

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

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS COMO FILER EM MISTURAS
ASFÁLTICAS SOB O EFEITO DA PRESENÇA D'ÁGUA**

LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.**

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2009

LÉDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da
Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Orientador

Campina Grande, Abril de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L935u

2009 Lucena, Leda Christiane de Figueiredo Lopes.

Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água / Leda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena.— Campina Grande, 2009.

132 f. : il.

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

Referências.

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

1. Filer. 2. Resíduo. 3. Susceptibilidade. I. Título.

CDU – 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

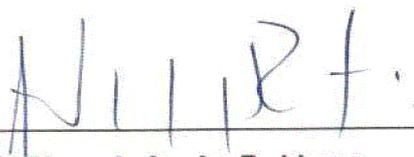
Autor: Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Título: Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água

Dissertação defendida em: 24/04/2009

Banca Examinadora

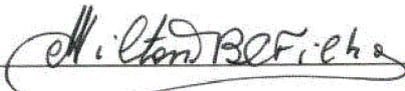
(Assinatura):



Prof. D.Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG/DEC

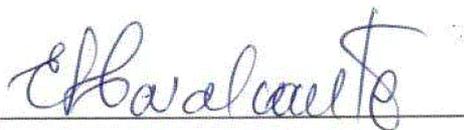
(Assinatura):



Prof. D.Sc. (Examinador interno) Milton Bezerra das Chagas Filho

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG/DEC

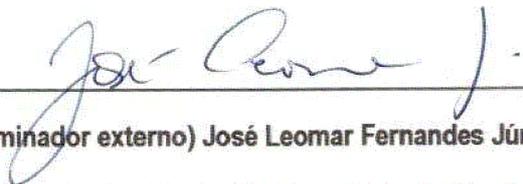
(Assinatura):



Prof. D.Sc. (Examinador externo) Erinaldo Hilario Cavalcante

Universidade Federal de Sergipe – UFS/DEC

(Assinatura):



Prof. D.Sc. (Examinador externo) José Leomar Fernandes Júnior

Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo – EESC/USP

UFCG/BIBLIOTECA

DEDICATÓRIA

As razões da minha vida:

Aos meus pais Analúcia e Lucena por todo amor, incentivo, paciência e dedicação.

Aos meus Irmãos, Adriano e Luciana por toda amizade e apoio.

Aos meus avós Stênio e Lêda.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de misericórdia e iluminação, força constante nos momentos difíceis;

Ao Professor Dr. Kennedy Guedes Rodrigues pelos ensinamentos, orientação, apoio, atenção e incentivo durante a graduação e todo o período de dissertação

À Empresa ATECEL pela disponibilidade do laboratório e fornecimento de equipamentos e recursos para o desenvolvimento do trabalho.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.

À coordenação do Curso de Graduação em Engenharia civil.

À secretária do programa de Pós-Graduação ,Josete Barros, por toda atenção, auxílio e amizade.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida.

Aos amigos: Adma Leal, André Quintans ,Danilo Medeiros, Emerson Santana, Hugo Jordão, Paulo Feitosa, Robson Barros, Saul Guedes, Washington Santos e outros que deram sua contribuição em particular.

Ao professor Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri pela ajuda e orientação durante a realização dos ensaios na EESC/USP.

Ao técnico Antônio Carlos Gigante pelo auxílio, orientações e sugestões durante o período que estive na EESC/USP.

Aos técnicos de laboratório Paulo Toyama e João Domingos pela ajuda nos ensaios laboratoriais na EESC/USP.

Aos funcionários da ATECEL, Eugenio, Marcos, Lelé, Eliane e Mano.

E a todos que colaboram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

A disposição final dos resíduos sólidos, sem um adequado gerenciamento, acarreta a poluição do solo, do ar e de recursos hídricos, podendo resultar em danos aos seres humanos e ao meio ambiente. Diante desse cenário, empresas do setor produtivo têm adotado "práticas limpas" utilizando a reincorporação de resíduos na cadeia produtiva. O Caulim é um dos minerais existentes em maior abundância no Brasil sendo empregado, principalmente, nas indústrias de cerâmicas e papéis. Entretanto, essas indústrias geram uma quantidade de resíduos que são dispostos no meio ambiente de maneira inadequada, causando grandes impactos ambientais. Outro resíduo encontrado em larga escala são os resultantes do beneficiamento de rochas ornamentais. Esse tipo de mineral tem grande relevância na economia mundial e o Brasil é detentor de grandes reservas de onde são extraídos mais de 450 tipos de rochas de diversos padrões e tonalidades. O presente trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos de Caulim e de Serragem de granito como filer nas misturas asfálticas, como forma de minimizar os impactos ambientais causados por tais resíduos. Foram realizados ensaios para caracterizações dos resíduos, por Análise Química, Análise Termogravimétrica, Análise Térmica Diferencial, Difração de Raios-X, Granulometria por sedimentação e Difração a Laser. Os ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência, de Lottman Modificado e Marshall foram realizados para verificação os efeitos da incorporação destes fileres na susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água. O efeito do tipo de compactação, por amassamento e por impacto, teve por objetivo avaliar a influência da compactação no comportamento mecânico e volumétrico das misturas. Os resultados indicam que ambos os fileres tornam a mistura asfáltica menos susceptível a presença de água, entretanto, o resíduo do Granito proporciona uma mistura mais flexível e, portanto, com uma menor probabilidade de fissuras prematuras durante a vida útil do pavimento.

Palavras Chave: Resíduos industriais, filer, susceptibilidade à presença de água, misturas asfálticas.

ABSTRACT

Without an appropriate management, the final disposal of the solid wastes can cause the pollution of soil, air and hydrological resources. As a consequence, it may occur any kind of damage to the human health and environment. In this context, several productive companies have adopted "clean practices" by using the reincorporation of residues into the productive chain. The kaolin is one of the most abundant minerals in Brazil it is mainly employed at paper and ceramic industries. These kinds of industry, however, generate a huge volume of residues which are inadequately disposed at the environment, provoking many environmental impacts. The residues generated at the ornamental rocks improvement are also found in large amounts in Brazil. This kind of mineral has great relevance at the global economy and Brazil detents many reserves where are extracted more than 450 rocks with different tonalities and standards. This works aims to study the technical viability of the kaolin and granite sawing residues as fillers in the asphaltic mixtures as a way of minimizing the environmental impacts caused by these residues. To characterize the residues the Tests of Chemical Analysis, Thermogravimetry, Differential Thermal Analysis, X-Ray Diffraction, Sediment Granulometry and Laser Diffraction were performed. The mechanical tests of Resilient Modulus, Modified Lottman Test and Marshall Test were conducted to verify the effects of these fillers incorporation in the susceptibility of asphaltic mixtures at water's presence. The analysis of the effect of compaction method, impact and gyration, aimed to evaluate the influence of compaction in the mechanical and volumetric behavior of the mixtures. The achieved results indicate that both fillers turn the asphaltic mixtures less susceptible to the water presence. The use of Granite residue, however, provides a more flexible mixture and, thus, with less probability of presenting premature fissures during the pavement life span.

Keywords: industrial waste, Residue, filler, moisture sensibility, asphaltic mixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Teor de Silica nos principais agregados usados em misturas asfálticas [Fonte: Libertadori & Constantino (2006)].....	9
Figura 2.2 - Tanque de disposição final da empresa Polygram S/A [Fonte: Fernandes (2007)].....	11
Figura 2.3 - Processo de beneficiamento de rochas ornamentais [Fonte: SILVA (1998) apud GONÇALVES (2000)]..	12
Figura 2.4 - Tanques utilizados para a decantação e sedimentação do Caulim [Fonte: Fernandes, (2007)].....	15
Figura 2.5 - Prensa e armazenamento do Caulim em forma de blocos [Fonte: Fernandes, 2007].....	16
Figura 2.6 - Ilustração do mecanismo de desgastes devido a susceptibilidade à presença de água [(Fonte: KIM & LUFIT, 2006)]	21
Figura 2.7 - Trincas longitudinais longas	24
Figura 2.8 - Roteiro para identificação de problemas de falha de adesividade [Fonte : Hicks et al., (2003)].....	25
Figura 2.9 - Painelas no revestimento	26
Figura 2.10 - Desagregação no revestimento	27
Figura 2.11 - Layout do molde Marshall [Fonte: Pinheiro (2004)].....	29
Figura 2.12 - Layout do estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral [Fonte: Rohde (2007)].....	31
Figura 2.13 - Layout do procedimento para o ensaio de Lottman [Fonte: TANDON et al.,(2003)]	32
Figura 2.14 - Layout do equipamento para determinação do Módulo de Resiliência [Fonte: Gigante, (2007)].....	34
Figura 2.15 - Layout sobre as deformações obtidas quando da realização do ensaio de Módulo de Resiliência em misturas asfálticas [Fonte: Huang, (1993)].....	34
Figura 2.16 - Variação do Módulo de Resiliência em diferentes níveis de saturação [Fonte: SCHMIDT & GRAF, (1972)].....	35
Figura 2.17 - Curva para distribuição dos tamanhos das partículas proposta por Fuller e Thompson [Fonte: Marques (2004)]	40
Figura 2.18 - Curva de distribuição dos tamanhos de partículas para o tamanho nominal máximo de 19 mm [Fonte: Santana., 2009].....	41
Figura 2.19 - Layout do Compactador Giratório e suas configurações.....	42
Figura 3.1 - Seqüência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa.....	45
Figura 3.2 - Agregado de rocha granítica – Brita 19 ou ¾”	46
Figura 3.3 - Agregado areia quartzosa	46
Figura 3.4 - Pó de pedra	47
Figura 3.5 - Resíduo do Caulim.....	48
Figura 3.6 - Resíduo do Granito.....	48
Figura 3.7 - Cimento Asfáltico de Petróleo.....	49
Figura 3.8 - Analisador de partículas por difração a laser, “granulômetro”	51
Figura 3.9 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Difração de raios-X.....	52
Figura 3.10 - Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova (a) Compactador (b) Corpo-de-prova (c) Soquete + Cilindro	54
Figura 3.11 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall (a) Prensa (b) Molde (c) Prensa + Molde	54
Figura 3.12 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de tração indireta (a) Banho Maria (b) Pórtico de Lobo Carneiro (c) Bomba de vácuo	55
Figura 3.13 - Compactador giratório (a) Molde e equipamento (b) Ensaio em execução (c) Extração do corpo-de-prova.....	58
Figura 3.14 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência.....	59

Figura 3.15 - Janela de trabalho do programa utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência.....	60
Figura 3.16 - Janela de trabalho do programa utilizado para o processamento dos dados e cálculo do MR.....	60
Figura 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres obtida por Sedimentação [Fonte: Fernandes (2007)].....	62
Figura 4.2 - Distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo do Caulim obtida por difração à laser [Fonte: Fernandes (2007)].....	62
Figura 4.3 - Distribuição dos tamanhos das partículas da Serragem de Granito obtida por difração a laser [Fonte: Fernandes (2007)].....	63
Figura 4.4 - Curva termodiferencial e termogravimétrica do resíduo do Caulim [Fonte: Fernandes (2007)].....	65
Figura 4.5 - Análise Termodiferencial do resíduo de serragem de Granito [Fonte: Fernandes (2007)].....	66
Figura 4.6 - Análise Termogravimétrica do resíduo de serragem de Granito [Fonte: Fernandes (2007)].....	66
Figura 4.7 - Difração de raios-x do resíduo do Caulim [Fonte: Fernandes (2007)].....	67
Figura 4.8 - Difração de raios - X do resíduo da Serragem de Granito [Fonte: Fernandes (2007)].....	67
Figura 4.9 - Viscosidade Saybolt Furol em função da variação dos incrementos dos fileres [Fonte: Fernandes (2007)].....	70
Figura 4.10 - Curva de distribuição dos tamanhos de partículas – Agregados.....	71
Figura 4.11 - Distribuição granulométrica - Mistura, Faixa "B", Pontos de controle e Zona de restrição.....	72
Figura 4.12 - Estabilidade Marshall para o filer serragem do Granito com teores de filer de 3,4,5 e 6%.....	73
Figura 4.13 - Estabilidade Marshall para o filer resíduo de Caulim com teores de filer de 3,4,5 e 6%.....	73
Figura 4.14 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o filer serragem do Granito.....	76
Figura 4.15 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o filer resíduo do Caulim.....	76
Figura 4.16 - Resistência à Tração diametral indireta para os fileres resíduo do Caulim e de serragem de Granito.....	77
Figura 4.17 - Relação da resistência retida à tração para os fileres resíduo do Caulim e serragem do Granito.....	78
Figura 4.18 - Relação da Resistência à Tração.....	79
Figura 4.19 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com e sem condicionamento para o filer Granito.....	81
Figura 4.20 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com e sem condicionamento para o filer Caulim.....	81
Figura 4.21 - Resultados do Módulo de Resiliência de todas misturas agrupados por temperatura (25°C) [Fonte: Marques (2004)].....	83
Figura 4.22 - Relação de Módulo de Resiliência total e instantâneo para a porcentagem de 5% de filer Granito.....	85
Figura 4.23 - Relação de Módulo de Resiliência total e instantâneo para a porcentagem de 5% de filer Caulim.....	85
Figura 4.24 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem ...	86
Figura 4.25 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filer Caulim.....	86
Figura 4.26 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com condicionamento e sem condicionamento para o filer Granito.....	87
Figura 4.27 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com condicionamento e sem condicionamento para o filer Caulim.....	87
Figura 4.28 - Relação entre o Módulo de Resiliência total e Módulo Instantâneo para a porcentagem de 5% de filer serragem do Granito.....	89
Figura 4.29 - Relação entre o Módulo de Resiliência total e Módulo Instantâneo para a porcentagem de 5% do filer resíduo do Caulim.....	89
Figura 4.30 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filer serragem do Granito.....	90

