA DE TABELAS

	página
Tabela 1 – Porcentagem de material (<i>filler</i>) em peso passando na peneira.....	44
Tabela 2 – Características do cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70 da Reman.....	62
Tabela 3 – Graduação para o ensaio <i>Los Angeles</i>	73
Tabela 4 – Graduação para determinação da carga abrasiva.....	74
Tabela 5 – Resultados médios dos ensaios de granulometria do seixo por peneiramento manual.....	96
Tabela 6 – Resultados médios dos ensaios de granulometria da areia por peneiramento manual.....	99
Tabela 7 – Enquadramento da granulometria dos agregados.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – Asphalt Institute

AN - Asfalto Natural

AP – Asfalto de Petróleo

ASTM – American Society for Testing

BEC – Batalhão de Engenharia e Construção

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

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DNC – Departamento Nacional de Combustíveis

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DRX – Difratometria de Raio – X

EDS – Energy Dispersive X – Ray Detector

ETA - Estação de Tratamento de Água

FRN – Fundo Rodoviário Nacional

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo

ICDD – International Center for Diffraction Data

ISC – Índice de Suporte California

ISO – International Organization for Standardization

LVDTs – Linear Variable Differential Transformers

Mbpd - Milhões de barris de petróleo por dia

MERCOSUL – Mercado Comum do Sul

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MR– Módulo de Resiliência

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PNV – Plano Nacional de Viação

RBV – Relação Betume/Vazios

REMAN – Refinaria de Manaus

RT – Resistência à Tração

SDS – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SRN – Sistema Rodoviário Nacional

SSF – Seconds *Saybolt Furol*

TC – Tensão Controlada

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

UNT – Unidade de Turbidez

Vv – Volume de vazios

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VCB – Vazios com Betume

SUMÁRIO

	página
INTRODUÇÃO	123
CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIORÁFICA	123
1.1 Meio ambiente e recursos hídricos.....	123
1.2 Sistemas de abastecimento de água.....	123
1.3 Lodo de ETA.....	123
1.4 Aspectos gerais associados ao transporte rodoviário.....	123
1.5 Classificação dos pavimentos rodoviários.....	123
1.6 Camadas da seção transversal dos pavimentos flexíveis e rígidos.....	123
1.7 Pavimento flexível.....	123
1.8 Conceituação de filler na mistura asfáltica.....	123
1.9 Definição e classificação de materiais pétreos e ligantes.....	123
1.10 Ensaio experimentais para avaliação das misturas betuminosas.....	123
CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS	123
2.1 Materiais empregados.....	123
2.2 Ensaio laboratoriais para avaliação das propriedades dos materiais.....	123
2.2.1 Preparação dos materiais.....	123
2.2.2 Ensaio físicos para caracterização dos agregados.....	123
2.3 Ensaio experimentais para avaliação das misturas betuminosas.....	123
2.3.1 Materiais empregados.....	123
2.3.2 Ensaio mecânicos.....	123
2.3.2.1 Ensaio <i>Marshall</i>	123

2.3.2.2 Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral – RT.....	123
2.3.2.3 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.....	123
2.3.2.4 Ensaio de fadiga.....	123
CAPÍTULO 3 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	123
3.1 Ensaio de caracterização dos materiais.....	123
3.2 Ensaio <i>Marshall</i>	123
3.3 Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral – RT.....	123
3.4 Ensaio de módulo resiliência por compressão diametral.....	123
3.5 Ensaio de fadiga.....	123
CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	123
REFERÊNCIAS.....	123
ANEXOS.....	123
A1 - Ficha de protocolo dos CPs com 100 % de cimento (medidas).....	123
A2 - Ficha de protocolo dos CPs com 50 % de lodo (medidas).....	123
A3 - Ficha de protocolo dos CPs com 100 % de lodo (medidas).....	123
A4 - Ficha de protocolo dos CPs com 100 % de cimento (resultados dos ensaios de densidade).....	123
A5 - Ficha de protocolo dos CPs com 50 % de lodo (resultados dos ensaios de densidade).....	123
A6 - Ficha de protocolo dos CPs com 100 % de lodo (resultados dos ensaios de densidade).....	123
A7 - Resultados do ensaio RICE da mistura betuminosa.....	123

A8 - Quadro do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de cimento (resultados).....	123
A9 - Quadro do ensaio de fadiga dos CPs com 50 % de lodo (resultados).....	123
A10 - Quadro do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de lodo (resultados).....	123
Gráfico A1 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de cimento (vida de fadiga x diferença de tensões).....	123
Gráfico A2 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 50 % de lodo (vida de fadiga x diferença de tensões).....	123
Gráfico A3 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de lodo (vida de fadiga x diferença de tensões).....	123
Gráfico A4 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de cimento (vida de fadiga x deformação resiliente).....	123
Gráfico A5 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 50 % de lodo (vida de fadiga x deformação resiliente).....	123
Gráfico A6 - Gráfico do ensaio de fadiga dos CPs com 100 % de lodo (vida de fadiga x deformação resiliente).....	123
APÊNDICES	123
Quadro 1 - Origem dos materiais utilizados na confecção dos CPs.....	123
Tabela 1 - Granulometria do agregado miúdo (areia).....	123
Tabela 2 - Granulometria do agregado graúdo (seixo).....	123
Tabela 3 - Granulometria do <i>filler</i> (cimento Portland).....	123
Tabela 4 - Granulometria do <i>filler</i> (lodo da ETA).....	123
Figura 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo (areia).....	123
Figura 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo (seixo).....	123
Figura 3 - Curva granulométrica do <i>filler</i> (cimento Portland).....	123

Figura 4 - Curva granulométrica do <i>filler</i> (lodo da ETA).....	123
Figura 5 - Ensaio realizados para caracterização dos materiais.....	123

INTRODUÇÃO

O concreto asfáltico, também chamado de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é um revestimento flexível, constituído de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante betuminoso. O CBUQ deve ser preparado em usina apropriada – devendo ser espalhado e comprimido a quente. É uma mistura da mais alta qualidade cujo controle rígido na dosagem, mistura e execução deve atender às exigências de estabilidade, durabilidade, flexibilidade e resistência mecânica preconizados pelas normas construtivas. O revestimento de concreto asfáltico consiste de uma ou mais camadas, construídas sobre base adequada, sendo o revestimento mais usado na pavimentação de rodovias.

A região Amazônica possui um alto custo dos serviços de pavimentação. Devido as peculiaridades da região, buscou-se encontrar uma alternativa não convencional para a pavimentação local com a utilização do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA). O lodo seár utilizado como fíler no concreto asfáltico, em substituição ao cimento *Portland*, material tradicionalmente utilizado na região.

O estado do Amazonas localizado na Região Norte do Brasil detém a maior bacia hidrográfica do mundo e, por seu vasto território, percorre também o maior e mais caudaloso rio existente na superfície terrestre, o rio Amazonas. O rio Negro, principal afluente, no seu percurso da nascente até encontrar o rio Amazonas, passa por Manaus, capital do estado.

O complexo de tratamento de água na cidade de Manaus, denominado Ponta do Ismael, recebe água captada do rio Negro nas suas instalações, sendo responsável pela produção da água distribuída na cidade.

Consequentemente a água aduzida do rio Negro, após passar pelo processo de tratamento na ETA, tem uma parcela de seu volume transformado em resíduo, composto de elementos

minerais e químicos, que são lançados no igarapé do Franco, na avenida Brasil, no bairro da Compensa, ocasionando prejuízo aos micro-organismos existentes nesse igarapé.

O que motivou a elaboração da presente pesquisa? A redução da impactação causada pelo lançamento dos resíduos do lodo da ETA, Ponta do Ismael, no Igarapé do Franco. Também a utilização desse lodo como fíler em concreto betuminoso, após passar por processo de industrialização.

Em razão disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a substituição parcial ou total do cimento *Portland*, utilizado como fíler no concreto asfáltico, por lodo oriundo do complexo Ponta do Ismael, tendo como agregados o seixo e a areia e a utilização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (CAP – 50/70). Assim, esta pesquisa contribui para a redução da poluição do igarapé do Franco e ao mesmo tempo viabiliza mais uma alternativa para a pavimentação local, levando em consideração o alto preço do cimento *Portland* no estado do Amazonas.

Para atingir o objetivo, tomaram-se medidas intermediárias específicas que correspondessem às várias fases do respectivo trabalho. São elas: caracterização química e mineral do lodo da ETA Ponta do Ismael; caracterização dos agregados: seixo, areia e fíler (cimento e lodo da ETA); determinação das condições ótimas, em escala laboratorial, do aproveitamento do lodo produzido na ETA da Ponta do Ismael, utilizando-se das normas vigentes do Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (DNIT); e avaliação do efeito da adição do lodo sobre as propriedades mecânicas no concreto asfáltico capaz de atender às especificações estabelecidas pelas normas do DNIT. Essas normas referem-se: à estabilidade e fluência (ensaio Marshall), à resistência a tração da mistura (ensaio da resistência à tração por compressão diametral), à deformação resiliente ou elástica (ensaio do módulo de resiliência) e a

trincas pela solicitação à flexão da camada de concreto asfáltico (ensaio da fadiga por compressão diametral).

A utilização do lodo de ETA da Ponta do Ismael como fíler em concreto asfáltico, se não solucionar, deve pelo menos amenizar o impacto ambiental ocasionado pelos resíduos da ETA da Ponta do Ismael, que lança seus resíduos no igarapé do Franco. Ao mesmo tempo é mais uma alternativa para a pavimentação local em substituição ao cimento *Portland*. Esse lodo, para ser aproveitado, deve passar por processo de decantação no qual a porção líquida do lodo será re- aproveitada no tratamento da água da ETA por conter elementos químicos, e a porção composta de material sólido será transformada em fíler na mistura asfáltica, como agregado mineral.

Visando a melhor ordenação das idéias, o trabalho organiza-se em três capítulos assim distribuídos.

O primeiro capítulo aborda a evolução da ecologia e a inter-relação entre o homem e a natureza. Disponibilidade e gestão dos recursos hídricos no mundo, no Brasil e no estado do Amazonas. Definição de sistemas de abastecimento de água. Definição de lodo de ETA, com as alternativas de redução de volume do lodo; suas principais características quantitativas e qualitativas; impactos ambientais e toxicidade dos resíduos, e caracterização química e mineralógica do lodo.

Também são abordados os aspectos gerais associados ao transporte rodoviário, com breve histórico do transporte rodoviário no mundo, no Brasil e no estado do Amazonas. As rodovias da Amazônia e o Sistema Rodoviário Nacional (SRN). Classificação e aspectos funcionais do pavimento rodoviário. Camadas da seção transversal dos pavimentos flexíveis e rígidos. A química e reologia do asfalto. Principais degradações sofridas por pavimento flexível.

Para finalizar o capítulo, a conceituação de fíler e materiais pétreos, com utilização desses em mistura asfáltica.

O segundo capítulo retrata os programas experimentais, descrevendo-se a natureza, procedência e as características dos materiais utilizados nas misturas, bem como os métodos necessários referentes aos ensaios que fornecem subsídios para se avaliar as propriedades mecânicas das misturas.

O terceiro capítulo apresenta e discute os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e dos ensaios mecânicos, referentes a dois tipos de misturas: misturas convencionais, com a utilização do cimento *Portland* como fíler, e misturas especiais com utilização do lodo da ETA da Ponta do Ismael como fíler, em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Os resultados estão representados em tabelas e gráficos. Também neste capítulo, é apresentada a análise dos resultados com as respectivas interpretações.

Para finalizar, apresentam-se as conclusões desta pesquisa e sugerem-se tópicos para pesquisas futuras.

Capítulo 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão da utilização do lodo oriundo da ETA da Ponta do Ismael como elemento capaz de substituir parcial ou total o cimento Portland, como fíler, em mistura asfálticas, se faz necessário a fundamentação teórica apresentada a seguir.

1.1 MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

A ciência da Ecologia, como todas as áreas de conhecimento, teve, ao longo da história, um desenvolvimento gradual. As obras de Hipócrates, Aristóteles e outros filósofos gregos já continham material de natureza ecológica, entretanto, eles não tiveram uma palavra para designá-la. Anton Van Leeuwenhoek, de Delft, Holanda, nos anos setecentos, foi o pioneiro no estudo das “cadeias alimentares” e do controle da população, duas áreas importantes da ecologia moderna (SETTI *et al*, 2001).

Segundo Setti *et al* (2001), a palavra Ecologia foi proposta pela primeira vez pelo biólogo alemão Ernest Haeckel, em 1869. Haeckel descobriu que existiam relações entre ambiente e hereditariedade, utilizando o termo Ecologia (do grego *oikos* = casa, e em sentido mais amplo ambiente; *logos* = ciências, estudo) para designar o ramo da biologia que se ocupa dessas relações.

Em sentido literal, a ecologia é o estudo dos organismos “em suas casas”. A ecologia é definida, usualmente, como o estudo das relações dos organismos ou grupos de organismos e o seu meio ambiente, ou a ciência das inter-relações entre os organismos com o seu meio ambiente. Uma vez que a ecologia se ocupa, principalmente, da biologia de grupos de organismos e de processos funcionais na terra, no mar e na água doce, pode ser definida como o estudo da estrutura e do funcionamento da natureza, considerando a humanidade como parte dela.

Segundo Setti *et al* (2001), a lei nº 6.938, de 31/08/1981 dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins, mecanismos de formulação e sua aplicação no Brasil, definindo meio ambiente como:

“Conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abrigam e regem a vida em todas as suas formas”.

Ainda segundo Setti *et al* (2001), a água é considerada um recurso ou bem econômico, porque é finita, vulnerável e essencial para a conservação da vida e do meio ambiente. Além disso, sua escassez impede o desenvolvimento de diversas regiões.

Por outro lado, é também tida como um recurso ambiental, pois a alteração adversa desse recurso pode contribuir para a degradação da qualidade ambiental. Já a degradação ambiental afeta, direta ou indiretamente: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a fauna e a flora; as condições estéticas e sanitárias do meio; e a qualidade dos recursos ambientais.

O controle da poluição da água é necessário para assegurar e manter níveis de qualidade compatíveis com sua utilização. A vida no meio aquoso depende da quantidade de oxigênio dissolvido, de modo que excesso de dejetos orgânicos e tóxicos na água reduz o nível de oxigênio e impossibilita o ciclo biológico normal.

A legislação ambiental brasileira - constituída pela Lei 6.938, de 31.08.81, e pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº. 001, de 23.01.86 - conceituou as águas interiores, as superficiais e as subterrâneas como um recurso ambiental, e a degradação da qualidade ambiental, por sua vez, como qualquer alteração adversa desse recurso.

Segundo Setti *et al* (2001), da quantidade de água existente sobre a terra, 97,2 % são de água salgada. A água presente na neve ou no gelo corresponde a 2,1 %, a água doce equivale a 0,6 % do total e o restante da água apresenta-se na forma de vapor atmosférico.

Ainda segundo Setti *et al* (2001), da água doce existente somente 1,2 % apresenta-se na forma de rios e lagos e os restantes 98,8 % constituem águas subterrâneas ou aquíferas.

Os continentes mais favorecidos em reservas de água doce são a Ásia, a América do Norte e a América do Sul.

Aproximadamente metade da água subterrânea é considerada inviável para utilização, porque está situada a mais de 800 m de profundidade. Sua qualidade, entretanto, é naturalmente boa para o consumo geral, graças ao processo de filtração e às reações biogeoquímicas no subsolo.

Em países como a Arábia Saudita, a Dinamarca e Malta, as águas subterrâneas são o único recurso hídrico disponível. Em outros, como a Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda Marrocos, Rússia e Suíça, mais de 70 % da demanda são atendidos pelo manancial subterrâneo (BANCO MUNDIAL, 1994).

Segundo a Agência Nacional de Água (ANA) (2006), citando o 2º Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos no Mundo, há atualmente no mundo 1,1 bilhão de pessoas que vivem sem água potável em condições apropriadas e 2,6 bilhões que não possuem acesso a saneamento básico. Catástrofes naturais relacionadas à água, tais como enchentes e secas, matam mais que qualquer outro desastre natural e doenças ligadas a este recurso continuam causando a morte de milhares de crianças todos os dias.

Por outro lado temos os recursos hídricos no Brasil, destacando-se a vazão da bacia amazônica que altera profundamente a disponibilidade dos recursos hídricos no território brasileiro. A vazão dessa bacia somada com as disponibilidades hídricas do Brasil corresponde a

53 % do potencial hídrico referente ao continente da América do Sul. A representatividade brasileira e amazônica também é significativa em termos mundiais (15 %).

A distribuição regional dos recursos hídricos brasileiros é de 70 % para a região Norte, 15 % para a região Centro-Oeste, 12 % para as regiões Sul e Sudeste, que apresentam o maior consumo de água, e 3 % para a região Nordeste. Essa região, além da carência de recursos hídricos, tem sua situação agravada por um regime pluviométrico irregular e pela baixa taxa de permeabilidade do terreno cristalino.

Com exceção da bacia amazônica, as demais 19 bacias hidrográficas brasileiras foram mapeadas pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) na década de 1980.

Em termos de águas subterrâneas, a utilização no Brasil é bastante modesta. São perfurados de 8 mil a 10 mil poços por ano, a grande maioria para abastecimento de indústrias.

Somente nas décadas de 1980 e 1990, observou-se a tendência para o abastecimento público com águas subterrâneas.

Visando a gestão dos recursos hídricos no Brasil foi elaborado a Lei Federal nº. 9.433 de 08/01/1997, Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), determinando compartilhamento do poder e de responsabilidades entre o Estado e os diversos setores da sociedade.

Segundo Borsoi & Torres (1997), gestão de recursos hídricos, em sentido lato, é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, bem como fazer o uso adequado, visando a otimização dos recursos em benefício da sociedade. A gestão dos recursos hídricos, portanto, realiza-se mediante procedimentos integrados de planejamento e de administração.

A gestão dos recursos hídricos é necessária pela escassez relativa de tais recursos e pela necessidade de preservação para as futuras gerações.

Historicamente, essa gestão tem acontecido em países ou regiões em que a pouca água decorre da aridez do clima ou da poluição, havendo limitação ao desenvolvimento econômico e social.

A decisão muitas vezes é tomada em condições em que a escassez já é efetiva. Somente na década de 1960, países como Estados Unidos, França, Alemanha e Grã-Bretanha renovaram suas leis e instituições existentes à procura de maior eficácia e recuperação e conservação dos recursos hídricos.

A informação ao público dos conflitos potenciais quanto ao uso dos recursos hídricos é fundamental para a discussão e participação nos processos gerenciais de tomada de decisão de uma dada região.

Segundo a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SDS) (2002), a gestão dos recursos hídricos no estado do Amazonas, envolve atividades reducionistas de impactos sobre os recursos hídricos e otimização do seu uso. As estratégias a serem adotadas para a implementação desta ação incluem a formulação de políticas para: proteção das nascentes; recuperação de áreas de proteção permanente; amenização e/ou cessão das contribuições que poluem/degradam corpos de água; estabelecimento do nível de qualidade e classe do corpo de água; qualificação das águas com base nos usos preponderantes; enquadramento de referência e prospectivo dos corpos d'água; instrumentalização da outorga de uso dos recursos hídricos; elaboração e implementação do Plano Estadual de recursos hídricos; e implementação do fundo estadual de recursos hídricos.

1.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um Sistema de Abastecimento de Água deve ser concebido e projetado para atender as necessidades humanas, variando nas suas características e porte das instalações.

Segundo Steel (1966), o Sistema Público de Abastecimento de Água se constitui num conjunto de obras e serviços, com a finalidade de produzir e distribuir água para uma população em qualidade e quantidade compatível com as suas necessidades, para fins de consumo doméstico, uso comercial, serviços públicos e de recreação, consumo industrial, segurança e outros usos.

A água é um elemento essencial à vida animal e vegetal. O homem necessita de água de boa qualidade e em quantidade suficiente para atender as suas necessidades, para proteção de sua saúde, melhoria de qualidade de vida e para propiciar o desenvolvimento econômico.

Com o aumento da densidade demográfica, a solução mais econômica e definitiva é a implantação de um sistema público de abastecimento de água, uma vez que se terá um melhor controle do que de sistemas individualizados. Também do ponto de vista sanitário a solução mais indicada é ainda a coletiva por apresentar melhor eficiência quanto ao controle do manancial e da qualidade de água servida para a população.

As soluções individuais para as áreas periféricas dos centros urbanos, não devem ser descartadas, pois serão úteis, salvam muitas vidas e minimizam o sacrifício da população, enquanto se aguardam soluções definitivas. Estas últimas geralmente envolvem altos custos e muitas vezes são morosas.

1.3 LODO DE ETA

A busca constante do homem para melhoria da qualidade de vida, principalmente nas áreas urbanas, tem como serviços essenciais dentre outros, os sistemas de abastecimento de água e de coletas de esgotos.

O equilíbrio homem-natureza não está ocorrendo, observando-se cada vez mais a degradação do meio ambiente, com o comprometimento dos recursos naturais, em particular os recursos hídricos decorrentes das atividades humanas, com comprometimento da qualidade da água das bacias hidrográficas dos grandes centros urbanos.

As empresas responsáveis pelo tratamento da água para consumo humano, utilizam o tratamento convencional (coagulação, floculação, decantação e filtração) com utilização de produtos químicos, gerando resíduos. Estes resíduos são gerados nos decantadores, na lavagem dos filtros e na lavagem dos tanques de preparação de soluções e suspensões de produtos químicos.

Segundo Cordeiro (1993), na América Latina e particularmente no Brasil poucos são os estudos realizados sobre o assunto, fato que já começa a trazer preocupações.

As indústrias da água têm se preocupado com a proteção dos mananciais, sem, contudo se preocupar com os corpos receptores do lodo de suas ETAs.

Levantamento realizado por Cordeiro (1993), mostrou que a sistemática de gestão das ETAs é bastante parecida em todo o Brasil. Dessa forma, diariamente são gerados no Brasil alguns milhões de toneladas de rejeitos que são dispostos no ambiente.

Um sistema de tratamento de água para abastecimento é similar a qualquer indústria, onde a matéria prima (água bruta) é trabalhada resultando num produto final (água tratada) com geração de resíduos (lodo).

Com o surgimento das séries de normas da *International Organization for Standardization* (ISO), consecutivamente, ISO 9000 e ISO 14000 tendo como enfoque a melhoria dos serviços prestados à população, o gerenciamento adequado dos sistemas de tratamento de água potáveis e residuárias, é fundamental para que não prejudiquem o meio ambiente.

Os lodos gerados em uma ETA têm características bastante variadas, dependendo das condições apresentadas pela água bruta, dosagens e produtos químicos utilizados, forma de limpeza dos decantadores, entre outros fatores.

Um dos maiores problemas é o desconhecimento das características dos sólidos presentes no lodo.

- **Buscas de alternativas de redução de volume do lodo de ETA**

Para redução de volume, tratamento e disposição dos lodos de ETAs tem sido utilizados alguns métodos tradicionais empregados para resíduos de estações de tratamento de esgotos sanitários e industriais.

A definição do tipo de método a ser utilizado depende de vários fatores podendo-se citar: área necessária para a implantação, custo da área, distância da estação ao ponto de lançamento dos efluentes, condições climáticas, custo dos equipamentos, operação da estação e equipamentos, recursos humanos qualificados, condições de condicionamento, entre outros.

Na figura 1, tem-se esquematicamente, as formas de redução de volume do lodo de ETA, e os meios usuais para se atingirem o objetivo proposto (CORDEIRO, 1993).

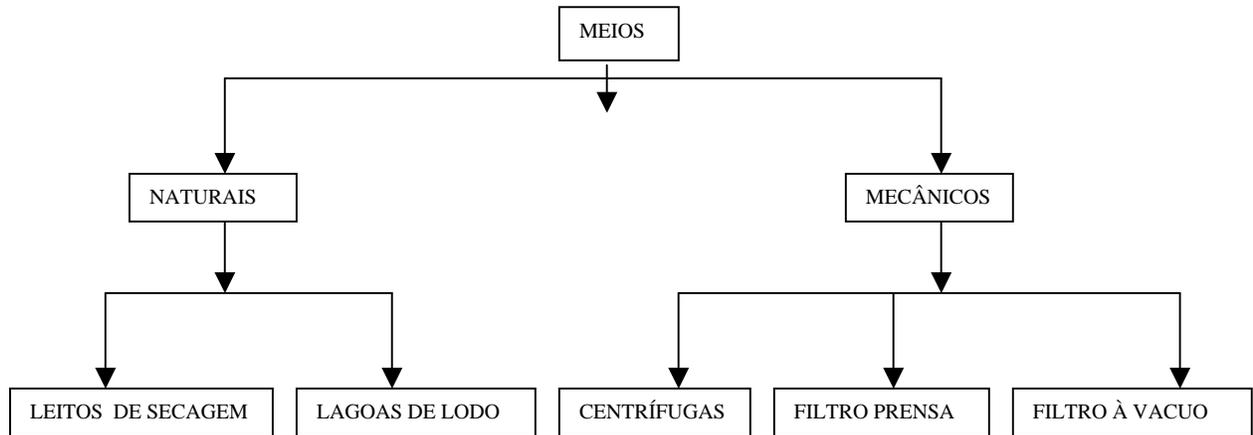


Figura 1 - Formas de redução de volume de lodo.

FONTE: Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Efluentes Líquidos de ETAs.

Escola de Engenharia de São Carlos, USP, página 15, 1993.

• Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETA

A partir da década de 1990 a tendência em relação às técnicas de tratamento de águas para abastecimento consiste na busca de sistemas que proporcionem a geração de quantidades de lodo menores que aquelas produzidas em Estações de Tratamento de Água (ETAs) convencionais, as quais empregam unidades de decantação antecedendo o processo de filtração da água destinada ao consumo humano.

Dentre as tecnologias que utilizam a coagulação química como base para a remoção de impurezas da água e que incorporam essa característica de menor produção de lodos, pode-se citar a técnica de filtração direta possível de ser empregada dependendo da qualidade da água do manancial. Nos sistemas que utilizam à filtração direta, são eliminadas as unidades de decantação e, algumas vezes, até mesmo os floculadores. As dosagens de coagulante são reduzidas significativamente, comparadas àquelas aplicadas no tratamento convencional, resultando em menores massas de lodo produzidas na ETA.

Porém, muitas vezes a água bruta a ser tratada apresenta características que impossibilitam a adoção da filtração direta, requerendo a utilização de unidades de pré-clarificação antecedendo a filtração. Nesses casos, dependendo das características do manancial, pode ser empregada, em substituição aos decantadores, unidade de flotação por ar dissolvido. Na década de 1990, a opção por esse tipo de alternativa, tem sido verificada com crescente frequência, devido às vantagens, podendo-se destacar: i) requer tempos de floculação menores; ii) opera com taxas de filtração significativamente maiores, resultando em menores áreas de implantação; iii) permite arraste de parcela de substâncias voláteis porventura presente na água, devido à enorme concentração de micro-bolhas de ar que atuam na flotação; iv) é capaz de produzir lodo espessado, com concentração de sólidos na faixa de 3 % a 6 % (desde que possua raspadores de superfície); e v) requer menores dosagens de coagulante, resultando em geração de menor massa de sólidos na ETA.

No entanto, ainda, verifica-se no Brasil a presença de poucas ETAs com filtração direta e menor número ainda de ETAs com unidades de flotação por ar dissolvido. A grande maioria dos sistemas de tratamento de água em operação no país é do tipo convencional com ciclo completo, ou seja, possuem grandes unidades de decantação após flocladores antecedendo as unidades de filtração. Nesse tipo de sistema, a maior parte dos sólidos presentes na água é removida nos decantadores e acumulada no fundo dos mesmos na forma de lodo.

Esse lodo geralmente se encontra bastante diluído, necessitando ser submetido a operações que visam a sua concentração, ou seja, a remoção de parcela da água presente nesse lodo antes de sua destinação final.

Para destinação final do lodo de ETAs, há várias opções possíveis de serem adotadas, dependendo da análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental para cada caso, tais como:

disposição em aterros sanitários; aplicações industriais diversas, como exemplo, na fabricação de tijolos ou outros materiais de construção; e, incineração dos resíduos.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos visando á busca de novas alternativas para destinação desse tipo de resíduo.

- **Impactos ambientais e toxicidade dos resíduos de ETA**

A toxicidade potencial dos lodos de estações de tratamento de água, para plantas, seres humanos e organismos aquáticos, depende de fatores tais como: características da água bruta; produtos químicos utilizados no tratamento; possíveis contaminantes contidos nesses produtos; reações químicas ocorridas durante o processo; forma de remoção e tempo de detenção dos resíduos nos decantadores; características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo receptor, etc.

As águas superficiais utilizadas como mananciais estão sujeitas à contaminação por formas naturais, decorrente da ação da água sobre as rochas e também por decorrência de ações sobre o meio, tais como: aplicação de fertilizantes, pesticidas e disposição de resíduos industriais. Este aspecto tem grande importância, pois essas substâncias poderão estar presentes nos resíduos gerados.

Quando é utilizado o sulfato de alumínio como coagulante primário, os possíveis compostos formados no processo dependerão do pH do meio, da presença de ligantes e hidróxidos na água bruta. Os caminhos da transferência do alumínio no tratamento da água é um fato complexo e poucos têm sido os trabalhos no sentido de melhor esclarecimento desses pontos. Esse transporte de formas de alumínio no processo pode se dar através da água filtrada e distribuída à população ou para as partículas retidas nos decantadores e nos filtros das ETAs.

Os resíduos dos decantadores têm em sua composição grandes concentrações de alumínio, quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante primário. Esse material, quando

disposto em rios com baixa velocidade ou lagos, poderá causar problemas, principalmente nas camadas mais profundas desses locais.

- **Caracterização química e mineralógica do lodo de ETA**

Submeteram-se o lodo da ETA da Ponta do Ismael à análise química pelo método da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes neste resíduo. Da mesma submeteu-se este resíduo à análise mineralógica pelo método da Difractometria de Raios X (DRX) para determinação qualitativa e quantitativa dos minerais presentes nas amostras do lodo.

- **Caracterização química**

Segundo Duarte *et al* (2003), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é utilizada em várias áreas do conhecimento, incluindo a mineralogia. O uso desta técnica vem se tornando mais freqüente por fornecer informações de detalhe, com aumentos de até 300.000 vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons no mineral, sob condições de vácuo. A incidência do feixe de elétrons no mineral promove a emissão de elétrons secundários, retro espalhados, *auger* e absorvidos, assim como de raios X característicos e de catodo luminescência (Reed, 1996).

Ainda segundo Duarte *et al* (2003), ao MEV pode ser acoplado o sistema de EDS (*Energy Dispersive System*), o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semi-quantitativa das amostras, a partir da emissão de raios X característicos. O limite de detecção é da ordem de 1%, mas pode variar de acordo com as especificações utilizadas durante a análise, como o tempo de contagem, por exemplo.

- **Caracterização mineralógica**

Segundo Bleicher & Sasaki (2000), a aplicação dos raios X nos estudos dos cristais pode ser considerada como um dos grandes marcos na história da cristalografia e da mineralogia.

Antes de 1912, os cristalógrafos haviam deduzido, a partir da clivagem, das propriedades óticas e das regularidades das formas externas, que os cristais possuíam uma estrutura interna ordenada. Mas tal pensamento sobre a geometria tinha apenas a força de uma hipótese. Os raios X tornaram possíveis não apenas medir a distância entre os sucessivos planos atômicos, mas também localizar a posição dos vários átomos ou íons no cristal, permitindo assim a determinação da estrutura cristalina.

Ainda segundo Bleicher & Sasaki (2000), os raios X ou radiações X foram descobertos acidentalmente pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, em 1895, e foram assim denominados porque a sua natureza era até então desconhecida. Diferente da luz visível, estes raios eram invisíveis, mas se propagavam em linhas retas e afetavam filmes fotográficos da mesma maneira que a luz. Por outro lado, eles tinham um poder de penetração muito maior e podiam atravessar facilmente o corpo humano, madeira, pedaços relativamente espessos de metal ou outros objetos opacos.

A difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização micro estrutural de cristais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências dos materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, além de geociências, entre outros.

A principal aplicação da difração de raios X refere-se à identificação de compostos cristalinos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos.

Os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades de átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada substância cristalina, da mesma forma que o padrão difratométrico por ela gerado (equivalente a uma impressão digital).

Um banco de dados contendo informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas de compostos cristalinos são mantidas e continuamente atualizadas pelo *International Center for Diffraction Data* (ICDD), com sede nos EUA. Atualmente estão disponíveis informações referentes a mais de 70.000 compostos cristalinos.

Várias estratégias de identificação podem ser empregadas, sendo que a dificuldade de identificação aumenta progressivamente com a elevação do número de fases cristalinas presentes na amostra.