Figura 4.31 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filler residuo de Caulim 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Ensaio utilizados para avaliar a susceptibilidade à presença de água sobre agregado solto [Fonte: Libertadori & Constatino (2006)]	27
Tabela 2.2 - Ensaio utilizados para avaliar a susceptibilidade à presença de água sobre misturas asfálticas [Fonte: Libertadori & Constantino (2006)]	28
Tabela 2.3 - Vantagens e limitações do ensaio Marshall [Fonte: Méndez (2005)]	30
Tabela 3.1 – Características físicas do cimento asfáltico de petróleo segundo a ANP	49
Tabela 3.2 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização do CAP	53
Tabela 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas da serragem de Granito - ensaio de sedimentação [Fonte: Fernandes (2007)]	61
Tabela 4.2 - Distribuição dos tamanhos das partículas do residuo do Caulim - ensaio de sedimentação [Fonte: Fernandes (2007)]	61
Tabela 4.3 - Composição química da Serragem de Granito no estado natural [Fonte: Fernandes (2007)]	64
Tabela 4.4 - Composição química do residuo do Caulim no estado natural [Fonte: Fernandes (2007)]	64
Tabela 4.5 - Constituintes químicos encontrados nos extratos lixiviados dos residuos de Caulim e de serragem de Granito [Fonte: Fernandes (2007)]	68
Tabela 4.6 - Constituintes químicos encontrados nos extratos solubilizados dos residuos de Caulim e de serragem de Granito [Fonte: Fernandes (2007)]	68
Tabela 4.7 - Caracterização do CAP utilizado na pesquisa [Fonte: LUBNOR (2006)]	69
Tabela 4.8 - Distribuição dos tamanhos das partículas para elaboração do traço	71
Tabela 4.9 – Requisitos do VAM [Fonte: Cominsky et. al., (1998)]	74
Tabela 4.10 - Dados de VAM da Mistura com residuo do Caulim e da serragem de Granito	75
Tabela 4.11 – Valores dos índices físicos e mecânicos para os corpos-de-prova submetidos a compactação por amassamento para o filer Granito	80
Tabela 4.12 - Valores dos índices físicos e mecânicos para os corpos-de-prova submetidos a compactação por amassamento para o filer Caulim	80
Tabela 4.13 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento –filer Caulim	84
Tabela 4.14 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento –filer serragem do Granito	84
Tabela 4.15 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento para o filer serragem do Granito - compactador giratório	88
Tabela 4.16 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento para o filer residuo do Caulim- compactador giratório	88

LISTA DE ABREVIATURAS

ϕ_f	Fração Volumétrica de "Filler"
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luis de Oliveira Júnior
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CPA	Camada Porosa de Atrito
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
DTA	Differential Thermal Analysis
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.
DRX	Difração de Raios-X.
EPA	Environmental Protection Agency.
TG	Termogravimetria
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada.
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
RT	Resistência à Tração
RRT	Relação de Resistência a Tração
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - OBJETIVO.....	2
1.1.1 - Objetivos específicos.....	2
1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	4
2.2 - RESÍDUOS.....	5
2.2.1 - Granito.....	9
2.2.2 - Caulim.....	14
2.3 - MISTURAS ASFÁLTICAS.....	17
2.4 - SUSCEPTIBILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS À PRESENÇA DE ÁGUA.....	19
2.4.1 - Deteriorações no revestimento devido à presença de água.....	23
2.4.2 - Ensaio utilizados para o estudo da susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água.....	27
2.4.3 - Procedimentos utilizados para minimizar a susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água.....	36
2.5 - DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PELO MÉTODO SUPERPAVE.....	39
2.5.1 - Compactação da mistura asfáltica.....	41
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 - MATERIAIS.....	45
3.1.1 - Agregados Graúdos.....	45
3.1.2 - Agregados Miúdos.....	46
3.1.3 - Resíduo do Caulim.....	47
3.1.4 - Resíduo do Granito.....	48
3.1.5 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	49
3.2 - MÉTODOS.....	49
3.2.1 - Ensaio de Caracterização Física e Química.....	50
3.2.2 - Ensaio com o cimento asfáltico de petróleo.....	52
3.2.3 - Ensaio mecânicos.....	53
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1 - SOBRE A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DOS MATERIAIS.....	61
4.1.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres.....	61
4.1.2 - Massa Específica.....	63
4.1.3 - Análise Química.....	64
4.1.4 - Análise Térmica.....	64
4.1.5 - Difração de Raios-X.....	66
4.1.6 - Classificação dos Resíduos Sólidos.....	68
4.1.7 - Ensaio de caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	69
4.2 - ENSAIOS COM O CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO E O FÍLER.....	69

4.3 - ENSAIOS COM MISTURAS DE AGREGADOS GRAÚDO E MIÚDO, FÍLERES E CAP	70
4.3.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados e dos fileres	70
4.3.2 - Ensaio Marshall.....	72
4.3.3 - Ensaio de Resistência a Tração Indireta por Compressão Diametral	75
4.3.4 - Ensaio de Lottman Modificado	77
4.3.5 - Compactador por Amassamento (SGC)/Lottman Modificado (RRT)	78
4.3.6 - Módulo de Resiliência.....	80
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS POSTERIORES	91
5.1 - CONCLUSÕES.....	91
5.1.1 - Quanto aos resultados dos Ensaios de Caracterização	91
5.1.2 - Quanto aos resultados dos Ensaios Marshall	91
5.1.3 - Quanto aos resultados dos ensaios de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral.....	92
5.1.4 - Quanto aos resultados dos ensaios de Lottman Modificado.....	92
5.1.5 - Quanto à comparação por impacto - amassamento (Marshall e Giratória).....	92
5.1.6 - Quanto aos resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....	93
5.1.7 - Considerações Finais	93
5.2 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	93
6 - REFERÊNCIAS.....	95
7 - ANEXOS.....	107

CAPITULO 1

1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração dos resíduos sólidos atinge contornos gravíssimos, pela ínfima presença de soluções adequadas para a sua correta disposição final. A atividade industrial é uma das maiores responsáveis pelas agressões ao ambiente devido a quantidade e toxicidade dos resíduos produzidos.

Durante as atividades de beneficiamento de rochas ornamentais e do Caulim, são gerados resíduos responsáveis pela contaminação direta dos rios ou do próprio solo, além de serem responsáveis pela desfiguração da paisagem.

A substituição dos fileres convencionais por resíduos oriundos de atividades industriais tem como intuito promover o desenvolvimento sustentável sem comprometer o comportamento mecânico, físico e químico das misturas asfálticas.

O filer serve de material de enchimento de vazios, contribuindo para o fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, diminuindo a susceptibilidade à água e a resistência ao envelhecimento. Puzinauskas (1983) relatou, baseado na realização de ensaios Marshall e ensaios de Imersão-Compressão, que a susceptibilidade à presença de água nas misturas asfálticas pode ser diminuída, e até eliminada, pela utilização do filer.

A susceptibilidade das misturas à presença de água pode ser definida como a perda de resistência e durabilidade das misturas asfálticas quando submetidas à presença prolongada e excessiva de água. A susceptibilidade associa-se a dois mecanismos que se inter-relacionam: a perda de adesão e a perda de coesão. A perda de adesão ocorre devido à existência de água entre o CAP e o agregado, causando o descolamento do filme de asfalto. Já a perda de coesão é devido ao enfraquecimento do asfalto na presença de água, que diminui a resistência da união CAP/agregado, causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura (FURLAN et al., 2004).

O revestimento asfáltico é responsável por absorver as solicitações cíclicas do tráfego e transmiti-las às camadas subjacentes e ao subleito, por sua vez, o aumento do número de veículos e o excesso de cargas aliados com a susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água podem tornar os revestimentos

asfálticos mais rígidos e conseqüentemente sujeitos a fadiga prematura.

As ações das intempéries nos pavimentos apresentam grande influência na durabilidade destes, pois as ações do calor e da chuva juntamente com a sobrecarga aplicada pelos veículos automotores aumentam a presença de água no interior dos pavimentos, o que provocará uma deterioração prematura destes. Os custos necessários para as atividades de conservação e manutenção das vias poderiam ser reduzidos se houvesse uma diminuição desta susceptibilidade (BLÓIS et al., 2003).

Os resultados da Pesquisa realizada pela CNT (2006) mostram que as deficiências na infra-estrutura rodoviária comprometem a integração com as demais modalidades, gerando restrições operacionais e dificultando o crescimento da intermodalidade. Todo crescimento econômico do país tem de ser precedido por uma situação favorável dos sistemas de transportes, o que requer melhorias significativas da rede atual, além da expansão do sistema rodoviário nacional.

A importância do estudo da susceptibilidade à presença de água em misturas asfálticas está relacionado às condições de segurança da rodovia, e como conseqüência, à razões econômicas, pois a fim de corrigir patologias no revestimento, tornam-se necessárias despesas para a manutenção e restaurações. Deste modo, torna-se necessário minimizar o tempo de exposição do revestimento à presença de água para que esta não venha a ocasionar defeitos que interfiram na qualidade de movimentação, na capacidade estrutural e segurança das vias. A presença de defeitos acarreta gastos desnecessários aos usuários, aumenta o número de acidentes e origina políticas imediatistas de reparo, que além de serem realizadas sem o devido apoio técnico, negligenciam o motivo que originou os defeitos, fazendo que no futuro estes venham a reaparecer.

Portanto, a utilização dos resíduos do Caulim e do Granito como filer em misturas asfálticas é uma alternativa a ser considerada, pois, a sua adoção minimizaria o impacto ambiental ocasionado pela sua disposição inadequada e pode vir a proporcionar melhorias no comportamento mecânico das misturas asfálticas.

1.1 - OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi de estudar o comportamento mecânico, físico e mineralógico de misturas asfálticas contendo resíduos provenientes do beneficiamento do Caulim e da serragem do Granito, considerando seu aproveitamento para as camadas de rolamento, de forma a estabelecer o teor adequado de material reaproveitado a fazer parte da composição da mistura, bem como avaliar qual dentre os fileres estudados proporciona às misturas asfálticas testadas uma menor susceptibilidade a presença de água.

1.1.1 - Objetivos específicos

- Estudar a o comportamento químico, mineralógico e a classificação dos resíduos sólidos dos resíduos do caulim e da serragem do granito;

- Estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas submetidas ao efeito deletério da presença de água;

- Avaliar o uso de fileres alternativos como meio de minimizar os danos causados às misturas asfálticas à susceptibilidade à presença de água;

- Comparar o efeito do tipo de compactação, por impacto e/ou por amassamento, no comportamento das propriedades mecânicas de misturas asfálticas submetidas à presença induzida de água.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto desta dissertação encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma.

[Capítulo 1] Introdução, objetivos e organização do trabalho – são descritos uma visão geral do trabalho com a introdução, justificativa, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

[Capítulo 2] Revisão da literatura – são descritos e discutidos assuntos relacionados ao desenvolvimento sustentável, resíduos provenientes da serragem do Granito e do beneficiamento do Caulim, susceptibilidade de misturas asfálticas à presença da água e filer.

[Capítulo 3] Materiais e métodos – são apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

[Capítulo 4] Resultados – são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental.

[Capítulo 5] Conclusões e sugestões – são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema estudado.

Por fim, estão incluídos as referências bibliográficas e os anexos, onde foram inseridas, respectivamente, as referências citadas para a realização do trabalho, e as planilhas, gráficos e quadros resultantes dos ensaios realizados.

CAPÍTULO 2

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Ao longo da história, o homem vem alterando os ecossistemas, sem considerar que os recursos disponíveis são finitos. Desde a revolução industrial, todas as atividades humanas de produção foram marcadas por um desenvolvimento tecnológico que vem gerando uma quantidade de resíduos que o meio ambiente não consegue reincorporá-los nos ciclos biogeoquímicos satisfatoriamente. Devido a isto, ocorre um acúmulo natural destes, o que pode acarretar a degradação do meio ambiente ao invés de serem inseridos com matéria prima no sistema produtivo.

Segundo Oliveira et al. (2007), desenvolvimento sustentável é uma das soluções que pode diminuir o acúmulo de resíduos industriais, pois visa manter o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e o meio ambiente. Na perspectiva da gestão ambiental, a produção mais limpa é um modelo de produção que estimula os conceitos e objetivos do desenvolvimento sustentável. Essa técnica incorpora mudanças no processo produtivo da empresa, por meio de medidas que priorizam o uso de matérias-primas de fontes renováveis, para gerar o mínimo de resíduos e emissões que causem danos ao meio ambiente .

O desenvolvimento sustentável é definido como o crescimento tecnológico e social que garante a manutenção adequada das condições ambientais tanto no presente, quanto no futuro. Este conceito visa promover o equilíbrio entre a integridade dos sistemas naturais e o suprimento das necessidades humanas, permitindo a continuidade desta inter-relação (MEDEIROS, 2006).

A incorporação deste conceito de desenvolvimento nas discussões políticas, econômicas e sociais mundiais reflete a atual tendência das nações, desenvolvidas ou em desenvolvimento, de atentarem com maior interesse e consciência para o fato da imprescindibilidade das questões relacionadas ao meio ambiente, seja no seu aspecto mais restrito, seja no seu aspecto global. Além do fator ecológico, a vertente ambiental que se insere gradativamente nos planos políticos e econômicos de crescimento busca associar aos demais indicadores de qualidade de vida um ambiente saudável e capaz de suportar as demandas de recursos com possibilidades de reconstrução contínua. As alterações de qualidade do meio ambiente vêm tendendo cada vez mais a serem compreendidas como alteração da qualidade de vida (BATISTA E ALBUQUERQUE, 2007).

A reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, entre eles podemos destacar:

- redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
- redução de áreas necessárias para aterro, pela diminuição de volume de resíduos pela reciclagem;
- redução do consumo de energia durante o processo de produção;
- redução da poluição.
- a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, no que se refere à colocação em depósito dos resíduos da construção;

Não é por meio da proibição da geração de resíduos e consumo que se pretende promover o desenvolvimento sustentável. O que se coloca às indústrias é a busca de novas tecnologias, a racionalização na utilização de recursos eliminando ou reduzindo perdas, fugas, o aperfeiçoamento do sistema produtivo (eco-eficiência) e sua integração interna e externa para efetivar as transformações necessárias ao atual ambiente de negócios (MARQUES, 1995 e VALLE, 2002 apud OKIDA, 2006).

A reciclagem dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias para uso como matérias-primas alternativas não é nova, e tem sido efetuada com sucesso em vários países. As razões que motivam esses países, em geral, são: a diminuição ou até mesmo a extinção das reservas confiáveis; a conservação de fontes não renováveis; melhoria da saúde e segurança da população; a preocupação com o meio ambiente e a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pela alta do petróleo, notadamente nos países onde há marcante escassez de matérias-primas (VIOLA et al., 1991).

A técnica de se reutilizar materiais em misturas asfálticas é mais recente, mas não menos importante. Esta proposta visa diminuir o impacto gerado pela exploração excessiva de jazidas minerais, escassas em algumas regiões do país, principalmente nas periferias dos grandes centros urbanos (CASTRO, 2003).

2.2 - RESÍDUOS

De acordo com Guimarães (2000) apud Santos (2003) o Banco Mundial, em 1978, propôs a definição para resíduo: "Material inútil, indesejado ou descartado, cuja composição ou quantidade de líquido não permita que ocorra escoamento".

Os resíduos têm origem ou como restos de um processo de produção ou como substâncias, produtos

ou objetos que ficaram incapazes de utilização para os fins que foram produzidos. Em ambos os casos pressupõe-se que o detentor tenha que se desfazer deles.

As atividades para o reaproveitamento de matéria prima evitando desperdício dos recursos não renováveis e também dos renováveis, e considerando que estas dependem do tempo de renovação, torna-se fundamental para aumentar a sustentabilidade do meio ambiente (SILVA, 2003 apud OKIDA,2006). Segundo Valle (2002) apud Okida (2006) a poluição industrial é uma forma de desperdício e um indicio de ineficiência dos processos produtivos. Resíduos industriais representam, na maioria dos casos, perda de matéria prima e insumos.

A gestão dos resíduos é um desafio para o desenvolvimento sustentável de cidades de grande e médio porte. A falta de políticas de gestão de resíduos sólidos aliada a falta de investimentos públicos e privados, que incentivem a adoção de práticas de controles, tem como consequência uma forma de gerenciamento incipiente.

A reciclagem de resíduos está sujeito a legislação ambiental, na qual é imperativa a análise do impacto ambiental causado pela sua incorporação. Um resíduo que é totalmente incorporado na forma de produto final a um volume inerte de material perde sua identidade como resíduo.

A legislação ambiental confere a responsabilidade da destinação dos resíduos ao gerador, determinando o prévio tratamento para a disposição final ou armazenamento temporário. Dentro de uma crescente conscientização pública e pressão dos mercados, a gestão ambiental tem se voltado para evitar, minimizar, reaproveitar e reciclar os resíduos, de forma a minimizar os recursos com tratamento e disposição finais mais adequados ambientalmente (ALONSO, 1992 e CPRH, 2000 apud SANTOS, 2003)

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional concentrado, principalmente, em centros urbanos e a diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando o volume e a massa acumulados, principalmente após a década de 80. Os problemas se caracterizavam por escassez da área de disposição de resíduos, causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 1999; JOHN, 2000; BRITO, 1999; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1999 apud CIRELLI et al. , 2001).

De uma forma geral, na construção civil ocorre uma aproximação, em suas atividades, para o conceito de desenvolvimento sustentável, entendido aqui como um processo que leva à mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, todas visando à harmonia e ao entrelaçamento nas aspirações e necessidades humanas presentes e futuras. Este conceito não implica somente multidisciplinaridade, envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (BRANDON, 1998; ANGULO, 2000; JOHN, 2000; ZWAN, 1997

apud CIRELLI et., 2001).

Segundo Pontes (2000), a reciclagem e o aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção é de fundamental importância para controle e minimização dos problemas ambientais causados pela geração de resíduos de atividades industriais e inerentes aos centros urbanos. Alguns resíduos apresentam propriedades que permitem a sua utilização em substituição parcial ou total da matéria-prima, utilizada como insumo em substituição ao convencional. O aproveitamento destes resíduos requer uma avaliação dos aspectos econômicos e tecnológicos, bem como, do risco de contaminação ambiental que poderá acarretar durante o ciclo de vida do material e após a sua destinação final.

A resolução nº 307 do CONAMA (2002) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diante deste cenário, a ABNT atualizou em 2004 um conjunto de normas para padronizar, em nível nacional, a classificação de resíduos sólidos. A NBR 10004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados.

De acordo com a NBR 10004/2004 os resíduos são classificados como: Resíduo Classe I – Perigosos e Resíduo Classe II – Não Perigosos.

Segundo a NBR 1000/2004 os Resíduos Classe I – denominados como Perigosos são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco a saúde pública e/ou riscos ao meio ambiente quando não ocorrer o correto gerenciamento dos resíduos. Entre os aspectos que conferem periculosidade ao resíduo são descritos a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Segundo NBR 10004 os Resíduos Classe II denominados como não Perigosos podem ser classificados como Resíduo classe II A – Não Inerte e Resíduo classe II B - Inerte.

O Resíduo classe II A - Não Inerte - são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos da classe I – Perigosos ou aqueles que não fazem parte dos resíduos classe II B - Inertes. Podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Enquanto o Resíduo classe II B – Inerte – são aqueles que quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT/NBR 10007/2004 e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT/ NBR 10006/2004 não obtiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A problemática da geração de resíduos merece atenção pois são lançados ao meio ambiente diariamente resíduos classificados como classe I e classe II A. Tal fato tem gerado preocupações de estudiosos, pois sua produção tem acarretado alterações na água, no solo e no ar. O resultado do descuido com o gerenciamento de resíduos pode provocar problemas ambientais, sociais e sanitários à população.

O estudo da incorporação de resíduos em misturas asfálticas apresenta campo com evidente necessidade de pesquisas com o objetivo de desenvolver e viabilizar a utilização de novos produtos, que sejam duráveis, seguros e confiáveis aos usuários, e que atendam às normas vigentes no país.

De acordo Carneiro et al. (2001) a utilização de resíduos de construção, reciclados em várias das camadas dos pavimentos, tem-se mostrado viável na base tecnológica existente. Em várias cidades do Brasil e no exterior, foram utilizados agregados reciclados em pavimentação e seus resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação estrutural desses materiais.

Segundo Zordan (1997), as principais vantagens da utilização dos resíduos sólidos da construção civil na pavimentação, são:

- a reciclagem exige uma menor utilização de tecnologia, o que implica em um menor custo do processo;
- a utilização dos componentes minerais dos resíduos sólidos (concreto, argamassas, materiais cerâmicos, areias, pedras, etc.), podem ser realizadas, em alguns casos, sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- há uma economia de energia no processo de moagem dos resíduos sólidos (em relação a sua utilização em argamassas), uma vez que parte do material permanece com granulometrias graúdas;
- há utilização de maior parcela dos resíduos sólidos produzidos, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração;
- há uma maior eficiência do resíduo quando adicionado ao solo, em relação à mesma adição feita com brita.

Pesquisas realizadas utilizando resíduos industriais em substituição ao filer convencional indicaram que a utilização de resíduos como material alternativo minimiza os impactos ambientais causados por sua deposição no meio ambiente, além de agregar valor a um material, atualmente visto como sem valor econômico. Gradativamente, tem-se aumentado o uso de resíduos como filer em revestimentos asfálticos. Pneu moído e vidro são dois dos mais conhecidos resíduos que foram, com algum sucesso, incorporados em revestimentos

asfálticos. Em alguns casos, resíduos podem ser usados para incrementar certas características desejáveis no concreto asfáltico, em outros casos, basta que o problema ambiental de despejo de resíduo seja resolvido, não importando que ocorra um ganho de propriedades físicas e mecânicas do CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) (REZENDE, 1999 apud LUCENA, 2008).

Uma das classificações utilizadas para o resíduo industrial quanto ao desempenho, após a incorporação em misturas asfálticas, pode ser atribuída em função do teor de sílica presente na estrutura (Figura 2.1). Normalmente os agregados ácidos silicosos possuem má adesividade ou interação química fraca com a maioria dos asfaltos. Muitas vezes os finos (ou fração areia) é a mais sensível em termos de má adesão nos agregados silicosos, enquanto o calcário possui má resistência à abrasão, que leva ao polimento e perda de macrotextura do revestimento asfáltico.

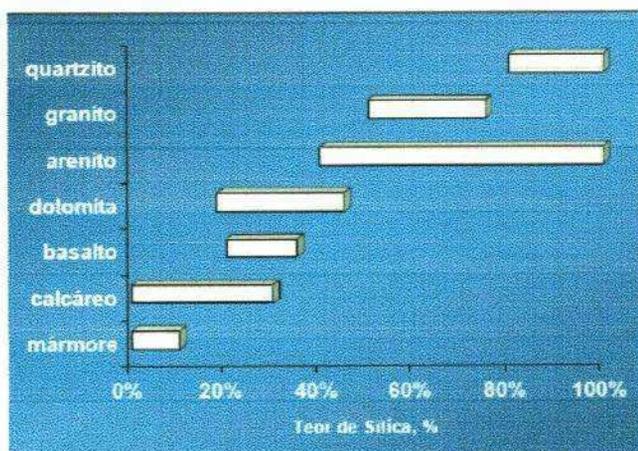


Figura 2.1 - Teor de Sílica nos principais agregados usados em misturas asfálticas
[Fonte: Libertadori & Constantino (2006)]

2.2.1 - Granito

Os Granitos correspondem cientificamente às rochas ígneas e metamórficas de granulometria grossa compostas principalmente de minerais félsicos, tais como quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio. Devido à alta dureza destes silicatos, os Granitos necessitam serras diamantadas para o corte. Fazem parte deste grupo, a álcali feldspato Granito, Granito, quartzo monzonito, granodiorito, quartzo diorito, tonalito, dolerito, gabro, álcali sienito, nefelina sienito, gnaiss facoidal, ortognaiss, paragnaiss, charnockito, granulito, etc. Os Granitos são fisicamente difíceis de serem explorados e beneficiados, entretanto, têm alto brilho no polimento e alta durabilidade mecânica. Portanto, são tratados como rochas ornamentais de qualidade máxima (VARGAS et. al., 2001).

Esse tipo de mineral tem grande aplicação do ponto de vista ornamental tendo relevância na economia mundial. Países como a Itália, China e Espanha são detentores do maior estoque e produção do mundo. O Brasil é detentor de grandes reservas no Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Ceará, de onde são extraídos mais de 450 tipos de rocha de diversos padrões e tonalidades.

De acordo com Vargas et. al. (2001) certos Granitos ornamentais do Brasil são famosos até no exterior. Além de ter beleza visual, são as rochas mais resistentes, não perdendo o brilho de polimento durante longos anos. Desta forma, desde os tempos antigos, os Granitos são tratados como material de luxo na construção. Sobretudo, os Granitos coloridos são muito procurados no mercado. As tumbas dos faraós das pirâmides do Egito foram construídas com Granitos e o corpo principal das pirâmides, com calcários. De acordo com a coloração, os Granitos são classificados em vermelho, marrom, amarelo, azul, verde, preto e cinza. A sua coloração é devido principalmente à cor dos minerais constituintes e da alteração intempérica.

De acordo com Gonçalves (2000) o Granito, em termos geológicos, é uma rocha ígnea, uniforme, de textura granular, constituída predominantemente de minerais de quartzo, feldspato e mica. O quartzo é o mineral mais abundante existente na terra. Apresenta estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), pertencendo ao grupo dos tectossilicatos. Pode apresentar cores de acordo com a sua variedade e é muito resistente ao intemperismo, ele sobrevive à erosão em grãos que formam a maior parte das areias da praia e do deserto.

A mica inclui diversos minerais do grupo dos filosilicatos que tem divisão basal altamente perfeita, todos são cristais monoclinicos que são similares em composição química. Ela aparece no Granito sob aspecto de pequenas lâminas brilhantes. A mica apresenta alta resistência dielétrica e excelente estabilidade química.

O feldspato pertence ao grupo de silicatos de alumínio com potássio, sódio, cálcio e mais raramente bário, sendo que o primeiro tem grande aplicação na indústria da cerâmica e do vidro. Na cerâmica, sua função é a de fundente, pois seu ponto de fusão é menor do que a maioria dos outros componentes, servindo de cimento para as partículas das várias substâncias cristalinas, além de outros aspectos, como as reações físico-químicas.

a) Processo de Fabricação

Diversos processos industriais são fontes geradoras de resíduos sólidos com alto potencial de reciclagem, enquadrado nessa categoria encontra-se o beneficiamento por serragem de rochas ornamentais.

O processo de extração de Granito começa nas pedreiras, onde essa rocha é encontrada na sua forma natural. O Granito é extraído através de cortes realizados com fios diamantados, que fatiam as montanhas tirando os blocos. O bloco é então levado à serraria onde máquinas denominadas de teares cortam os mesmos, transformando-os em chapas. Posteriormente, as chapas são trabalhadas e transformadas no produto final (CARRISSO, 2003).

A serragem dos blocos de Granito tem por objetivo a produção de chapas, em geral de 2 a 3 centímetros de espessura, e consiste no movimento de lâminas de serragem paralelas que descem gradualmente, serrando o bloco. Este processo ocorre em via úmida (objetivando: lubrificar e resfriar as lâminas,

evitar a oxidação das chapas, servir de veículo ao abrasivo e limpar os canais entre as chapas) e para aumentar o atrito, é adicionada granalha de aço ou ferro. Adiciona-se também, cal hidratada para evitar a oxidação das chapas em contato com a granalha e as lâminas. Neste processo ocorre o desgaste da rocha, transformando-a em pó, que em conjunto com a água, a granalha e a cal formam o resíduo do corte de Granito. Se tais fragmentos não forem removidos periodicamente, a mistura reunirá cada vez mais sólidos, aumentando consideravelmente sua viscosidade.

O controle da viscosidade é realizado acrescentando-se água e descartando-se a parcela da mistura de menor granulometria, que é bombeada para um tanque onde é efetuada a separação da mistura de maior granulometria. Nos casos mais gerais, esta separação é feita por densidade, deixa-se o tanque ser preenchido completamente e separa-se a fração de menor granulometria que se posiciona na região superficial, de onde será descartada por transbordamento (ROCHAS DE QUALIDADE, 1993 apud FERNANDES, 2007).