Os métodos de análise quantitativa por difração de raios X desenvolveram-se propriamente com a utilização do difratômetro com contador *Geiger* e da sistematização proposta por Alexander e Klug, em 1948. A quase totalidade destes métodos utiliza comparações com amostras de referência. Por razões diversas, estes padrões não estão disponíveis comercialmente, devendo ser preparados caso a caso.

Mais recentemente, com a utilização de computadores mais potentes e a análise de todo o padrão do difratograma, utilizando as intensidades individuais de cada passo (*step*), foi desenvolvido, uma metodologia que permite o refinamento de estruturas cristalinas complexas, o método de Rietveld (1967,1969). Com base nesta metodologia, foi desenvolvido um procedimento de análise quantitativa, com reconhecida precisão.

A estrutura de materiais inorgânicos, a maioria cristalino, no estado sólido, é uma propriedade característica no controle das suas propriedades físicas e químicas. As técnicas utilizadas para identificar e investigar tais minerais envolve a caracterização das suas estruturas. Para melhor expressar e entender os princípios fundamentais da difração de raios X, a fim de examinarem minerais e materiais inorgânicos com mais propriedade, é importante ter uma idéia geral de cristalografia e determinação das estruturas.

A matéria no seu estado sólido pode ser descrita como:

amorfa: os átomos são arranjados ao acaso de maneira similar à desordem que se encontra em um líquido. Temos como exemplo o vidro.

crystalina: os átomos são arranjados em modelo regular, e existe um menor elemento de volume que pela repetição em três dimensões descrevem o cristal. Este menor elemento de volume é chamado de célula unitária (Figura 2). As dimensões da cela unitária são descritas pelos três eixos; a, b, c e os ângulos entre eles α , β e γ .

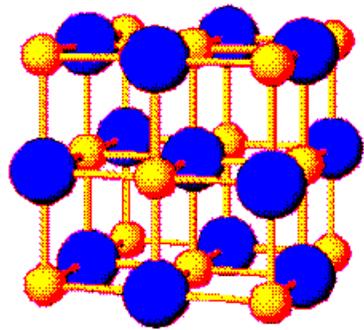


Figura 2 – Célula unitária do NaCl

Fonte: Introdução à Difração em Raios-X em Cristais, Universidade do Ceará, setembro de 2000, página 8.

Cerca de 95% de todos os sólidos podem ser descritos como cristalinos. Quando os raios X interagem com uma substância cristalina (fase), nós temos um espectro de difração. O espectro de difração de raios X de uma substância pura é a impressão digital da substância. O método de difração de raios X pelo método do pó, tal qual foi realizado nesta pesquisa, é o ideal para caracterização e identificação das fases cristalinas (BLEISHER & SASAKI, 2000).

1.4 ASPECTOS GERAIS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Segundo Zioni¹ apud Bruna, 2004 “o transporte e as comunicações em geral podem ser entendidos como meios de produção das localizações que caracterizam a organização espacial, ao se ter como pressuposto que as transformações na organização do espaço são respostas às diferentes exigências do desenvolvimento das forças produtivas que acompanham o processo de acumulação do capital e que a organização da produção implica na constante reorganização do espaço, na sua transformação.”.

Visando-se mostrar a evolução do transporte rodoviário ao longo do tempo, fez-se um breve histórico relatando o seu desenvolvimento no mundo, no Brasil, na Amazônia e finalmente no estado do Amazonas.

• Breve histórico do transporte rodoviário no mundo

As possibilidades comerciais do transporte rodoviário ficaram evidentes durante a primeira guerra mundial. A produção em larga escala de veículos militares ocorria na mesma época de seu aproveitamento no transporte de soldados e apetrechos para as diversas frentes de guerra.

A partir de então, e especialmente depois da segunda guerra mundial, o setor se expandiu de forma extraordinária. O uso comercial do transporte rodoviário cresceu em proporção muito superior ao da via férrea.

• Breve histórico do transporte rodoviário no Brasil

Segundo Gordinho (2003), com a necessidade de expansão da colonização do Brasil e a urgência de integrar a base econômica do país, após a Independência, viu-se a necessidade de ampliação dos meios de transportes. Apesar disso, foi só em 1808, com a mudança da família real

¹ ZIONI, Silvana. Análise histórica da produção de transporte urbano em São Paulo, in SANTOS, Enilson e ARAGÃO, Joaquim. Transporte em tempos de reforma. Editora LGE, s/d., pg. 409.

para o Rio de Janeiro, que foi esboçada, pela primeira vez, uma verdadeira abordagem dos transportes enquanto assunto de política pública, já que era preciso unir as grandes distâncias geográficas e interligar as diferentes regiões.

Em 1838 surgiram às primeiras idéias - não colocadas em prática - de um sistema viário, o Plano Rebelo, que propunha a construção de três estradas reais que, saindo da capital do Império, atingissem o Sudeste, o Noroeste e o Norte do país.

Ainda segundo Gordinho (2003), "A economia açucareira tinha na navegação o seu condicionante de expansão. Levava para o exterior a produção e trazia para o país mercadorias e a mão-de-obra indispensável, o escravo. A navegação costeira interligava os mais importantes pontos de povoamento, todos ainda na faixa litorânea. A imensidão amazônica recebia os barcos rio adentro, trazendo os produtos da floresta para o mercado". A descoberta do ouro em Minas Gerais, no século XVIII, também contribuiu para mudanças no sistema de transporte. Por isso, uma estrada ligou o Rio de Janeiro à Vila Rica, passando a ser o grande eixo de transporte de mercadorias.

Já na segunda metade do século XIX, as ferrovias começaram a ter forte presença no país, interligando áreas despovoadas do Brasil central à faixa litorânea. "A alta produtividade e a lucratividade das novas lavouras (principalmente ligadas ao café) exigiram a ocupação de terras sempre mais distantes."

As primeiras ferrovias tiveram forte presença no país, fazendo com que as estradas e a navegação marítima e fluvial fossem passando, paulatinamente, para segundo plano.

Ainda segundo Gordinho (2003), o fracasso da maioria das ferrovias brasileiras começou quando elas foram impossibilitadas de saldarem os juros dos empréstimos devidos ao governo federal. Por causa disso, elas acabaram transferindo seus equipamentos e propriedades ao Estado. "O avanço do projeto de industrialização, a partir de 1930, a integração do mercado

interno e a centralização estatal nos investimentos para o crescimento do país levaram ao abandono da prioridade para a ferrovia."

Ainda segundo Gordinho (2003), foi no governo de Juscelino Kubitschek, na década de 1950, que houve um impulso ao sistema rodoviário, principalmente por causa da instalação da indústria automobilística, consolidando esse sistema como a modalidade de integração do território brasileiro. "A construção de Brasília, o grande projeto de JK, deu impulso à interiorização do desenvolvimento e ao sistema rodoviário."

Nas décadas de 1940 e 1950, três fatores impulsionaram a construção de rodovias: a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), em 1946, que estabeleceu um imposto sobre combustíveis líquidos com a finalidade de financiar a construção de estradas pelos estados e União; a criação da Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRÁS), em 1954, que passou a produzir asfalto em larga escala; e a implantação da indústria automobilística nacional, em 1957.

A crise no setor de transportes, no Brasil, começou com o agravamento da crise internacional, entre 1976 e 1978, e com o esgotamento do padrão de crescimento do país. Por causa disso, foi imposta uma política de contenção de despesas públicas, levando à interrupção dos investimentos programados, atingindo frontalmente o setor de transportes.

Na década de 90, a ação descentralizadora do Estado brasileiro, no repasse de poderes e responsabilidades para os governos estaduais e municipais, traçou uma forte mudança no sistema de transporte. Hoje, a situação das rodovias federais é ruim, o setor ferroviário, privatizado, atende principalmente aos interesses de seus concessionários, os portos têm custos altos e operação ineficiente e as companhias aéreas estão em situação crítica.

Ainda segundo Gordinho (2003), "O transporte brasileiro tem gargalos que impedem seu desenvolvimento. O desbalanceamento de sua matriz, a legislação e a fiscalização

inadequadas, a deficiência da infra-estrutura de apoio e a insegurança das vias de comunicação são os principais”.

Segundo Bernucci et al (2007), de acordo com a pesquisa da CNT publicada em 2004, a malha rodoviária brasileira encontra-se em condições insatisfatórias aos usuários tanto quanto ao desempenho, quanto à segurança e à economia.

• O transporte rodoviário no estado do Amazonas

Antes do barco a motor, no fim do século XIX, as viagens do interior para Manaus, eram feitas em batelões, transportando bois e mercadorias diversas para suprir o comércio local. Eram tracionados por remo, varas grandes para impulsionar os batelões, puxado por cordas nas margens dos rios e vela de pano. O tempo médio de viagem do alto Solimões para Manaus era de noventa dias. Com o advento do barco a motor, este mesmo percurso passou a ser feito de cinco a seis dias, variando em função do nível das águas e potência do motor.

Em 1893 o atual governador do Amazonas, Eduardo Ribeiro, autorizou, através de contrato, o fazendeiro Sebastião Diniz como responsável de constituir uma equipe para abrir uma picada ligando Manaus a Boa Vista, no qual foram abertos 815 quilômetros de extensão. Após o término do mandato de Eduardo Ribeiro, a não conservação da via, possibilitou o retorno da selva a toda a área aberta pela picada. Collins com sua equipe, em 1927, voltou a abrir nova picada percorrendo 868 quilômetros de extensão de selva pelas matas e rios.

Em setembro de 1975 uma comitiva de oficiais do 6º Batalhão de Engenharia e Construção - 6º BEC saía de Boa Vista e chegava a Manaus, completando a primeira ligação rodoviária entre as capitais de Roraima e do Amazonas. O trecho Manaus - Boa Vista num total de 988 quilômetros deu-se efetivamente em 1976, integrando a bacia do Rio Branco ao Brasil e aos outros países das Américas com o asfaltamento da BR-174 completado no ano de 1998 (PORTAL AMAZÔNIA, 2007).

- **As rodovias da Amazônia**

Com o intuito de promover o progresso da Amazônia, foram implantadas, principalmente a partir de 1964, rodovias federais interceptando os rios em pontos navegáveis, ocupando espaços intermediários e efetivando a integração da região ao restante do país.

Segundo DNER (1973), esta expansão deu-se no período de 1964 a 1976 quando a rede rodoviária federal na Região Norte saltou de 2.071 km de extensão para 10.068 km de extensão, dos quais 1.560 km pavimentados. Na Amazônia Ocidental destaca-se a ligação Cuiabá - Porto Velho; Manaus - Boa Vista - Venezuela. No outro lado da região tem-se como destaque a Belém - Brasília. No sentido de leste para oeste a Transamazônica, cortada ao meio pela Cuiabá - Santarém. Como resultados, viram-se ligados ao Centro - Sul do país as capitais dos Estados do Amazonas, Pará, Acre, e os na época territórios e atuais estados de Roraima e Rondônia.

Ainda segundo do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1973), atual Departamento Nacional de Infra-estrutura do Transporte (DNIT), a essas rodovias-troncos, associaram-se 5.948 km de extensão de rodovias estaduais e 13.955 km de extensão de estradas municipais, constituindo quase 30 mil quilômetros, quatro vezes superior às rodovias existentes antes de 1964.

Ressalta-se também a rede hidrográfica com cerca de 20 por cento das reservas mundiais de água doce. A Amazônia possui cerca de 20 mil quilômetros de extensão de rios permanentes e navegáveis (DNER, 1973).

A situação atual das rodovias federais no estado do Amazonas não difere muito do ano 1973, nas quais a rodovia Transamazônica e BR – 319 (Manaus – Porto Velho) estão intrafegáveis e a BR – 176 (Manaus – Boa Vista) apresentam problemas técnicos e/ou de manutenção tais como: acostamento e pavimentação, praticamente em toda a sua extensão.

1.5 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Segundo Bernucci et al (2007), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a proporcionar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Portanto pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade.

Da mesma forma, pavimento pode ser definido como uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por intermédio da norma NBR-7207/82 define que:

“O pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, economicamente e simultaneamente, em seu conjunto”:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento".

Em obras de engenharia civil como construções de rodovias, aeroportos, ruas, etc, a superestrutura é constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assente sobre o terreno de fundação, considerado como semi-espaço infinito e designado como subleito (SENÇO,1997).

Segundo Medina (1997), consideram-se tradicionalmente duas categorias de pavimentos:

- pavimento flexível: constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente.
- pavimento rígido: construído por placas de concreto (raramente é armado) assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.

Quando se tem uma base cimentada sob o revestimento betuminoso, o pavimento é dito semi-rígido. O pavimento reforçado de concreto asfáltico sobre placa de concreto é considerado como pavimento composto.

Perde o sentido a definição das camadas quanto às suas funções específicas e distintas umas das outras, à medida que se passou a analisar o pavimento como um sistema de camadas e a calcular as tensões e deformações (MEDINA, 1997).

A partir daí começou-se a considerar a absorção dos esforços de tração pelas camadas de rigidez como o concreto asfáltico.

Ainda, segundo Medina (1997), “A mecânica dos pavimentos é uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos a cargas dos veículos. Faz-se o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com a utilização de programas de computação. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga” (Figura 3)

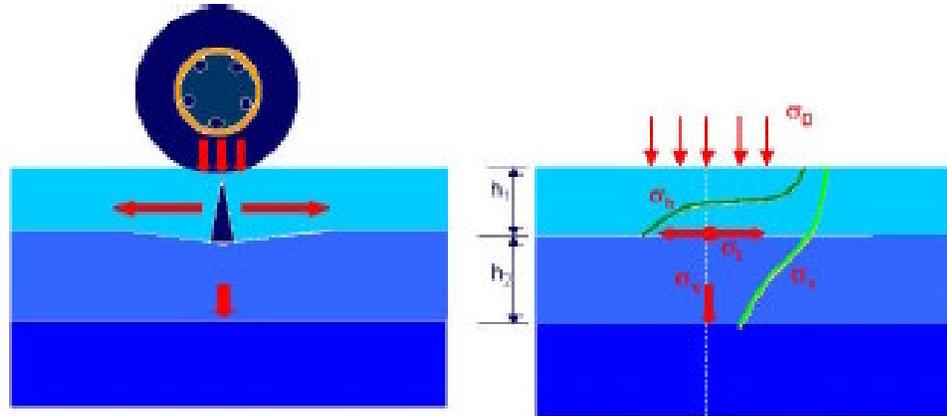


Figura 3 – Tensões em um pavimento (MEDINA, 1997)

FONTE: O pavimento rodoviário. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de engenharia. Departamento de transporte e geotecnia. Página 5.

- **Aspectos funcionais do pavimento rodoviário**

Quando o pavimento é solicitado por uma carga de veículo Q , que se desloca com uma velocidade v , recebe uma tensão vertical σ_0 (de compressão) e uma tensão horizontal τ_0 (de cisalhamento), conforme mostra a figura 4.

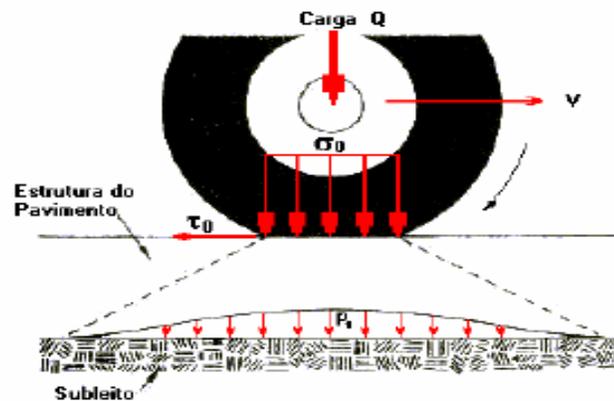


Figura 4 – Cargas atuantes em um pavimento (Santana 1993)

FONTE: O pavimento rodoviário. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de engenharia. Departamento de transporte e geotecnia. Página 2.

As camadas componentes da estrutura de um pavimento, têm a função de diluir a tensão vertical aplicada na superfície, de tal forma que o subleito receba uma parcela bem menor desta tensão superficial (ρ_1).

• Pavimentos flexíveis

São aqueles constituídos por camadas que não trabalham à tração. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas. Um exemplo de uma seção típica pode ser visto na figura 5.

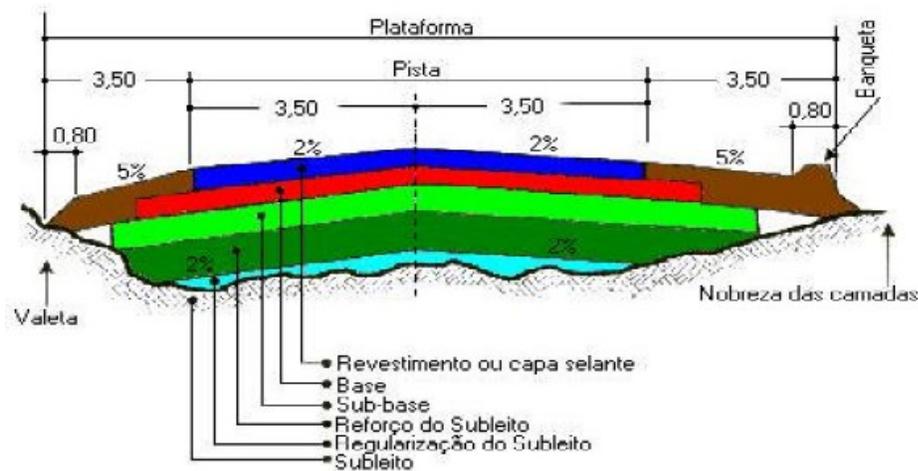


Figura 5 – Seção transversal típica de pavimento flexível

FONTE: O pavimento rodoviário. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de engenharia. Departamento de transporte e geotecnia. Página 3.

No dimensionamento tradicional são consideradas as características geotécnicas dos materiais a serem usados, e a definição da espessura das várias camadas depende do valor do CBR e do mínimo de solicitação de um eixo padrão (8,2 ton.).

• Pavimentos rígidos

São constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto de cimento Portland, as quais são apoiadas em uma camada de transição, que são as sub-bases.

A determinação da espessura é conseguida a partir da resistência à tração do concreto e são feitas considerações em relação à fadiga, coeficiente de reação do subleito e cargas aplicadas.

Os pavimentos rígidos são pouco deformáveis com uma vida útil maior que os pavimentos flexíveis.

O dimensionamento do pavimento flexível é comandado pela resistência do subleito e do pavimento rígido pela resistência do próprio pavimento.

Seção característica de um pavimento rígido pode ser visto na figura 6.

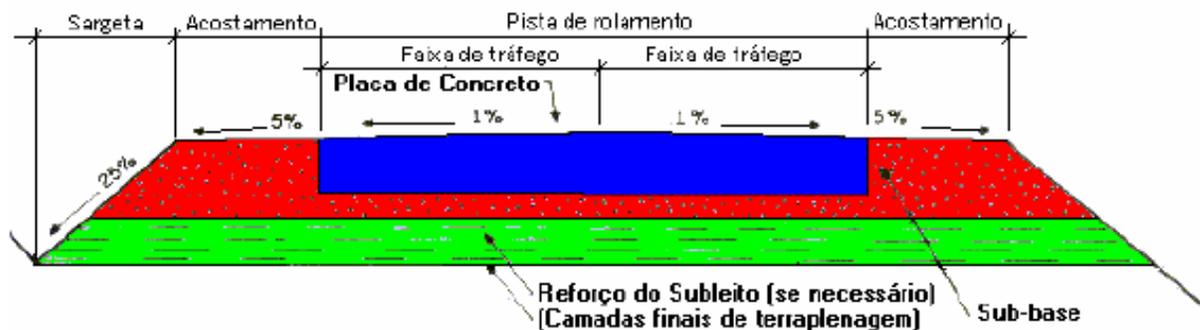


Figura 6 – Seção transversal típica de um pavimento rígido

FONTE: O pavimento rodoviário. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de engenharia. Departamento de transporte e geotecnia. Página 4.

• Pavimentos semi-rígidos (semi-flexíveis)

Situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso das misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume dentre outras, que apresentam razoável resistência à tração.

1.6 CAMADAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS

A nomenclatura descrita a seguir refere-se às camadas e aos componentes principais que aparecem numa seção típica de pavimentos flexíveis e rígidos.

- **Subleito**

É o terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. Deve ser considerado e estudado até as profundidades em que atuam significativamente as cargas impostas pelo tráfego (de 60 a 1,50 m de profundidade).

Se o Índice de Suporte Califórnia – ISC ou California Bearing Ratio - CBR como é conhecido originalmente, do subleito for $< 2\%$, ele deve ser substituído por um material melhor, ($2\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$) até pelo menos 1,00 metro.

Se o CBR do material do subleito for $\geq 20\%$, pode ser usado como sub-base.

- **Regularização do subleito (nivelamento)**

É a operação destinada a conformar o leito, transversal e longitudinal. Poderá ou não existir, dependendo das condições do leito. Compreende cortes ou aterros em até 20 cm de espessura.

- **Reforço do subleito**

É a camada de espessura constante transversal e variável longitudinal, de acordo com o dimensionamento do pavimento. Por circunstâncias técnicas e econômicas, será executada sobre o subleito regularizado.

Serve para melhorar as qualidades do subleito e regularizar a espessura da sub-base.

Nos pavimentos rígidos também são feitas às operações de regularização do subleito e reforço, quando necessário.

- **Leito**

É a superfície do subleito (em área) obtida pela terraplanagem ou obra de arte e conformada ao greide e a seção transversal.

- **Sub-base**

Camada complementar à base. Deve ser usada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço, por circunstâncias técnicas e econômicas. Pode ser usada para regularizar a espessura da base.

A camada da sub-base tem o objetivo de evitar o bombeamento dos solos do subleito. A placa de concreto de cimento tem a função de servir ao mesmo tempo como base e revestimento.

- **Base**

Camada destinada a resistir e distribuir as outras camadas, os esforços advindos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento.

- **Revestimento**

É a camada, tanto quanto possível impermeável que recebe diretamente a ação do movimento dos veículos. Esta camada tem a função econômica de:

- melhorar as condições do pavimento quanto à comodidade e segurança;
- resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando-o mais durável.
- ser resistente ao desgaste.

Esta camada também é chamada de capa ou camada de desgaste.

- **Acostamento**

Parte da plataforma contígua à pista de rolamento, destinado ao estacionamento de veículos, ao trânsito em caso de emergência e ao suporte lateral do pavimento.

1.7 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Como a proposta do trabalho prende-se a utilização de pavimento flexível, mais precisamente o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), largamente utilizado na região Amazônica, necessitando-se para isto, definir suas propriedades.

• Petróleo

As reservas e a produção de petróleo mundial tiveram variação de 0,6 % e 1 % respectivamente, tendo a produção atingindo o patamar de 81,1 milhões de barris por dia. Em termos de reservas, quem apresentou a mais expressiva redução foi o México com 7,7 %, e os maiores incrementos de reservas na China e no Brasil com 6,4 % e 4,7 %, respectivamente, o que demonstra os investimentos realizados por esses países na descoberta de novas fontes do produto. No âmbito da produção cabe destacar a redução da produção americana em 5,5 %, justificado em grande parte pelos prejuízos nas refinarias causados na passagem do furacão *Katrina*, e o aumento de 11,1 % da produção brasileira.

A produção interna teve um aumento de aproximadamente 12 %, atingindo a marca de 1,68 milhões de barris por dia, sendo a maioria proveniente das plataformas da Bacia de Campos (83 %). A capacidade de refino permaneceu praticamente inalterada, embora a utilização dessas refinarias tenha chegado a níveis máximos na história, acompanhando a tendência internacional que atingiu no ano 86 % de utilização da capacidade instalada.

O consumo interno dos derivados de petróleo em 2005, medidos em quantidade de metros cúbicos, não apresentou variação relevante no ano. Cabe destacar a significativa diminuição da gasolina de aviação e do querosene iluminante.

Em 2006 o Brasil atingiu auto-suficiência em petróleo na relação, produção/consumo de barris diários. Entretanto, esta auto-suficiência não é completa, pois o óleo e derivados consumidos não são os mesmos produzidos/refinados.

A economia global continuou com um ritmo de crescimento elevado em 2005 na ordem de 3,6 % ao ano. Apesar de inferior ao de 2004 (4 % ao ano), é um crescimento significativo o que automaticamente eleva o aumento de consumo de energia globalmente. Entretanto, o aumento do preço do óleo fez desacelerar o consumo desse produto na matriz energética mundial.

O ano de 2005 foi um ano com menor crescimento para o setor, tanto no consumo quanto na produção. Um dos fatores que explicam isso é, além do aumento do preço, a diminuição do consumo no continente asiático. A Índia decidiu substituir as importações de óleo pelas importações de gás natural e carvão mineral. Um fator relevante é que a utilização da capacidade das refinarias está quase chegando ao limite (86,3 %), dificultando a expansão da produção. Muitos dos investimentos do setor estão concentrados nessa área. Há de se ressaltar também o fator China. O país foi responsável por metade do crescimento de consumo de energia em 2005 e agora é o segundo maior consumidor de petróleo do mundo, ultrapassando o Japão (DNPM, 2006).

- **Asfalto ou cimentos asfálticos de petróleo (CAP)**

Segundo Pinto (2002), a palavra asfalto tem origem do termo *Acádio* “*Asphaltu*” ou “*Sphallo*” que significa “esparrear”. Posteriormente por sua natureza aglutinante passou a chamar-se “firme”, “estável”, “seguro”. É um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo homem.

Segundo Amaral (2000), o *The Asphalt Institute* (1947), mostra a evolução do asfalto conforme a cronologia a seguir:

Pré-história	Presença de esqueletos de animais pré-históricos preservados intactos na superfície de depósitos de asfalto, La Brea, Los Angeles, Califórnia.
Período de 3.200 a 540 A.C.	Escavação arqueológica constatam o uso do asfalto na Mesopotâmia e no Vale dos Indus, como cimento para alvenaria e rodovias e como impermeabilizantes para salas de banho e reservatório de água.
300 A.C.	Utilização do asfalto em mumificação no Egito.
1.802 D.C.	Utilização de rochas asfálticas em telhados, pontes e calçadas na França.
1.838 D.C.	Importação de rochas asfálticas para sua utilização em construções de calçadas na Filadélfia, Estados Unidos.
1.876 D.C.	Utilização de asfalto importados de lagos em pavimentação asfáltica, na cidade de Washington, Estados Unidos.
1.902 D.C.	Refinamento do asfalto de petróleo nos Estados Unidos da América.

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) (1994), a partir de 1909 teve início a utilização do asfalto derivado de petróleo no Brasil, que apresentou maiores vantagens que o asfalto natural pelas suas características de economia e pureza.

Os asfaltos são materiais aglutinantes, com cor preta ou parda escura, constituídos por misturas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Podem ser encontrados em estado natural ou obtidos da refinaria de petróleo.

O Asfalto Natural (AN) surge à superfície da terra e sofre uma espécie de destilação natural pela ação do vento e do sol, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo muito duro que é o asfalto natural. As grandes jazidas em forma de lagos estão localizadas na Trindade e Venezuela.

O Asfalto de Petróleo (AP) é obtido através de uma destilação fracionada de certos tipos de petróleo.

• **Química do asfalto**

Os asfaltos podem ser considerados como uma dispersão coloidal de partículas de asfaltenos em um meio oleoso denominados maltenos, formando a dispersão coloidal.

É de grande complexidade a natureza química dos constituintes do petróleo desde a sua origem, até a refinaria, para se transformar em asfalto.

O avanço dos métodos de fracionamento tem permitido grandes progressos nessa área e, estudos recentes, são direcionados para relacionar a constituição dos asfaltos às suas propriedades físicas e reológicas.

Os processos de fracionamento mais simples separam as frações dos asfaltos em asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos têm as características de sólido duro e quebradiço, na temperatura ambiente de 25⁰ C. Logo a presença dos asfaltenos associa-se à consistência dos asfaltos.

Os maltenos constituem a fase de aspecto oleoso e podem ser separados em óleos aromáticos e óleos saturados.

Existe ainda uma pequena fração do total dos constituintes dos asfaltos que são os carbenos e os carbóides.

- **Reologia do asfalto**

Segundo Amaral (2000), “Reologia é a ciência que estuda a deformação e fluxo dos materiais, seja nas formas líquido, liquefeito ou sólido em termos de elasticidade e de viscosidade do material”.

Pode-se considerar que o asfalto é constituído por uma matriz viscosa, os maltenos, reforçada por uma estrutura de asfaltenos que governa o comportamento reológico do asfalto. Portanto o asfalto é um material visco-elástico que pode exibir tanto um comportamento elástico como viscoso, ou uma combinação destes dois comportamentos dependendo da temperatura e do tempo de observação.

Em temperaturas relativamente baixas e/ou em altas taxas de carregamento, o asfalto reage como um sólido elástico. Com o aumento de temperatura

- **Principais degradações sofridas pelo pavimento rodoviário flexível**

Um pavimento rodoviário flexível está sujeito a desgastes durante seu tempo de vida útil, diminuindo conseqüentemente a sua capacidade estrutural e a sua funcionalidade para o qual foi projetado. Do ponto de vista estrutural, as fendas por fadiga das misturas betuminosas e as deformações permanentes são as principais degradações que contribuem para a redução da qualidade do pavimento.

- **Fadiga**

Segundo Gontijo (1980), a fadiga é um processo de degradação estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material, quando submetido, em um ou em vários pontos, a tensões ou deformações repetidas, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após um determinado número de repetições.

Segundo Motta & Pinto (1994), a fadiga representa o principal mecanismo de ruptura dos pavimentos asfálticos no Brasil, determinando o fim da vida útil estrutural do pavimento devido ao surgimento de trincas causado pela repetição das cargas e das conseqüentes deformações elásticas.

Segundo Balbo (1997), a terminologia brasileira de classificação de defeitos, classifica fissuras e trincas dentro de um grupo geral de defeitos chamados fendas. Uma fissura é uma fenda perceptível a olho nu a partir de distância inferior a 1,5 m; trinca são as fendas maiores que as fissuras considerando o critério adotado para definir fissuras.

As trincas são classificadas como transversais (se aproximadamente perpendiculares ao eixo da estrada) e longitudinais (se aproximadamente paralelas ao eixo da estrada). Serão consideradas curtas para extensão inferior a 1,0 m, e consideradas longas em caso contrário.

Existem ainda as trincas interligadas, que são divididas em duas categorias: trincas denominadas couros de jacaré, com contornos erráticos, e trinca em bloco, apresentando os contornos bem definidos em forma de bloco.

As origens possíveis para trincas couro de jacaré são:

- processo de fadiga do pavimento asfáltico, prematuro ou não, a ser considerado no caso de extensas áreas afetadas. Caso ocorra prematuramente e não motivado por razões de natureza resiliente, deverá ser avaliado na elaboração da mistura;
- processo de ruptura multi-pontos no caso de associação com deformações plásticas localizadas, em geral motivadas por perda de resistência e/ou deformabilidade local excessiva do subleito e/ou outras camadas do pavimento;
- reflexão acelerada de trincas de idênticas natureza pré-existentes em uma superfície asfáltica que recebeu o reforço.

“O aparecimento de fendas à superfície do pavimento, responsável pela progressiva degradação das camadas betuminosas do pavimento, é um fenômeno que deve ser retardado de modo a assegurar um bom funcionamento de toda a estrutura. As fendas permitem a entrada de água para as camadas granulares e solo de fundação, provocando uma diminuição da capacidade de suporte do pavimento, contribuindo ainda para o aumento do desconforto e redução da segurança durante a circulação. As fendas são ainda responsáveis pela concentração de tensões nas camadas do pavimento, acelerando a ruína de toda a estrutura” (PAIS, 1999).

Segundo Gotijo (1980), “No que diz a respeito aos parâmetros que influenciam o valor das tensões e extensões que se desenvolvem nas camadas de um pavimento, em particular nas suas faces inferiores, são considerados como principais, os seguintes”:

- as características do tráfego: carga por roda, pressão de contato, velocidade do veículo, intensidade do tráfego;
- as características próprias do pavimento: espessura e rigidez das camadas;
- as condições climáticas, em particular, a temperatura.

A variação das tensões de tração que se desenvolvem na base de um revestimento betuminoso com os fatores citados acima, apesar de não ocorrer de forma sistemática, permite constatar que em geral a tensão de tração:

- diminui com o aumento da temperatura e conseqüentemente com o decréscimo do módulo de rigidez;
- diminui com o aumento do módulo da base (fenômeno da solidariedade);
- varia relativamente pouco com a espessura da camada de base (quando esta é superior a 20 cm) e com o módulo do solo de fundação de outra parte;
- diminui com o aumento da espessura do próprio revestimento e aumenta com o acréscimo do módulo de rigidez do concreto asfáltico”.

- **Deformação permanente**

Segundo Balbo (1997), o afundamento de um pavimento rodoviário é decorrente da deformação permanente na superfície do pavimento.. Dois casos são tratados distintamente: quando não há elevação lateral ao afundamento e quando ocorrem elevações laterais ao afundamento. No primeiro caso é dito de consolidação. Até 6,0 m de extensão o afundamento é considerado localizado e para extensão maior e ao longo das trilhas de roda, o afundamento é considerado de consolidação da trilha. No segundo caso é dito plástico.

Têm-se como origens possíveis do afundamento local de consolidação:

- início do processo de solapamento em consequência da ruptura de tubulações enterradas;
- perda da resistência do pavimento e ruptura de camadas inferiores motivada por saturação das camadas do pavimento;
- deformação acentuada das camadas do pavimento com diminuição de volume.

Como origens possíveis do afundamento da trilha de consolidação, tem-se:

- as camadas inferiores isoladamente ou em conjunto sofrem processo de deformação permanente com alteração de volume, com eventual contribuição do revestimento asfalto no processo.

As origens possíveis do afundamento em trilhas de roda são:

- fluência excessiva da mistura asfáltica do revestimento em função do tráfego e de temperaturas elevadas;
- ação contínua e intensa do tráfego sobre a mesma faixa do pavimento;
- combinação de deformações plásticas das várias camadas do pavimento.

Segundo Bouldin & Collins (1992), os ligantes à temperaturas elevadas (60 °C) as suas propriedades mecânicas tem influência significativa na resistência à deformação permanente em misturas betuminosas à quente.

Segundo Corté *et al* (1994), o tipo de asfalto interfere no melhoramento da resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica.

Segundo Pais (1999), “As deformações permanentes causam principalmente desconforto e insegurança na circulação rodoviária. A solução para este fenômeno passa, na maior parte dos casos, pela escolha adequada da composição das misturas betuminosas, assim como pela correta escolha dos materiais granulares e dos sistemas de drenagem do pavimento”.

Para Motta & Pinto (1994), um dos principais mecanismos que determinam o fim da vida útil estrutural de um pavimento é a deformação permanente que forma o afundamento de trilha de roda.

Segundo Souza *et al* (1991)² apud Sá & Motta (1996), uma das causas mais prováveis da deformação permanente em muitas misturas é o acúmulo de tensões cisalhantes permanentes na parte superior da camada do pavimento em concreto asfáltico. Estas deformações são maiores em áreas de elevado cisalhamento, ou seja, próxima às bordas.

No quadro 1 são mostrados os principais fatores que influem nas deformações permanentes das misturas para concreto asfáltico.

² Souza et al (1991) Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Publicação SHRP-A/IR-91-104 do Strategic Highway Research Program, 120p.1991.

FATOR	VARIAÇÃO DO FATOR	EFEITO DA VARIAÇÃO DO FATOR NA RESISTÊNCIA ÀS D.P.
Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumento
Granulometria	Aberta para contínua	Aumento
Forma	Redonda para angulosa	Aumento
Tamanho	Aumento do tamanho máximo	Aumento
Rigidez ^(a)	Aumento	Aumento
Quantidade de ligante	Aumento	Redução
Volume dos vazios ^(b)	Aumento	Redução
Vazio dos agregados minerais	Aumento	Redução (c)
Método de compactação ^(d)	-	-
Temperatura	Aumento	Redução
Estado de Tensão/Deformação	Aumento da pressão de contato dos pneus	Redução
Repetições do carregamento	Aumento	Redução
Água	Seco para molhado	Redução, se a mistura for sensível a água

Quadro 1 – Fatores que influem nas deformações permanentes (D.P.) das misturas para concreto asfáltico (SOUZA *et al* (1991) *apud* (COELHO, 1994).

FONTE: Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Publicação SHRP-A/IR-91-104 do Strategic Highway Research Program, 120p.1991.

No quadro (1) as seguintes condições anotadas são:

(a) Refere-se à rigidez na temperatura em que a propensão às deformações permanentes está sendo determinada. O uso de produtos modificadores das características do ligante pode ser

usada para aumentar a rigidez do material nas temperaturas críticas, com conseqüente redução da sua propensão às deformações permanentes.

(b) Quando o volume de vazios for inferior a 3 % a propensão às deformações permanentes aumenta.

(c) Há questionamento para valores muito baixo de VAM, inferiores a 10 %, devem ser evitados.

(d) A metodologia de compactação adotada no laboratório ou no campo, pode influir na estrutural do material e conseqüentemente na sua propensão às deformações permanentes.

Segundo Motta *et al* (1996), “O desempenho estrutural de um pavimento pode ser medido sobre dois aspectos, relacionado aos defeitos resultantes das duas parcelas da deformação total: a deformação elástica ou resiliente e a deformação plástica ou permanente. A repetição das cargas pelo tráfego leva ao surgimento das trincas de fadiga, associada a parcela elástica da deformação total, e aos afundamentos, especialmente nas trilhas de roda, associados às parcelas elásticas ou permanentes.

O afundamento da trilha de roda é resultante do somatório das deformações permanentes que ocorrem a cada passagem de um veículo, sendo acumulativo, podendo-se ter dois tipos de afundamento da trilha de roda nos pavimentos com revestimentos de mistura asfáltica: um resultante da contribuição de todas as camadas e subleito, e outro resultante da deformação exclusiva (ou preponderante) da própria mistura asfáltica; então, além das condições de tráfego e ambientais, também as propriedades da própria mistura asfáltica são de suma importância no entendimento do fenômeno e conseqüentemente no controle de sua ocorrência. A revisão dos métodos da dosagem das misturas asfálticas, bem como a adição dos modificadores aos ligantes asfálticos, são algumas tentativas par melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos”.

1.8 CONCEITUAÇÃO DE FÍLER NA MISTURA ASFÁLTICA

O filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland, que, devido as suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades da mistura asfáltica, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade.

Os fileres podem ser materiais naturais ou minerais inorgânicos processados. É importante a uniformidade das propriedades, e, especialmente da finura.

O material de enchimento ou filer, usado em concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ), pode ser constituído por pó calcário, cal extinta, pó-de-chaminé ou outro material que satisfaça os requisitos:

- livre de torrões de argila;
- inerte em relação aos componentes da mistura;
- uniforme em qualidade, seco e sem grumos;
- passando 65 % na peneira de 0,075mm, conforme tabela 1.

Segundo Pinto (2003), a execução do concreto asfáltico sem a utilização do *filler* comercial tem gerado muitas controvérsias. Concretos asfálticos executados no Brasil sem *filler* comercial tiveram um bom desempenho em serviço.

Peneiras (aberturas das malhas)	%, em peso, passando
0,42 mm	100
0,18 mm	95 – 100
0,075 mm	65 – 100

Tabela 1 – Percentagem de material (fíler) em peso passando na peneira

FONTE: Material para enchimento para misturas betuminosas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER – EM 367/97, página 2.

1.9 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS

Os materiais pétreos usados em pavimentação normalmente são conhecidos sob a denominação genérica de agregados, podendo ser naturais ou artificiais. Os primeiros são encontrados na natureza, como pedregulho e o seixo, quanto os segundos compreendem os que necessitam de transformação física e química do material natural para sua utilização, nos quais estão incluídas, a escória e argila expandida (PINTO, 2003).

• Classificação

Segundo Pinto (2003), os agregados usados em pavimentação são classificados segundo a natureza, tamanhos e distribuição dos grãos.

Quanto à **natureza** das partículas:

- **agregados naturais** constituídos de grãos provenientes da alteração das rochas por processo de intemperismo ou produzidos por processos de britagem nos quais se enquadram os pedregulhos, seixos, areias e britas.

- **agregados artificiais** grãos provenientes de sub produtos de processo industrial por transformação física e química do material natural, como escória de alto forno, argila expandida, etc.

Quanto ao **tamanho** dos grãos:

- **agregado graúdo**: material retido na peneira com 2,0 mm de abertura. Podendo-se citar, a pedra britada, o cascalho, a escória de alto forno e o seixo rolado.

A norma DNIT 031/2004 – ES define **agregado graúdo**, como materiais granulares comprovadamente inertes e de características semelhantes, de diâmetro superior a 4,8mm.

O agregado graúdo deverá ainda ter as seguintes características:

a) desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50 % (DNER – ME 035); admitindo-se excepcionalmente agregados com valores maiores, caso tenham apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior;

b) índice de forma superior a 0,5 (DNER – ME 086/94) e partículas lamelares inferiores a 10 %;

c) durabilidade, perda inferior a 12 % (DNER – ME 089/94).

• **agregado miúdo:** material que passa na peneira com 2,0 mm de abertura e fica retido na peneira com 0,075 mm de abertura.

Ainda segundo a norma a norma DNIT 031/2004 - ES, o agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas Especificações Complementares. Suas partículas devem ser resistentes individualmente, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55 % (DNER – ME 054/97).

Quanto à **distribuição** ou **gradação** dos grãos

• **agregado de graduação densa:** apresenta curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, principalmente na peneira com 0,075 mm de abertura, suficiente para encher os vazios entre as partículas maiores.

• **agregado de graduação aberta:** apresenta curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, principalmente na peneira com 0,075 mm de abertura, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

• **agregado tipo macadame:** possui partículas de tamanho único, o chamado “*one site aggregate*”. Agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo.

Segundo Pinto (2003), as características tecnológicas de um agregado fazem a distinção entre os materiais, para se comprovar sua uniformidade, e definir a escolha do material, de forma adequada, as cargas que o pavimento irá suportar.

Segundo DNIT, Manual de pavimentação (1996), as características de um agregado tais como: a granulometria, massa específica, absorção, abrasão e adesividade, servem para assegurar uma fácil distinção de materiais, de modo a se poder comprovar a sua uniformidade, bem como a escolha de um material que resista, de forma adequada, as cargas que o pavimento irá suportar.

Portanto, para caracterização dos agregados utilizados na confecção dos corpos de prova para posteriormente serem submetidos aos ensaios mecânicos, levou-se em consideração:

- a **granulometria** do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, que é uma das características que asseguram estabilidade aos pavimentos, devido ao maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, desde a mais graúda à mais fina. A forma predominante entre os grãos de um agregado é avaliada por um índice, denominado Índice de Forma, obtido por ensaio normalizado pelo DNIT. Na construção de revestimentos asfálticos do tipo tratamento superficial é importante que a maioria dos agregados tenha a forma cúbica, enquanto do revestimento por mistura admite-se agregados com formas lamelares ou alongados.

Os agregados são os esqueletos da estrutura de um pavimento e a interação entre os grãos deve ser observada. Isto é necessário para se obter o maior atrito interno e maior estabilidade da mistura. As porcentagens em cada graduação devem ser tais que as partículas menores preencham os vazios deixados pelas maiores obtendo-se assim um conjunto de maior estabilidade.

A dimensão máxima característica do agregado é obtida pela abertura da peneira em que ficar retida, uma porcentagem acumulada do agregado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Os materiais pulverulentos são as partículas minerais com dimensão inferior a 0,075mm, incluindo os materiais solúveis em água, presentes nos agregados.

- a **massa específica e porosidade** do agregado

Segundo Frazão (2002), um agregado no seu estado natural apresenta-se como um conjunto de minerais interligados ocupando um determinado tamanho, constituído pelos minerais e pelos vazios entre estes. A maior ou menor quantidade de vazios gera menor ou maior compacidade do agregado, que refletirá numa maior ou menor massa específica e, por consequência, maior ou menor porosidade. Por esta razão, há diversas definições para a massa específica e para a porosidade.

A massa específica real permite a identificação do material. É sempre para um mesmo material, qualquer que seja sua forma. É a quantidade de matéria na unidade de massa, sob determinadas condições, isto é, considerando-se o grão como um sólido impenetrável pela água, ou melhor, sem poros. Esta definição despreza o volume de vazios; tem por isso, pouca importância prática, porque não existem agregados com compacidade absoluta.

Portanto, a definição de massa específica aparente é mais aplicável aos agregados, pois apresentará a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume aparente do agregado. O volume do agregado, por sua vez, compreende o volume dos minerais e o volume dos vazios. Depende da forma do grão.

Agregados com diferentes graus de compacidade apresentarão diferentes graus de porosidade. Em decorrência disto, resulta que a porosidade seja definida como sendo a relação entre o volume dos vazios e o volume das partículas para porosidade absoluta ou real, ou volume dos vazios e o volume do agregado para porosidade aparente.

- a **absorção** do agregado, é a quantidade de água, ou líquido qualquer capaz de preencher os poros. Esta propriedade representa a capacidade do agregado em absorver e reter a água nos seus poros (FRAZÃO, 2002).

A absorção pode ser obtida pela diferença entre a massa do agregado saturado e a massa do agregado seco, relacionado à massa do agregado seco, para se obter a capacidade de absorção em massa, ou em volume se os parâmetros citados representarem volumes.

A absorção será sempre menor que as porosidades absoluta e aparente, porque a água, ou outro líquido, não penetrará em todos os poros, pois muitos deles não são acessíveis.

A absorção é sempre determinada para um estado máximo de saturação dos poros pela água e corresponde, portanto, ao máximo teor de umidade que o agregado pode alcançar. Em outras palavras, corresponde ao grau máximo de saturação dos poros.

As propriedades dos agregados são muito influenciadas pela absorção da água. Agregados com alta absorção de água apresentam aumento na massa específica aparente saturada e na condutividade térmica, dentre outras, enquanto que a resistência mecânica diminui por enfraquecimento das ligações intergranulares.

É recomendável, portanto, que os mecânicos sejam executados no estado máximo possível de saturação do agregado que depende do tempo de exposição à água.

- a **abrasão** do agregado, representa a característica de perda de massa sendo tanto mais desgastável ou abrasível, quanto menor for a sua dureza. A dureza do agregado, por sua vez, é resultado da dureza dos seus minerais constituintes e do grau de compacidade ou de coerência do agregado e é definida como a propriedade que um agregado possui de se opor à penetração de um corpo estranho mais duro ou de ser riscado por ele (FRAZÃO, 2002).

A determinação da dureza do agregado de forma direta é uma prática complexa e os resultados podem não refletir a real propensão do agregado a se desgastar. Isto ocorre porque os

próprios minerais que o constituem apresentam diferentes graus de dureza. Além disso, a dureza dos agregados é influenciada pela sua clivagem, pela direção do eixo cristalográfico, bem como pela textura, estrutura e pela direção da sollicitação de desgaste em relação a estas feições.

A resistência ao choque e ao desgaste é associada à ação do tráfego ou aos movimentos recíprocos das diversas partículas. A resistência ao choque é avaliada pelo ensaio *Treton* e a resistência ao desgaste pelo ensaio *Los Angeles*, ambos normalizados pelo DNIT.

- a **adesividade** do agregado, é a propriedade que apresenta de reter uma dada substância na sua superfície, como por exemplo o ligante asfáltico.

A adesividade é um fenômeno de natureza físico-químico dependendo tanto da natureza do agregado como da composição química do betume. A variação no grau de adesividade é altamente dependente da composição mineralógica, a qual por sua vez determina as propriedades de superfície do agregado a ser envolto pelo betume, pois este se ligará ao agregado por forças de atração eletrostáticas

Em geral agregados básicos apresentam adesividade melhor ao ligante betuminoso do que os ácidos.

Um agregado de caráter ácido apresenta alto teor em sílica ($> 65\%$).

Quando o agregado é de caráter básico, além do oxigênio existirão átomos de elementos alcalinos (Na, K etc.) ou alcalinos-terrosos (Ca, Mg etc.) predominantes que geram cargas de sinal positivo na superfície do grão.

Os betumes têm, em geral, polaridade negativa e, por esta razão, a sua adesão a agregados de caráter ácido é pouco eficaz, devido a superfície deste apresentar também carga negativa, sendo o contrário com agregados de caráter básico, por apresentar cargas opostas.

Para qualquer tipo de agregado, a adesividade poderá ser insatisfatória se as suas superfícies contiverem material pulverulento aderido, se as superfícies apresentarem alteração mineralógica e se o agregado estiver úmido.

No tocante à umidade, o problema está no efeito de “molhabilidade” entre o betume e o agregado, pois a água tem maior afinidade com a superfície do agregado do que com o betume.

Quando não for possível evitar os fatores citados, na sua totalidade ou em parte, e o agregado disponível é de caráter ácido, utilizam-se aditivos nos betumes, que são os agentes umectantes, para melhorar sua adesividade ao agregado pela modificação de sua polaridade.

1.10 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE LIGANTES

• Mistura asfáltica à quente

A norma DNIT 031/2004 - ES considera mistura asfáltica a quente como mistura executada em usina apropriada, com características próprias, composta de agregados minerais graduados, material de enchimento (**filer**) e ligante betuminoso, espalhada e comprimida a quente.

O concreto asfáltico pode ser empregado como revestimento, camada de ligação (binder), base, regularização ou reforço do pavimento.

O concreto asfáltico somente poderá ser fabricado, transportado e aplicado quando a temperatura ambiente for superior a 10⁰C.

• Ligantes

Segundo o IBP (1994), “Os cimentos asfálticos, são preparados especialmente para apresentarem qualidades e consistência próprias, para o uso direto na construção de revestimentos asfálticos. É um material ideal para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois além de suas

propriedades aglutinantes e impermeabilizantes possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis”.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é produzido especialmente para apresentar qualidades e consistência próprias para o uso na construção e manutenção de pavimentos asfálticos, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possuem características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

Os cimentos asfálticos de petróleo são classificados segundo a penetração em CAP 30 – 45, CAP 50 – 70, CAP 85 – 100 e CAP 150 – 200 conforme a Agência Nacional de Petróleo (ANP).

A determinação das características do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) será realizada mediante o emprego de normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou das normas da “*American Society for Testing Materials*” (ASTM).

A análise do produto deverá ser realizada em uma amostra representativa do mesmo segundo método ABNT NBR 14883 – Petróleo e produtos de petróleo – Amostragem manual ou ASTM D 4057 – *Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products*.

As características do CAP deverão ser determinadas de acordo com os seguintes métodos de ensaio:

• **Penetração**

MÉTODO	TÍTULO
NBR 6576	Materiais betuminosos – Determinação da penetração
ASTM D5	Determinação de penetração de materiais betuminosos (<i>Penetration of Bituminous Materials</i>)

- **Ponto de amolecimento**

MÉTODO	TÍTULO
NBR 6560	Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola
ASTM D 36	Determinação do ponto de amolecimento (Método do anel e bola) (<i>Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)</i>)

- **Viscosidade Saybolt-Furol e Viscosidade Brookfield**

MÉTODO	TÍTULO
NBR 14950	Materiais betuminosos – Determinação da Viscosidade <i>Saybolt Furol</i>
ASTM E 102	Determinação da Viscosidade <i>Saybolt Furol</i> de materiais betuminosos a temperaturas elevadas (<i>Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures</i>)
ASTM D 4402	Determinação da viscosidade do asfalto a temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (<i>Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer</i>)

- **Ponto de fulgor**

MÉTODO	TÍTULO
NBR 11341	Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto <i>Cleveland</i> .
ASTM D 92	Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto <i>Cleveland</i> (<i>Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester</i>)

- **Solubilidade em Tricloroetileno**

MÉTODO	TÍTULO
NBR 14855	Materiais betuminosos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno

ASTM D 2042 Solubilidade de materiais betuminosos em tricloroetileno (*Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene*)

• **Ductibilidade**

MÉTODO TÍTULO

NBR 6293 Materiais betuminosos – Determinação da ductibilidade

ASTM D 113 Dutilidade de materiais betuminosos (*Ductility of Bituminous Materials*)

• **Variação em massa**

MÉTODO TÍTULO

ASTM D 2872 Efeito do calor e do ar numa película móvel de asfalto (*Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*)

1.11 ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Segundo Senço (1997): “Apesar das diversas crises petrolíferas no Brasil e no mundo, a preferência é por pavimentação com misturas betuminosas devido basicamente a cinco fatores: o preço competitivo, a impermeabilidade do ligante, a possibilidade de trabalhar a diversas temperaturas, a durabilidade das misturas betuminosas e a adesividade do ligante aos agregados”.

Segundo Souza *et al* (1991) *apud* Coelho (1994), os ensaios avaliadores dos parâmetros elásticos, visco elásticos, plásticos e de resistência ao cisalhamento dos concretos asfálticos, classificam-se em: ensaios de compressão diametral com corpos de prova cilíndricos, com carregamentos estáticos ou repetidos; ensaios de compressão uniaxial com corpos de prova cilíndricos, não confinados de carregamentos estáticos, repetidos ou dinâmicos; ensaios de compressão triaxial com corpos de prova cilíndricos, confinados, com carregamentos estáticos, repetidos ou dinâmicos; ensaios de trilha de rodas.

Segundo Motta & Pinto (1994), os ensaios mais utilizados no Brasil com relação à fadiga são: ensaio de compressão diametral dinâmico para a obtenção do módulo de resiliência; ensaio de flexão alternada;

- **Ensaio *Marshall***

Segundo De Senço (1977), o ensaio *Marshall* foi desenvolvido em 1930 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Mississippi nos EUA, com o objetivo de determinar a quantidade ótima de ligante betuminoso a ser utilizado em uma mistura betuminosa.

Com o passar do tempo este ensaio foi modificado para adaptar-se somente a energia de moldagem dos corpos de prova.

Ainda segundo Bernucci et al (2007), a dosagem *Marshall*, realizada no Brasil, segue as orientações da norma do DNIT e embora parecida com a da *American Society for Testing* (ASTM) e com os procedimentos adotados pelo Instituto de Asfalto norte-americano, não foi talvez atualizada conforme as mudanças ocorridas nas citadas normas estrangeiras, em pelo menos dois pontos: absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada; uso da fórmula de cálculo da DMT.

Na ASTM e no Instituto de Asfalto só se utiliza a densidade específica *Rice* (Gmm), parâmetro este determinado em laboratório seguindo a ASTM 2041 (2000) ou a AASHTO T 209 (1999). No Brasil não há ainda método normatizado para essa determinação, embora ainda alguns órgãos e instituições de pesquisa já dotem alguma variação das normas norte-americanas.

- **Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral - RT**

Segundo Bernucci et al (2007), a Resistência à Tração (RT) tem se mostrado como importante ensaio em misturas asfálticas. Em virtude da dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente. Diversos métodos indiretos têm sido desenvolvidos para a sua determinação.

Ainda segundo Bernucci et al (2007), o ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da RT foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland.

Este ensaio popularizou-se em todo o mundo, pela facilidade e rapidez de execução.

O ensaio tem sido adotado desde 1972 para a caracterização de misturas asfálticas, com a aplicação das forças, através de frisos de carga, no corpo-de-prova cilíndrico tipo Marshall convencional, uma vez que estes apresentam superfície lateral irregular e bem deformável.

Segundo Bernucci et al (2007), à medida que as misturas asfálticas envelhecem em pista, a RT aumenta o que não configura em vantagem. Também perdem sua flexibilidade pelo aumento do módulo de resiliência.

Ainda segundo Bernucci et al (2007), há uma correlação entre Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) para cada tipo de mistura asfáltica. Com o passar do tempo, ou seja, com o envelhecimento da mistura, essa relação se mantém constante.

- **Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral**

Segundo Bernucci et al (2007) os estudos referentes ao comportamento resiliente das misturas asfálticas, tiveram início na década de 1930 por Francis Hveem. O termo “resiliência” foi definido como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”.

O termo módulo de resiliência ou *resilient modulus* foi criado para que não se fizesse confusão com o módulo de Young, determinado estaticamente.

Ainda segundo Bernucci et al (2007), foram realizados ensaios para avaliação do módulo de resiliência em misturas asfálticas, utilizando-se para isto dos ensaios de flexão, carregamento axial e compressão diametral. Os resultados demonstraram que os valores obtidos com o ensaio de compressão diametral foram superiores aos obtidos nos ensaios de flexão e de

carregamento axial. Os valores obtidos nos ensaios de flexão e de carregamento axial são relativamente semelhantes. Resultados semelhantes foram obtidos no Brasil por Pinto em 1991.

- **Ensaio de fadiga**

Segundo Bernucci et al (2007) as cargas cíclicas produzem danos intermitentes nos materiais, ou seja, crescem na fase de carregamento e mantêm-se constante na fase de descarregamento.

Portanto as cargas cíclicas produzem falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos em rupturas nos ensaios estáticos, porém a mesma carga é aplicada repetidas vezes. Este fenômeno é denominado fadiga.

Segundo Bernucci et al (2007), a ASTM define fadiga como “o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas que não aparecem como elementos críticos, levando-se em conta o carregamento, porém são decisivas para a vida útil do material.

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida pela vida de fratura (N_f) ou vida de serviço (N_s). A primeira refere-se ao número de aplicações de uma determinada carga necessária para a fratura completa da amostra, enquanto a segunda refere-se ao número total de aplicações dessa mesma carga capaz de reduzir o desempenho ou rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido, seja dois tipos de ensaios podem ser realizados: um a tensão controlada no qual os corpos-de-prova atingem a ruptura completa e outro a deformação controlada para o qual o fim do ensaio é estabelecido por uma relação de razão de rigidez convencional. Para ambos é necessário se estabelecer um fator de ajuste entre os resultados dos ensaios e o tráfego previsto, fator este conhecido como fator campo laboratório.

Capítulo 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Fizeram-se a caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa a serem utilizados nas misturas betuminosas e executaram-se ensaios mecânicos para avaliação dos corpos-de-prova.

Para se atingir os objetivos propostos, se fizeram necessário realizar as seguintes atividades:

- a) caracterização e preparação dos materiais constituintes das misturas betuminosas a serem avaliadas, as preparadas com fíler tradicional e as com lodo da ETA;
- b) confecção dos corpos de prova para serem utilizados no ensaio *Marshall* e nos outros ensaios mecânicos;
- c) realização de ensaios para avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas estudadas;
- d) análise dos resultados e conclusões.

2.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Para selecionar os materiais a serem empregados, teve-se primeiro que definir o tipo de mistura optando-se pela mistura asfáltica a quente a usualmente utilizada na região.

Os materiais empregados foram:

- **Agregados**

Tanto o agregado graúdo como o agregado miúdo, foram especificados de acordo com a norma DNIT 031/2004 – ES do Departamento Nacional de Infra- Estrutura e Transportes (DNIT).

Visando-se a máxima utilização possível de materiais disponíveis na região, preferencialmente os materiais existentes próximos à cidade de Manaus, procuraram-se adquirir os que fossem mais usualmente utilizados.

Os agregados utilizados na presente pesquisa como elementos na mistura de concreto asfáltico, têm as seguintes natureza e procedências:

a) agregado graúdo: adquiriu-se o seixo rolado no comércio local, classificando-o manualmente nas peneiras de 19,1 mm a 0,075 mm. No estado do Amazonas o seixo é o material utilizado em larga escala tanto nos concretos asfálticos como também nos concretos de cimento Portland, em razão de ser encontrado em maior quantidade e com custo menor de extração em comparação a pedra britada escassa na região (Figura 7);



Figura 7 – Agregado graúdo utilizado na presente pesquisa: seixo rolado (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

b) agregado miúdo: utilizou-se neste trabalho como agregado miúdo, a areia de terra firme, obtida no comércio local, por apresentar melhor distribuição granulométrica do que as oriundas de leito de rio. As areias de leito de rio apresentam granulometria uniforme sem a

presença dos finos devido estes serem dispersos no rio, enquanto as de jazida possuem granulometria bem distribuída com a presença dos finos (Figura 8).



Figura 8 – Agregado miúdo utilizado na presente pesquisa: areia de jazida (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

- **Material de enchimento (fíler)**

Os materiais de enchimento ou fíleres utilizados na mistura de concreto asfáltico da presente pesquisa teve as seguintes procedências:

- a) cimento: portland da marca Nassau obtido no comércio local;
- b) resíduo da ETA: obtido do complexo de tratamento de água da Ponta do Ismael

- **Ligantes**

O cimento asfáltico de petróleo utilizado na presente pesquisa foi o CAP 50/70, obtido na Refinaria de Manaus (REMAN) com as características referenciadas na tabela 2.

Fez-se no laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Amazonas, durante esta pesquisa, o ensaio de viscosidade *Saybolt Furol* a $177\text{ }^{\circ}\text{C}$ para confirmação dos dados fornecidos pela REMAN.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	65	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	4 6 min	50,8	grau C
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i> a 135 GC	E 102	141 min	282	S
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i> a 150 GC	E 102	50 min	121,7	S
Viscosidade <i>Saybolt Furol</i> a 177 GC	E 102	30 a 150	37,0	S
RTFOT penetração retida	D 5	55 min	59	%
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D 36	8 max.	8,0	grau c
RTFOT ductibilidade a 25 GC	D 113	20 min.	20	Cm
RTFOT variação em % de massa	D 2872	0,5 max.	- 0,027	%
Ductibilidade a 25 GC	D 113	60 min.	87	Cm
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 min.	99,8	% massa
Ponto de fulgor	D 92	235 min.	330,1	grau C
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	-1,5 a 0,7	- 0,4	
Densidade relativa a 20/4 GC	D 70	Anotar (1)	0,992	
Aquecimento a 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

Notas:

(1) Ensaio não faz parte da especificação.

Data da emissão: 20/01/2007

(2) NESP = não espuma

Tabela 2 – Características do cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70 da REMAN

FONTE:Refinaria de Manaus (REMAN).

O quadro 2 fornece um resumo dos materiais utilizados na mistura asfáltica com suas respectivas procedências.

Tipo de Material	Discriminação do Material	Procedência	Características Encontradas
Agregados	Seixo de rio	Comércio local	Granulometria variando de 19,1 a 0,075mm constituído de pedregulho e areia
	Areia de jazida	Comércio local	Granulometria variando de 4,8 a 0,075mm constituído de areia grossa, areia média e areia fina
Fíler	Cimento Nassau	Comércio local	Granulometria variando de 0,177 a 0,074mm
	Lodo de ETA	Águas do Amazonas	Granulometria do material passando 100% na peneira de abertura de 0,075mm
Material betuminoso	Cap 50/70	REMAN	Penetração de 65mm

Quadro 2 – Origem dos materiais utilizados na mistura betuminosa

2.2 ENSAIOS LABORATORIAS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa: seixo, areia, CAP, cimento Portland e lodo da ETA, foram submetidos a ensaios laboratoriais para obtenção de suas características. Para tanto inicialmente preparam-se estes materiais que foram posteriormente submetidos aos ensaios físicos de caracterização dos mesmos.

2.2.1 Preparação dos materiais

Tomaram-se os seguintes procedimentos para preparação dos agregados (seixo rolado e areia de jazida), fíleres (cimento Portland e lodo de ETA) e cimento asfáltico de petróleo (CAP), antes dos ensaios laboratoriais de caracterização destes materiais.

- seixo rolado: colocados para secar à sombra, homogeneizados e quarteados e armazenados em sacos plásticos, (Figura 10 e Figura 11);
- areia de jazida: colocadas para secar à sombra, homogeneizadas e quarteadas e armazenadas em sacos plásticos, (Figura 9 e Figura 10)



Figura 9 – Ensacamento do seixo e areia; Figura 10 – Secagem do seixo e areia (Fotos do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

- Cimento Portland: acondicionado em sacos plásticos para manter suas propriedades originais;
- CAP: acondicionado ainda quente em vasilhames específico para manter suas propriedades originais;
- lodo da ETA: obtido na Estação de Tratamento de Água da concessionária Águas do Amazonas, no bairro da Compensa na cidade de Manaus, denominada de ETA 2.

Para se entender como se origina o lodo a ser utilizado na mistura asfáltica, desta pesquisa, faz-se necessário conhecer o processo produtivo deste desde a sua origem, com a captação de água do rio Negro, o resíduo gerado (lodo) e descarte deste lodo no igarapé do Franco (Figura 11).