A partir deste descarte, o resíduo é transportado e, posteriormente, depositado em poços e lançados em tanques de disposição final (Figura 2.2). Uma vez cessada a capacidade de armazenamento, o volume depositado é removido para que o tanque fique novamente pronto para estocagem de nova quantidade de resíduo.



Figura 2.2 - Tanque de disposição final da empresa Polygram S/A [Fonte: Fernandes (2007)]

A figura 2.3 apresenta o processo que envolve o beneficiamento de rochas ornamentais, inclusive com a geração de resíduos.

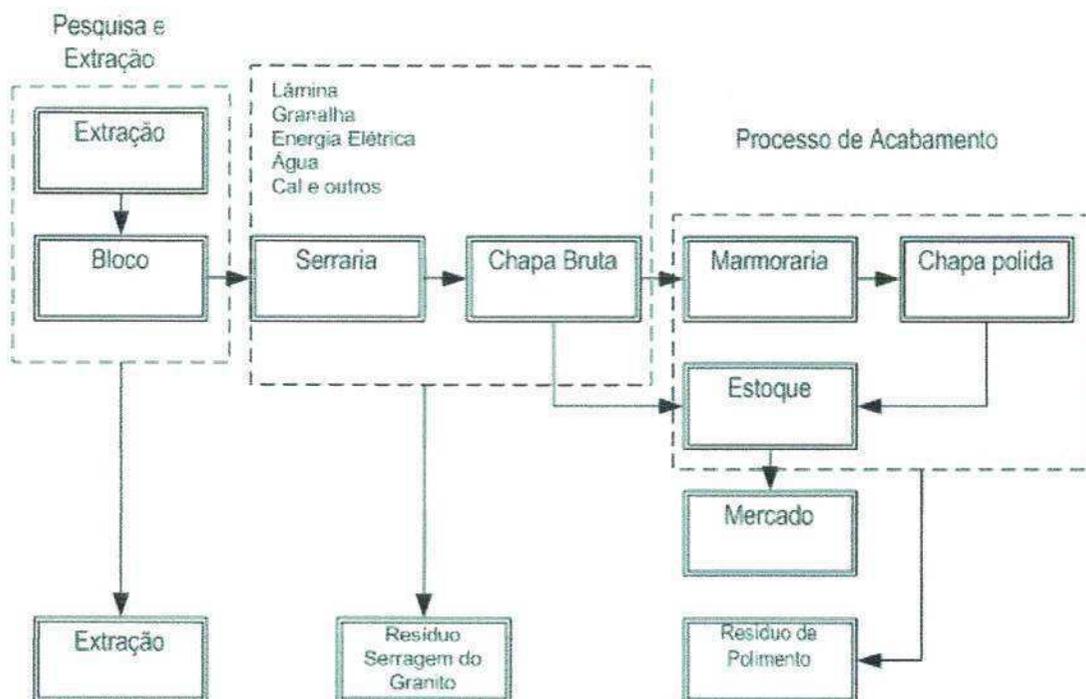


Figura 2.3 - Processo de beneficiamento de rochas ornamentais
 [Fonte: SILVA (1998) apud GONÇALVES (2000)]

As atividades de extração de blocos, mesmo quando a recuperação é relativamente elevada, geram grande quantidade de rejeitos. A redução do impacto ambiental causado por esses materiais é uma questão importante nas pedreiras, embora os efeitos sejam sobre tudo visuais e bastantes localizados.

b) Resíduo da serragem do Granito

O volume de resíduo gerado pelo beneficiamento de Granito é significativo. Porém existe uma oscilação nos valores, porque dependem da demanda do mercado consumidor. O volume total de pó gerado no processo de serragem é bastante significativo, gerando problemas no transporte, estocagem, econômicos, de manutenção de depósitos, ambientais e problemas para a população e operários possibilitando o surgimento de uma doença denominada silicose. De acordo com Rochas Ornamentais (1995) apud Gonçalves (2000) cerca de 30% do material utilizado para serragem é transformado em pó.

Equacionar o contínuo desenvolvimento do setor, sem que haja um impacto sobre o meio ambiente, é uma prioridade. Dessa forma, a reciclagem do rejeito é uma alternativa que possibilita agregar-lhe valor, gerar novos empregos e ajudar a minimizar o problema ambiental. O rejeito gerado pela indústria das rochas ornamentais, cerca de 200.000 t/ano, pode ser subdividido em grosso e fino. O grosso é constituído de fragmentos maiores que areia fina, incluindo placas defeituosas ou quebradas, pedaços de rochas e ou minerais e aparas de blocos. O rejeito fino é composto pela lama gerada pelo corte dos blocos, polimento das placas e acabamento das peças (MOTHÉ FILHO et al., 2005).

O descarte do rejeito tem sido um problema para as indústrias, pois elas podem ter dificuldades para acondicioná-lo de forma adequada, dependem de ter um local para colocá-lo ou ainda têm de pagar para depositá-lo em terreno alheio. Pagava-se cerca de quinze reais por caminhão de entulho retirado. No passado, este rejeito era jogado diretamente nos rios, causando problemas no fluxo hídrico, assoreamento, falta de oxigênio, turbidez e destruição das condições biológicas naturais (MOTHÉ FILHO et al., 2005).

A composição pré-definida (Granito moído, cal e granalha de ferro ou aço) e a inexistência de grãos mistos entre os componentes básicos dos rejeitos gerados (SILVA, 1998), impulsionaram estudos na viabilidade de utilização dos mesmos em diversos setores da indústria, como na produção de argamassa (CARVALHO et al., 2003), tijolos, telhas, concentração de feldspatos para indústria de vidro e cerâmica (CARRISSO et al., 2003). Porém, a geração mensal de resíduos (CARVALHO et al., 2003) é elevada e os setores industriais mencionados não conseguem consumir todo rejeito gerado (CARVALHO, 2008).

Moreira (2003) estudou a possibilidade de reciclagem de resíduo de serragem de Granito, gerado por empresas de beneficiamento da cidade de Cachoeiro do Itapemirim-ES, como matéria-prima alternativa para fabricação de produtos de cerâmica vermelha (tijolos, blocos cerâmicos e telhas) para construção civil.

Pesquisas realizadas por Motta & Freire (1995), sobre o aproveitamento econômico dos resíduos da Serragem de Granito das empresas do município de Guarulhos, indicaram que é possível produzir um novo produto cerâmico, de boa qualidade, com custo inferior aos tradicionais.

O trabalho desenvolvido por Sobrinho (1998) apud Silva (1998) evidencia a possibilidade de utilização dos resíduos provenientes do processamento de Granitos e mármore na produção de argamassas alternativas para o uso na construção civil.

Nogueira (2006) relata uma pesquisa onde o objetivo é ressaltar a importância do aproveitamento dos rejeitos de lavras de Granito para confecção dos diversos insumos de rochas de emprego imediato pela construção civil, na forma de alicerce, muro de arrimo, paralelepípedos, pedra tosca para calçamentos, cascalho para aterros, britas de pós, de modo a criar uma fonte de renda mínima com agregação de valor ao material extraído.

Nesse contexto, surge o processo de pavimentação asfáltica, que além de um ligante asfáltico, chamado de cimento asfáltico do petróleo (CAP), que tem a função de aglutinante, apresenta também um conjunto de agregados minerais, que representam em torno de 95%, em peso, da mistura. Estes, por sua vez, são responsáveis por suportar o peso do tráfego e oferecer estabilidade mecânica ao pavimento. Dentre os agregados minerais mais utilizados podemos citar a areia, o pedregulho, a pedra britada, a escória e o filer (LEITE et al., 2003).

Estudos preliminares realizados por Fernandes (2007) indicaram a viabilidade da utilização do resíduo da serragem do Granito como filler em misturas asfálticas, portanto é um assunto que deve ter seu conhecimento aprofundado.

2.2.2 - Caulim

O termo Caulim tem origem na expressão "Kauling", que na língua chinesa significa colina alta, se referindo a uma colina localizada no norte da China, onde o material é extraído há tempos. Esse é um minério argiloso de cor branca, devido ao baixo teor de ferro, que começou a ser explorado há mais de 3.000 anos na China, sendo um dos mais importantes e um dos seis minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre.

A composição química do Caulim está relacionada com a composição do mineral caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), entretanto, outros elementos são constituintes do Caulim além do alumínio, silício, hidrogênio e oxigênio. Sua constituição química é expressa em termos dos óxidos dos vários elementos: $\text{SiO}_2 = 51,3\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 34,6\%$, $\text{TiO}_2 = 0,5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,5\%$ e Alcalis = 2,1%.

A primeira aplicação do Caulim foi na fabricação de artigos cerâmicos e de porcelana. Posteriormente, o Caulim passou a ser utilizado na indústria do papel e na indústria da borracha. O Caulim tem muitas aplicações industriais e novos usos estão sendo desenvolvidos e pesquisados. Atualmente, é empregado na produção de tintas, plásticos, borrachas, cosméticos, produtos químicos, veterinários, catalisadores para refino de petróleo, cimentos, materiais refratários, produtos alimentícios, farmacêuticos, cosméticos e etc.

Existem depósitos de Caulim em vários países do mundo, entretanto, são poucas as jazidas que tem volume adequado para suportar uma escala de produção competitiva. Entre os maiores produtores estão os Estados Unidos, Inglaterra e Rússia. O Brasil é o sexto maior produtor de Caulim, com aproximadamente 6% da produção mundial, e juntamente com a Coreia do Sul estão em aumento do processo produtivo. No Brasil, a maior produção ocorre nas regiões norte e sudeste do país.

Antes de sua utilização final, o Caulim precisa ser refinado e processado para aprimorar as suas propriedades físicas, tais como alvura, granulometria, viscosidade e pureza, que são comercialmente importantes dependendo de sua utilização final.

A geração do resíduo do Caulim dar-se durante a etapa de lavagem e classificação do tamanho das partículas da mistura. Presume-se que se tem uma grande quantidade de resíduo, uma vez que 70% da matéria-prima bruta é rejeitada durante o processo. O material rejeitado é depositado a céu aberto, pois as indústrias não têm a preocupação de construir tanques de deposição, lançando a imensa quantidade de rejeito no meio ambiente.

a) Beneficiamento do Caulim

O beneficiamento do Caulim é realizado em três etapas: decantação, filtração e secagem e moagem.

- *Decantação*

O processo de decantação tem como finalidade classificar as parcelas da mistura de acordo com a sua granulometria, para destiná-las, respectivamente, à sua utilização final. Para atingir tal fim, o material é disperso em água e é iniciada a primeira lavagem do material bruto seguindo de seu transporte por gravidade até o coberto de peneiramento, nesse transporte se realiza a remoção do material mais grosso e/ou de densidade maior que a da caulinita. O resíduo do material grosso é constituído por mica, quartzo, feldspato e alguns óxidos de ferro e de titânio.

Na etapa de peneiramento ocorre a classificação das partículas da mistura. Esta etapa é formada por um conjunto de peneiras nº 200, de abertura 0,074mm, e peneiras nº 325, de abertura 0,044mm, que estão empilhadas em ordem crescente da abertura da malha, nesse sistema a mistura é classificada de acordo com as dimensões de suas partículas: todo o material que passa nas peneiras nº 200 corresponde ao Caulim que será beneficiado, caso se faça necessário um melhor refinamento do minério, ele é passado nas peneiras nº 325. O material retido nas peneiras de nº 200 é rejeitado e consiste no resíduo fino da cadeia produtiva do Caulim.

O material que passa nas peneiras é transportado, por gravidade, através de tubulações para um sistema de tanques onde se inicia a fase de decantação e sedimentação. O primeiro tanque recebe a mistura e é preenchido com água destilada, ocorrendo a separação da fração de maior granulometria através da sedimentação. A fração mais fina, passa por transbordamento para um segundo tanque, que apresenta um desnível de altura em relação ao primeiro. O processo se repete, ocorrendo o transbordamento para os outros tanques, onde ficam depositadas as partículas de Caulim. A Figura 2.4 mostra um destes tanques.



Figura 2.4 - Tanques utilizados para a decantação e sedimentação do Caulim
[Fonte: Fernandes, (2007)]

A água superficial que não transborda é vazada para um outro tanque de onde é reciclada para fase inicial de dispersão do minério bruto. Um dos materiais sedimentados, em cada um dos tanques, é escolhido, de acordo com a utilização final e destinado ao tanque de vazamento, de onde será retirado para a realização do segundo processo da cadeia produtiva.

- *Filtração*

Na etapa de filtração é retirada a água do material proveniente dos tanques de vazamento, reduzindo assim, a umidade do mineral. Este processo é realizado através do método da prensagem, em que a mistura é recalçada para dentro de uma prensa, por meio de uma bomba de recalque. Retida na prensa a mistura é prensada e, assim, a água é eliminada da mistura, os vazios são compactados e o Caulim fica armazenado na forma de blocos.

A Figura 2.5 mostra uma prensa utilizada no processo de filtração na qual a água é retirada e o Caulim é prensado.



Figura 2.5 - Prensa e armazenamento do Caulim em forma de blocos [Fonte: Fernandes, 2007]

- *Secagem e Moagem*

Para a perda total da umidade os blocos de Caulim são encaminhados à fase de secagem, na primeira etapa eles são expostos ao sol e as correntes de ar onde ficam parcialmente secos. Para completa secagem do material elas são dispostas em forno a lenha. Posteriormente os blocos de Caulim são dispostos no forno para a completa secagem do material, nessa etapa ocorre à desagregação das partículas. Depois da calcinação são trituradas, ensacadas e destinados a comercialização.

b) Resíduo do Caulim

A preservação ambiental é amplamente discutida e, a indústria da construção civil, por ser um dos principais setores que provoca impactos ambientais pela geração e acúmulo de resíduos, é considerada como o campo mais propício para absorver resíduos e subprodutos. É imprescindível que nos próximos anos tenha-se disponível dados relevantes para a redução de perdas, reutilização e reciclagem de resíduos por intermédio da otimização de tecnologias e técnicas direcionadas para o tratamento e aplicação dos mesmos (LIMA, 2004).