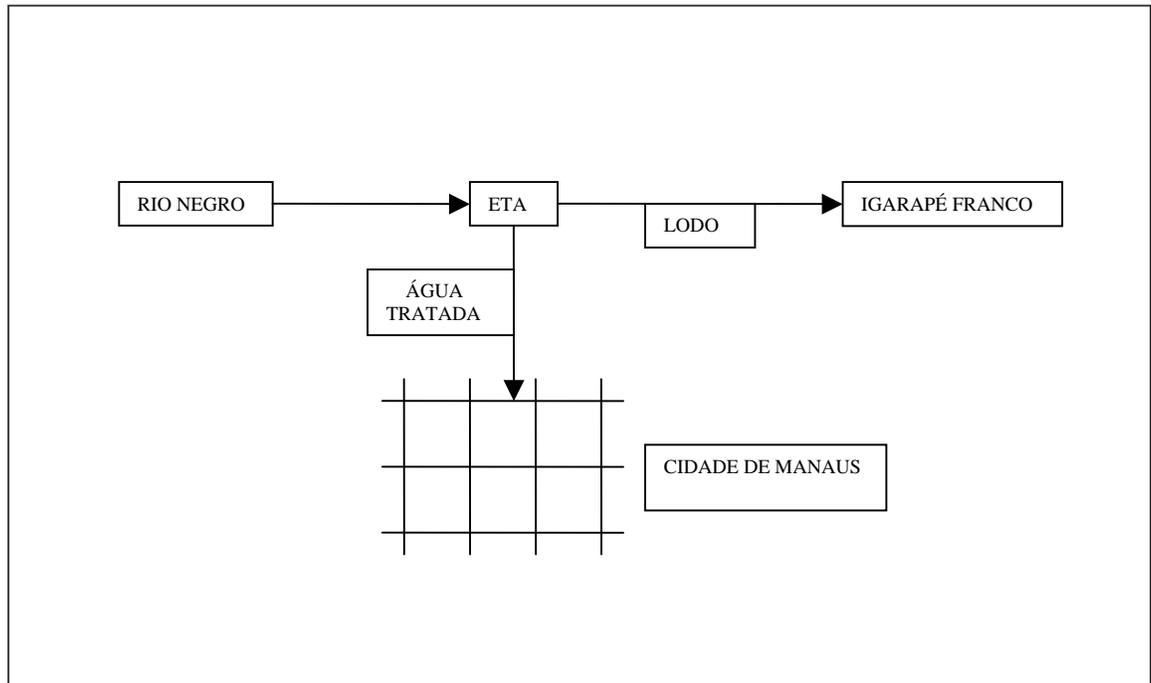


Figura 11 – Fluxograma da produção do lodo da ETA da Ponta do Ismael

As estações de tratamento de água na cidade de Manaus, recebem água captada do Rio Negro nas suas instalações. Este manancial apresenta vazões de até $40.000\text{m}^3/\text{seg}$ na época da cheia, no seu percurso desde as nascentes na Venezuela e Colômbia até Manaus, atravessando boa parte da região amazônica, enriquecendo-se de matérias orgânicas dissolvidas provenientes da decomposição dos vegetais. Sua cor predominantemente escura, deve-se principalmente a este fato.

Á água deste rio é originária do degelo e das chuvas e correm por terrenos que não contêm significativamente sais nem matérias suspensas como argilas ou areias, mesmo na época das enchentes; o que resulta numa água pobre em substâncias dissolvidas, de baixa condutividade (na faixa de $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$) e turbidez de 5 a 20 UNT.

A água é caracteristicamente ácida com pH variando entre 4,5 e 5,9, sem alcalinidade e teores muito baixos de cálcio e de dureza. A temperatura varia entre os 26 e 35 graus Celsius.

Devido à sua acidez, à quase pequena existência de áreas urbanas e industriais a montante, e a enorme capacidade de diluição e sua autodepuração, apresenta valores muito baixo de poluição, e quase ausência de contaminação fecal. Não obstante, nas proximidades das captações da Ponta do Ismael e a montante das mesmas há a existência de porto e estaleiros, com atividades potencialmente poluidoras do Rio Negro.

São realizados ensaios diários na ETA, para se obter uma água potável para consumo humano, que atenda as exigências da Portaria 1469 do Ministério da Saúde (ÁGUA DO AMAZONAS, 2001).

Segundo a concessionária Águas do Amazonas (2007), o complexo de tratamento “Ponta do Ismael” é formado por duas estações de tratamento de água superficial, denominadas ETA 1 e ETA 2, localizadas numa área de 18 hectares, e são responsáveis pela produção de 76% da água distribuída na cidade de Manaus.

Ainda segundo a concessionária Águas do Amazonas (2007), as estações de tratamento possuem as seguintes etapas de tratamento:

ETA 1: captação da água bruta do Rio Negro, pré-alkalinização, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, pós-alkalinização e bombeamento. Esta ETA tem produção média diária de 220.000m³/dia.

ETA 2: captação da água bruta do Rio Negro, pré-alkalinização, coagulação, floculação, flotação, filtração, desinfecção, pós-alkalinização e bombeamento. Esta ETA tem produção média diária de 210.000m³/dia.

As etapas do processo podem ser definidas como:

captação da água bruta do Rio Negro: a água captada do Rio Negro é aduzida para a estação de tratamento por meio de bombas de eixo vertical, que elevam o líquido até a câmara de carga da estação por meio de um conduto.

pré-alcalinização: uma das características da água bruta do rio Negro é sua cor escura, causada por colóides orgânicos resultantes da decomposição de materiais vegetais, contendo teor muito baixo de sais e alta acidez. Esta condição obriga a aplicação de cal para aumentar a alcalinidade, necessária para se obter as condições químicas ideais para as etapas seguintes do tratamento.

coagulação: processo no qual a água bruta, após a correção do pH, recebe o coagulante sulfato de alumínio. Este processo é realizado por meio de um dispersor para se obter uma mistura rápida do coagulante com o volume de água da estação.

floculação: processo no qual as partículas coaguladas se agregam entre si com ajuda de um coadjuvante, polímero sintético não iônico, formando partículas progressivamente maiores. Este processo de agregação envolve processos físico-químicos complexos chamados de floculação.

decantação: a água que sai do floclador, após o processo de floculação, entra nos decantadores, dotados de módulos lamelares, aonde as partículas agregadas se sedimentam no fundo do tanque. A água clarificada é coletada por calhas e encaminhada a etapa seguinte que é a filtração (ETA1) .

flotação: A água que sai do floclador, após o processo de floculação, entra nos decantadores e por meio de bombas, uma parte da água clarificada é ré-circulada até vasos de pressão (saturadores) recebendo simultaneamente ar comprimido, fazendo com que as partículas sólidas (impurezas) flutuem. Nestas condições se obtém água saturada em ar (ETA 2).

filtração: a água clarificada que saí dos decantadores é conduzida para os filtros. Esses filtros são tanques prismáticos com camadas de agregados com granulometria diferentes, fazendo com que as partículas, que não foram eliminadas na decantação, fiquem retidas nos mesmos.

desinfecção: a água filtrada é desinfetada por meio do cloro, um poderoso oxidante que elimina os microorganismos.

pós-alcalinização: após a desinfecção da água faz-se uma segunda correção do pH, com cal, antes de aduzir a água para a cidade de Manaus. Isto permite obter uma água tratada menos agressiva, fundamental para preservar as instalações hidráulicas das instalações da concessionária, como também dos usuários.

bombeamento: A água tratada é bombeada para a cidade de Manaus, por meio de bombas hidráulicas de grande porte, através de adutoras até os reservatórios, para em seguida ser feita à distribuição aos usuários.

Tomaram-se os seguintes procedimentos para a preparação do lodo da ETA a ser utilizada como fíler na mistura asfáltica:

- A coleta do lodo na ETA se deu pela superfície da massa de água já que o mesmo fica em suspensão pela de injeção de micro-bolhas na massa líquida, fazendo com que as impurezas existentes na água flutuem, por ficar com menor peso específico do que a água (Figura 12 e Figura 13).



Figura 12 – Vista parcial da ETA 2; Figura 13 – Coleta do lodo na ETA 2 (Fotos do autor: ETA da Ponta do Ismael, 2007).

- após ser coletado na ETA foi posto para secar em estufa a 110° C por 24 horas, sendo posteriormente destorroado (figura 14), pulverizado, homogeneizado, quarteado, calcinado a 300° C (figura 15) para queima da matéria orgânica e acondicionado em sacos plásticos para manter suas propriedades originais após processamento.



Figura 14 – Lodo destorroado no Mão de Gral; Figura 15 – Lodo calcinado a 300° C (Fotos do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

2.2.2 Ensaios físicos para caracterização dos agregados

Uma vez determinado a metodologia de caracterização dos agregados, foram realizados os seguintes ensaios:

a) agregado graúdo (seixo rolado)

- **Granulometria**

Realizados três ensaios de granulometria de acordo com norma do DNER – ME 083/98, com utilização de 5.000g do material em cada ensaio. Foram utilizadas peneiras e malhas quadradas conforme especificação do DNIT.

Todos os ensaios foram realizados por peneiramentos manuais, aplicados inicialmente na peneira de maior abertura, e subsequentemente nas demais da série em ordem decrescente.

A agitação das peneiras foi feita em movimentos laterais e circulares alternados, tanto no plano horizontal quanto no vertical e inclinado.

• **Massa específica**

A norma DNER – ME 195/97 prescreve o método a ser adotado na determinação da massa específica e da absorção, nas condições seca e saturada superfície seca, de agregado graúdo natural, para aplicação nos estudos de dosagem.

Para utilização da norma precisa-se do conhecimento das seguintes definições:

- massa específica na condição seca: relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis;
- massa específica na condição saturada superfície seca: relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e o seu volume, excluídos os vazios permeáveis;
- vazios permeáveis: descontinuidades ligadas diretamente à superfície externa do agregado que, na condição saturada superfície seca, são passíveis de reter em água.

Tanto para o ensaio de massa específica como para o ensaio de absorção, foi utilizado 2,0 kg da amostra, em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo (seixo) ser igual ou menor que 12,5 mm, conforme preconiza a norma.

A massa específica do agregado foi determinada pela expressão:

a) massa específica aparente:

$$\gamma_{ap} = \frac{Ps}{Ph - Pi}, \text{ onde :} \quad (1)$$

γ_{ap} = massa específica aparente, em g/cm³;

Ps = massa do agregado seco, em g;

Ph = massa do agregado na condição saturada superfície seca (úmido), em g;

Pi = massa do agregado imerso em água (hidrostático), em g.

a) massa específica real:

$$\lambda_r = \frac{P_s}{P_s - P_i} \quad (2)$$

• Absorção

A norma DNER – ME 195/97, define absorção, como aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como porcentagem de sua massa seca.

A absorção do agregado foi determinado pela expressão:

$$a = \frac{Ph - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3)$$

• Abrasão *Los Angeles*

A norma DNER – ME 035/98, prescreve o método para obtenção do valor da abrasão “*Los Angeles*” de agregado. Apresenta a aparelhagem, definições, a execução do ensaio nas graduações estabelecidas para o agregado, a carga abrasiva aplicada, e as condições para obtenção dos resultados.

O método fornece o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “*Los Angeles*” juntamente com uma carga abrasiva, submetido um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 35 rpm.

O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7mm.

A amostra selecionada para ensaio, enquadrou-se na graduação C (Tabela 3), portanto foi utilizado 2.500 g de material passando na peneira de 9,5 mm e retido na peneira de 6,3 mm e

mais 2.500 g de material passando na peneira de 6,3mm e retido na peneira de 4,8 mm, num total de 5.000g do material para 500 rotações do tambor.

Calcula-se a abrasão “*Los Angeles*” do agregado pela seguinte expressão:

$$A_n \leq \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100, \text{ sendo:} \quad (4)$$

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)

conforme mostra a figura 16.



Figura 16 – Amostra lavada e secada após passar na máquina *Los Angeles*. (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

Peneiras abertura em mm		Amostra – massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3			2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8			2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4			-	5000 ± 10	-	-	-
Massa totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
No de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Tabela 3 – Graduação para ensaio “Los Angeles”

FONTE: Agregados - determinação da abrasão ‘Los Angeles’ - DNER - ME 035/98. Página 4.

A carga abrasiva usada foi a da graduação C, com 8 esferas para massa de carga de 3.330 g, conforme mostra a tabela 4.

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Tabela 4 – Graduação para determinação da carga abrasiva

FONTE: Agregados-determinação da abrasão ‘Los Angeles’ - DNER - ME 035/98. Página 5.

- **Adesividade**

A adesividade do agregado a ligante betuminoso é estabelecido pela norma DNER – ME 078/94 que mostra a capacidade do agregado de ser aderido pelo ligante asfáltico a ser empregado.

Recobriu-se o agregado com o ligante asfáltico a 40⁰C e deixou-se submetido à ação da água destilada durante 72 horas.

- b) agregado miúdo (areia de jazida)**

- **Granulometria**

Foram realizados três ensaios de granulometria para se identificar a granulometria do agregado miúdo com utilização de 1.000g do material em cada ensaio. Para o procedimento da análise granulométrica dos agregados miúdos foram utilizadas peneiras de malhas quadradas conforme especificação DNER ME 083/98.

Todos os ensaios foram realizados por peneiramentos manuais, aplicados inicialmente na peneira de maior abertura, e subseqüentemente nas demais da série em ordem decrescente.

A agitação das peneiras foi feita em movimentos laterais e circulares alternados, tanto no plano horizontal quanto no vertical e inclinado.

- **Massa específica real (*Chapmann*)**

A norma DNER – ME 194/98 define como massa específica a relação entre a massa do agregado seco em estufa na temperatura de 100⁰C a 110⁰C, até a constância de massa e o volume do sólido, incluídos os poros impermeáveis.

A massa específica do agregado foi determinado pela expressão:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}, \text{ onde:} \quad (5)$$

γ = massa específica do agregado, expressa em g/cm³;

L = leitura no frasco de *Chapman* (volume ocupado pelo conjunto água-agregado).

Foram realizados três ensaios em laboratório, utilizando-se para isto do método Chapman (Figura 17).

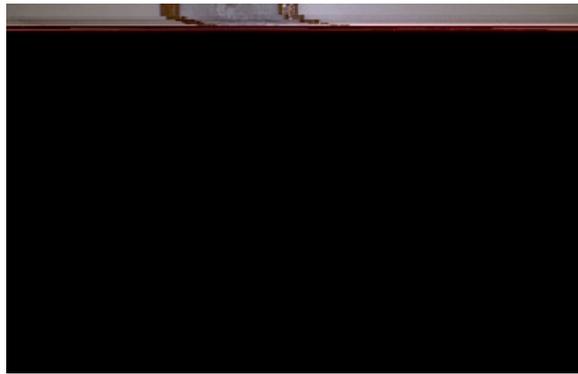


Figura 17 – Método *Chapman* (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

c) cimento *Portland* (fíler)

• Granulometria

O ensaio para verificar a granulometria do cimento, foi feito de acordo com a norma DNER – EM 367/97. Esta norma apresenta as características exigidas para material de enchimento para misturas betuminosas, além dos critérios a serem adotados para aceitação e rejeição.

• Massa específica real

O ensaio para determinação da massa específica real, foi feito como o estabelecido pela norma DNER – ME 085/94, que apresenta os procedimentos para determinação da massa específica de cimentos *Portland*, solos finos e para material de enchimento. Prescreve a aparelhagem e requisitos concernentes a cálculos e para obtenção dos resultados.

Para isto colocou-se 50 g de cimento *Portland* no frasco *Le Chatellier* que continha em seu interior querosene e encontrava-se em banho de água em temperatura constante de 25 °C. Fez-se as leituras do nível de querosene no frasco *Le Chatellier*, antes e após a adição do cimento *Portland* (Figura 18).

A diferença entre as leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo cimento *Portland*. A massa específica real foi obtida pela razão entre a massa do material pelo volume deslocado.



Figura 18 – Ensaio de *Le Chatellier* para cimento *Portland* (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

d) lodo da ETA (fíler)

• Granulometria

Utilizou-se o mesmo procedimento tomado para o cimento *Portland* de acordo com a norma DNER – EM 367/97. Esta norma apresenta as características exigidas para material de enchimento para misturas betuminosas, além dos critérios a serem adotados para aceitação e rejeição.

Preparou-se o lodo da ETA intencionalmente para ter uma finura acima dos valores estabelecidos por norma, que estabelece que o fíler deva ter de 65 % a 100 % em peso, passando

pela peneira de 0,075 mm, com a pretensão de que tal finura iria preencher o máximo de vazios na mistura asfáltica.

- **Massa específica**

Utilizou-se o mesmo procedimento tomado para o cimento *Portland* de acordo com a norma DNER – ME 085/94, que apresenta os procedimentos para determinação da massa específica para material de enchimento.

Para isto colocou-se 60 g de lodo da ETA no frasco *Le Chatellier* que continha em seu interior querosene e encontrava-se em banho de água em temperatura constante de 25 °C. Fez-se as leituras do nível de querosene no frasco *Le Chatellier*, antes e após a adição do lodo da ETA (Figura 19).



Figura 19 – Ensaio de *Le Chatellier* com lodo da ETA (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

A diferença entre as leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo lodo da ETA. A massa específica real foi obtida pela razão entre a massa do material pelo volume deslocado.

- **Ensaio químicos e mineralógicos para caracterização do lodo da ETA**

No presente estudo, caracterizou-se química e mineralogicamente os resíduos do lodo da estação de tratamento de água da ETA Ponta do Ismael. Também se fez uma estimativa quantitativa das fases presentes no resíduo levado ao laboratório da Nokia. As técnicas utilizadas foram: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX). Teve-se como objetivo identificar, no resíduo do esgoto da ETA da Ponta do Ismael os principais elementos químicos presentes e todas as principais fases minerais presentes, sem se preocupar com a representatividade quantitativa.

- **Análise química do lodo por microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

As micrografias e análises químicas das amostras de lodo da ETA da Ponta do Ismael calcinada na temperatura de 300 °C foram realizadas no laboratório do Instituto Nokia de Tecnologia. As amostras de lodo calcinadas foram fixadas em suportes com fita adesiva e recobertas com filme de carbono para submissão ao MEV. A caracterização química foi realizada por espectrometria de energia dispersiva de raios-x, no equipamento *System Six* da *Thermo Electron*, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6460LV. As imagens foram feitas com elétrons secundários e a análise química com *Energy Dispersive Spectrometry* (EDS), com quantificação em óxidos.

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação, e grande resolução. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados. Ao MEV pode ser acoplado o sistema de energia dispersiva, por espectrometria de energia dispersiva (EDS).

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 KV a 30 KV. Essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada.

O espectrômetro de energia dispersiva (EDS) é um equipamento que acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) permite a composição qualitativa e semi-quantitativa dos elementos químicos constituintes da amostra em análise. É um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais (Figura 20).



Figura 20 - Microscópio eletrônico de varredura, JEOL JSM-646

FONTE: <http://www.degeo.ufop.br/laboratórios/microlab/mev.htm>.

O uso em conjunto do EDS com o MEV é de grande importância na caracterização petrográfica e estudo petrológico nas geociências. Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens (ainda que virtuais, pois o que se vê no monitor do computador é a transcodificação da energia emitida pelas partículas, ao invés da radiação emitida pela luz, ao qual estamos habitualmente

acostumados), o EDS permite sua imediata identificação. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados.

O método consiste na varredura da amostra por um feixe de elétrons que ao incidir sobre o mineral provoca excitação dos elétrons e/ou íons mais externo. Os átomos da amostra ao serem excitados, produzem raios-x nas energias características de seus elementos constituintes. Esse elétron do átomo é promovido de camada e ao retornar ao estado fundamental libera a energia adquirida, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. O comprimento de onda característica com intensidade relativa depende da concentração do átomo que lhe deu origem na amostra, proporcionando assim as bases para a análise qualitativa e semi-quantitativa. O espectro de linhas característico possui uma série de comprimentos de onda próprios do elemento emissor.

• **Difração de raios X (DRX)**

As análises mineralógicas foram efetuadas no laboratório de Difração de Raios X do departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas. As amostras chegaram ao laboratório, já pulverizadas, a fim de serem manipuladas pelo Método do Pó (Figura 21). O método utilizado foi para amostras não orientadas – randômicas, sem pré-tratamento do pó, evitando-se ao máximo o efeito de orientação preferencial.

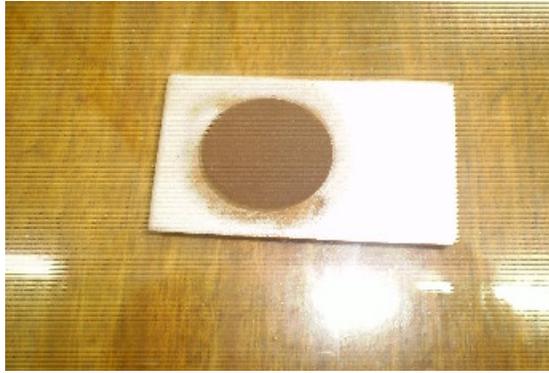


Figura 21 – Amostra pulverizada (pó) para ser submetida ao ensaio de Difração de Raio – X (Foto do autor: Laboratório de Geociências da UFAM, 2007).

O difratograma é uma superposição dos padrões conhecidos de difração comparando-os aos presentes na amostra. Desta forma, para se descobrir os materiais que formavam a determinada amostra (caracterizá-la), teve-se que testar padrões de diferentes materiais até obter-se um padrão de difração que coincidissem com o da amostra na posição e intensidade dos picos. Este trabalho foi feito utilizando-se de um programa de computador.

Para identificar os materiais presentes no gráfico do difratograma, é necessário obter-se informações contidas nos vários padrões de difração, tais como: posição dos picos, intensidade dos picos e finalmente forma e largura dos picos.

2.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para o estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas do tipo de concreto asfáltico usinado à quente com a utilização do asfalto convencional (CAP-50/70) com o do lodo da estação de tratamento de água - ETA como fíler nas misturas asfálticas, realizaram-se ensaios que permitiram comparar misturas convencionais feitas com fíler cimento com aquelas preparadas com lodo de ETA em substituição ao cimento.

Todas as misturas betuminosas foram produzidas no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, seguindo o preconizado pela norma DNIT - ES 031/2006.

Confeccionaram-se vários corpos de prova para se avaliar a resistência mecânica. Primeiro utilizou-se 100 % de cimento *Portland* como fíler em mistura asfáltica usinada a quente, que é o material tradicionalmente usado na região. Em seguida substituiu-se o cimento *Portland* gradativamente por lodo da ETA da Ponta do Ismael nas proporções de 25 %, 50 %, 75 % e 100 %, para se fazer a comparação da validade da substituição parcial ou total do cimento *Portland*, pelo lodo da ETA.

Com o objetivo de se avaliar a utilização do fíler do lodo da ETA da cidade de Manaus, em substituição ao fíler de cimento *Portland*, material convencional utilizado em misturas asfálticas, com agregados de seixo rolado de rio e areia de terra firme, materiais existentes na Amazônia, fizeram-se os seguintes ensaios mecânicos:

- ensaio *Marshall*;
- ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral;
- ensaio de módulo de resiliência sob compressão diametral;
- ensaio de fadiga.

2.3.1 Ensaio *Marshall*

Realizado no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, seguindo a determinação estabelecida na norma DNER – ME 043/95 do DNIT, que apresenta os procedimentos para a determinação da estabilidade e da fluência de misturas betuminosas, a quente, para uso em pavimentação, com agregado de tamanho de 25,4mm máximo, por meio da aparelhagem *Marshall*. A referida norma apresenta definições, o preparo de corpos-de-prova e os procedimentos para a obtenção dos resultados.

A Estabilidade *Marshall* é a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo-de-prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, expressa em kgf.

A Fluência *Marshall* é a deformação total apresentada pelo corpo-de-prova, desde a aplicação da carga inicial até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetro (centésimos de polegada).

O valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade.

• **Procedimentos tomados para determinação do teor ótimo da mistura betuminosa**

O procedimento adotado para a dosagem das misturas betuminosas, foi o método *Marshall*, para um esforço de compactação de 75 golpes, obedecendo a seguinte ordem:

a) seleção da faixa granulométrica a ser utilizada, de acordo com a composição granulométrica dos agregados, ou seja, o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura, sem considerar ainda o teor de asfalto.

b) escolha das temperaturas de mistura e compactação, a partir da viscosidade-temperatura do ligante escolhido;

Segundo Bernucci et al (2007), a temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C nem superior a 177 °C para todo o processo. A temperatura dos agregados deve ser de 10 °C a 15 °C acima da temperatura definida para o ligante sem ultrapassar 177 °C. A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidade na faixa de 125 SSF a 155 SSF (segundos *Saybolt-Furol*) ou $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Portanto fez-se o ensaio de viscosidade *Saybolt-Furol* para se determinar a temperatura da mistura e compactação (Figura 22).



Figura 22 - Ensaio de viscosidade *Saybolt Furol* (Foto do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

c) composição da dosagem das misturas betuminosas com: 4,0 %, 4,5 %, 5,0 %, 5,5 %, 6,0 % e 6,5 % de teor de CAP, para se determinar a melhor composição para a mistura (Método das Tentativas);

d) a partir do teor de asfalto do grupo de corpos-de-prova estudados, ajustou-se o percentual em massa de cada agregado na mistura asfáltica já contendo o asfalto;

e) moldagem dos corpos-de-prova (três corpos-de-prova para cada teor);

f) após o resfriamento e desmoldagem dos corpos-de-prova, obtiveram-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura);

g) determinaram-se para cada corpo de prova suas massas seca e submersa em água. Com estes valores, obteve-se a massa específica aparente dos corpos-de-prova, que, por comparação com a massa específica teórica, permitiu obter-se as relações volumétricas da dosagem;

h) com base na porcentagem de massa de cada agregado, na porcentagem em massa do teor de asfalto e nas massas específicas reais dos constituintes, calculou-se a densidade máxima teórica da mistura correspondente ao teor de asfalto considerado de cada corpo-de-prova;

i) calcularam-se os parâmetros de dosagem para cada corpo-de-prova, que são: volume (V), massa específica aparente da mistura (d), volume de vazios (Vv), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV).

j) após as medidas volumétricas os corpos-de-prova ficaram submersos em banho-maria a 60 0C por 40 minutos e levados a prensa *Marshall* e submetidos ao ensaio mecânico à compressão semi-confinada (Figura 23 e Figura 24);



Figura 23 - Ensaio Marshall; Figura 24 - Corpo de prova rompido no ensaio *Marshall* (Fotos do autor: Laboratório de Pavimentação da UFAM, 2007).

k) determinaram-se, então, por meio da prensa Marshall os parâmetros mecânicos que são:

- **estabilidade** (em kgf): carga máxima que o corpo-de-prova resistiu antes da ruptura, definido como um deslocamento ou quebra de agregado causando diminuição da carga necessária a fim de manter o prato da prensa em deslocamento a uma taxa constante;

- **fluência** (em mm): deslocamento vertical do corpo de prova submetido à aplicação da carga máxima.

Para determinar a estabilidade e fluência, dispôs-se de um anel dinamométrico para leitura da carga aplicada e um medidor de fluência para medir o deslocamento vertical sofrido pelo corpo-de-prova no momento que rompe.

l) com os resultados encontrados, verificaram-se quais os teores que mais se aproximavam dos valores estabelecidos pela norma DNER-ME 043/95 do DNIT para o volume de vazios, relação betume/vazios, estabilidade *Marshall* e fluência.

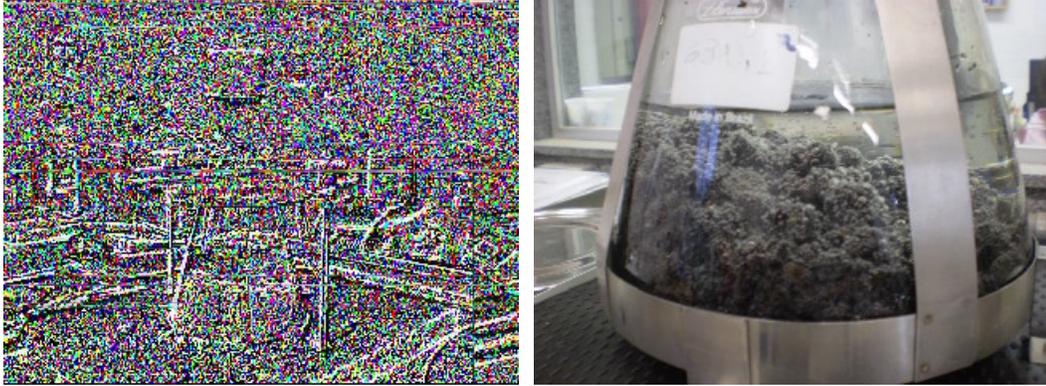
m) determinação do teor ótimo da mistura ou percentual de ligante na mistura que apresenta os valores mais próximos admitidos na norma anteriormente citada.

Segundo Bernucci et al (2007), há distinção de procedimentos para definição do teor de projeto dependendo do órgão, empresa ou instituto de pesquisa. A escolha pode se dar também a partir da estabilidade *Marshall*, da massa específica aparente e do Vv. Para este processo, o teor de projeto é uma média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima da amostra compactada e a um Vv de 4 % (ou média das especificações).

Ainda segundo Bernucci et al (2007), os critérios volumétricos não garantem que o teor de projeto, ou ótimo, corresponda ao melhor teor para todos os comportamentos de uma mistura asfáltica.

O método de compactação adotado foi a compactação manual com 75 golpes, no qual não se pode evitar influência do operador do compactador durante a aplicação dos golpes.

Fez-se o ensaio Rice no Laboratório de Geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), conforme figuras 25 e 26, para se determinar a Densidade Máxima Medida (DMM) em três corpos-de-prova, para massa intemperizada, envelhecida a 135 °C durante 2 horas.



Etapas do Ensaio Rice: Figura 25 – Material no agitador; Figura 26 – Retirada de ar do material (Fotos do autor: Laboratório de Geotecnia na COPPE – UFRJ).

2.3.2 Ensaios mecânicos

2.3.2.1 Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral (RT)

Realizado no laboratório de pavimentação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, seguindo a determinação estabelecida na norma DNER – ME 138/94 do DNIT, que apresenta os procedimentos para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de misturas betuminosas, de utilidade para projeto de pavimentos flexíveis.

O ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas, em um cilindro, gerando, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Repetiu-se o ensaio no COPPE, para obtenção das forças resultantes a serem utilizadas nos ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral e fadiga (Figura 27)



Figura 27 – Etapa do Ensaio de Resistência à Tração (Fotos do autor: Laboratório de Geotecnia na COPPE – UFRJ).

A aplicação da carga deu-se progressivamente, até a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical.

A resistência à tração do corpo-de-prova rompido se dá através da expressão:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH}, \text{ sendo:} \quad (6)$$

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 cálculo da RT para misturas asfálticas assume que o corpo-de-prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala a tensão máxima admissível ($\sigma_{adm} = RT$).

A norma DNIT 031/2004 – ES especifica o valor mínimo de 0,6 MPa para concretos asfálticos.

2.3.2.2 Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral

Realizado no Laboratório de Geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no país pela norma DNER – ME 133/94 do DNIT que estabelece o método para determinar o módulo de resiliência de misturas betuminosas, para pavimentos flexíveis, utilizando o equipamento de compressão diametral de carga repetida.

O módulo de resiliência de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de misturas betuminosas e a deformação específica recuperável (ε_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T) dada por.

$$MR = (\sigma_t / \varepsilon_t) \tau \quad (7)$$

Para a determinação do módulo de resiliência adotou-se o seguinte procedimento:

- a) determinou-se a resistência à tração dos corpos de prova
- b) 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 63,5 mm de altura, moldados no compactador *Marshall*, de modo a se obter uma tensão (σ_t) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Aplicou-se a menor carga, para obter-se um registro compatível com a precisão dos LVDTs. A frequência de aplicação da carga vertical é de 60 ciclos por minuto, com o tempo de aplicação da carga de 0,10 segundo e 0,90 segundos de repouso de descarregamento (Figura 28);

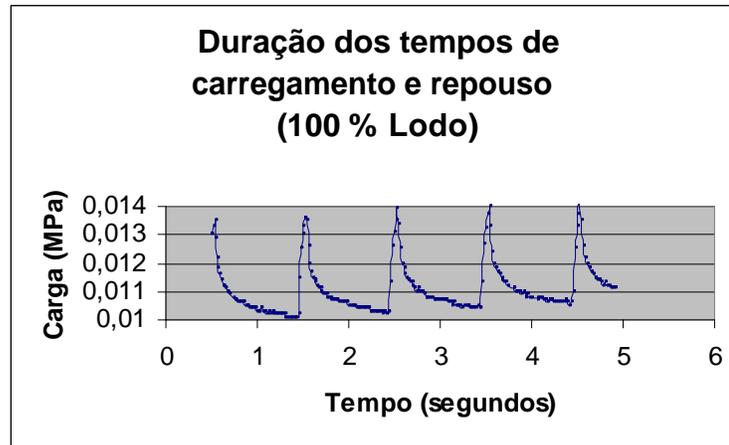


Figura 28 – Exemplo do diagrama do tempo de duração do carregamento e repouso para um CP contendo 100 % de lodo como fíler.

FONTE: Laboratório de Geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

c) com os valores obtidos da carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos, calculou-se o módulo de resiliência por meio da expressão.

$$MR = \frac{F}{100\Delta * H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

F = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova, em N;

Δ = deslocamento elástico ou resiliente registrado no microcomputador onde é feita a visualização dos resultados, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F), em mm;

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

μ = coeficiente de Poisson.