Os impactos ambientais, causados pelas empresas mineradoras de beneficiamento de Caulim primário ou residual podem ser classificados em duas etapas: na primeira etapa, o impacto é originado pelo primeiro beneficiamento, ou seja de cada tonelada bruta 70% vira resíduo, são freqüentemente depositadas às margens de rodovias, estradas e sobre a vegetação nativa e geralmente são compostos por grande quantidade de sílica e pequena proporção de feldspato e mica. Na segunda etapa, o impacto ambiental é gerado pelo segundo beneficiamento do material que fica retido em peneira nº 200. Pesquisa sobre reciclagem de resíduos, principalmente os de mineração, vem sendo desenvolvidas por vários pesquisadores em todo mundo.

Segundo Neves (2002) apud Fernandes (2007) as razões que motivaram estas pesquisas maneira geral são: redução do impacto ambiental, esgotamento das matérias prima não renováveis, redução de custos, redução do consumo de energia e melhoria na saúde da população

O resíduo obtido no beneficiamento do Caulim vem tendo bastante atenção por parte das indústrias, visto que há uma intensa preocupação dos órgãos e agências ambientais, devido aos grandes transtornos provocados por essas empresas. A maioria do resíduo gerado é, em geral, descartado em campo aberto e em várzeas de riachos e rios, o que causa vários danos ao meio ambiente, como agressão à fauna e flora da região e à saúde da população. Essa postura das empresas vem sendo alvo de severas fiscalizações por parte dos órgãos de proteção ambiental, fazendo com que o resíduo gerado torne-se uma fonte de custos e um limitante no aumento da produção, o que vislumbra um grande potencial de lucro para as empresas que consigam reaproveitar ou incorporar esses resíduos em suas linhas de fabricação (MENEZES, 2007 apud PEREIRA et al. 2008).

O resíduo caulínico, nos dias atuais, não tem destino de reutilização. Porém, existem alguns trabalhos que designam propostas de reaproveitamento do mesmo como matéria-prima na fabricação de cimentos e adições minerais para a produção de concretos (BARATA, 1998; BARATA; DAL MOLIN, 2002; SOUZA; DAL MOLIN, 2002 apud LIMA, 2004).

2.3 - MISTURAS ASFÁLTICAS

O pavimento asfáltico é formado pela mistura entre um conjunto de agregados minerais, com

granulações pré-definidas, e um ligante, chamado de cimento asfáltico de petróleo (CAP). O pavimento tem a função de suportar o peso do tráfego e fornecer aos usuários segurança, conforto e economia. Em um pavimento asfáltico, os agregados minerais constituem entre 94 e 95%, em peso, da mistura e o CAP corresponde entre 5 - 6%, sendo este responsável pela agregação dos minerais.

O CAP é preparado para apresentar características próprias para uso direto na construção de camadas asfálticas de pavimentos. É um material adequado 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 produtos inorgânicos (IBP, 1999 apud MOURAO, 2003).

As misturas asfálticas são projetadas para:

- resistirem às deformações permanentes;
- resistirem ao fendilhamento por fadiga e por variação térmica;
- terem uma adequada adesividade agregado-mástique que impeça a desagregação;
- serem trabalháveis durante a sua produção, espalhamento e compactação;
- serem duráveis para resistirem ao desgaste do tráfego e aos efeitos do ar e da água;
- serem impermeáveis, para protegerem as camadas inferiores da água da chuva;
- possuírem uma adequada textura superficial;
- causarem um nível de ruído pneu/pavimento reduzido;
- terem boas características ópticas;
- possibilitarem a obtenção duma superfície regular;
- terem uma manutenção fácil;
- serem de utilização economicamente vantajosa.

As misturas asfálticas devem atender a características especiais em sua formulação, recebendo

geralmente as seguintes designações (PINTO e PREUSSLER, 2002):

- camada de rolamento ou capa asfáltica: camada superior da estrutura responsável em receber diretamente a ação do tráfego. A mistura empregada deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura e condições de rugosidade que proporcionem segurança ao tráfego, mesmo sob condições climáticas e geométricas adversas;

- camada de ligação: camada posicionada imediatamente abaixo da capa. Apresenta, em relação à mistura utilizada para camada de rolamento, diferenças de comportamento, decorrentes do emprego de agregados de maior diâmetro máximo, de maior porcentagem de vazios e menor relação betume/vazios;

- camada de nivelamento ou regularização: serviço executado com massa asfáltica de graduação fina, com a função de corrigir deformações ocorrentes na superfície de um antigo revestimento e, simultaneamente, promover selagem de fissuras existentes.

Muito se tem estudado a respeito do processo de pavimentação, principalmente, levando-se em consideração as normas estabelecidas pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), que se preocupam apenas com os aspectos físicos e não com os fenômenos químicos, existentes no processo de pavimentação asfáltica (RIBEIRO, 2006 apud MARTIN et al., 2007).

O desempenho do pavimento depende, dentre outros fatores, das propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constitui. Dentre as camadas, a de revestimento envolve componentes de custo elevado e, devido a isto, fatores que venham a interferir no desempenho da camada devem ter controle rigoroso, entre eles: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção.

A ação das intempéries aliada às oscilações críticas impostas pelo tráfego reduz a vida útil do pavimento. A degradação dos materiais – agregados minerais, ligantes, e misturas asfálticas - por ação da água e calor, é geralmente afetada pela ação desagregadora do tráfego, expondo novas superfícies à ação físico-química em contato com a água (MEDINA, 1997).

Quando existe uma modificação da estrutura do pavimento em estado seco para o úmido, tem-se o envelhecimento da mistura asfálticas, devido à fadiga, o que provoca uma diminuição da resistência quando este é susceptível à presença de água (MÉNDEZ, 2005).

2.4 - SUSCEPTIBILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS À PRESENÇA DE ÁGUA

A relevância de impermeabilização adequada do revestimento é impedir a penetração da água e

consequentemente a fadiga da mistura. Quando se tem um alto percentual de vazios na mistura, devido a uma compactação deficiente, esta se torna susceptível a infiltração da água e do oxigênio que causam a oxidação, desintegração e consequentemente diminuição da estabilidade mecânica das misturas asfálticas.

A susceptibilidade das misturas asfálticas à presença de água é definida como o conjunto de efeitos deletérios inerentes ao incremento da água na interação entre o mástique (asfalto e filer) e os agregados.

A susceptibilidade ocasiona um defeito conhecido internacionalmente por "stripping", o qual acelera a degradação estrutural do pavimento associado ao aparecimento de trincas e deformações plásticas. O "stripping" se caracteriza pelo descolamento da película de ligante do agregado que, nesse caso, inicia-se na parte superior da camada de rolamento, devido aos esforços de tração resultantes das cargas do tráfego, progredindo até a base.

A susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água ocorre pela perda de adesão entre o CAP e os agregados causada pela sua infiltração ou pelo vapor dela. O desempenho das misturas asfálticas está relacionado às propriedades de adesão e coesão com o sistema asfalto-agregado. A perda de coesão e resistência do filme de CAP e as falhas de adesão entre o agregado e o mesmo, em conjunto com a degradação e a fratura do agregado, são identificados como resultado da susceptibilidade à presença de água ou dano por umidade.

A Figura 2.6 apresenta a redução da tensão do mástique devido à difusão da água no interior da mistura provocando à redução da adesão entre o mástique e o agregado. A medida que a mistura é submetida a presença de água, começa a ocorrer o enfraquecimento do filme asfáltico ocasionando a perda de adesão e coesão da mistura, deixando-a susceptível ao aparecimento de danos como trilha de roda, desgastes, trincas, etc. (KIM & LUFIT, 2006).

O fato de que a adesão entre o CAP e o agregado é reduzida pela presença de água e que a coesão do sistema em si também é afetada é do conhecimento dos técnicos da área desde a década 20. Os primeiros trabalhos sobre esse tema foram conduzidos por Nicholson (1932), Riedel e Weber (1934), Saville e Axon (1937). No estudo de Saville e Axon são analisados os resultados provenientes dos ensaios de fervura e imersão em comparação com os resultados obtidos em campo de misturas asfálticas para diferentes tipos de agregados. Neste estudo são apresentadas fotografias de revestimentos com desgastes provocados pela baixa adesividade (LIBERATORI & CONSTATINO, 2006).

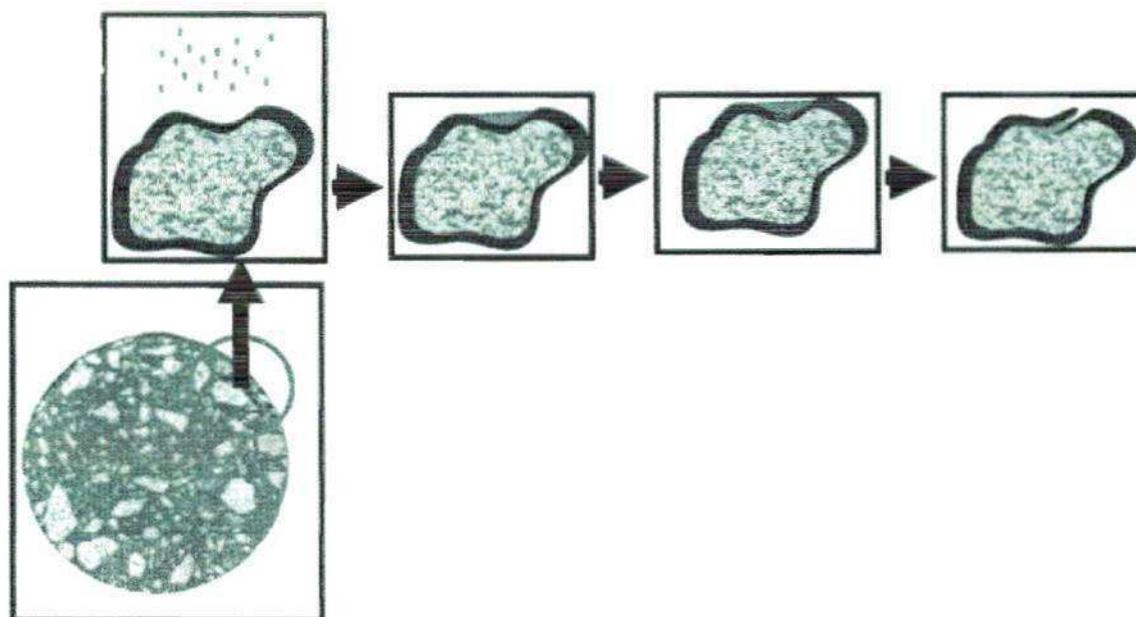


Figura 2.6 - Ilustração do mecanismo de desgastes devido a susceptibilidade à presença de água
 [(Fonte: KIM & LUFIT, 2006)]

Mohamed (1993) apud Kim & Lufit (2006) ressalta que a complexidade dos mecanismos que acarretam falhas de adesão é devido a estes envolverem ações mecânicas e reações químicas, atrações moleculares relacionadas à teoria da energia entre fases.

Em misturas asfálticas, a adesividade entre o CAP e o agregado é efetivada devido a duas propriedades: a capacidade do CAP de envolver e promover a aderência entre os agregados. A primeira propriedade é conhecida como adesividade ativa e a segunda como adesividade passiva. A aderência entre o agregado mineral e o CAP depende do estreito contato entre os dois materiais e da atração de suas superfícies (LYTTON, 2004).

A susceptibilidade de misturas asfálticas à umidade é um problema complexo, que depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas. Os principais fatores que aceleram o aparecimento dos danos causados pela umidade são: o clima e o tráfego. Os maiores danos ocorrem em condições extremas, particularmente quando ocorre congelamento combinado com alto volume de tráfego. Os fatores construtivos que influenciam a susceptibilidade incluem a qualidade da compactação e as condições do tempo durante o processo de execução. Dentre as características das misturas asfálticas destacam-se a natureza do agregado, a natureza do asfalto e o tipo de mistura (GOUVEIA et al., 2004).

Segundo Elphinstone (1997) e informações contidas SHRP (1993) os principais fatores que podem afetar a adesão entre o CAP e os agregados são a composição mineralógica, química e morfológica, a porosidade, a durabilidade, a área superficial, o teor de umidade, a absorção de água e a forma dos agregados minerais. Quanto aos CAPs, os principais fatores estão relacionados com: as características físico-químicas, a

composição química e as propriedades viscoelásticas.

Dentre as características do revestimento e/ou pavimento e do meio ambiente que podem tornar as misturas asfálticas mais susceptíveis a presença de água, pode-se citar:

- as condições do sistema de drenagem;
- a falta de ligação entre as camadas de concreto asfáltico que podem permitir o movimento lateral da água;
- a presença de materiais drenantes e selantes abaixo da superfície, que podem facilitar ou dificultar, respectivamente, a circulação de água na estrutura do pavimento;
- o projeto de mistura asfáltica, incluindo teor de CAP, granulometria, relação filler-betume;
- tipo de ligante utilizado, viscosidade e o uso de aditivos;
- procedimentos de construção e a composição da mistura;
- compactação ineficiente;
- sazonalidade;
- tráfego.

Os mecanismos de perda de ligação agregado-mástique ocorrem devido:

- a pressão intersticial da água nos vazios de mistura betuminosa, devido ao carregamento repetido transmitido pelos pneus dos veículos;
- as diferenças de expansão e contração térmica, produzidas por ciclos de temperatura acima da temperatura de congelamento da água, pela ação de gelo e degelo ou pela ação de choque térmico;
- a combinação da pressão intersticial da água nos vazios da mistura betuminosa com diferenças de expansão e contração térmica;
- a remoção do ligante pela água existente na mistura asfáltica para temperaturas moderadas e altas;

- a interação do vapor de água com o mástique e com as interfaces dos agregados de maiores dimensões;

- a interação da água com minerais argilosos.

2.4.1 - Deteriorações no revestimento devido à presença de água

De acordo com Gontijo (1980) apud Amaral (2000) a fadiga é um processo de degradação estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material submetido a tensões ou deformações repetidas, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após um número suficiente de repetições.

Para Motta & Pinto (1994) apud Amaral (2000) a fadiga é apontada como o principal mecanismo de ruptura dos pavimentos brasileiros, determinando o fim da vida útil estrutural do pavimento devido ao trincamento causado pela repetição de cargas e das conseqüentes deformações elásticas.