Foi utilizada a temperatura de 25 °C como referência para o ensaio de módulo de resiliência. É possível, no entanto, a realização do ensaio em temperaturas mais baixas ou ligeiramente mais elevadas para analisar-se principalmente a importância da variação do comportamento das misturas asfálticas em função da variação da temperatura.

Nas misturas asfálticas o coeficiente de Poisson pode ser considerado independente do carregamento, variando apenas com a temperatura. Seu valor varia entre 0,15 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas. No Brasil tem sido adotado o valor de 0,30 para 25 °C.

O sistema de medição do deslocamento do corpo-de-prova é constituído de dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT;

Os ensaios no COPPE foram realizados por equipamentos mostrados nas figuras 29 e 30, 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. Esse procedimento no passado era feito de maneira manual, por intermédio da leitura dos resultados impressos por oscilógrafo, em rolos de papel milimetrado.

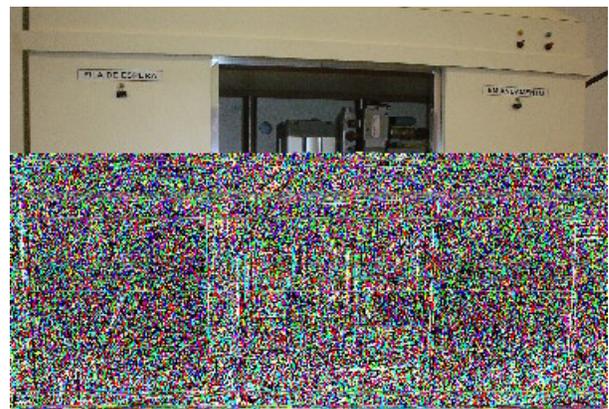


Figura 29 – Exemplos de deslocamentos lidos pelos LVDTs; Figura 30 – Equipamento para realização do ensaio de Módulo de Resiliência (Fotos do autor: Laboratório de Geotecnia na COPPE – UFRJ).

2.3.2.3 Ensaio de fadiga

Realizado no Laboratório de Geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O ensaio realizado na COPPE para definição do número de repetições de carga foi feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), com a carga aplicada numa determinada frequência por intermédio de um equipamento pneumático. Como o ensaio é por compressão diametral, considera-se que o ensaio gera um estado biaxial de tensão no corpo-de-prova cilíndrico Marshall. No decorrer do ensaio, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova.

Embora ainda não esteja normatizado, este ensaio à compressão diametral sob tensão com temperatura controlada é largamente utilizado no país.

Utilizou-se uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. Para manter a temperatura controlada os corpos-de-prova são colocados dentro de uma câmara com sistema de aquecimento e refrigeração ligados a um termostato (Figura 31)



Figura 31 – Câmara de ensaio de MR e Fadiga (Foto do autor: Laboratório de Geotecnia na COPPE – UFRJ).

Para expressar o ensaio de fadiga utiliza-se em geral uma expressão exponencial conforme indicado na Figura 32 como exemplo. No ensaio de compressão diametral como se tem um estado biaxial de tensões (tração e compressão) é comum utilizar a chamada diferença de tensões ($\Delta\sigma$) para expressar esta condição (expressão 9).

$$N = K_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (9)$$

N = número de repetições de carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

k_i, n_j = constantes obtidas na regressão linear nos pares N e $\Delta\sigma$ determinados nos ensaios, em escalas logarítmicas.

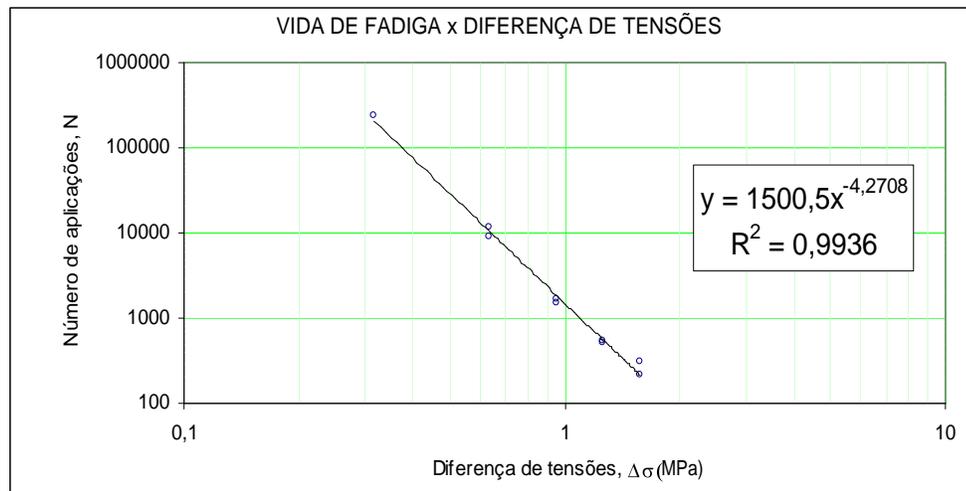


Figura 32 – Exemplo de gráfico de vida de fadiga considerando a diferença de tensões horizontal (tração) e vertical (compressão).

FONTE: Laboratório de geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)).

No ensaio de fadiga a tensão controlada a carga solicitante no corpo-de-prova é mantida constante, o que é uma aproximação, uma vez que o carregamento constante ao longo do ensaio não é traduzido em uma tensão solicitante constante visto que a seção resistente vai se modificando ao longo do ensaio e da ruptura.

Quando se faz o ensaio de fadiga a deformação controlada leva-se em conta a deformação de tração medida no centro de prova (ϵ_t), exprimindo-se:

$$N = K_3 \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{n_3} \quad (10)$$

O ensaio de fadiga tem sido usado mais comumente para fins de comparação entre misturas, o que satisfaz a proposta do presente trabalho, que é comparar os resultados da mistura asfáltica utilizando cimento Portland e lodo de ETA como fíler. Porém é necessário cautela para uma conclusão direta somente a partir das curvas de número de aplicações x diferença de tensões, pois o estado de tensões gerado em cada situação de campo depende do valor do módulo de resiliência das camadas constituintes do pavimento. Há uma tendência de se considerar, ao se comparar as duas misturas, a curva de maior k como a de maior vida de fadiga. Esta análise será válida se e somente se as diferenças de tensões ($\Delta\sigma$) geradas forem as mesmas para os dois tipos de misturas na estrutura do pavimento.

A condição de maiores valores de k neste tipo de ensaio está quase sempre associada a maiores valores de módulos resilientes. Misturas com maiores módulos resilientes absorvem mais tensões numa estrutura de pavimentos, logo os níveis de tensão de tração para comparação das vidas de fadiga das duas misturas devem ser correspondentes a cada caso estudado.

Capítulo 3 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos desde a caracterização dos materiais utilizados nas misturas asfálticas deste estudo até os ensaios mecânicos: *Marshall*, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral e vida de fadiga.

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

a) Agregado graúdo (seixo rolado)

- **Granulometria**

O ensaio de granulometria do agregado graúdo (seixo) foi realizado por peneiras de malhas quadradas. Apresentou uma quantidade maior de material retido na peneira de 4,8 mm de abertura, com 48,8 %, seguido de material retido na peneira de 2,0 mm, com 24,74 %, em terceiro de material retido na peneira de 0,42 mm, com 14,58 % e o restante 11,88 % de areia. O agregado foi classificado segundo a norma da ABNT, como pedregulho e areia.

Os ensaios de granulometria do agregado graúdo (seixo) apresentaram os resultados médios indicados na Tabela 5.

Peneira		Peso(g)		%	
n ^o	mm	Retido	Passa	Retido	Passa
3/4"	19,1	0,00	4.970,85	0,00	100
1/2"	12,7	82,14	4.888,71	1,65	98,35
3/8"	9,5	410,27	4.478,44	8,25	90,10
4	4,8	2.425,9	2.052,54	48,8	41,30
10	2,0	1.229,97	822,57	24,74	16,56
40	0,42	724,51	98,06	14,58	1,98
80	0,18	65,30	32,76	1,31	0,67
200	0,075	23,42	9,34	0,47	0,2
> 200		9,34	0,00	0,20	0,00
Total		4.970,85		100	

Tabela 5 – Resultados médios do ensaio de granulometria do seixo por peneiramento manual

• **Massa específica – Método Chapman**

Após os procedimentos estabelecidos por norma, obtiveram-se como resultados para a massa específica do agregado graúdo (seixo rolado), os seguintes valores: $\gamma_1=2,62$ g/cm³ no 1º ensaio, $\gamma_2=2,62$ g/cm³ no 2º ensaio e $\gamma_3=2,63$ g/cm³ no 3º ensaio, tendo-se $\gamma_m=2,62$ g/cm³ de massa específica média.

Os resultados obtidos estão compatíveis com as características do material existente na região.

• **Absorção e massa específica**

A absorção do agregado foi determinada pela expressão:

$$a = \frac{Ph - Ps}{Ps} \quad (11)$$

A massa específica do agregado foi determinada pela expressão:

a) massa específica aparente:

$$\gamma_{ap} = \frac{Ps}{Ph - Pi} \quad (12)$$

onde :

γ_{ap} = massa específica aparente, em g/cm³;

P_s = 1071,4 g = massa do agregado seco, em g;

P_h = 1085,5 g = massa do agregado na condição saturada superfície seca (úmido), em g;

P_i = 678,8 g = massa do agregado imerso em água (hidrostático), em g.

Obteve-se o valor da massa específica aparente do agregado igual 2,63 g/cm³.

a) massa específica real:

$$\gamma_r = \frac{Ps}{P_s - Pi} \quad (13)$$

Obteve-se o valor da massa específica real do agregado igual 2,73 g/cm³.

Portanto o agregado apresentou baixa porosidade com 1,32% de absorção, atendendo à norma do DNIT, que estabelece valores entre 0,5 % a 2,0 %. Em função da baixa porosidade do agregado provavelmente houve pequena absorção do ligante pelo agregado que pode ser verificado pelo ensaio Rice.

A determinação da massa específica por este método confirmou a obtida pelo método Chapman que apresentou o mesmo resultado de 2,63 g/cm³.

• Abrasão “Los Angeles”

A abrasão “Los Angeles” do agregado foi calculada pela seguinte fórmula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (14)$$

sendo:

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

n = graduação C escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina = 5000g;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm) = 402,6 g

O valor encontrado foi: $A_n = 19,6 \%$

De acordo com as características do agregado, realizou-se o ensaio na graduação “C” com 5.000g do material, obtendo-se o resultado de $A_c=19,6 \%$, caracterizando esse material como abrasivo.

- **Adesividade**

Após os procedimentos estabelecidos por norma, observou-se o não deslocamento da película betuminosa que recobriu o agregado, quando a mistura agregado-ligante foi submetido, a 40°C , à ação da água destilada, durante 72 horas. Isto fez com que essa película aderisse totalmente ao agregado. Portanto, considerou-se o resultado satisfatório.

b) Agregado miúdo (areia de jazida)

- **Granulometria**

Os ensaios de granulometria do agregado miúdo (areia de jazida) apresentaram maior quantidade de material retido nas peneiras de 0,42mm, com 38,39 %, seguido de material retido na peneira de 0,18 mm, com 40,56 % e em terceiro de material retido na peneira de 0,074 mm com 15,64 %. Segundo classificação da *AASHTO* para a granulometria encontrada temos 38,39 % de areia grossa (fração retido na peneira de 0,42 mm) e 56,2 % de areia fina (fração que passa na peneira de 0,042 mm), sendo o restante 5,41 % de finos. Verificou-se também, que a dimensão máxima do agregado corresponde ao material retido na peneira de 4,8 mm, com 0,82 %.

Os ensaios de granulometria do agregado miúdo (areia de jazida) usado neste estudo apresentaram os seguintes resultados médios mostrados na Tabela 6.

Peneira		Peso		Porcentagem	
nº	mm	Retido	Passa	Retido	Passa
4	4,8	8,19	989,22	0,82	99,18
10	2,0	32,83	956,39	3,29	95,89
40	0,42	382,99	573,40	38,39	57,50
80	0,18	404,59	168,81	40,56	16,94
200	0,075	156,03	12,78	15,64	1,28
> 200	-	12,78	0,0	1,28	0,0
Total		997,41			

Tabela 6 - Resultados médios do ensaio de granulometria da areia por peneiramento manual

• **Massa específica – método Chapman**

Após os procedimentos estabelecidos por norma, obtiveram-se os seguintes resultados da massa específica do agregado miúdo (areia de jazida): $\gamma_1 = 2,63 \text{ g/cm}^3$ no 1º ensaio, $\gamma_2 = 2,63 \text{ g/cm}^3$ no 2º ensaio e $\gamma_3 = 2,63 \text{ g/cm}^3$ no 3º ensaio, com $\gamma_m = 2,63 \text{ g/cm}^3$ de média.

Os resultados obtidos são compatíveis com o tipo de material da região.

c) **Cimento Portland**

• **Granulometria**

O ensaio de granulometria acusou 100 % do material passando na peneira de 0,42mm, 98,47 % passando na peneira de 0,18mm e 92,14 % passando na peneira de 0,075 mm.

Os ensaios de granulometria do cimento *Portland*, usado no presente estudo, apresentaram resultado satisfatório atendendo as especificações estabelecidas por norma para fíler.

Massa específica real – Método *Le Chatellier*

Após os procedimentos estabelecidos por norma, obteve-se a massa específica real de $\gamma_r = 3,109 \text{ g/cm}^3$, valor este compatível com o tipo de cimento fabricado na região.

d) Lodo de ETA

- **Granulometria**

O ensaio de granulometria do lodo após secagem, queima e destorroamento, apresentaram um resultado satisfatório atendendo as especificações da norma para fíler.

- **Massa específica**

Seguindo toda a metodologia estabelecida pela norma pelo ensaio *Le Chatellier*, para determinação da massa específica real, obteve-se o valor de $\gamma_r = 2,490 \text{ g/cm}^3$.

- **Análise química do lodo por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O lodo da ETA da Ponta do Ismael após calcinação foi preparado e posteriormente submetido à análise química pelo processo de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), como mostram as figuras 33 e 34. A figura 35 ilustra os minerais encontrados nas amostras 1 e 2: silicatos, sulfatos e óxidos, em especial o óxido de alumínio. A figura 36 ilustra o mineral óxido de alumínio encontrado nas duas amostras; 60 % na amostra 1 e 41 % na amostra 2.

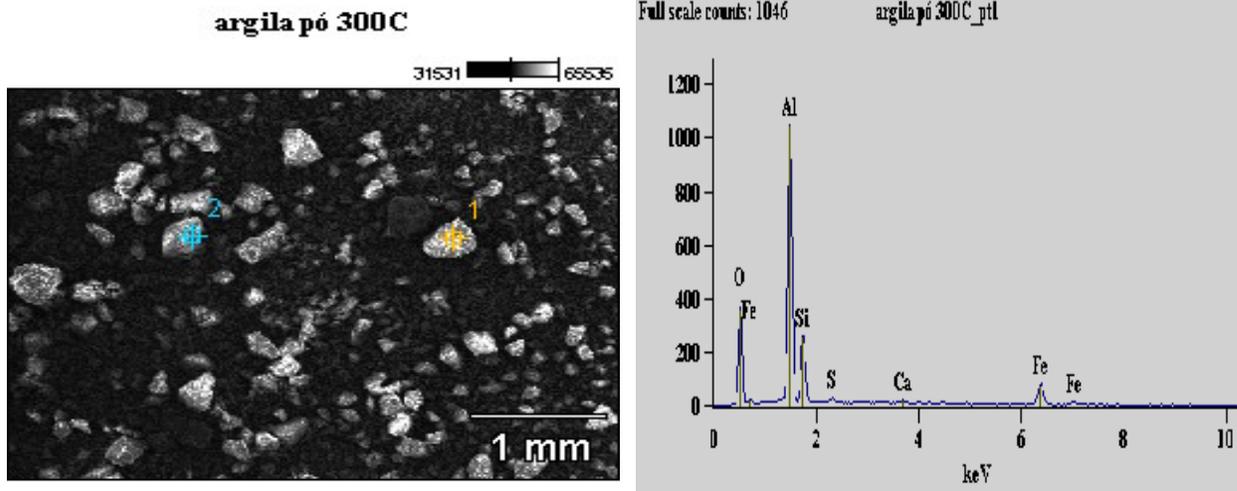


Figura 33 – Imagem obtida por microscopia eletrônica; Figura 34 – Difratoograma dos elementos químicos presentes no lodo deste estudo.

FONTE: Laboratório do Instituto Nokia de Tecnologia no estado do Amazonas.

Peso %

	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ca-K</i>	<i>Fe-K</i>
<i>argila pó 300C_pt1</i>	46.28S	32.05	10.28	1.13	0.81	9.46
<i>argila pó 300C_pt2</i>	41.34S	21.99	8.48			28.20

Figura35 – Porcentagem em peso dos elementos químicos

FONTE: Laboratório do Instituto Nokia de Tecnologia no estado do Amazonas.

Composto %

		<i>Al2O3</i>	<i>SiO2</i>	<i>SO3</i>	<i>CaO</i>	<i>Fe2O3</i>
<i>argila pó 300C_pt1</i>	0.00	60.55	21.98	2.81	1.14	13.52
<i>argila pó 300C_pt2</i>	0.00	41.55	18.13			40.31

Figura 36 - Porcentagem da composição dos óxidos presentes na amostra

FONTE: Laboratório do Instituto Nokia de Tecnologia no estado do Amazonas.

A presença em maior número do óxido de alumínio já era esperado, pela utilização do sulfato de alumínio como elemento coagulante no tratamento da água da ETA da Ponta do Ismael.

- **Análise mineralógica por difração de raio X**

O lodo da ETA da Ponta do Ismael, após calcinação, foi submetido à análise mineralógica por difração de raio X, constatando-se a presença dos elementos mineralógicos: quartzo (Q) e caulinita (Ct), de acordo com a figura 37.

O gráfico não tem picos bem definidos, provavelmente pela presença ainda de matéria orgânica na amostra de lodo. A presença de matéria orgânica foi sentida pela perda do peso da amostra, quando essa após ter sido secada a 100 °C, foi em seguida calcinada a 300 °C.

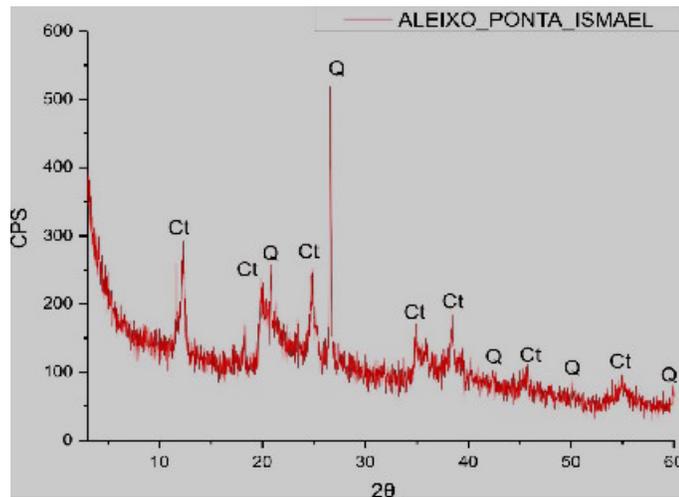


Figura 37 – Difratograma da amostra de lodo deste estudo

FONTE: Laboratório do departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas - UFAM

3.2 ENSAIO MARSHALL

• Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada

Fez-se o enquadramento dentro da faixa C do DNIT, obtendo-se 67 % de seixo, 28 % de areia e 5 % de cimento, conforme mostram tabela 7 e figura 38;

Peneira		Seixo		Areia		Cimento		composição	Faixa C
nº	Mm	% pass.	0,67	% pass.	0,28	% pass.	0,05	agregados	(DNIT)
1"	25,4								
¾"	19,1	100,00	67,00	100,00	28,00	100,00	5,00	100,00	100
½"	12,7	98,35	65,89	100,00	28,00	100,00	5,00	98,89	80 - 100
3/8"	9,5	90,10	60,37	100,00	28,00	100,00	5,00	93,37	70 - 90
4	4,8	41,30	27,67	99,18	27,77	100,00	5,00	60,44	44 - 72
10	2	16,56	11,10	95,89	26,85	100,00	5,00	42,94	22 - 50
40	0,42	1,98	1,33	57,50	16,10	100,00	5,00	22,43	8 - 26
80	0,18	0,67	0,45	16,94	4,74	98,47	4,92	10,12	4 - 16
200	0,075	0,20	0,13	1,28	0,36	92,14	4,61	5,10	2 - 10

Tabela 7. Enquadramento da granulometria dos agregados conforme Norma DNIT 031/2004 –

ES. Página 5. Pavimentos flexíveis-concreto asfáltico.

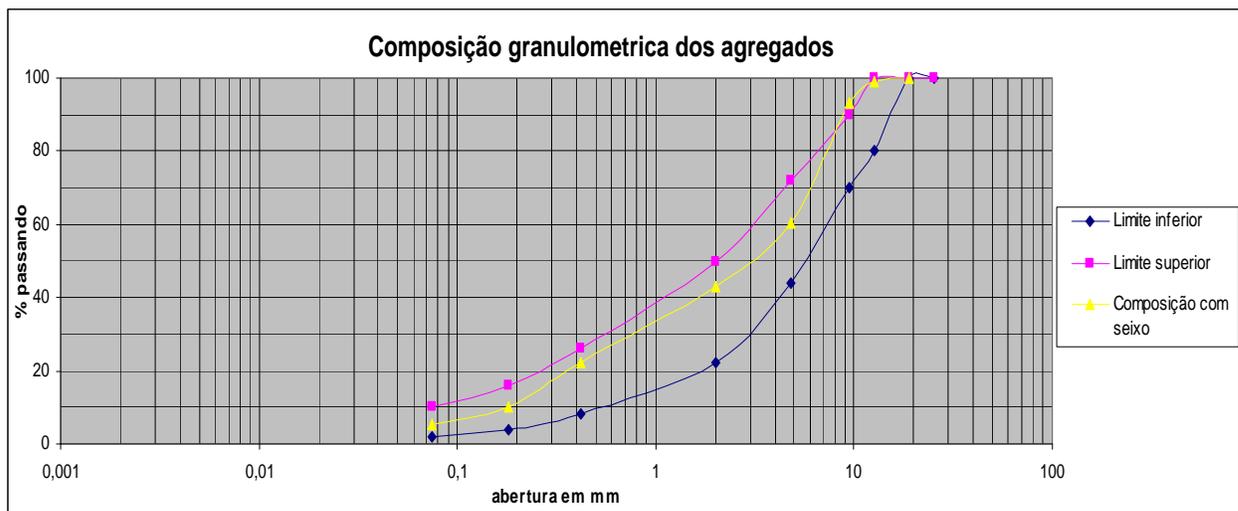


Figura 38 - Composição granulométrica dos agregados utilizado nesta pesquisa

- **Escolha das temperaturas de mistura e compactação**

As temperaturas encontradas foram para o CAP de 157 °C, para os agregados de 170 °C e para a mistura betuminosa de 146 °C, conforme quadro 3 e figura 39.

Viscosidade Saybolt Furol	
temperatura (°C)	tempo (s)
120	466
135	193
158	70
182	30

Quadro 3 – Relação temperatura x tempo no ensaio de viscosidade SF do CAP utilizado nesta pesquisa

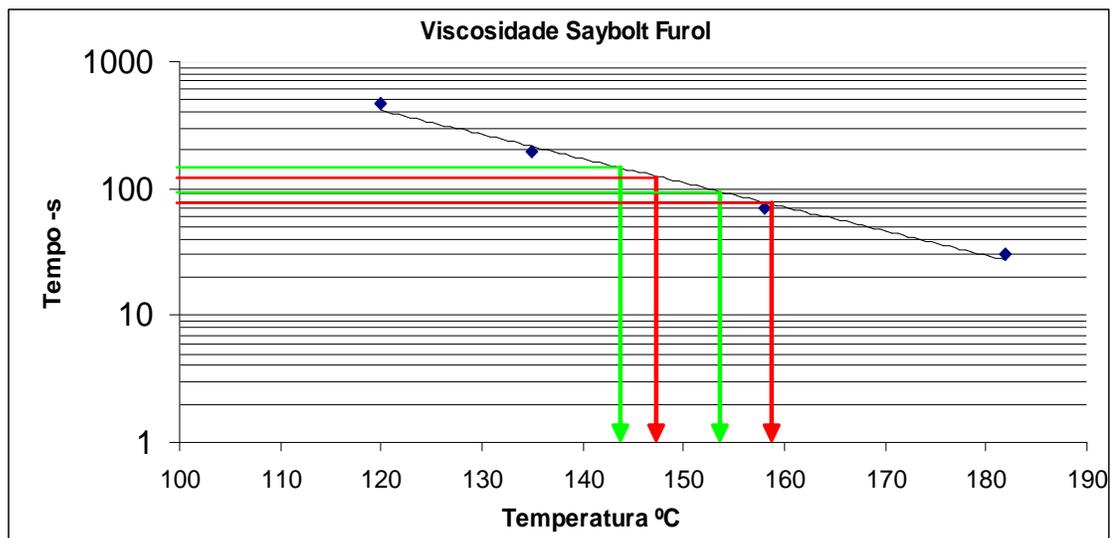


Figura 39 – Gráfico da relação temperatura x tempo

- **determinação da estabilidade e fluência**

Os teores que mais se aproximaram dos valores estabelecidos por norma do DNIT quanto a volume de vazios, relação betume/vazios, *Marshall* e fluência, encontravam-se na faixa

de 4,5 % a 5,5 % de teor de CAP. Fez-se três novas composições com 4,8 %, 5,0 % e 5,3 % de teor de CAP, para se determinar o teor ótimo das misturas.

As figuras 40 a 44 mostram os resultados obtidos com utilização de 100 % do lodo da ETA como fíler, para os teores de 4,8 %, 5 % e 5,3 % de CAP, utilizados para se determinar o teor ótimo de CAP.

• **determinação do teor ótimo da mistura**

Obteve-se o teor ótimo da mistura pelo método do Salomão Pinto para o seguinte traço: 63,65 % de seixo, 26,60 % de areia, 4,75 % de fíler e 5 % de CAP.

Adotou-se este traço para todas as misturas incluindo-se as que continham lodo da ETA como *filler*.

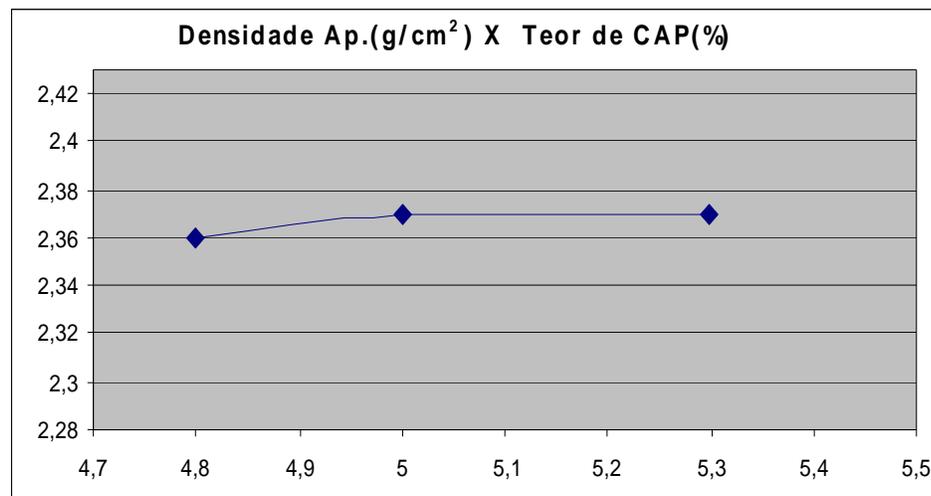


Figura 40 – Evolução da curva de densidade aparente x teor de CAP da mistura asfáltica de referência deste estudo

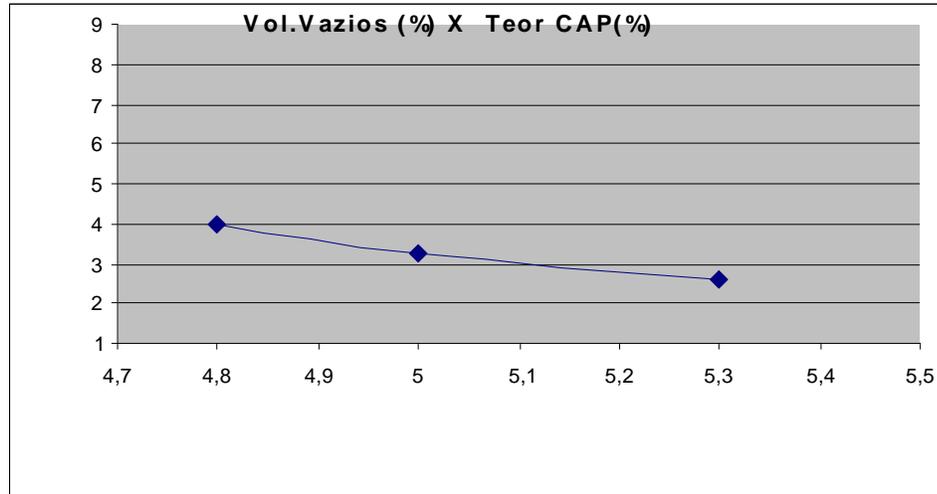


Figura 41 – Evolução da curva de volume de vazios x teor de CAP da mistura de referência deste estudo

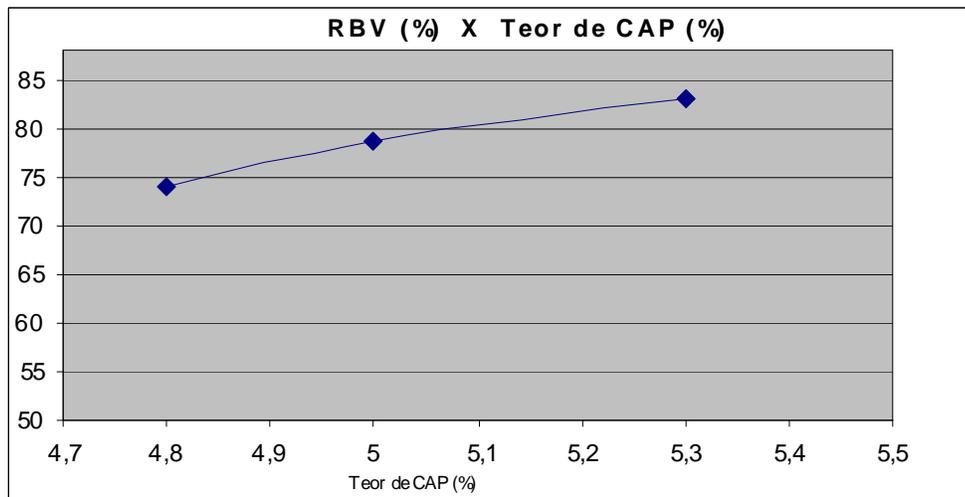


Figura 42 – Evolução da curva de RBV x teor de CAP da mistura de referência deste estudo

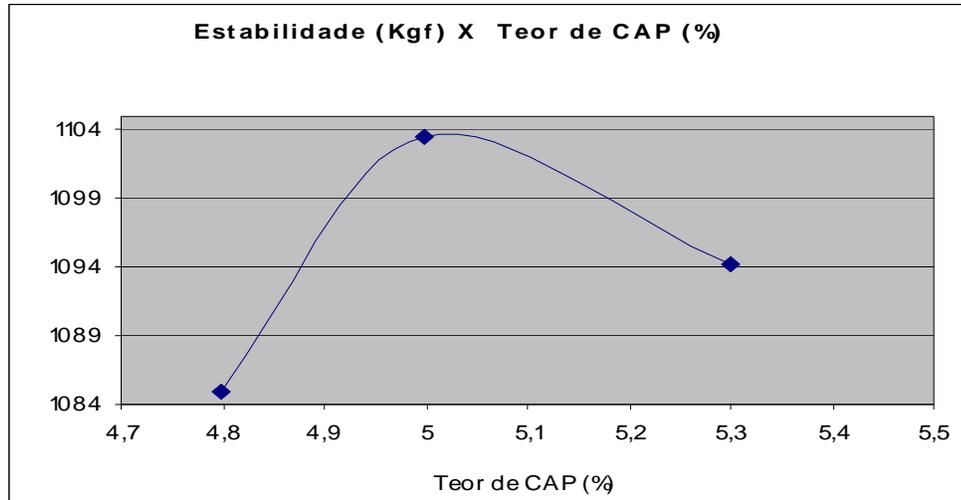


Figura 43 – Evolução da curva de estabilidade x teor de CAP da mistura de referência deste estudo

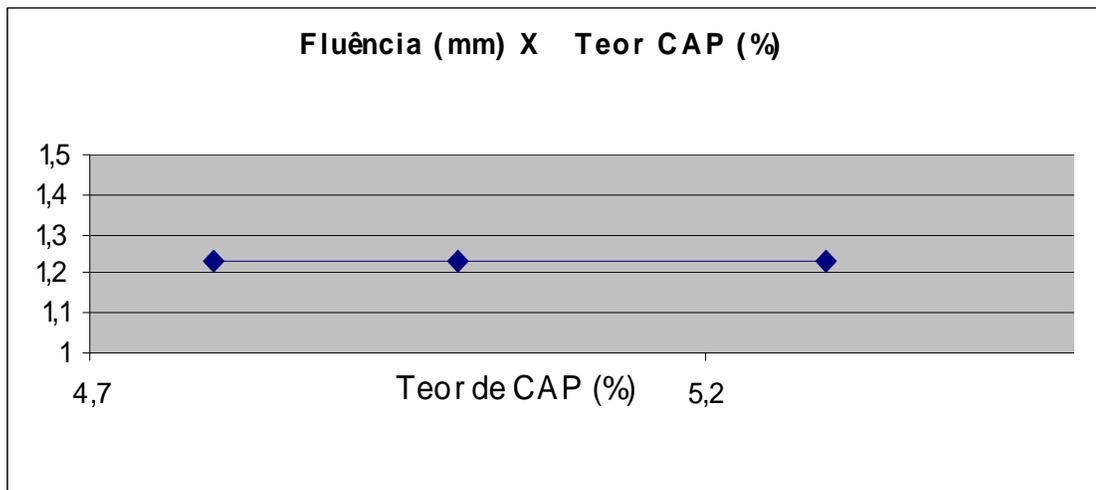


Figura 44 – Evolução da curva de fluência x teor de CAP da mistura de referência deste estudo

Adotou-se o teor de projeto de 5 %, que conduziu à características dentro de um intervalo aceitável dos parâmetros volumétricos.