A degradação devido à presença de água em misturas asfálticas ocorre em diferentes formas e graus de severidade, a principal é a perda de ligação agregado-mástique. A perda de ligação ocorre, inicialmente, em áreas localizadas do pavimento, onde o mástique (que se separou do agregado) migra até à superfície. Este fenômeno, tem como resultado uma matriz instável na parte inferior das misturas o que pode vir a provocar deformações permanentes (afundamento de trilha de roda), assim como desagregações e fendilamentos devido à ação da carga repetida dos veículos (SILVA, 2006).

Conforme salientado por Daroncho (2001) a superfície dos pavimentos deve ter qualidade física que facilite os movimentos dos veículos e relações físicas para que a transmissão dos esforços entre a superfície da via e os pneus dos veículos atenda as condições de segurança e o conforto da viagem, solicitações e resistência de componentes de pavimento.

Os defeitos existentes nos pavimentos podem ocorrer devido à composição inadequada das misturas que os compõem, pelo entrosamento inadequado entre as camadas ou pela falta de resistência das camadas que os constituem. Esta perda de resistência, que pode ser ocasionada pela perda de adesão devido à presença de água, pode vir a provocar falhas ou descontinuidades na superfície que irão afetar a qualidade de movimentação da via.

As alterações sofridas pela rodovia são hierarquizadas em graus ou níveis de severidade que variam de acordo com a interferência na trafegabilidade da via. De acordo com Oda (1995) os defeitos causam irregularidades, provocam desconforto e, dependendo do nível de severidade, podem levar sérios riscos à segurança do usuário, além de influir na velocidade de operação e noutros custos operacionais dos veículos.

Hicks et al. (2003) apresentam um método de identificação de problemas no pavimento devido as falhas de adesividade (Figura 2.8).

Os mecanismos ocasionados pelas falhas de adesão e coesão poderão acelerar os seguintes tipos de defeitos: trincas, buraco e desgastes.

- *Fendas*

As fissuras e trincas estão definidas dentro de um grupo geral chamado de fendas. A sua presença irá facilitar a penetração de águas para camadas granulares e solo de fundação, diminuindo a capacidade de suporte do pavimento e provocando desconforto e redução da segurança. São classificadas como fissuras, quando a abertura é perceptível a olho nu a uma distância de 1,5m, e são classificadas como trincas quando sua abertura é superior a fissuras (Figura 2.7).

O trincamento de um pavimento é o maior responsável pela diminuição da vida útil, fato comprovado pelas manutenções e restaurações a serem determinadas em função do grau de severidade destes. As conseqüências do aparecimento das trincas podem ser relacionadas com:

- a perda da impermeabilidade da superfície, causando perda da capacidade de suporte do solo e abertura de panelas;
- a progressiva degradação do revestimento próximo às trincas;
- o aumento das tensões verticais que atuam nas camadas inferiores.

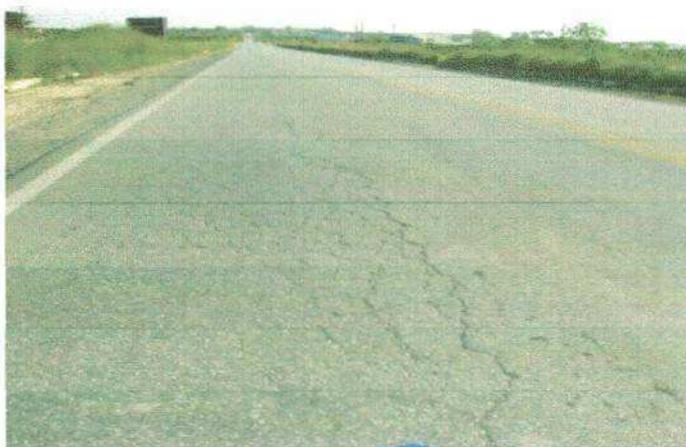


Figura 2.7 - Trincas longitudinais longas

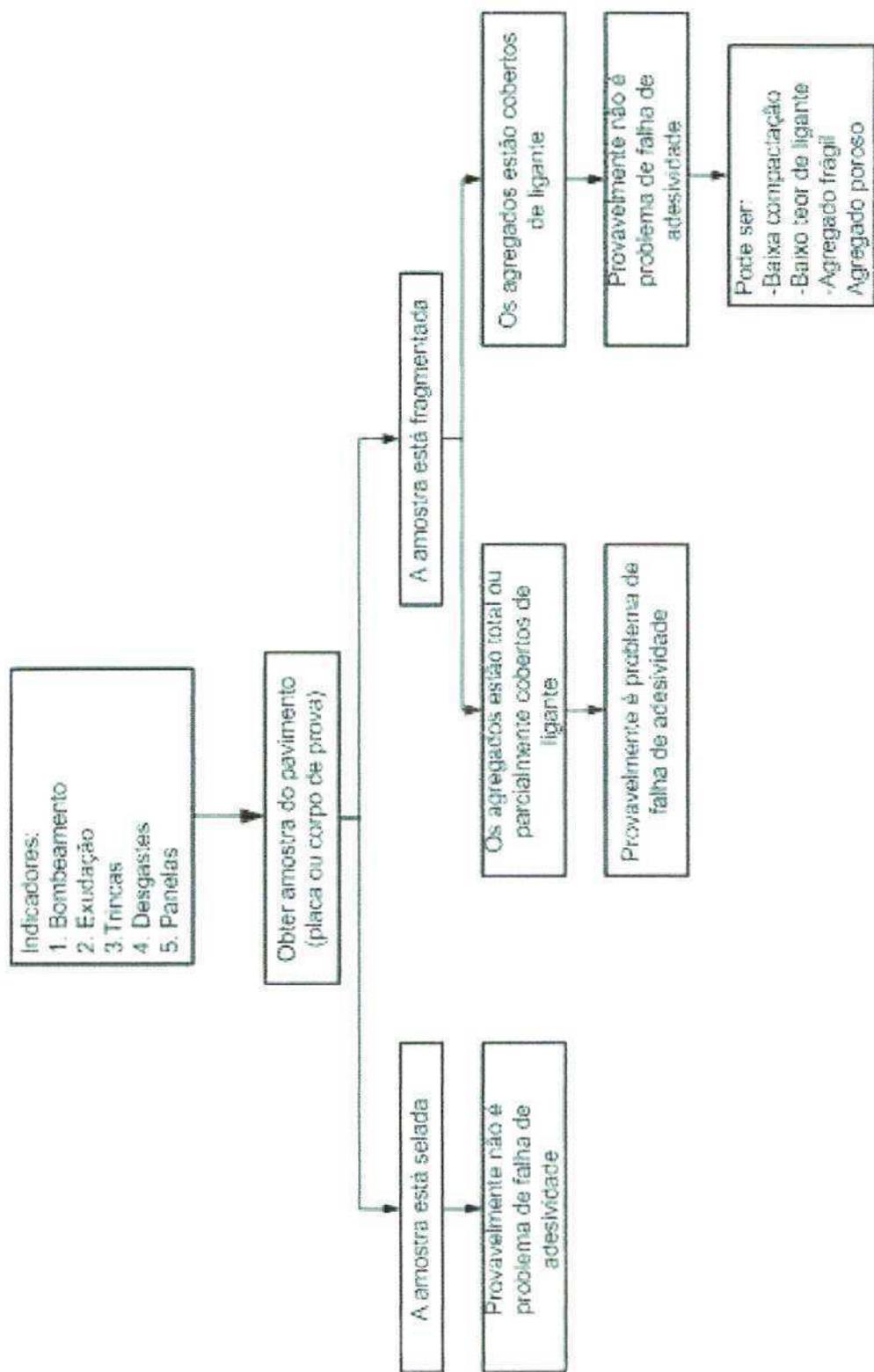


Figura 2.8 - Roteiro para identificação de problemas de falha de adesividade [Fonte : Hicks et al., (2003)]

- *Panela ou Buraco*

São cavidades de diversos tamanhos que ocorrem no revestimento, resultantes de uma desintegração localizada próximos a defeitos como trincas, fissuras, deformações ou perda de agregado, pode ou não atingir camadas subjacentes. Elas estão associadas a uma drenagem deficiente, e evoluem, sob a ação do tráfego e em presença de água, da fragmentação até a remoção de partes do revestimento e da base. A Figura 2.9 apresenta um exemplo deste tipo de defeito.



Figura 2.9 - Painelas no revestimento

- *Desagregação*

A desagregação é a corrosão do revestimento do pavimento, caracterizada pelo desalojamento progressivo de partículas do agregado, devido à quebra e à perda do ligante, as partículas do material ficam soltas e atuam como material granular desvinculado resultando em depressões que podem acumular água. O agregado solto e a água são potencialmente perigosos para o usuário. Geralmente ocorre associado à presença da umidade, baixo conteúdo do ligante ou do envelhecimento deste. O asfalto da mistura tem como finalidade manter a coesão e impermeabilizar o revestimento, ao ocorrer a infiltração de água na superfície do agregado através dos vazios intercomunicados, sob alta pressão hidrostática motivada pelo tráfego, ocorre a quebra de ligação entre os agregados e o CAP, desagregando o revestimento (Figura 2.10).



Figura 2.10 - Desagregação no revestimento

2.4.2 - Ensaios utilizados para o estudo da susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água

Os ensaios previamente realizados pela comparação de amostras de misturas asfálticas, submetidas à ação da umidade, com amostras sem condicionamento, possibilita avaliar a interferência da presença de água na Resistência à Tração que as amostras poderão vir a apresentar, e deste modo prever se estas irão fadigar prematuramente.

De acordo com Libertadori & Constatino (2006) os ensaios de controle de adesividade podem ser divididos em dois grupos: ensaios feitos em agregados soltos e ensaios realizados em misturas asfálticas. Por este critério os ensaios existentes são classificados conforme apresentados na Tabela 2.1 e na Tabela 2.2.

Um método comum de identificar a sensibilidade à umidade é através da determinação da razão entre propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de resiliência, etc) antes e após a indução de umidade (LOTTMAN, 1982; AL-SWAILMI e TERREL, 1992 apud VASCONCELOS,2006).

Entre os ensaios existentes em misturas compactadas destacam-se o ensaio Marshall, o ensaio de tração por compressão diametral, o ensaio de Lottman e o ensaio de módulo resiliência. As particularidades de cada um encontram-se descritas a seguir.

Tabela 2.1 - Ensaios utilizados para avaliar a susceptibilidade à presença de água sobre agregado solto
[Fonte: Libertadori & Constatino (2006)]

Ensaio	Especificação		
	ASTM	AASHTO	Outras
Azul de metileno			ISSA TB 145
Film Stripping			California Test 302
Imersão estática	D 1664*	T 182	
Imersão dinâmica			
Imersão química			Método TMH-1 (Road Research Laboratory 1986, Inglaterra)
Reação superficial			Ford et al (1974)
Quick bottle			Virginia Highway and Transportation Research Council
Fervura	D 3625		Tex 530-C; Kennedy et al. (1984)
Rolling bottle			Isacsson e Jorgensen (1987) Suécia
Adsorção			SHRP A -341 (Curtis et al. 1993)
Energia superficial			Thelen 1958, HRB Bulletin 192; Cheng et al (2002), AAPT
Pneumatic Pull-off			Youtcheff e Aurilio (1997)

Tabela 2.2 - Ensaio utilizados para avaliar a susceptibilidade à presença de água sobre misturas asfálticas
[Fonte: Libertadori & Constantino (2006)]

Ensaio	Especificação		
	ASTM	AASHTO	Outras
Susceptibilidade à umidade por vapor			California test 307 Desenvolvido na década de 1940
Imersão-compressão	D 1075	T 165	ASTM STP 252 (Gode 1959)
Imersão Marshall			Stuart (1986)
Freeze-Thaw pedestral test			Kennedy et al. (1982)
Ensaio de Lottman original			NCHRP Report 246 (Lottman 1982), TRR 515(1974)
Ensaio de lottman modificado		T 283	NCHRP Report 274 (Tunnicklif e Root 1984), Tex 531-C
Tunnicklif-root			NCHRP Report 274 (Tunnicklif e Root 1984)
ECS com módulo resiliente			SHRP-A-403 (Al Swailmi e Terrel, 1994)
Hamburgo	D4867		Aschenbrener e Currier (1993). Tex -242-F
Asphalt Pavement Analyzer	WK 1822		
ECS/SPT			NCHRP 9-34 2002-03
Multiple freeze-Thaw			

a) Ensaio Marshall

O ensaio Marshall teve origem em 1939 com o engenheiro Bruce Marshall, ele foi difundido ao redor do mundo e é usado pelos órgãos rodoviários do Brasil. O ensaio consiste em produzir corpos-de-prova com massas específicas similares às das misturas asfálticas compactadas em campo e rompe-los por tração diametral com um molde específico denominado, Marshall, (Figura 2.11).

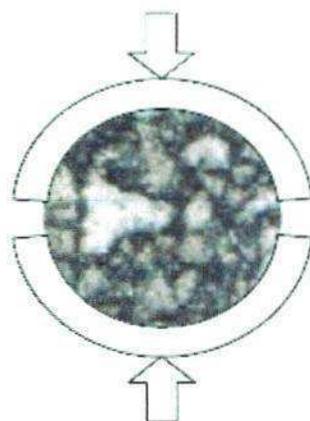


Figura 2.11 - Layout do molde Marshall [Fonte: Pinheiro (2004)]

O ensaio Marshall é utilizado pela maioria dos DOTs (Departamento de Transportes), firmas de consultoria e projeto em todo mundo, devido ao seu equipamento ser relativamente barato e portátil e este apresentar cuidados com as propriedades densidade/vazios dos materiais asfálticos (LEITE et al., 1996).

De acordo com Coelho (1992) apesar do método Marshall ser o mais utilizado e conhecido, ele ainda é alvo de discussões no que se refere ao modelo mecânico de ensaio, como também pelo significado dos parâmetros medidos e pelas correlações obtidas entre os parâmetros mensurados e o desempenho das camadas nas rodovias.