Para a mistura com 100 % de lodo o valor encontrado foi de 4,8 % de CAP e de 5 % de CAP para o cimento *Portland*, ou seja, uma diferença de 0,2 % entre os dois teores. Na usina aceita-se até 0,3 % como variação do teor de projeto.

Provavelmente se tivéssemos usado o teor de CAP um pouco menor, como o fíler do lodo da ETA é mais fino, o enrijecimento da mistura teria sido maior. Acredita-se que o enrijecimento da mistura não foi mais acentuado, por ter-se acrescido um pequeno aumento do ligante, de 4,8 % para 5 % de CAP.

Optou-se em moldar os corpos-de-prova com 5 % de CAP, tanto para o cimento *Portland* como para o lodo da ETA, para se ter uma comparação, entre os dois tipos de materiais utilizados como fíler na mistura betuminosa.

• ensaio Rice

Obteve-se o resultado constante no quadro 4 para os três tipos de misturas.

	Massa do CP (g)	Densidade
100 % cimento	2.157,4	2,426
50 % cim + 50 % lodo	2.170,6	2,391
100 % lodo	2.183,8	2,371

Quadro 4 – Resultados do Ensaio Rice.

Observou-se que com a adição do lodo na mistura asfáltica em substituição ao cimento *Portland*, a sua densidade diminuía. Esta relação é função do lodo da ETA ter menor massa específica que o cimento *Portland* e conseqüentemente, menor densidade do conjunto.

• Resultados

O ensaio *Marshall* dá indicação do comportamento do pavimento, quanto à estabilidade e fluência do mesmo.

A norma DNIT – ES 031/2004 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: ≥ 500 kgf e valores para fluência de 2,5 mm a 4,5 mm.

Após os ensaios realizados em laboratório, obtiveram-se os valores médios para teor ótimo de 5% de ligante constantes no quadro 5 para todas as misturas preparadas neste estudo.

Material	Quant. CP	Dens. Apar.	vv(%)	RBV(%)	Estabilidade (kgf)	Fluência(mm)
100% C	13	2,37	4,01	74,97	709,72	2,67
75% C + 25% L	05	2,39	3,18	79,06	711,25	2,35
50% C + 50% L	05	2,39	3,15	79,21	820,74	2,73
25% C + 75% L	05	2,37	3,18	79,00	884,82	2,34
100% L	06	2,36	3,62	76,61	977,17	2,94

Quadro 5 - Valores obtidos no Ensaio *Marshall* com 5% de teor de asfalto (teor ótimo)

Sendo: C = cimento Portland; L = lodo da ETA

Observou-se que todas as misturas atenderam a norma do DNIT no tocante a volume de vazios e relação betume-vazios.

Com relação à estabilidade, as misturas confeccionadas com lodo apresentaram melhores resultados, na proporção em que se aumentava a quantidade de lodo como fíler. A substituição total do cimento pelo lodo, proporcionou um ganho de resistência mecânica correspondente a **27,37** %.

Nas figuras 45 a 48 são mostrados os resultados das características mostras no Quadro 6 à medida em que se foi adicionando o lodo da ETA em substituição ao cimento *Portland* nos corpos-de-prova.

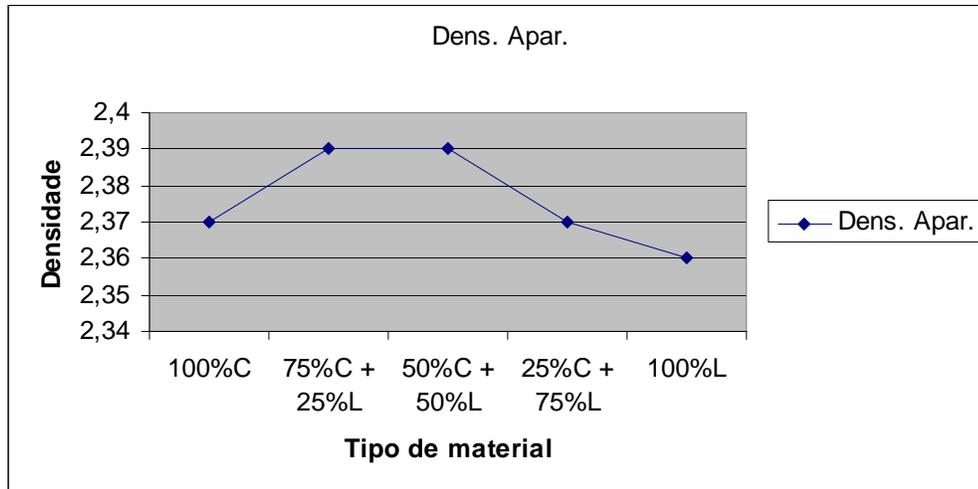


Figura 45 – Evolução da densidade aparente com a quantidade de lodo deste estudo

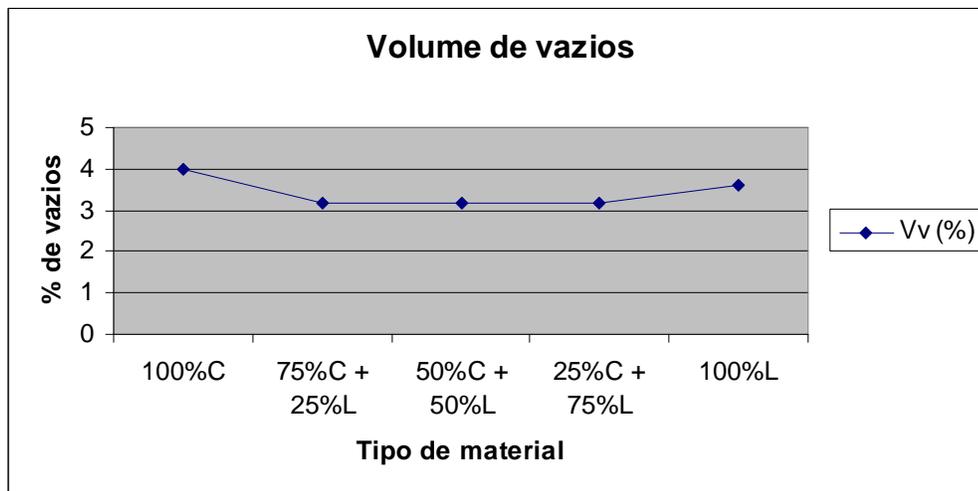


Figura 46 – Evolução do volume de vazios com a quantidade de lodo deste estudo

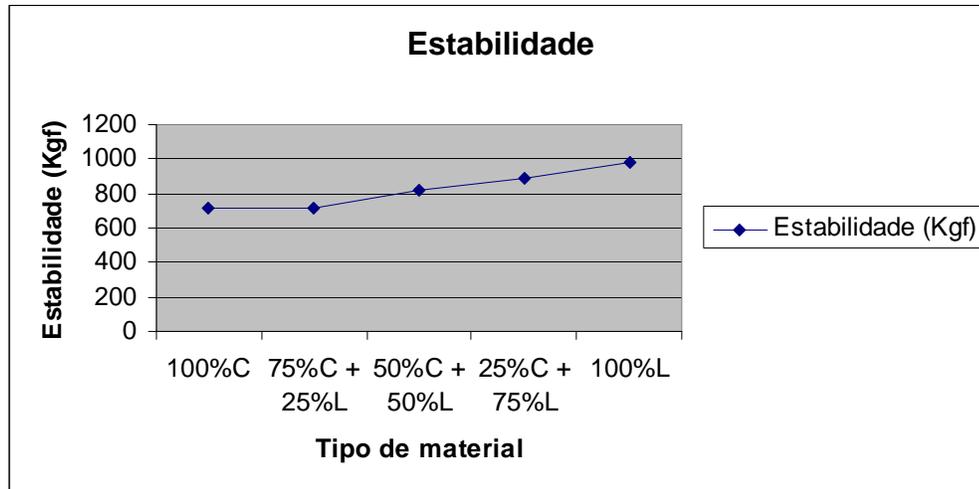


Figura 47 – Evolução da estabilidade com a quantidade de lodo deste estudo

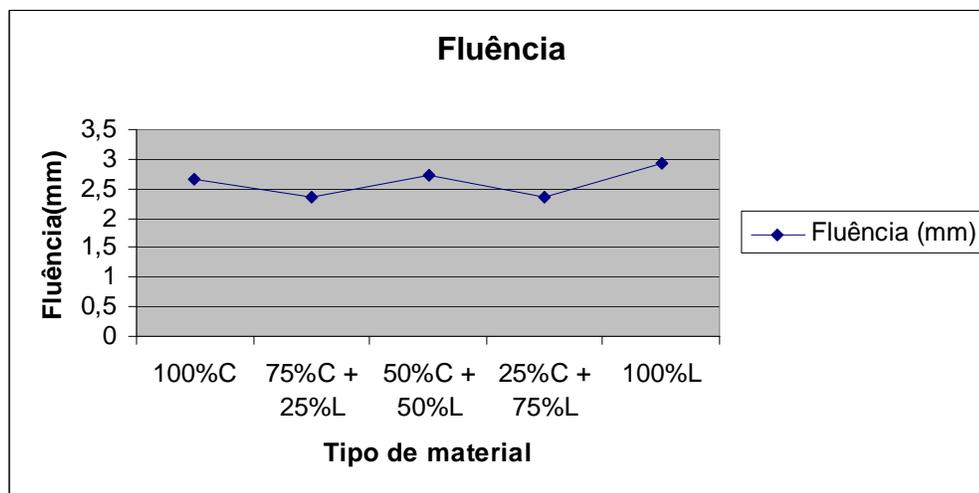


Figura 48 – Evolução da fluência com a quantidade de lodo deste estudo

A análise dos resultados *Marshall* foram realizados tendo-se como parâmetro o volume de vazios (V_v).

Os resultados volumétricos (V_v , RBV) por serem tendências físicas, são aproximações, no qual se imagina os corpos-de-prova como um corpo esférico perfeito, com volume de vazios do mesmo tamanho e granulometria bem distribuída.

Os resultados mecânicos, estabilidade, resistência à tração ou módulo, são mais coerentes com a proporcionalidade dos resultados, os quais tendem a acompanhar a curva de tendência.

3.3 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RT

A norma DNIT 031/2004 estabelece como limite mínimo os valores de $\geq 6,5 \text{ kgf/cm}^2$ ou $0,65 \text{ MPa}$ a serem obtidos para este ensaio para uma mistura tipo CBUQ.

Após os procedimentos estabelecidos por norma, obtiveram-se os valores médios, para cada mistura, conforme mostrados no quadro 6.

Observou-se que, em todos os CBUQ em que se adicionou o lodo de ETA, houve melhoria da resistência à tração por compressão diametral. A substituição total do cimento pelo lodo, proporcionou um ganho de resistência mecânica correspondente a 7,53 %.

Material	Quant. CP	Compressão diametral a 25 ⁰ C	
		Kgf/cm ²	MPa
100% C	06	8,6	0,86
75% C + 25% L	06	8,8	0,88
50% C + 50% L	06	9,3	0,93
25% C + 75% L	06	10,0	1,00
100% L	06	9,3	0,93

Quadro 6 - Valores médios dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

Na figura 49 estão mostrados os resultados do ensaio de compressão diametral feitos no Laboratório de Pavimentação da UFAM na medida em que foi adicionando-se o lodo da ETA em substituição ao cimento *Portland* nos corpos de prova.

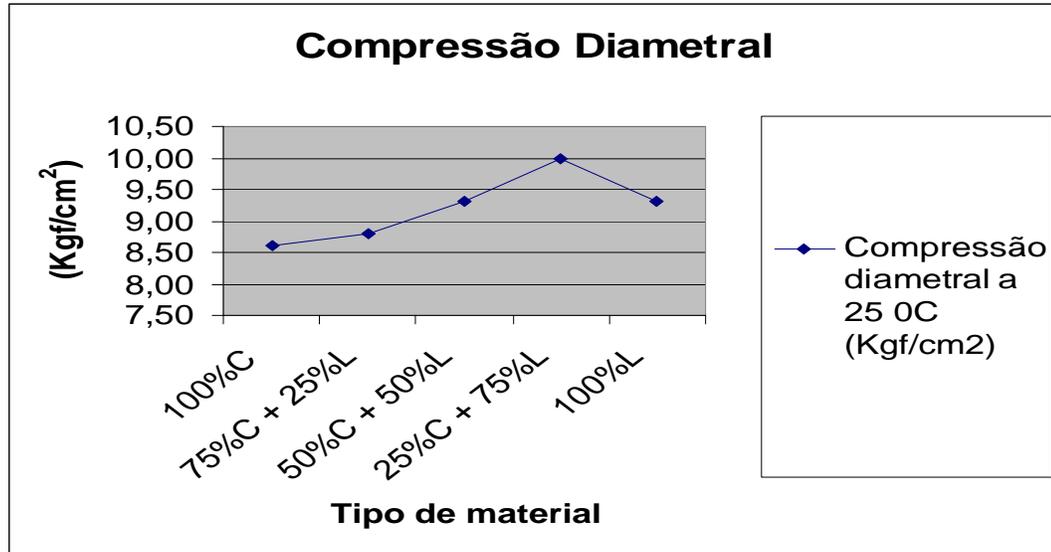


Figura 49 – Gráfico mostrando a evolução dos resultados do ensaio de compressão diametral.

Os valores obtidos pela resistência à tração foi de 0,86 MPa para o cimento *Portland* e 0,92 MPa para 100 % de lodo da ETA, valores maiores do que estabelece a norma do DNIT que é de 0,6 MPa. Logo por este critério o material, lodo da ETA, seria aceito. Estes resultados são bons porque a vida de fadiga é função da resistência à tração.

Porém se a resistência à tração for muito alta, isto pode implicar na necessidade de se aumentar a espessura do revestimento, dependendo das outras camadas, uma vez que este se torna mais rígido, diminuindo sua flexibilidade. Pavimentos muito rígidos com pouca espessura tem tendência a fissuras.

Na mistura asfáltica pode-se crescer a resistência à tração e em conseqüência o módulo de elasticidade, desde que se aumente a espessura da camada do pavimento. Ou seja o módulo de resiliência e a resistência à tração têm influência no dimensionamento do pavimento e na dosagem da mistura asfáltica.

3.4 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de módulo de resiliência faz-se necessário para se determinar as tensões geradas nas camadas de um pavimento. Devido ao comportamento visco-elástico do ligante asfáltico a resposta do revestimento é diferente para carregamentos estáticos e dinâmicos.

Os resultados obtidos em nove corpos-de-prova deste estudo, encontram-se no quadro 7, para três condições de preparo da mistura.

Dados gerais (MPa)	100 % C			50 %C + 50 % L			100 % L		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
MR s/ trat. estat.	2.875	3.281	3.703	3.907	4.317	4.867	4.273	4.726	5.278
MR 95%trat. estat.	3.222	3.316	3.422	4.155	4.242	4.519	4.519	4.591	4.732

Quadro 7 – Resultados obtidos no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.

Observou-se que, em todos os CBUQ em que se adicionou o lodo de ETA, houve aumento do módulo de resiliência por compressão diametral. A substituição total do cimento pelo lodo, proporcionou aumento de cerca de 28 % de MR em relação à mistura de referência. Com tratamento estatístico, houve um salto do valor médio de 3.316 MPa para os corpos-de-prova contendo 100 % de cimento Portland como fíler, para 4.591 MPa para os corpos-de-prova contendo 100 % de lodo da ETA.

Na figura 50 estão mostrados os valores de MR na medida em que se foi adicionando o lodo da ETA em substituição ao cimento *Portland* nos corpos de prova.

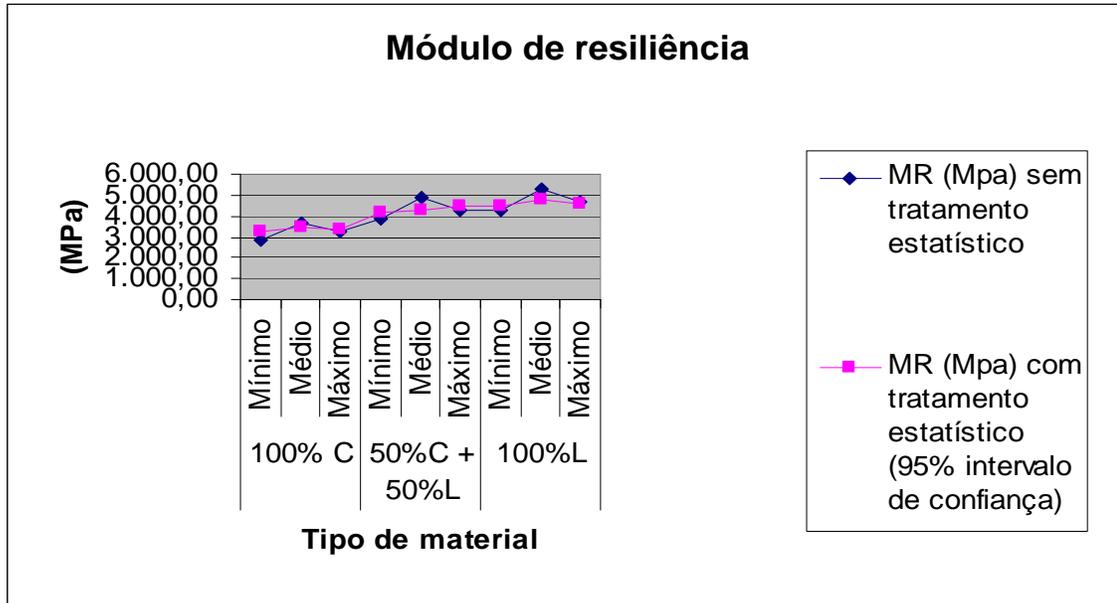


Figura 50 – Valores de módulo de resiliência das diferentes misturas deste estudo

O concreto asfáltico é flexível por ter baixo módulo de elasticidade em relação ao concreto de cimento *Portland*, por exemplo, sendo mais deformável elasticamente.

Uma possível explicação para o aumento da RT e do MR quando se acrescenta o lodo de ETA, é o fato de que por ser muito fino pode ter parte incorporada ao CAP, enrijecendo a mistura modificando a ductibilidade do CAP.

Com relação à deformação elástica a mistura com lodo de ETA aumentou o seu módulo. cerca de 10 % a 20 %.

Como a temperatura ambiente na cidade de Manaus é alta, por esta encontrar-se próximo a linha do Equador, o fíler com lodo de ETA contribui para a mistura ficar menos viscosa, deformando menos. Logo o pequeno aumento de rigidez da mistura torna-se neste caso bom para a mistura.

3.5 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga permite prever a vida útil de um pavimento, pelo efeito de cargas cíclicas de amplitudes variáveis que produzem trincas.

Nos ensaios laboratoriais aplicaram-se cargas de tensão constante em ciclos até o rompimento do CP.

Os resultados obtidos em nove corpos-de-prova, encontram-se no quadro 8.

Dados gerais	100 % Cimento			50 % Cimento + 50 % Lodo			100 % Lodo		
	Valores			Valores			Valores		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Nível de tensão (%)	10	30	50	10	30	50	10	30	50
Carga aplicada (kgf)	72,30	218,90	364,50	101,40	301,70	506,00	112,40	337,80	560,10
Pressão manométrica (kgf/m ²)	0,49	1,78	3,06	0,75	2,51	4,31	0,84	2,83	4,78
Deformação específica resiliente	2E-05	7E-05	0,0001	3E-05	8E-05	0,0001	3E-05	8E-05	0,00015
Diferença de tensões (Mpa)	0,32	0,95	1,58	0,43	1,28	2,14	0,46	1,38	2,30
Número de aplicações	242.328	1.531	211	87.718	6.700	229	371.350	1.400	132
Temperatura de ensaio	25 °C			25 °C			25 °C		
Módulo resiliente médio da amostra	3.316 Mpa			4.242 Mpa			4.591 Mpa		
Resistência máxima à tração estática (smáx.)	0,79 MPa			1,07 Mpa			1,15 Mpa		

Quadro 8 – Resultados obtidos no ensaio de Fadiga

Observou-se que, em todos os CBUQ em que se adicionou o lodo de ETA, houve modificações em todas as propriedades mecânicas tais como: resistência à carga aplicada, maior deformação resiliente, maior módulo resiliente e maior resistência à tração estática.

Nas figuras 51 a 54 estão mostrados os resultados da vida de fadiga para as misturas deste estudo, sendo a primeira mistura de referência 100 % de cimento a segunda com 50 % de

lodo e a terceira com 100 % o lodo da ETA em substituição ao cimento *Portland* nos corpos de prova.

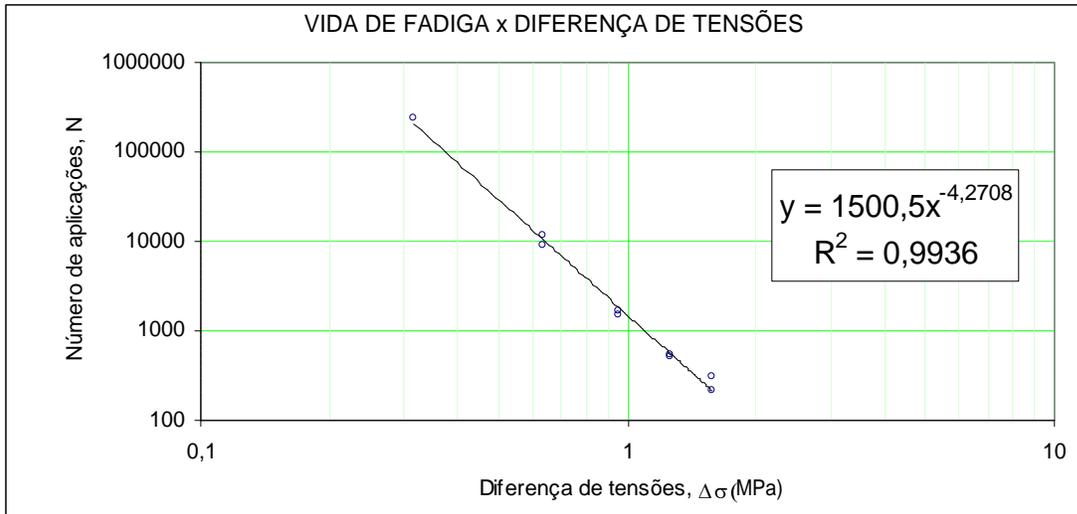


Figura 51 - Vida de fadiga x diferença de tensões de CBUQ com 100 % de cimento

FONTE: Laboratório de geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

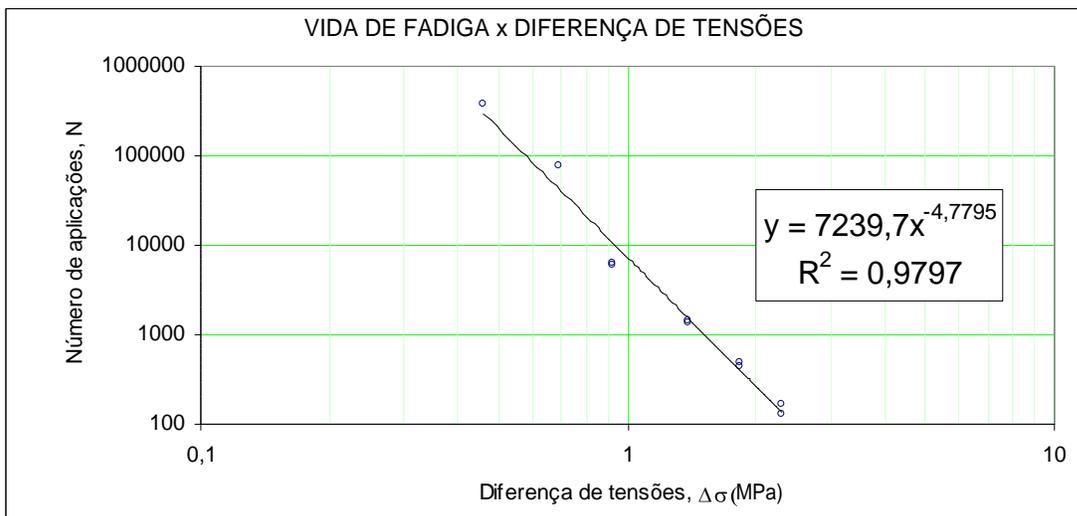


Figura 52 –Vida de fadiga x diferença de tensões de CBUQ com 100 % de lodo

FONTE: Laboratório de geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

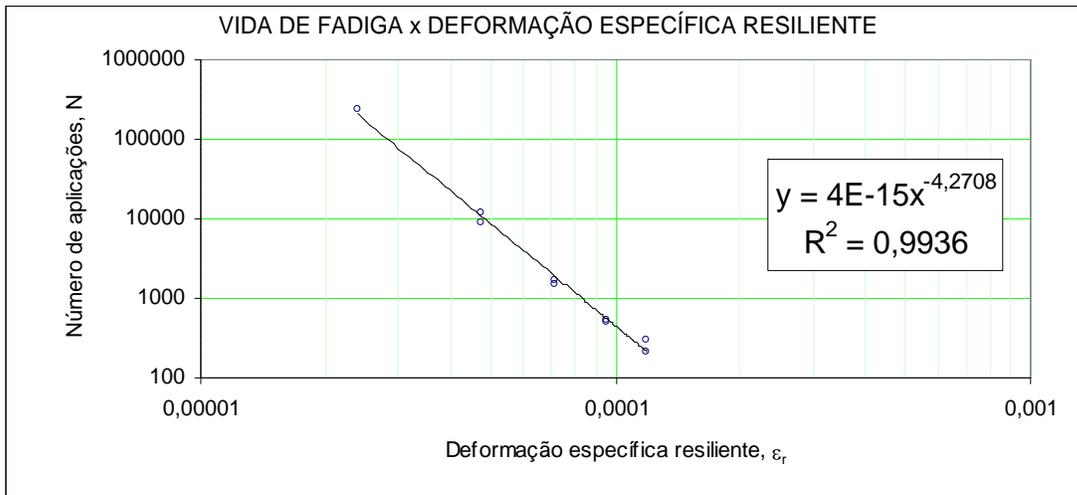


Figura 53 – Vida de fadiga x deformação específica resiliente de CBUQ com 100 % de cimento

FONTE: Laboratório de geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

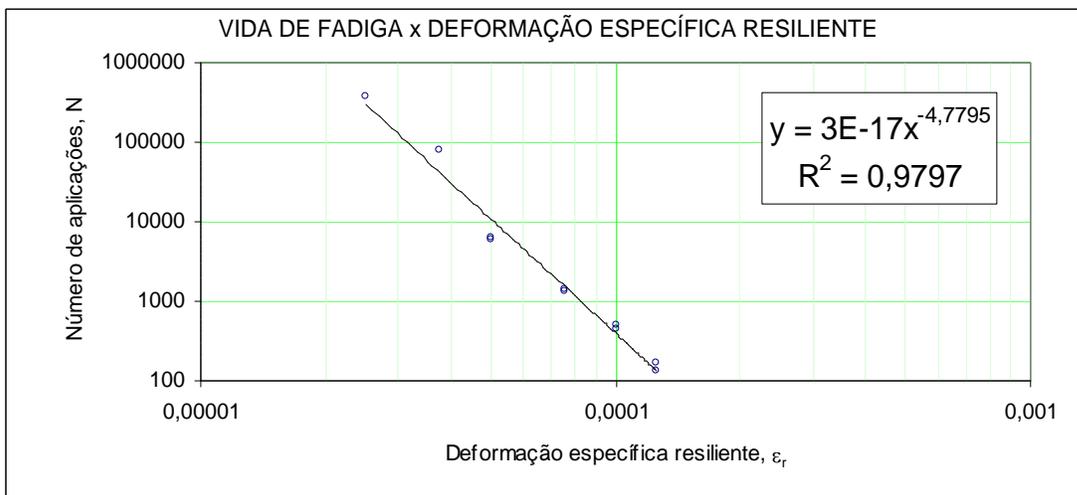


Figura 54 – Vida de fadiga x deformação específica resiliente de CBUQ com 100 % de lodo

FONTE: Laboratório de geotecnia no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa - COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

As curvas de vida de fadiga apresentam boa formação porque os pontos estão bem próximos um do outro, ou seja, com pouca dispersão. Portanto a curva é bem representativa.

As curvas das misturas de cimento *Portland* e o lodo da ETA, veríamos que elas são quase paralelas pelo fato de que o expoente (n) de ambas são parecidos, porém como os coeficientes k são bem diferentes elas estão deslocadas.

A priori pode-se dizer, que a mistura com lodo da ETA tem um tempo de vida de fadiga maior, porque a curva com lodo da ETA, está um pouco acima da curva da mistura com cimento *Portland*.

Como as tensões são proporcionais aos módulos, a mistura com lodo da ETA está ligeiramente mais rígida que a mistura com cimento *Portland*. Por ter módulo maior, então vai absorver mais tensões. Pode ocorrer que no limite, as duas misturas tenham a mesma vida de fadiga dependendo da estrutura total do pavimento e do subleito em cada caso.

A vida de fadiga da mistura com lodo da ETA, poderá ter maior valor que a da mistura com cimento *Portland*, se garantirmos, por intermédio das espessuras das misturas, tensões iguais.

De forma geral, é preciso ter cuidado para não se enrijecer muito a mistura com o lodo da ETA, uma vez que se a camada do revestimento for pouca espessa, este não absorverá a carga e surgirá a presença de trincas no pavimento.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com relação ao aproveitamento do lodo da ETA em CBUQ, que é o objetivo do presente estudo, teve-se a confirmação do enrijecimento dos mastiques em função do tipo e da finura do fíler, que granulometricamente foi preparado para ter suas dimensões, com 100 % passando na peneira 200.

O fíler parte dele se incorpora ao ligante enrijecendo-o. Como o ligante envolve o agregado mais graúdo e como este ligante está mais enrijecido, o módulo é maior.

O fíler do lodo da ETA por ser muito fino aumentou a rigidez da mistura, podendo melhorar a deformação permanente, evitando o deslocamento do material da mistura. Com isto a mistura ficou menos elástica aumentando o módulo resiliente.

Obtendo-se um fíler do lodo da ETA bastante fino parte do mesmo pode se incorporar no ligante, enrijecendo-o, o que no caso de Manaus pode ser considerado positivo, porque o CAP 50/70 utilizado na região é muito mole, para as temperaturas elevadas do local, fazendo com que diminua a rigidez da mistura nas horas mais quentes do dia.

Quanto aos ensaios mecânicos, em função do enrijecimento da mistura, houve melhoria das propriedades.

Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para a utilização destes resíduos de lodo de ETA, como matérias primas em aplicações mais nobres possíveis, minimizando impactos ambientais e aumentando a lucratividade da empresa que gerar este tipo de resíduo.