A grande deficiência do método está na compactação por impacto e na estabilidade nos corpos-de-prova que não representa adequadamente o que ocorre em campo. Estes dois problemas podem resultar em misturas com propensão à deformação permanente (PINHEIRO, 2004).

Segundo Motta et al. (1993) a dispersão dos resultados de estabilidade do método Marshall é devido a diversidade de procedimentos na preparação das amostras, compactação e desmoldagem dos corpos-de-prova. Para Siddiqui et al. (1998) entre os fatores apontados como causas da variabilidade desses parâmetros destacam-se: tipo de soquete, a velocidade da haste do soquete durante a operação de compactação dos corpos-de-prova, além de aspectos relativos à estrutura de fixação do molde e do soquete de compactação.

De acordo com Méndez (2005) uma das vantagens do método Marshall é que, durante a sua execução, é possível controlar os parâmetros densidade e vazios dos materiais. Esta análise serve para

assegurar que as proporções volumétricas dos agregados fiquem dentro de limites adequados para assegurar durabilidade da mistura. Na Tabela 2.3 estão inseridas algumas vantagens e limitações o método.

Tabela 2.3 - Vantagens e limitações do ensaio Marshall [Fonte: Méndez (2005)]

Vantagens	Limitações
Simples, prático, rápido e eficiente para dosagem e controle da qualidade;	Compactação é por impacto
Controle de vazios, resistência e durabilidade	A carga é perpendicular ao eixo de compactação
Não necessita de aparelhagem sofisticada;	Não considera esforços de corte

b) Ensaio de tração indireta por compressão diametral

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro em 1943, com a finalidade de determinar a Resistência à Tração de corpos-de-prova de concreto de cimento Portland por solicitações estáticas, tem sido usado no Brasil para o dimensionamento empírico de pavimentos.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o corpo-de-prova cilíndrico é posicionado diametralmente em relação à direção de compressão, resultando em uma tração, agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura da amostra nesta direção. Pode ser realizado em uma prensa simples de CBR. Sendo o corpo-de-prova apoiado ao longo de duas geratrizes por dois frisos de carga posicionados na parte superior e inferior do corpo-de-prova. Em misturas asfálticas, realiza-se o ensaio de acordo com a norma ME 138/94 do DNIT (Figura 2.12).

Falcão e Soares (2002) apud Lima (2003) verificaram que para diferentes larguras de frisos a Resistência a Tração (RT) apresentou valores variados, e com auxílio de observações dos ensaios de RT e simulações numéricas, os autores inferiram possíveis influências das tensões de cisalhamento sobre o valor da força máxima aplicada pela prensa (P), gerando um incremento dos valores destas com a diminuição da largura dos frisos.

Bemucci et al. (2007) descrevem que com o envelhecimento das misturas asfálticas, o valor da resistência a tração aumenta, todavia, este fator pode vir a comprometer a flexibilidade do revestimento ocasionado pelo aumento do Módulo de Resiliência (MR).

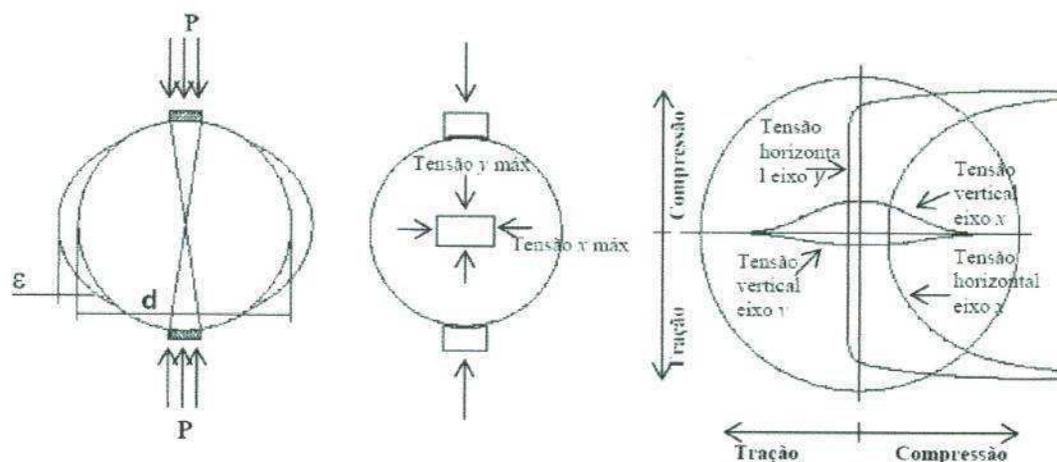


Figura 2.12 - Layout do estado de tensões gerado no ensaio de tração por compressão diametral [Fonte: Rohde (2007)]

c) Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio de Lottman modificado, também conhecido como ensaio de "dano por umidade induzida", é utilizado para avaliar a capacidade mecânica da mistura asfáltica, em termos de resistência a tração (RT), sob a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas.

O ensaio de dano por umidade induzida, tem importância reconhecida nas especificações de alguns tipos especiais de misturas SMA (Stone Matrix Asphalt) e CPA (Camada Porosa de Atrito), para as quais o ensaio Lottman modificado faz parte do projeto (AASHTO, 2001 e WATSON et al., 2002 apud MAGALHÃES, 2004). O ensaio é utilizado por engenheiros e técnicos dos Departamentos de Transportes dos Estados Unidos (DOTs) e pelo meio acadêmico brasileiro.

De acordo com Furlan (2004) o principal ensaio utilizado na avaliação dos danos por umidade das misturas asfálticas é o ensaio de Tração por Compressão Diametral de Lottman. Ainda, segundo a autora, esta importância é justificável por ele refletir o esforço ao qual a película de asfalto é submetida quando deslocada/arrancada e por também apresentar sensibilidade suficiente para diagnosticar variações na resistência ou perdas de coesão da mistura.

No ensaio, os corpos-de-prova são divididos em dois grupos, onde um é rompido à tração (sido submetido a condicionamento) e o outro sofre a ruptura após ciclos de gelo e degelo. A razão entre os grupos fornece a Relação da Resistência à Tração (RRT). A metodologia desenvolvida pelo projeto SUPERPAVE

(Superior Performance Pavement) estabelece que este valor deve ficar acima de 80%, enquanto a ASSHTO MP 8-01 estabelece o limite mínimo para RRT de 70%. A Figura 2.13 apresenta o esquema do ensaio.



Figura 2.13 - Layout do procedimento para o ensaio de Lottman [Fonte: TANDON et al., (2003)]

Apesar do ensaio supracitado ser utilizado e apontado como eficaz na avaliação da susceptibilidade à presença de água, ele apresenta restrição a seu uso, que é o fato de trabalhar com aplicação de carga estática.

d) Ensaio de Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência, obtido para misturas asfálticas, é a relação entre as tensões repetidamente aplicadas diametralmente e as deformações reversíveis provocadas por estas, sob condições específicas de carregamento e temperatura, quando admitido o regime elástico-linear. O ensaio para determinação do Módulo de Resiliência é realizado em um equipamento composto por uma prensa, sistema pneumático com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, sistema de aplicação da carga, sistema de medição do deslocamento diametral horizontal do corpo-de-prova quando submetido à carga e sistema de controle de temperatura. A Figura 2.14 apresenta o esquema do equipamento de ensaio.

O tráfego provoca no pavimento pulsos de tensões, de magnitudes variadas, que são aplicadas repetidamente em cada elemento subjacente que o compõe e até uma dada distância ao lado das trilhas de roda. Próximo da superfície, o pulso tem uma forma sinusoidal pronunciada. Ao longo da profundidade a forma ainda se mantém sinusoidal, entretanto tende a uma conformação aproximadamente triangular (BARKSDALE et al., 1997 apud GIGANTE, 2007). Durante o ensaio, são aplicadas cargas repetidas com o objetivo de simular o efeito de consolidação devido ao contato repetido dos pneus dos veículos sobre o pavimento. O tempo de aplicação de carga tem como função simular a velocidade de translação dos eixos

dos veículos no campo, enquanto a frequência reproduz o número de eixos que passam em determinada seção de rodovia.

O Módulo de Resiliência, assim como a Resistência à Tração, tem na teoria da elasticidade a base para sua formulação. Apesar do reconhecimento da viscoelasticidade dos materiais asfálticos, o ensaio de Módulo de Resiliência usa a prerrogativa de que pequenas cargas, quando comparadas à Resistência à Tração, após fase de condicionamento, produzem deformações consideradas elásticas (HUANG, 1993 apud MAGALHÃES, 2004). Este ensaio tornou-se rotineiro em laboratórios do Brasil e do mundo por auxiliar na estimativa de propriedades mecânicas das misturas asfálticas relacionadas ao fenômeno da fadiga e por poderem ser usadas em procedimentos racionais de dimensionamento de pavimentos flexíveis (MOTTA, 1998) (Figura 2.15).

Em misturas asfálticas, o Módulo de Resiliência é definido como a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico de mistura asfáltica, e a deformação específica recuperável (ϵ_r) provocada pela tensão aplicada, numa certa temperatura. É usado como parâmetro de entrada de dados para o cálculo de tensões. Ressalta-se, contudo, que os ligantes usados nas misturas asfálticas são materiais viscoelásticos, cuja rigidez varia em função da temperatura (SOUZA, 2005 & MEDEIROS JR, 2006 apud OLIVEIRA, 2007).

Brito (2006) explica que nos últimos anos as metodologias puramente empíricas evoluíram para processos empírico-mecanísticos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, os quais, além de mais racionais, são significativamente mais complexos e apresentam melhores resultados. O autor, entretanto, chama atenção para várias particularidades do atual procedimento de realização desse ensaio como, por exemplo, algumas simplificações matemáticas impostas ao ensaio, o número de ciclos de condicionamento aplicado, a temperatura do ensaio, a forma e o período do pulso de carga, o equipamento utilizado (sensores de deslocamento, sistema de carregamento, largura dos frisos de transmissão de carga), dentre outros. Segundo o autor, a variação desses fatores é a principal responsável pela elevada variabilidade dos valores do Módulo de Resiliência em misturas asfálticas.

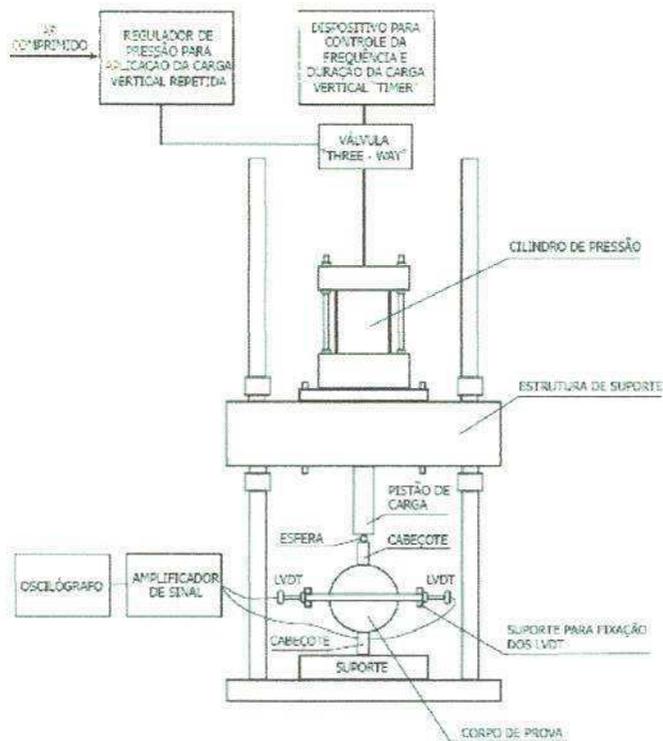


Figura 2.14 - Layout do equipamento para determinação do Módulo de Resiliência
[Fonte: Gigante, (2007)]

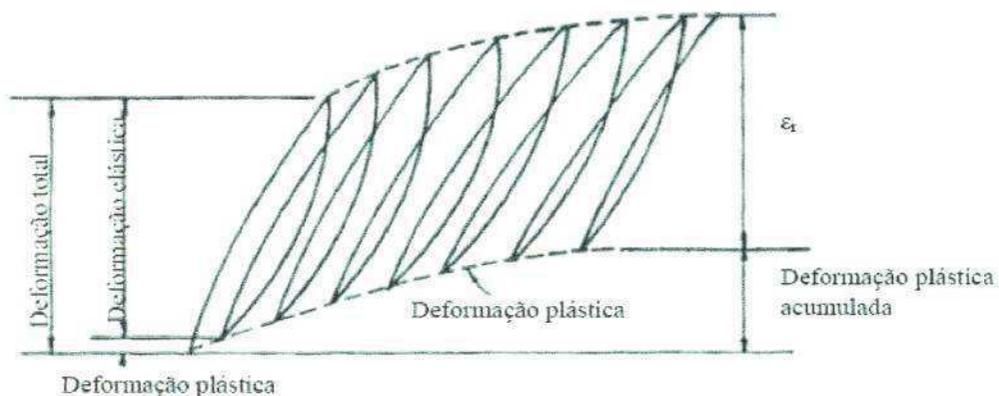


Figura 2.15 - Layout sobre as deformações obtidas quando da realização do ensaio de Módulo de Resiliência em misturas asfálticas [Fonte: Huang, (1993)]

Schmidt e Graf (1972) apud Neves Filho (2006) relataram que misturas asfálticas têm, em geral, o

valor do Módulo de Resiliência diminuído em torno de 50% quando submetidas a saturação em relação às não saturadas e que essa perda continua com o passar do tempo de imersão em água. Estes autores mostraram também que, após drenagem da água contida na mistura asfáltica, o valor do Módulo de Resiliência pode ficar dentro dos níveis iniciais (Figura 2.16).