Os resultados mostraram que a substituição do cimento *Portland* pelo lodo de ETA, proporcionou ganho de resistência mecânica no CBUQ produzido, o que comprova tecnicamente o uso desse material em concreto asfáltico a quente.

Que se dê continuidade a pesquisa, recomenda-se dentre outros, estudo de caracterização deste tipo de fíler, bem como definição dos limites mínimos e máximos da fração

fina deste tipo de fíler em misturas com o ligante da região. Ainda com relação à caracterização, sugere-se a análise da distribuição granulométrica do fíler e testes *Lottman* de dano por umidade induzida para melhor avaliar a sensibilidade à água.

Recomenda-se também: estudar a variabilidade dos elementos químicos e físicos presentes no lodo para verificar se há modificação destas propriedades ao longo de um ano; estudar necessidade ou não de queima de lodo; estudar a quantidade de matéria orgânica no lodo; estudar qual o tipo de processo industrial para utilização do lodo; estudar a quantidade real de material sólido disponível no lodo, e, que deverá ser utilizado como fíler; fazer ensaio de deformação permanente.

REFERÊNCIAS

- AASHTO T 209. Theoretical maximum specif gravity and density of bituminous paving mixtures, 2008.
- ABNT NBR – 6560/00. Materiais betuminosos-determinação de ponto de amolecimento, 2000.
- ABNT NBR – 7175/92. Cal hidratada para argamassa, 1992.
- AGUAS DO AMAZONAS. Estudo da tratabilidade da água do Rio Negro. P. 1- 82, 2001,
- AGUAS DO AMAZONAS. Estações de tratamento de água. Memorial descritivo de funcionamento. Agosto, 2007.
- AMARAL, Simonne da Costa. Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do pará, utilizando asfalto convencional (CAP – 40) e Asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60). São Carlos/SP. 300 p. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2000.
- ASTM D 2041. A Standard test method for theoretical maximum specif gravity and density of bituminous paving mixtures, 2003.
- ASTM D 2161. Standard Practice for Conversion of kinematic viscosity , *Saybolt* universal viscosity or to *Saybolt Furol* viscosity, 2005.
- ASTM D 2170. Standard test method for kinematic viscosity of asphalts bitumens, 2007.
- BALBO, J.T. Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção. Editora Plêiade. 103 p, 1997.
- BANCO MUNDIAL, Recursos hídricos, 1994.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, 2007.
- BLEICHER, Lucas; SASAKI, José Marcos. Introdução à difração de raios-X em cristais. 20 p, 2000.

BORSOI, Zilda Maria Ferrão; TORRES, Solange Domingo Alencar. A Política de recursos hídricos no Brasil. 15 p.

BOULDIN, M.G.; COLLINS, J.H. Influence of binder rheology on rut resistance of polymer modified and unmodified hot mix asphalt. Polymer modified asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p. 50-0, 1992.

BRUNA, Gilda Collet; VIZIOLI, Simone Helena Tanone. Rodovia e meio ambiente. Rio de Janeiro/RJ. 10 p. 35^a Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro. Outubro/2004.

CERATTI, J.A.; RUWER, P.M.; OLIVEIRA, J.A. Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímero. 13^o Encontro de asfalto.v.1.p.290-303,1996.

COELHO, V. Considerações sobre deformações permanente em camadas asfálticas de pavimentação. 12^o Encontro de asfalto..p.179-194,1994.

CORDEIRO, João Sérgio. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. p. 1 – 19, 1993.

CORDEIRO, João Sérgio. O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água. 343 p, 1993.

CORTÉ, J. F.; BROSSEAUD, Y.; SIMONCELLI, J. P.; CAROFF, G. Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration. Transportation Research Record 143, p, 28 – 37. 1994.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. As rodovias e o desenvolvimento da Amazônia. 9 p. 1973.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Especificação de material. 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 086/94. Agregados – determinação do índice de forma, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio. DNER – ME 089/94. Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Método de ensaio DNER – ME 133/94. Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliencia.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 204/95. Cimentos asfálticos de petróleo. 7p.1995.

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 E TRANSPORTES. Roteiro básico para sistemas rodoviários nacionais. P.1 – 56, Rio de Janeiro. Outubro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES. Especificação de serviço. DNIT 031/2004. Pavimentos flexíveis. Concreto asfáltico, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM: Guia do investidor no Brasil / Mineral business: Investor's guide in Brazil. Brasília-DF: DNPM, 200 p. – Ilustradas. 2006.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P.L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M. de; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A.C. & ACAUN, R. B. Aplicações de microscopia eletrônica de

varredura (MEV) e Sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros. Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre, RS – Brasil, 2003.

FRAZÃO, Ely Borges. Tecnologias de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2002.

FILHO, Virgílio F. Nascimento. Dept^o de Ciências Exatas/ESALQ. Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA. Julho. 1999.

GONTIJO, P.R.A. -a. Reologia, propriedades visco-elásticas lineares e conceito do módulo de rigidez de betumes puros e de misturas betuminosas – método de cálculo. Instituto Brasileiro de Asfalto - IBP. 5^o Encontro de Asfalto. P. 257 - 305, 1980.

GONTIJO, P.R.A. -b. A fadiga de misturas betuminosas. Condição essencial no desenvolvimento racional de pavimentos flexíveis. 15^a Reunião Anual de Pavimentação. 55p, 1980.

GORDINHO, Margarida Cintra. Transportes no Brasil: a opção rodoviária. Editora Marca D'água. São Paulo, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Informações básicas sobre materiais asfálticos. Comissão de asfalto. 68 p, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Informativo ‘O Asfalto’. Rio de Janeiro. p. 1 –5, 1996.

KARASAHIN, M; TERZI, S. Use of marble waste in the mixture of asphaltic concrete as mineral filler.2004.

LEITE, L.F.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, J.A.; BASTOS, A.C.R. Produção de asfaltos segundo especificações Superpave. 9^o Congresso Ibero- Latino Americano Del Asfalto Assunción, Paraguay. P. 87-98, 1997.

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

- MOTTA, L. M. G.; PINTO, S. O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas. 12^o Encontro de Asfalto, p. 152 – 178, 1994.
- MOTTA, L. M. G.; SÁ, M. F. P.; OLIVEIRA, P. M. F.; SOUSA, A. M. O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas. 30^a Reunião Anual de Pavimentação, p. 115 – 135, 1996.
- PAIS, J. C. Consideração da reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis. Portugal, 262 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, 1999.
- PINTO, S. Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem, 2003.
- PINTO, S. Materiais betuminosos. Conceituação, especificação e utilização, 2002.
- PORTAL AMAZONIA. O transporte rodoviário no Amazonas, 2007
- REALI, Marco Antonio Penalva. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. p. 21 – 37, 1993.
- RESTOM, Mário Kabalem. Pavimentações betuminosas. Associação Brasileira de Pavimentação. Pavimentos: dimensionamento, tecnologia, construções. P. 513 – 543, 1963.
- SÁ, M. F. P.; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaios de creep estático e dinâmico para caracterização de misturas asfálticas. 13^o Encontro de Asfalto, v. I, p.91 – 115, 1996.
- SAYED, Mohammed H; Al. MADANY, Ismail; M. BUALI, A. Rahman. Use of Sewage Sludge Ash in Asphaltic Paving Mixes in Hot Regions. Construction and Building Materials. Vol. 9. No 1. pp. 19-23. 1995.
- SETTI, Arnaldo Augusto. LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. CHAVES, Adriana Goretti de Miranda. PEREIRA, Isabella de Castro. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Agência Nacional de Água – ANA. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. 328 p. 2001.

SOUZA, J.B.; CRAUSS, J.; MONISMITH, C. L.; Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. Publicação SHRP-A/IR -91-104 do Strategic Highway Research Program. 120 p, 1991.

STEEL, Ernest W. Abastecimento de água e sistemas de esgoto. Ao Livro Técnico S. A. Rio de Janeiro. 592 p.1966.

TAYEBALI, A. A.; GOODRICH. J.L.; SOUSA, J.B.; MONTSMITH, C.L. Influence of properties of modified asphalt binders on the load deformation characteristics of binder – aggregate mixtures. Polymer modified asphalt binders, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.77 -95, 1992.

WESSELING, Diego Henrique; SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge A. Pereira. Estudo laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fileres. Campinas/SP. 14 p. 34ª Reunião Anual de Pavimentação. Agosto/2003.

ZIONI, Silvana. Análise histórica da produção de transporte urbano em São Paulo, in SANTOS, Enilson e ARAGÃO, Joaquim. Transporte em tempos de reforma. Editora LGE, s/d., pg. 409,1991.

ANEXOS

ANEXO I

DIMENSÕES DOS CORPOS - DE – PROVA E DENSIDADE APARENTE

(CPs MOLDADOS NA UFAM E ENSAIADOS NO COPPE)

Projeto:		UFAM - CBUQ com 100% cimento								PROTOCOLO	40-08				
Ensaio:		Fadiga, MR e Creep													
Operador:		Washington				Interessado:		UFAM (José Aleixo)						DATA:	22-07-08
Nº DO CP		DETERMINAÇÃO DA ALTURA MÉDIA (cm)				DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO (cm)				PESO SECO (g)	PESO ÚMIDO (g)	PESO IMERSO (g)	VOLUME (cm ³)	ensaio	
Lab	Proj	h1	h2	h3	h4	φ1	φ2	φ3	φ4						
10545	01	5,59	5,61	5,62	5,62	10,13	10,12	10,13	10,12	1077,0	1077,2	629,4	447,6	CREEP	
10546	02	5,64	5,67	5,68	5,63	10,13	10,14	10,13	10,14	1086,0	1086,1	634,2	451,8		
10547	03	5,65	5,64	5,65	5,66	10,14	10,14	10,13	10,14	1083,3	1083,6	632,7	450,6		
10563	01	5,63	5,62	5,64	5,66	10,15	10,15	10,14	10,16	1084,3	1084,5	633,7	450,6	MR	
10564	02	5,62	5,61	5,67	5,58	10,17	10,18	10,17	10,15	1081,1	1081,5	631,4	449,7		
10565	03	5,63	5,72	5,65	5,67	10,15	10,15	10,15	10,13	1084,9	1085,3	633,4	451,5		
10596	1	5,64	5,60	5,64	5,64	10,16	10,16	10,14	10,15	1079,6	1079,9	630,0	449,6	Fadiga	
10597	2	5,65	5,62	5,71	5,60	10,17	10,16	10,16	10,14	1083,0	1083,6	631,2	451,8		
10598	3	5,63	5,62	5,62	5,63	10,18	10,16	10,17	10,16	1081,5	1082,2	631,8	449,7		
10599	4	5,66	5,66	5,67	5,69	10,16	10,15	10,14	10,14	1082,1	1082,4	631,3	450,8		
10600	5	5,75	5,64	5,62	5,71	10,15	10,16	10,15	10,14	1079,0	1079,2	628,7	450,3		
10601	6	5,66	5,67	5,61	5,67	10,15	10,16	10,17	10,17	1079,7	1080,0	628,5	451,2		
10602	7	5,62	5,62	5,70	5,63	10,16	10,15	10,15	10,15	1080,5	1080,7	630,4	450,1		
10603	8	5,58	5,62	5,64	5,57	10,16	10,16	10,16	10,15	1078,9	1079,4	630,8	448,1		
10604	9	5,72	5,65	5,61	5,73	10,14	10,14	10,14	10,14	1080,7	1080,9	631,5	449,2		
10605	10	5,60	5,61	5,69	5,61	10,13	10,14	10,14	10,15	1083,9	1084,1	634,4	449,5		
10606	11	5,59	5,69	5,63	5,61	10,16	10,15	10,17	10,17	1084,5	1084,7	633,0	451,5		
10607	12	5,64	5,73	5,69	5,65	10,14	10,15	10,16	10,16	1083,3	1083,4	631,6	451,7		

A1 – Medidas dos CPs (100 % de cimento como *filler*)

Projeto:		UFAM - CBUQ com 50% lodo								PROTOCOLO	42-08				
Ensaio:		Fadiga, MR e Creep													
Operador:		Washington				Interessado:		UFAM						DATA:	22-07-08
Nº DO CP		DETERMINAÇÃO DA ALTURA MÉDIA (cm)				DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO (cm)				PESO SECO (g)	PESO ÚMIDO (g)	PESO IMERSO (g)	VOLUME (cm ³)	ensaio	
Lab	Proj	h1	h2	h3	h4	φ1	φ2	φ3	φ4						
10551	01	5,66	5,68	5,69	5,66	10,17	10,16	10,14	10,14	1086,7	1087,2	631,5	455,2	CREEP	
10552	02	5,71	5,67	5,68	5,71	10,16	10,16	10,15	10,16	1089,7	1090,0	633,0	456,7		
10553	03	5,73	5,67	5,69	5,72	10,14	10,15	10,15	10,14	1089,2	1089,8	634,0	455,2		
10569	01	5,69	5,68	5,68	5,68	10,17	10,17	10,17	10,17	1089,1	1089,6	631,7	457,4	MR	
10570	02	5,65	5,65	5,70	5,62	10,17	10,15	10,15	10,16	1084,2	1084,6	630,5	453,7		
10571	03	5,73	5,64	5,70	5,70	10,16	10,17	10,16	10,15	1088,6	1089,2	632,9	455,7		
10572	1	5,76	5,92	5,73	5,85	10,16	10,16	10,15	10,15	1095,7	1096,0	629,7	466,0	Fadiga	
10573	2	5,82	5,78	5,74	5,82	10,16	10,16	10,16	10,16	1096,0	1096,4	632,2	463,8		
10574	3	5,75	5,81	5,73	5,77	10,15	10,15	10,15	10,15	1092,7	1093,0	630,6	462,1		
10575	4	5,82	5,80	5,81	5,82	10,15	10,15	10,15	10,14	1096,8	1097,5	632,0	464,8		
10576	5	5,70	5,77	5,74	5,71	10,16	10,16	10,17	10,17	1088,3	1088,9	627,8	460,5		
10577	6	5,79	5,77	5,80	5,76	10,16	10,15	10,14	10,14	1092,0	1092,7	629,9	462,1		
10578	7	5,75	5,74	5,74	5,76	10,15	10,15	10,15	10,16	1084,8	1085,3	624,2	460,6		
10579	8	5,78	5,81	5,77	5,77	10,13	10,14	10,16	10,16	1088,6	1088,7	626,0	462,6		
10580	9	5,75	5,75	5,82	5,73	10,16	10,19	10,17	10,15	1088,5	1089,0	625,3	463,2		
10581	10	5,82	5,78	5,81	5,83	10,16	10,16	10,15	10,15	1089,5	1090,4	625,5	464,0		
10582	11	5,74	5,74	5,73	5,77	10,18	10,18	10,17	10,16	1087,8	1088,3	627,1	460,7		
10583	12	5,77	5,76	5,83	5,76	10,15	10,15	10,15	10,15	1088,6	1089,2	626,1	462,5		

A2 – Medidas dos CPs (50 % de lodo como *filler*)

Projeto:		UFAM - CBUQ com 100% lodo								PROTOCOLO	41-08			
Ensaio:		Fadiga, MR e Creep												
Operador:		Washington				Interessado:		UFAM (José Aleixo)				DATA:	22-07-08	
Nº DO CP		DETERMINAÇÃO DA ALTURA MÉDIA (cm)				DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO (cm)				PESO SECO (g)	PESO ÚMIDO (g)	PESO IMERSO (g)	VOLUME (cm ³)	ensaio
Lab	Proj	h1	h2	h3	h4	φ1	φ2	φ3	φ4					
10548	01	5,76	5,79	5,80	5,76	10,15	10,15	10,15	10,14	1095,9	1096,2	632,2	463,7	CREEP
10549	02	5,80	5,82	5,83	5,81	10,15	10,15	10,15	10,15	1092,8	1093,3	628,0	464,8	
10550	03	5,83	5,80	5,81	5,82	10,15	10,15	10,15	10,15	1094,6	1095,3	630,8	463,8	
10566	01	5,84	5,77	5,79	5,86	10,16	10,15	10,16	10,16	1092,5	1093,2	629,1	463,4	MR
10567	02	5,77	5,80	5,75	5,77	10,16	10,16	10,15	10,17	1091,7	1092,0	629,7	462,0	
10568	03	5,81	5,82	5,78	5,84	10,16	10,15	10,16	10,16	1092,7	1093,3	628,4	464,3	
10584	1	5,98	6,03	5,97	6,00	10,17	10,16	10,17	10,17	1098,8	1099,7	619,7	479,1	Fadiga
10585	2	5,82	5,83	5,81	5,85	10,17	10,17	10,17	10,17	1093,9	1094,6	629,6	464,3	
10586	3	5,96	5,97	5,97	5,97	10,17	10,17	10,17	10,17	1096,6	1097,3	619,0	477,6	
10587	4	5,88	5,82	5,85	5,86	10,17	10,17	10,16	10,16	1095,2	1095,3	627,7	467,5	
10588	5	5,84	5,83	5,80	5,88	10,15	10,15	10,15	10,15	1096,1	1096,2	631,3	464,8	
10589	6	6,04	6,01	6,04	6,04	10,15	10,15	10,16	10,16	1090,3	1091,1	609,6	480,7	
10590	7	6,04	5,99	6,02	6,01	10,14	10,14	10,15	10,15	1097,6	1098,4	620,2	477,4	
10591	8	6,00	6,05	5,98	5,99	10,18	10,15	10,15	10,16	1094,8	1095,6	617,4	477,4	
10592	9	5,99	5,95	5,97	6,00	10,17	10,17	10,17	10,17	1099,5	1100,0	620,7	478,8	
10593	10	6,01	5,96	5,91	5,97	10,17	10,16	10,15	10,16	1096,1	1096,2	618,5	477,6	
10594	11	6,03	5,95	5,95	6,04	10,15	10,15	10,15	10,14	1098,2	1098,5	620,6	477,6	
10595	12	5,95	6,05	5,94	5,97	10,15	10,15	10,15	10,15	1099,7	1100,1	621,7	478,0	

A3 – Medidas dos CPs (100 % de lodo como *filler*)

PROJETO:	UFAM - CBUQ com 100% cimento		Operador:	Washington		
DATA:	22-07-08	PROTOCOLO:	40-08			
INTERESSADO:	UFAM (José Aleixo)	TIPO E % DE LIGANTE:	5% ligante - Reman 50-70			
ORIGEM:	Moldados na UFAM					
ENSAIOS A SEREM REALIZADOS						
FADIGA (x)	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO(x)	MÓDULO (x)	RT ()		
ENSAIOS REALIZADOS						
FADIGA ()	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO()	MÓDULO ()	RT ()		
Nº DO CORPO DE PROVA	ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	Dap	Defetiva	%Vv	ensaios
10545	01	5,61	10,13	2,41	2,41	CREEP
10546	02	5,66	10,14	2,40	2,40	
10547	03	5,65	10,14	2,40	2,40	
10563	01	5,64	10,15	2,41	2,41	MR
10564	02	5,62	10,17	2,40	2,40	
10565	03	5,67	10,15	2,40	2,40	
10596	1	5,63	10,15	2,40	2,40	Fadiga
10597	2	5,65	10,16	2,40	2,39	
10598	3	5,63	10,17	2,40	2,40	
10599	4	5,67	10,15	2,40	2,40	
10600	5	5,68	10,15	2,40	2,40	
10601	6	5,65	10,16	2,39	2,39	
10602	7	5,64	10,15	2,40	2,40	
10603	8	5,60	10,16	2,41	2,41	
10604	9	5,68	10,14	2,41	2,40	
10605	10	5,63	10,14	2,41	2,41	
10606	11	5,63	10,16	2,40	2,40	
10607	12	5,68	10,15	2,40	2,40	

OBS.: Dap proj.= 2,38; Dt= 2,47

A4 – Resultados dos ensaios de densidade dos CPS (100 % de cimento como *filler*)

PROJETO:	UFAM - CBUQ com 50% lodo			Operador:	Washington	
DATA:	22-07-08	PROTOCOLO:	42-08			
INTERESSADO:	UFAM	TIPO E % DE LIGANTE:	5% ligante - Reman - 50/70			
ORIGEM:	Moldados na UFAM					
ENSAIOS A SEREM REALIZADOS						
FADIGA (x)	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO(x)	MÓDULO (x)	RT ()		
ENSAIOS REALIZADOS						
FADIGA ()	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO()	MÓDULO ()	RT ()		
Nº DO CORPO DE PROVA	ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	Dap	Defetiva	%Vv	ensaios
10551	01	5,67	10,15	2,39	2,38	2,96
10552	02	5,69	10,16	2,39	2,38	3,01
10553	03	5,70	10,15	2,39	2,39	2,73
10569	01	5,68	10,17	2,38	2,38	3,21
10570	02	5,66	10,16	2,39	2,39	2,86
10571	03	5,69	10,16	2,39	2,39	2,89
10572	1	5,82	10,16	2,35	2,35	4,42
10573	2	5,79	10,16	2,36	2,36	3,94
10574	3	5,77	10,15	2,36	2,36	3,88
10575	4	5,81	10,15	2,36	2,36	4,08
10576	5	5,73	10,17	2,36	2,36	3,93
10577	6	5,78	10,15	2,36	2,36	3,94
10578	7	5,75	10,15	2,36	2,35	4,26
10579	8	5,78	10,15	2,35	2,35	4,34
10580	9	5,76	10,17	2,35	2,35	4,47
10581	10	5,81	10,16	2,35	2,34	4,55
10582	11	5,75	10,17	2,36	2,36	4,02
10583	12	5,78	10,15	2,35	2,35	4,32

OBS.: Dap proj.=2,38 Dt= 2,46

A5 – Resultados dos ensaios de densidade dos CPS (50 % de lodo como *filler*)

PROJETO:	UFAM - CBUQ com 100% lodo			Operador:	Washington	
DATA:	22-07-08	PROTOCOLO:	41-08			
INTERESSADO:	UFAM (José Aleixo)	TIPO E % DE LIGANTE:	5% ligante - Reman 50-70			
ORIGEM:	Moldados na UFAM					
ENSAIOS A SEREM REALIZADOS						
FADIGA (x)	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO(x)	MÓDULO (x)	RT ()		
ENSAIOS REALIZADOS						
FADIGA ()	CREEP DINÂMICO()	CREEP ESTÁTICO()	MÓDULO ()	RT ()		
Nº DO CORPO DE PROVA	ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	Dap	Defetiva	%Vv	ensaios
10548	01	5,78	10,15	2,36	2,36	3,54
10549	02	5,82	10,15	2,35	2,35	4,04
10550	03	5,82	10,15	2,36	2,36	3,67
10566	01	5,82	10,16	2,36	2,35	3,77
10567	02	5,77	10,16	2,36	2,36	3,55
10568	03	5,81	10,16	2,35	2,35	3,94
10584	1	6,00	10,17	2,29	2,29	6,39
10585	2	5,83	10,17	2,36	2,35	3,84
10586	3	5,97	10,17	2,30	2,29	6,28
10587	4	5,85	10,17	2,34	2,34	4,38
10588	5	5,84	10,15	2,36	2,36	3,75
10589	6	6,03	10,16	2,27	2,26	7,42
10590	7	6,02	10,15	2,30	2,30	6,16
10591	8	6,01	10,16	2,29	2,29	6,40
10592	9	5,98	10,17	2,30	2,29	6,27
10593	10	5,96	10,16	2,30	2,29	6,33
10594	11	5,99	10,15	2,30	2,30	6,15
10595	12	5,98	10,15	2,30	2,30	6,10

OBS.: Dap proj.= 2,36

Dt=2,45

A6 – Resultados dos ensaios de densidade dos CPS (100 % de lodo como *filler*)

ANEXO II
RESULTADOS DO ENSAIO RICE DAS MISTURAS
(ENSAIOS REALIZADOS NO COPPE)

ENSAIO RICE

Projeto: José Aleixo
Operador: Dias

Densidade máxima teórica
Data: 08.08.08

Amostra 1 - 100% cimento

Teor de Ligante
 Massa da Amostra (g)
 Massa da Amostra intemperizada 2157,4 (A)
 Massa do Sistema (imerso em água) em g 7579,7 (B)
 Massa do Kitassato (imerso em água) em g 6311,6 (C)

DMT 1= 2,426

A massa a 135°C (envelhecimento 2 hs)
B massa+quitassato+tampa+agua(arrasado)
C quitassato+tampa+agua(arrasado)

Amostra 2 - 100% lodo

Teor de Ligante
 Massa da Amostra (g)
 Massa da Amostra intemperizada 2183,8 (A)
 Massa do Sistema (imerso em água) em g 7574,3 (B)
 Massa do Kitassato (imerso em água) em g 6311,6 (C)

DMT 2= 2,371

A massa a 135°C (envelhecimento 2 hs)
B massa+quitassato+tampa+agua(arrasado)
C quitassato+tampa+agua(arrasado)

Amostra 3 - 50% cimento+ 50% lodo

Teor de Ligante
 Massa da Amostra (g)
 Massa da Amostra intemperizada 2170,6 (A)
 Massa do Sistema (imerso em água) em g 7574,3 (B)
 Massa do Kitassato (imerso em água) em g 6311,6 (C)

DMT3 = 2,391

A massa a 135°C (envelhecimento 2 hs)
B massa+quitassato+tampa+agua(arrasado)
C quitassato+tampa+agua(arrasado)

Média:

DMTm=

ANEXO III

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA DAS MISTURAS DESTE ESTUDO

(CPs MOLDADOS NA UFAM E ENSAIOS REALIAZDOS NO COPPE)

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: **UFAM-CBUQ COM 100% CIMENTO** Protocolo: **40-08**

Temperatura de ensaio: **25** °C Operador(es): **ROBERTO VIANNA**

Módulo resiliente médio da amostra: **3316** MPa Interessado: **JOSÉ ALEIXO**

Resistência máxima à tração estática, $\sigma_{Tmax.}$: **0,79** MPa Data: **agosto/2008**

Equação do cil. de carga (125mm):

$$P_{m(0-10)} = 0,0088 F + -0,146$$

$$F_{(0-10)} = 112,58 P_m + 17,961$$

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
10596	5,63	10,15	10	72,3	0,49	0,000238	0,32	242328
10598	5,63	10,17	20	144,9	1,13	0,000476	0,63	8882
10599	5,67	10,15	20	145,7	1,14	0,000476	0,63	11807
10600	5,68	10,15	30	218,9	1,78	0,000715	0,95	1531
10601	5,65	10,16	30	218,0	1,77	0,000715	0,95	1655
10602	5,64	10,15	40	289,8	2,40	0,000953	1,26	541
10603	5,60	10,16	40	288,1	2,39	0,000953	1,26	514
10604	5,68	10,14	50	364,5	3,06	0,001191	1,58	211
10605	5,63	10,14	50	361,3	3,03	0,001191	1,58	302

A8 – Resultados do ensaio de fadiga da mistura betuminosa com 100 % de cimento como *filler*

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra:	UFAM-CBUQ COM 50%LODO	Protocolo: 42-08
Temperatura de ensaio:	25 °C	Operador(es): ROBERTO VIANNA
Módulo resiliente médio da amostra:	4242 MPa	Interessado: JOSÉ ALEIXO
Resistência máxima à tração estática, $\sigma_{Tmax.}$:	1,07 MPa	Data: agosto/2008
Equação do cil. de carga (125mm):		$P_{m(0-10)} = 0,0088 F + -0,146$ $F_{(0-10)} = 112,58 P_m + 17,961$

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
10572	5,82	10,16	10	101,4	0,75	0,0000252	0,43	87718
10573	5,79	10,16	15	151,3	1,19	0,0000378	0,64	20888
10574	5,77	10,15	20	200,8	1,62	0,0000504	0,86	10728
10575	5,81	10,15	20	202,2	1,63	0,0000504	0,86	10478
10576	5,73	10,17	30	299,7	2,49	0,0000757	1,28	7612
10577	5,78	10,15	30	301,7	2,51	0,0000757	1,28	6700
10578	5,75	10,15	40	400,2	3,38	0,0001009	1,71	546
10579	5,78	10,15	40	402,3	3,39	0,0001009	1,71	446
10580	5,76	10,17	50	502,1	4,27	0,0001261	2,14	200
10581	5,81	10,16	50	506,0	4,31	0,0001261	2,14	229

A9 – Resultados do ensaio de fadiga da mistura betuminosa com 50 % de lodo como *filler*

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: UFAM-CBUQ COM 100%LODO

Protocolo: 41-08

Temperatura de ensaio: 25 °C

Operador(es): ROBERTO VIANNA

Módulo resiliente médio da amostra:

4591 MPa

Interessado: JOSÉ ALEIXO

Resistência máxima à tração estática, $\sigma_{Tmax.}$:

1,15 MPa

Data: agosto/2008

Equação do cil. de carga (125mm):

$$P_{m(0-10)} = 0,0088 F + -0,146$$

$$F_{(0-10)} = 112,58 P_m + 17,961$$

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
10584	6,00	10,17	10	112,4	0,84	0,0000250	0,46	371350
10586	5,97	10,17	15	167,8	1,33	0,0000376	0,69	78517
10588	5,84	10,15	20	218,4	1,78	0,0000501	0,92	6196
10589	6,03	10,16	20	225,8	1,84	0,0000501	0,92	5948
10590	6,02	10,15	30	337,8	2,83	0,0000751	1,38	1400
10591	6,01	10,16	30	337,5	2,82	0,0000751	1,38	1353
10592	5,98	10,17	40	448,2	3,80	0,0001002	1,84	446
10593	5,96	10,16	40	446,3	3,78	0,0001002	1,84	490
10594	5,99	10,15	50	560,1	4,78	0,0001252	2,30	132
10595	5,98	10,15	50	559,2	4,77	0,0001252	2,30	170

A10 – Resultados do ensaio de fadiga da mistura betuminosa com 100 % de lodo como *filler*

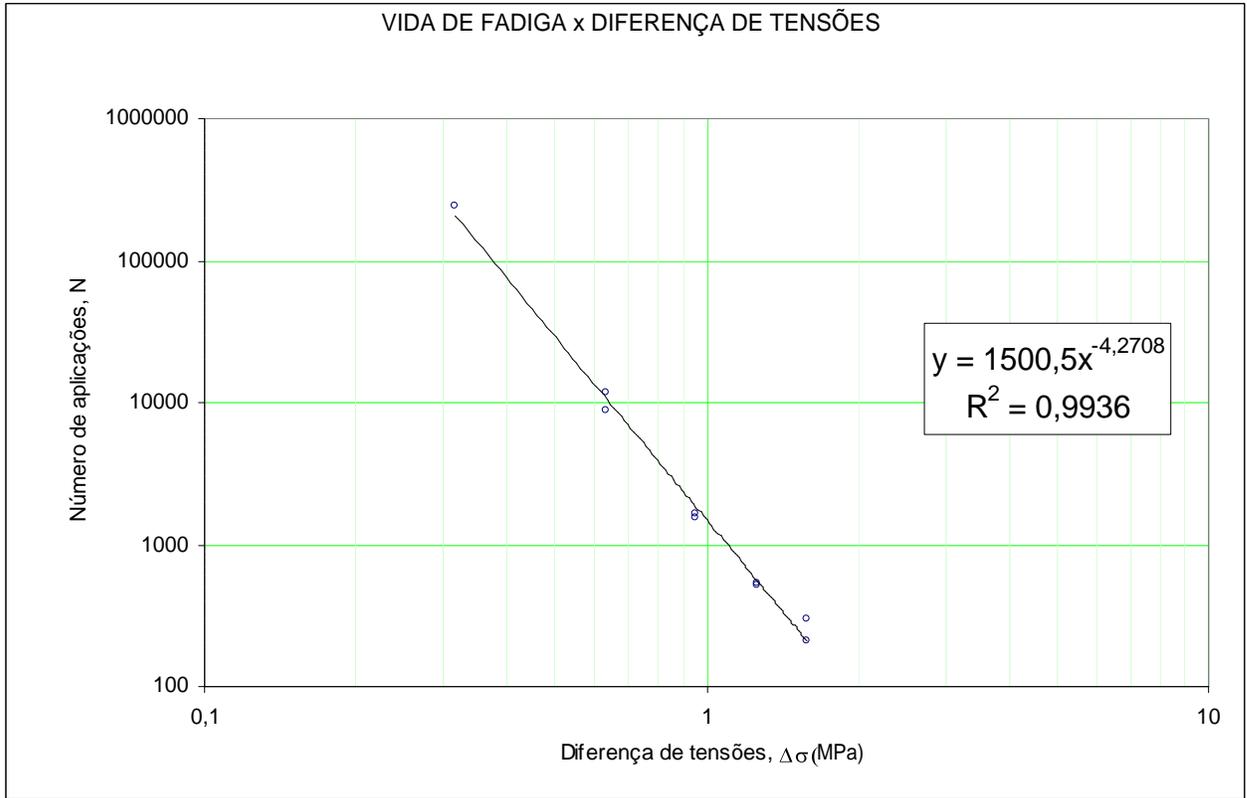


Gráfico A1 – Vida de fadiga x diferença de tensões (100 % de cimento como *filler*)

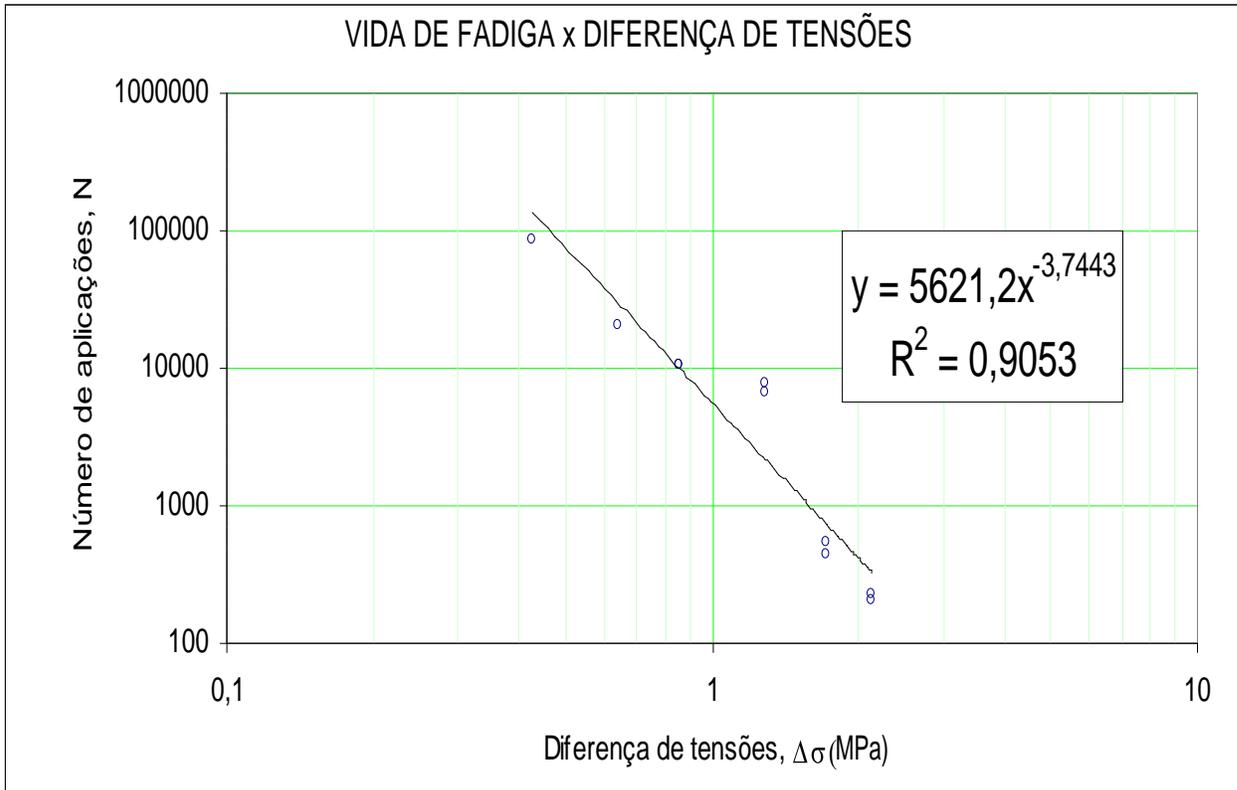


Gráfico A2 – Vida de fadiga x diferença de tensões (50 % de lodo como *filler*)

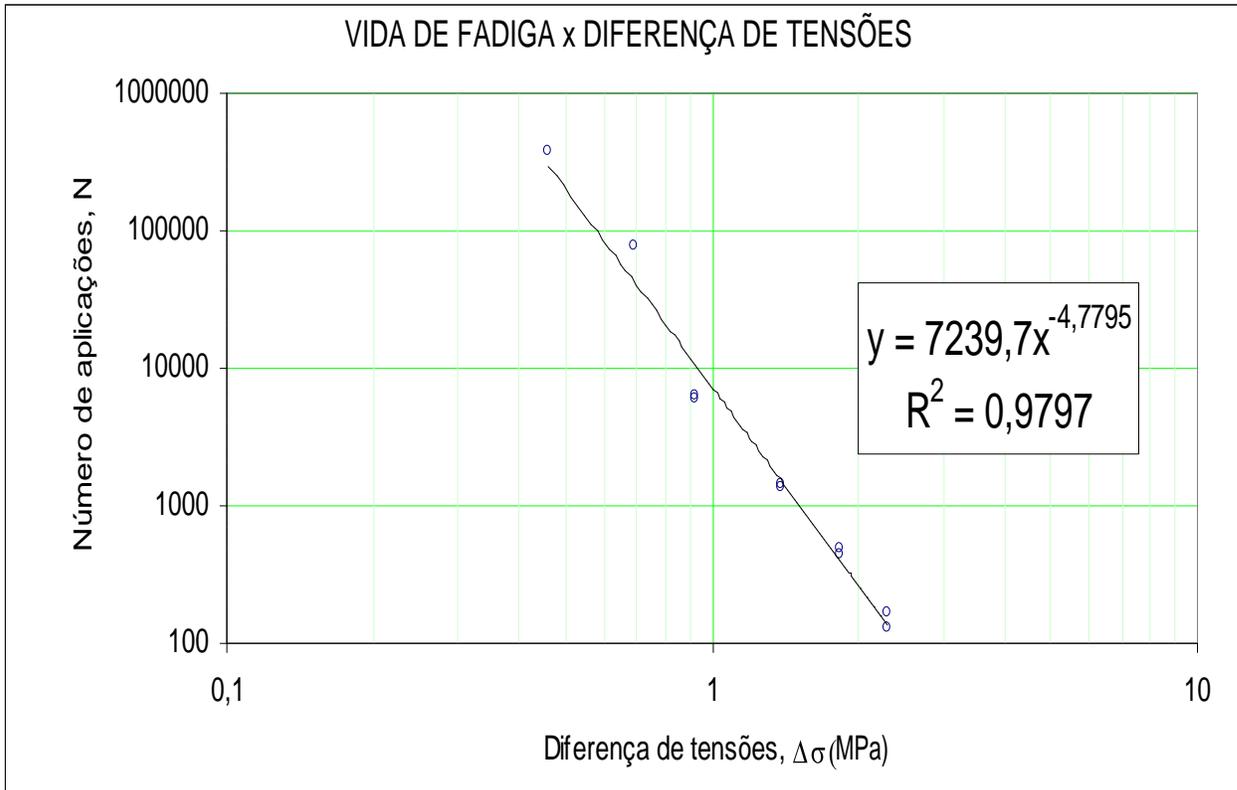


Gráfico A3 – Vida de fadiga x diferença de tensões (100 % de lodo como *filler*)

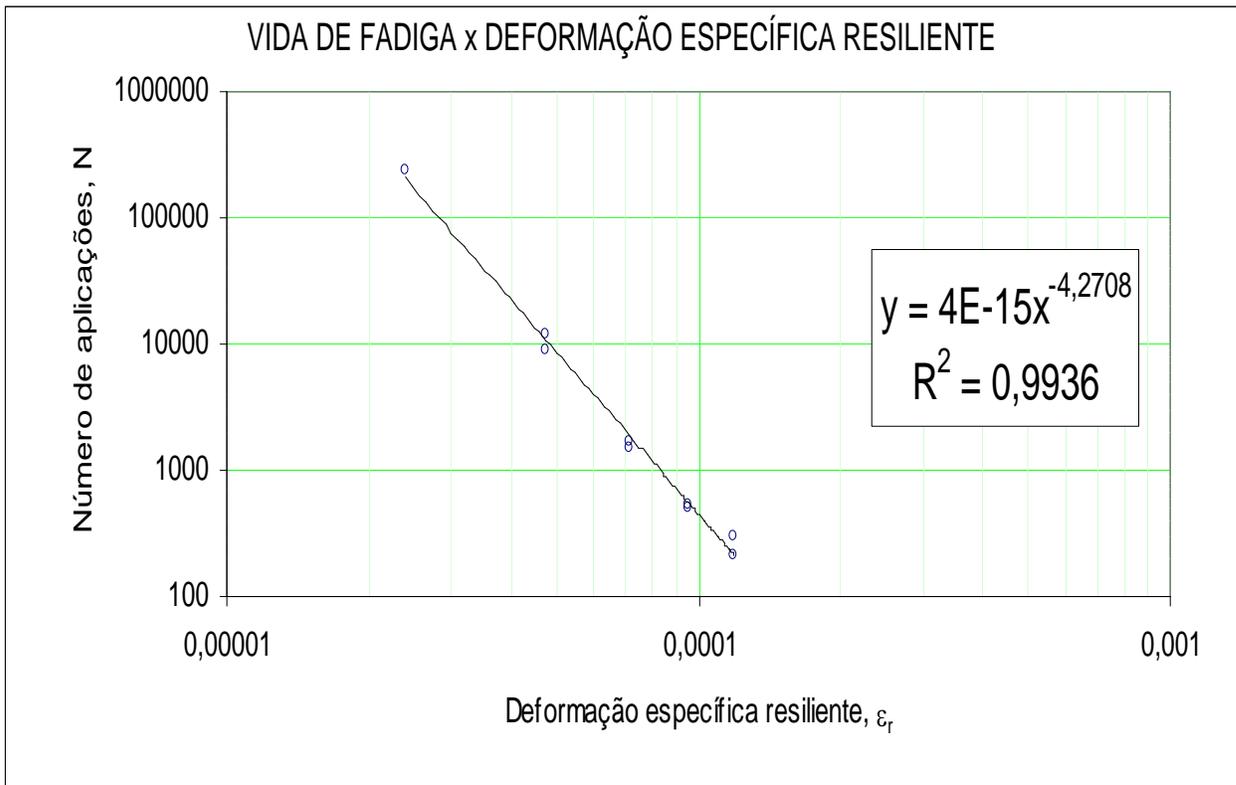


Gráfico A4 – Vida de fadiga x deformação específica resiliente (100 % de cimento como *filler*)

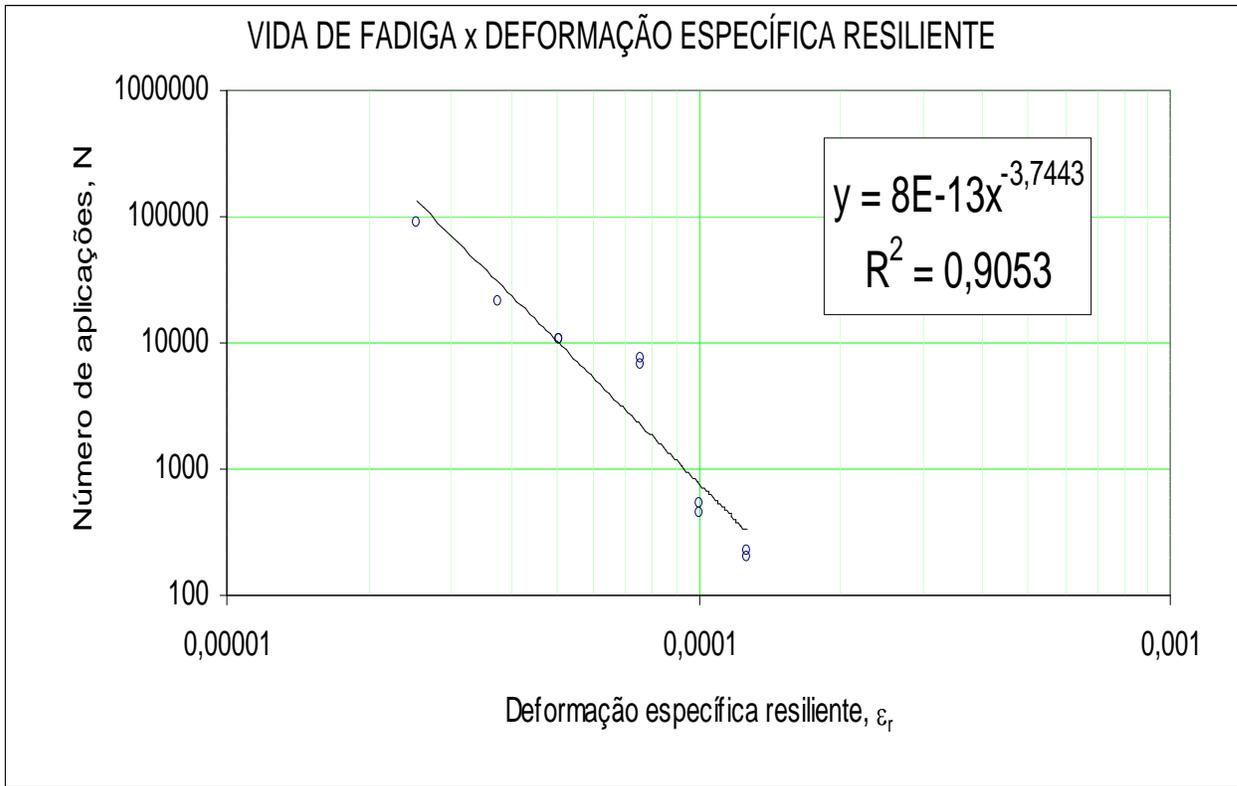


Gráfico A5 – Vida de fadiga x deformação específica resiliente (50 % de lodo como *filler*)

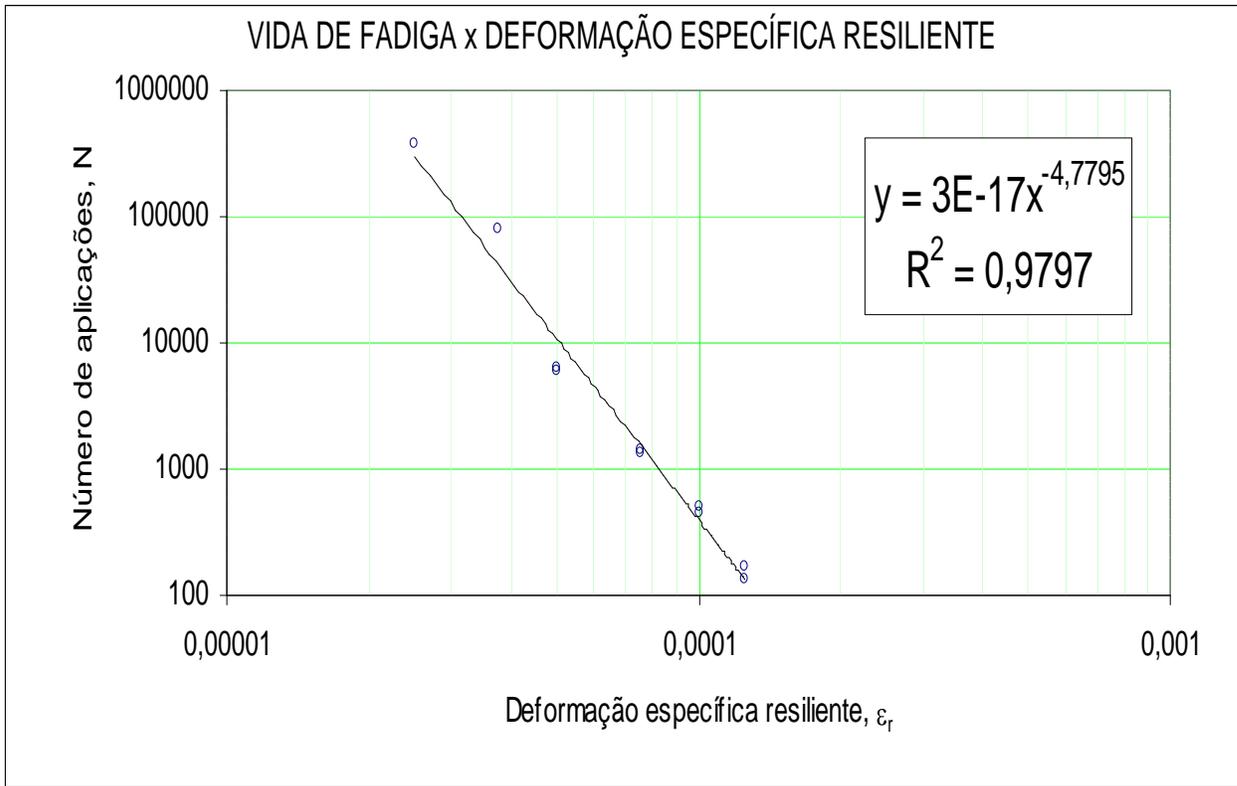


Gráfico A6 – Vida de fadiga x deformação específica resiliente (100 % de lodo como *filler*)

APÊNDICES

APENDICE I – ORIGEM DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DOS CPs

Tipo de material	Discriminação do material	Procedência	Características encontradas
Agregados	Seixo de rio	Comércio local	Granulometria variando de 19,1 a 0,074mm constituído de pedregulho e areia
	Areia de jazida	Comércio local	Granulometria variando de 4,8 a 0,074mm constituído de areia grossa, areia média e areia fina
<i>Filler</i>	Cimento Nassau	Comércio local	Granulometria variando de 0,177 a 0,074mm
	Lodo de ETA	Águas do Amazonas	Granulometria a ser determinada após a secagem do material
Material betuminoso	CAP 50/70	Refinaria de Manaus - REMAN	Penetração de 65mm

Quadro 1 - Origem dos materiais utilizados na confecção dos CPs

APENDICE II – GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Peneira (n°)	Peneira (mm)	Peso retido (g)	Peso passa (g)	% Retido	% Acumulado	% Que passa	Classificação
3/4"	19,1	0,00	1.000,00	0,00	0,00	100,00	-
1/2"	12,7	0,00	1.000,00	0,00	0,00	100,00	-
3/8"	9,5	0,00	1.000,00	0,00	0,00	100,00	-
4	4,80	8,19	991,81	0,82	0,82	99,18	Pedregulho
10	2,00	32,83	958,98	3,28	4,10	95,90	Areia grossa
40	0,42	382,99	575,99	38,30	42,40	57,60	Areia média
80	0,177	404,59	171,40	40,46	82,86	17,14	Areia fina
200	0,074	156,03	15,37	15,60	98,46	1,54	Areia fina
Menor 200	-	15,37	0,00	1,54	100,00	0,00	
Total		1000,00		100,00			

Tabela 1 – Granulometria do agregado miúdo (areia)

Peneira (n°)	Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Peso Passa (g)	% Retido	% Acumulado	% Que Passa
3/4"	19,1	0,00	5.000,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	82,14	4.917,86	1,64	1,64	98,36
3/8"	9,5	410,27	4.507,59	8,21	9,85	90,15
4	4,80	2.425,90	2.081,69	48,52	58,37	41,63
10	2,00	1229,97	851,72	24,60	82,97	17,03
40	0,42	724,51	127,21	14,49	97,46	2,54
80	0,177	65,30	61,91	1,31	98,76	1,24
200	0,074	23,42	38,49	0,47	99,23	0,77
Menor 200	-	38,49	0,00	0,77	100,00	0,00
Total		5000,00		100,00		

Tabela 2 – Granulometria do agregado graúdo (seixo)

Peneira (n°)	Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Peso Passa (g)	% Retido	% Acumulado	% Que Passa
3/4"	19,1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
4	4,80	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
10	2,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
40	0,42	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
80	0,177	1,53	98,47	1,53	1,53	98,47
200	0,074	6,33	92,14	6,33	7,86	92,14
Menor 200	-	92,14	0,00	92,14	100,00	0,00
		100,00				

Tabela 3 – Granulometria do *filler* (cimento *Portland*)

Peneira (n ^o)	Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Peso Passa (g)	% Retido	% Acumulado	% Que Passa
3/4"	19,1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
4	4,80	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
10	2,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
40	0,42	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
80	0,177	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
200	0,074	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
Menor 200	-	100,00	0,00	100,00	100,00	0,00

Tabela 4 – Granulometria do *filler* (lodo da ETA)

APENDICE III – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

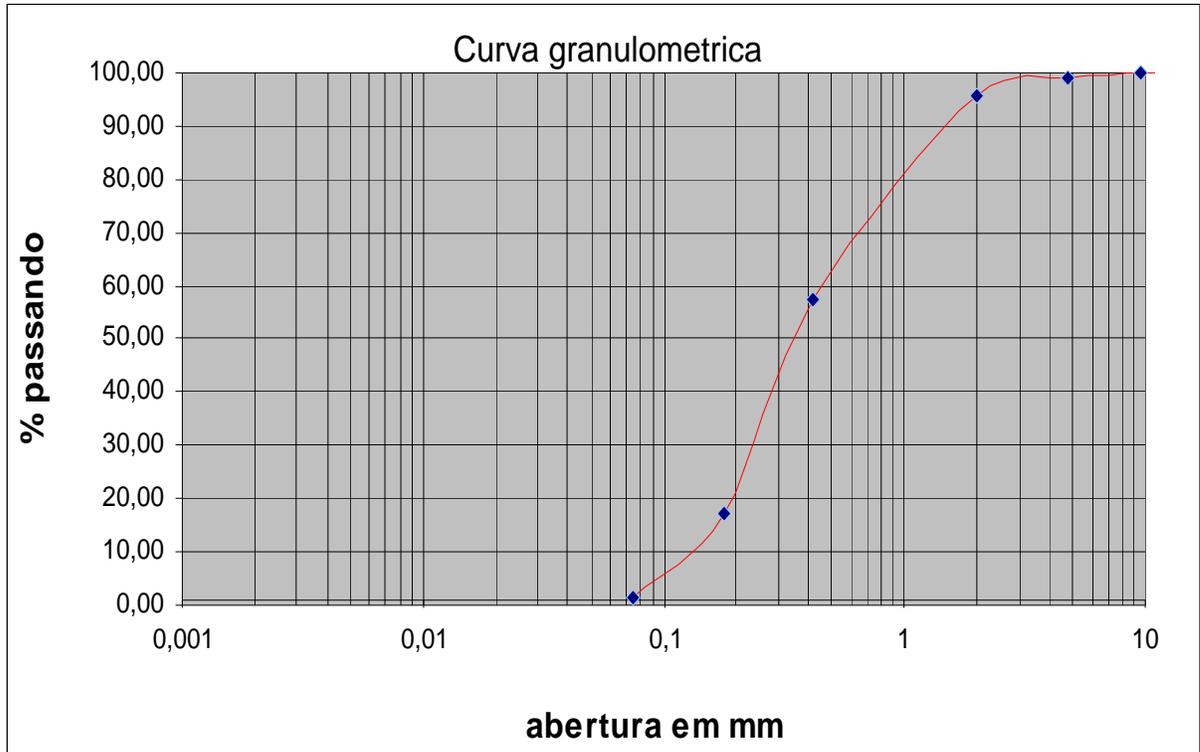


Figura 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia)

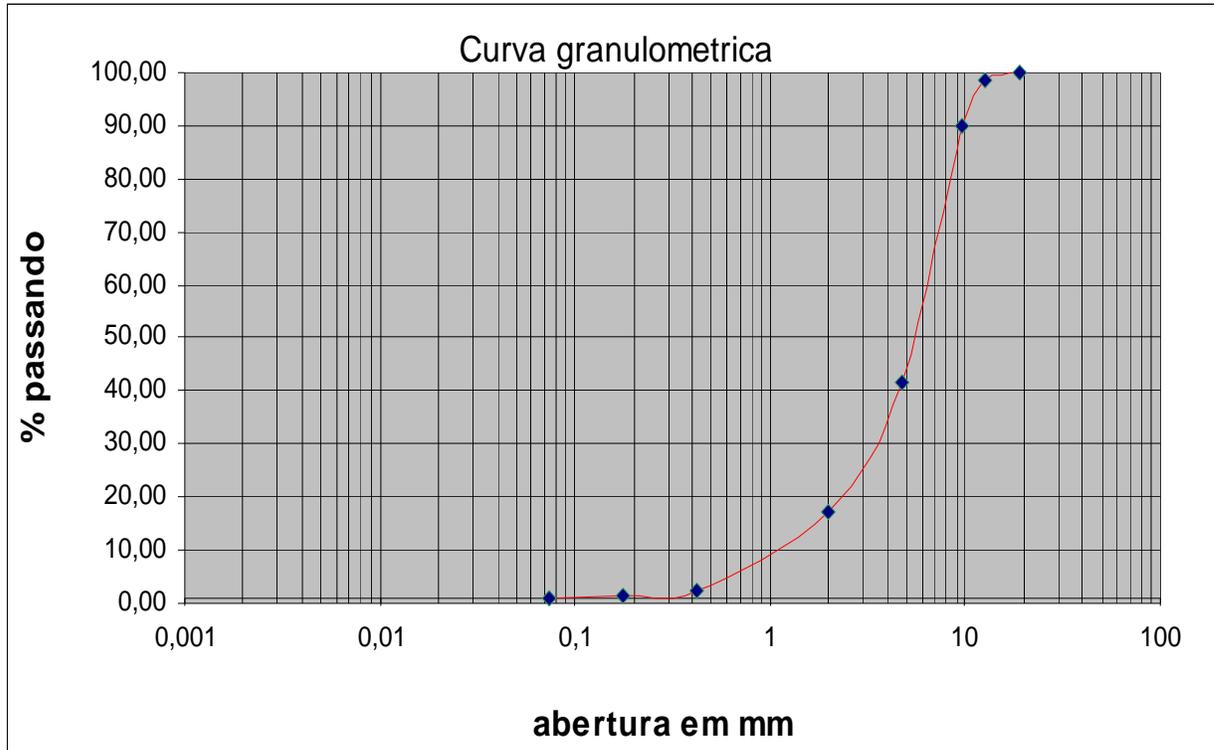


Figura 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo (seixo)

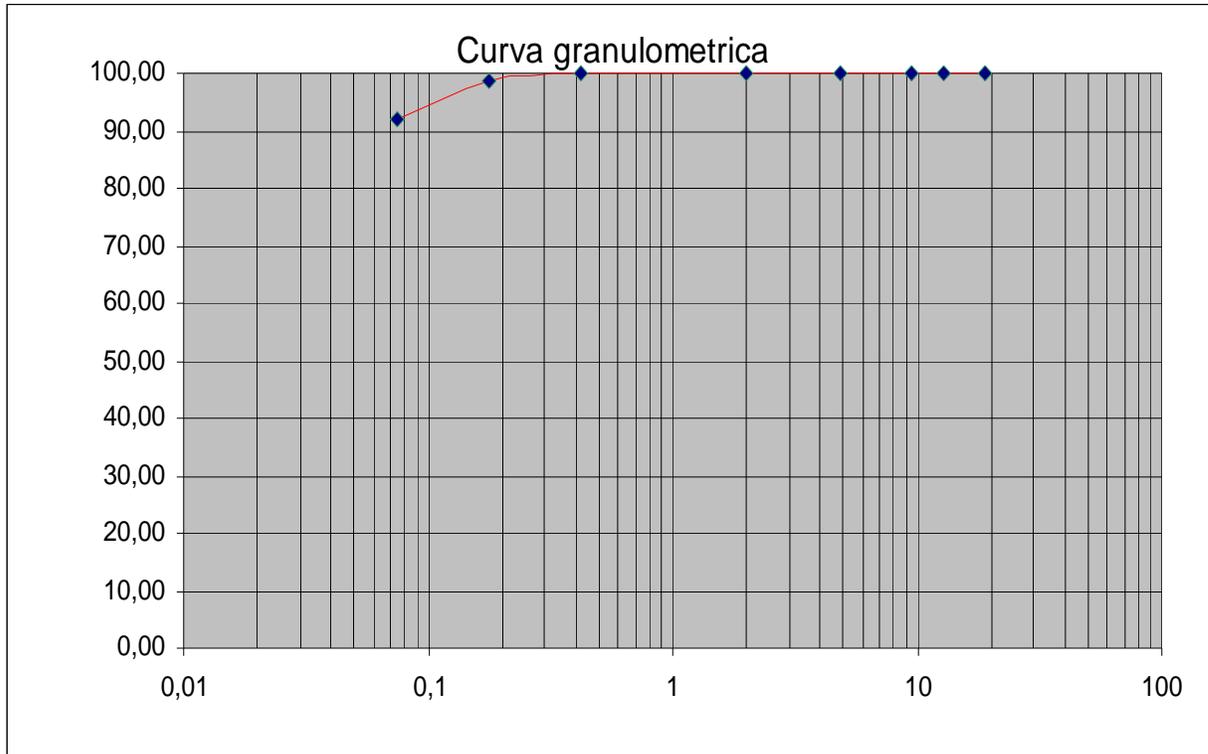


Figura 3 – Curva granulométrica do *filler* (cimento Portland)

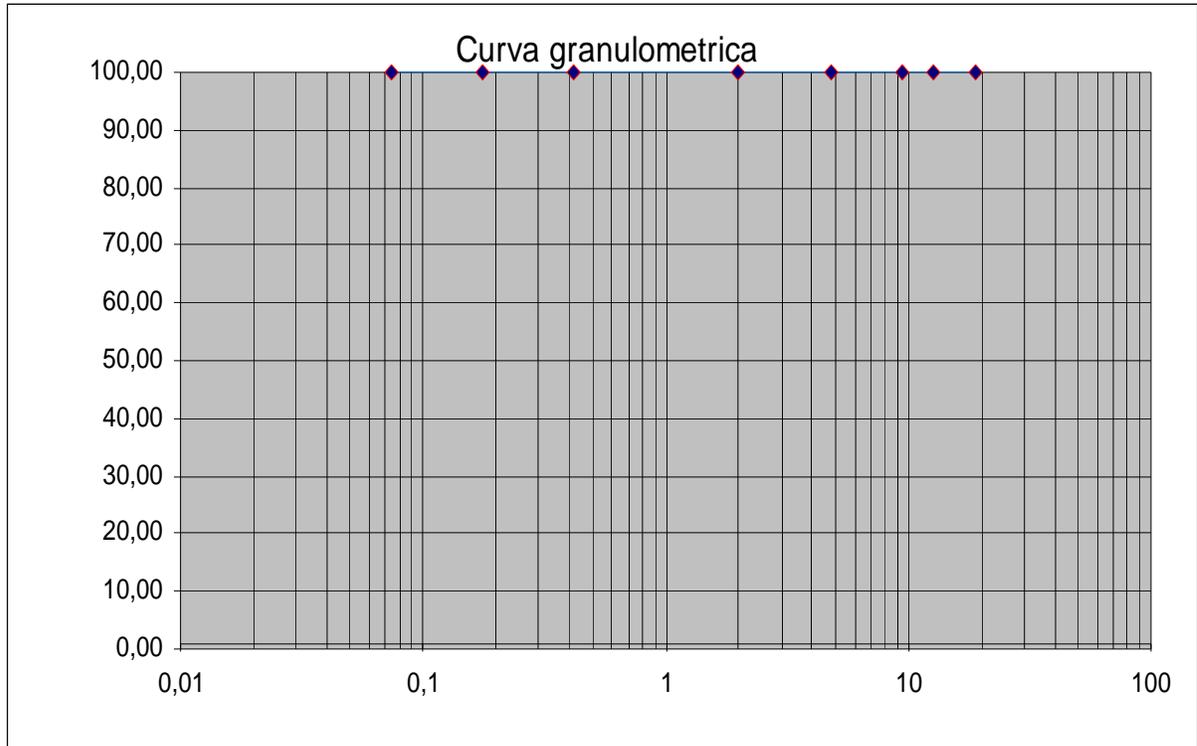


Figura 4 – Curva granulométrica do *filler* (lodo da ETA)

APENDICE X – ENSAIOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tipo de material	Discriminação do material	Tipos de ensaios	Local do ensaio
Agregados	Seixo	Granulometria (DNER-ME 083/98), massa específica real-Chapman (DNER-ME 194/98), absorção DNER-ME 195/97, abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98) e adesividade (DNER-ME 078/94)	Laboratório de pavimentação da UFAM
	Areia	Granulometria (DNER-ME 083/98) e massa específica real-Chapman (DNER-ME 194/98)	Laboratório de pavimentação da UFAM
<i>Filler</i>	Cimento Portland	Granulometria (DNER-EM 367/97)	Laboratório de pavimentação da UFAM
	Lodo de ETA	Granulometria, massa específica real, difração de raios X, fluorescência de raio X	Laboratório de pavimentação, LAPEC e Laboratório de Difração de Raio X
Material betuminoso	CAP 50/70	Penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, ductilidade, ponto de fulgor e densidade	Refinaria de Manaus - REMAN

Quadro 2 – Ensaio com respectivas normas utilizadas para caracterização dos materiais para confecção dos CPs (normas do DNIT)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.