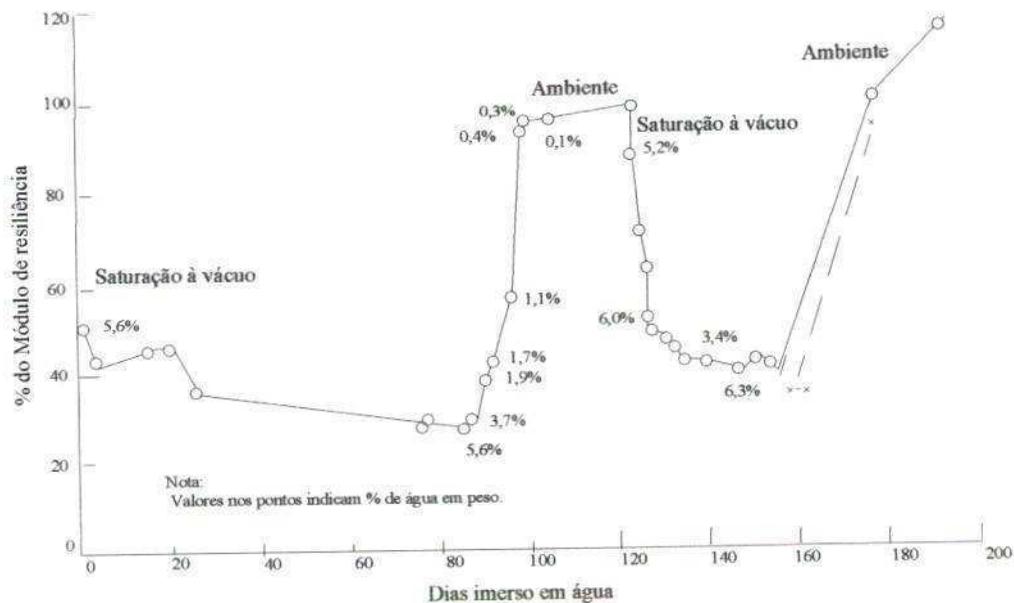


Figura 2.16 - Variação do Módulo de Resiliência em diferentes níveis de saturação
[Fonte: SCHMIDT & GRAF, (1972)]

Entre os fatores que afetam os valores do Módulo de Resiliência pode-se destacar:

- percentagem de ligante: pesquisas realizadas por Al-Sugair (1991) apud Mendez (2005) constataram que ao aumentar a quantidade de ligante na mistura asfáltica, ocorre uma redução no Módulo de Resiliência;

- tipo de agregado: a composição química e o tipo de mistura afetam significativamente o módulo de resiliência;

- quantidade de vazios: ao aumentar o número de vazios na mistura, ocorre uma redução no Módulo de Resiliência;

- variáveis ambientais: temperatura, umidade ou qualquer fator que interfira na vida útil dos pavimentos.

Outras fontes de variabilidade são ligadas ao equipamento, como a forma e carregamento, incluindo magnitude, modo, frequência, duração e período de descanso entre pulso de carga, além dos procedimentos de cálculo do deslocamento medido, do desenvolvimento do ensaio e dos fatores inerentes ao equipamento.

2.4.3 - Procedimentos utilizados para minimizar a susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água

A fim de minimizar os danos provocados pela ação deletéria da água nas misturas asfálticas, frente às oscilações cíclicas impostas pelo tráfego, foram desenvolvidas algumas técnicas que melhoram a adesão asfalto/agregado. Entre as técnicas, pode-se destacar: a adição de aditivos sintéticos e fileres.

a) Aditivos

Aditivos são agentes melhoradores de adesividade e são substâncias tensoativas catiônicas, na maioria das vezes, *aminas*. Quando adicionados às misturas asfálticas, eles reduzem a tensão superficial e aumentam a adesão do filme asfáltico com os agregados (ROBERTS et al., 1996).

O acréscimo de aditivos (composto com cabeça polar positiva) ao ligante melhora a adesão entre este e o agregado ácido (com preponderância absoluta de cargas negativas). Esse aumento da adesão se dá por meio da forte atração entre os dois componentes de polaridades opostas e da conseqüente formação das ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio (NEVES FILHO, 2006).

Epps et al. (2003) apud Neves Filho (2006) concluíram que as propriedades do aditivo variam com a composição química do asfalto, a composição química e concentração do aditivo no CAP, do tipo de dispersante utilizado e, em alguns casos, da temperatura e do tempo de estocagem. Alguns aditivos de baixa eficácia são utilizados com a adição de óleos como agentes de dispersão, já os aditivos de elevado desempenho são utilizados uma pequena quantidade de dispersante.

O uso do aditivo, "dope", reduz a tensão da superfície do CAP e aumenta a adesão entre este e o agregado. Existem dois métodos pelos quais se pode adicionar o "dope" às misturas asfálticas. O mais simples e econômico, é adicioná-lo ao CAP antes da mistura com o agregado. O segundo consiste em

acrescentá-lo durante o processo final de refino do petróleo.

b) Fíleres

O filer é definido como material de enchimento proveniente da trituração de agregados graúdos e miúdos, é não plástico e passa pelo menos 65% na peneira de 75 μ m de abertura. Sua finalidade é melhorar o desempenho reológico, mecânico, térmico e a susceptibilidade à presença da água. Entre os fileres utilizados, encontram-se a cal e o cimento Portland (LUCENA et. al., 2004).

Dependendo da granulometria, o filer pode exercer preencher os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, ajudando a formar o esqueleto mineral e aumentar a viscosidade do ligante, ou seja, sua resistência à deformação. De acordo com a natureza, ele pode ser classificado como filer natural quando provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou artificial, quando tem origem em outras fontes como pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, entre outros.

O filer mineral é um material que atua como agente melhorador da coesão da mistura asfáltica. Pode ser classificado como material de enchimento e é utilizado para atender a objetivos distintos. O primeiro deles, diz respeito à melhora da graduação da composição da mistura. Também auxilia na compatibilidade do sistema, "exercendo um efeito lixotrópico sobre a massa asfáltica a fim de evitar a segregação do agregado e/ou afloramento do ligante". O filer mineral ainda atua no processo de ruptura da emulsão e aumenta a coesão final da mistura. O tipo e a quantidade de filer deverão ser determinados no laboratório por ocasião do projeto de mistura do micro revestimento asfáltico a frio (REIS & SANTOS, 1997).

O incremento de filer além de diminuir os vazios da mistura, também é importante para a melhoria da adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados. Observa-se ainda uma redução na absorção de água, nas perdas de resistência após o período de imersão prolongado e também na redução do envelhecimento de misturas asfálticas. A utilização de fileres nas misturas asfálticas é importante pois tendem a diminuir a desuniformidade na consistência e na susceptibilidade térmica que possa existir nas misturas asfálticas (MEDEIROS, 2006).

De acordo com RUIZ (1959) apud Souza (2001) "...num sistema filer-asfalto, ao aumentarmos a quantidade de Fíler, as partículas tendem a aproximar-se, diminuindo os poros, tendendo a formar uma estrutura que vai deixar o masticue rígido, tomando-o frágil e quebradiço (concentração crítica)".

Segundo Motta e Leite (2000) apud Cardoso (2004), o filer influencia as propriedades da mistura enrijecendo o ligante, aumentando o volume de ligante, alterando a resistência à água da mistura, afetando o envelhecimento e modificando a trabalhabilidade e compactação da mistura.

Kvuxxi and Hicks (1997) apud Paes (2006) estudaram a influência do filer no comportamento do mástique e das misturas asfálticas e concluíram que as propriedades físicas de diferentes fileres têm efeito direto nas propriedades mecânicas do mástique que vão originar. Estes autores concluíram que as propriedades do mástique se relacionam diretamente com as dimensões das partículas de filer, embora o aumento da concentração seja o fator mais influente no aumento da consistência do mástique.

Segundo Al-Suhaibani et al. (1992) apud Amaral (2000) a atuação do filer se dá por duas teorias que ocorrem simultâneas, a primeira é que suas partículas finas preenchem os vazios presentes entre os agregados, aumentando a densidade e a resistência da mistura quando compactadas. A outra é que as partículas finas de filer, ficando suspensas no ligante, aumentam a sua viscosidade, e, em decorrência disto, a rigidez da mistura.

Existem diversos estudos sendo realizados referentes à incorporação de resíduos industriais como filer em misturas asfálticas.

Bonet (2002) mostrou a viabilidade da utilização de 8% do resíduo de areia de fundição no traço da massa de asfalto. O resíduo foi totalmente envolvido pelo material asfáltico o que evitou possíveis contaminações. Em estudos realizados com escória de aciaria. Branco (2004) encontrou limitações quanto ao seu uso devido a heterogeneidade dos agregados, todavia a substituição apresentou possibilidade de utilização.

Souza (2001) e Fernandes (2007) utilizaram o ensaio Marshall para avaliar a eficácia da utilização do resíduo proveniente de serragem de rocha granítica como substituição aos fileres convencionais, os resultados apontaram a percentagem de 5% em peso como o teor ideal. Fernandes (2007) também avaliou o uso do resíduo do beneficiamento do Caulim, a percentagem de 5% alcançou os resultados mais satisfatórios com relação aos parâmetros Marshall, a adesividade medida pelo ensaio Lottman e a Resistência à Tração.

Medeiros (2006) estudou a utilização do lodo de esgoto, que passou na peneira de malha nº 200 e foi calcinado para uso como filer em misturas asfálticas. As misturas com lodo calcinado apresentaram comportamento semelhante às misturas com cimento (filer convencional), proporcionando melhor

comportamento quanto à estabilidade e relação de Resistência à Tração.

Lucena (2008) pesquisou a utilização do cascalho de perfuração de poços de petróleo como filler em misturas asfálticas. Além de ser uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, seu comportamento mecânico atendeu às exigências do DNIT e da ASSHTO. Aldigueri et al. (2004) também estudaram o uso de solo contaminado com petróleo em pavimentos com baixo volume de tráfego, os resultados apontaram a alternativa como uma solução viável.

Higashi et al. (2004) estudou a utilização de cinzas volantes em misturas asfálticas. As cinzas volantes consistem de sílica, alumínio, e ferro que originam o cimento pozolânico quando em contato com a água, e apresenta-se similar ao cimento Portland. Como esta substância apresenta uma elevada área superficial e uma alta capacidade de absorção, ela é indicada para tratamentos de misturas asfálticas suscetíveis a apresentarem danos devido à presença de água.

De acordo com Balige (2003) a transformação de pneus em farelos de borracha através do seu esmagamento, e incorporá-los nas misturas asfálticas podem dar um destino adequado a estes. A adição das partículas originadas irá melhorar a susceptibilidade térmica, o comportamento elástico, a resistência a trincas de fadiga e a estabilidade devido ao tempo de uso do pavimento. Aksoy et al. (2004) descreveram que a finalidade do uso de borracha triturada pode diminuir a susceptibilidade à água, aumentar o Módulo de Resiliência e a resistência do ligante à oxidação.

2.5 - DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PELO MÉTODO SUPERPAVE

O procedimento de dosagem desenvolvido no Programa SUPERPAVE surgiu nos Estados Unidos no final dos anos 80 como resultado do Programa SHRP (Strategic Highway Research Program). Ele é baseado em especificações estabelecidas para os agregados e nas proporções volumétricas da mistura asfáltica. Por sua vez, as misturas são "projetadas" com o auxílio de parâmetros relacionados com as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados, bem como pela relação volume de vazios, volume de CAP e volume de agregado.

Uma das exigências da metodologia SUPERPAVE diz respeito à distribuição dos tamanhos de grãos, onde a granulometria é abordada de forma diferente da tradicional. Usa-se a curva proposta por Fuller e Thompson em 1907 para lançar em gráfico a distribuição dos diferentes tamanhos das partículas dos agregados que irão compor a mistura no nível 1.

Na Figura 2.17 encontra-se um exemplo de distribuição dos tamanhos de grãos para dosagem pelo o Procedimento SUPERPAVE. A reta representa a curva de densidade máxima e está relacionada à distribuição dos tamanhos das partículas em que os agregados se encaixam da forma mais compacta possível. Esta, por sua vez, deve ser evitada, pois a mistura deve conter um mínimo de vazios (4%). Entretanto, a proporção dos agregados deve se enquadrar dentro dos pontos de controle estabelecidos para cada tamanho nominal máximo dos agregados.

Na zona restrita, a mistura asfáltica apresentará comportamento mecânico frágil, dificultando a compactação e oferecendo pouca resistência à deformação permanente. Nesta zona, a mistura terá excesso de areia fina em relação à areia total. A Figura 2.18 ilustra um exemplo de duas distribuições dos tamanhos de partículas de agregados (diâmetro nominal máximo 19 mm) dentro dos pontos de controle, fora da zona de restrição e situadas na Faixa A do DNIT.

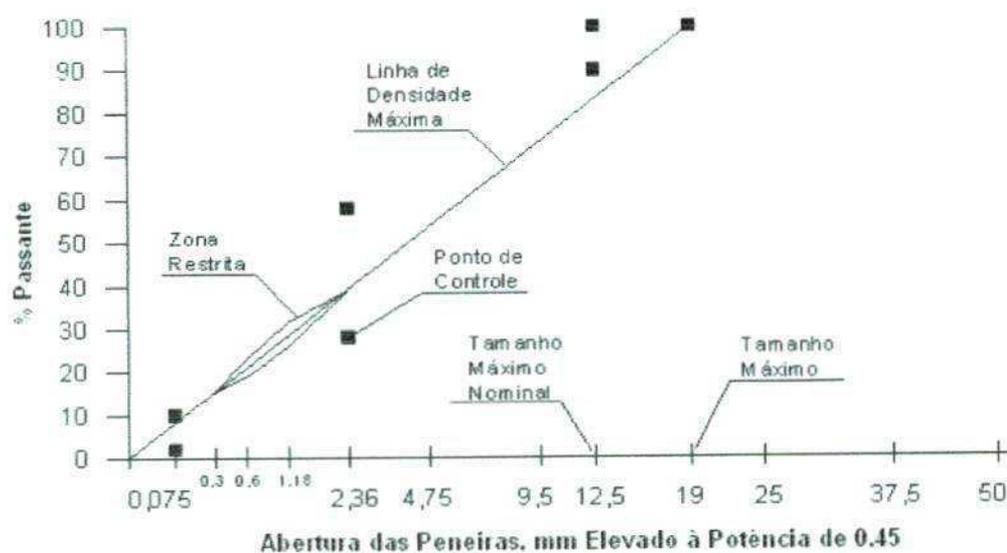


Figura 2.17 - Curva para distribuição dos tamanhos das partículas proposta por Fuller e Thompson
[Fonte: Marques (2004)]

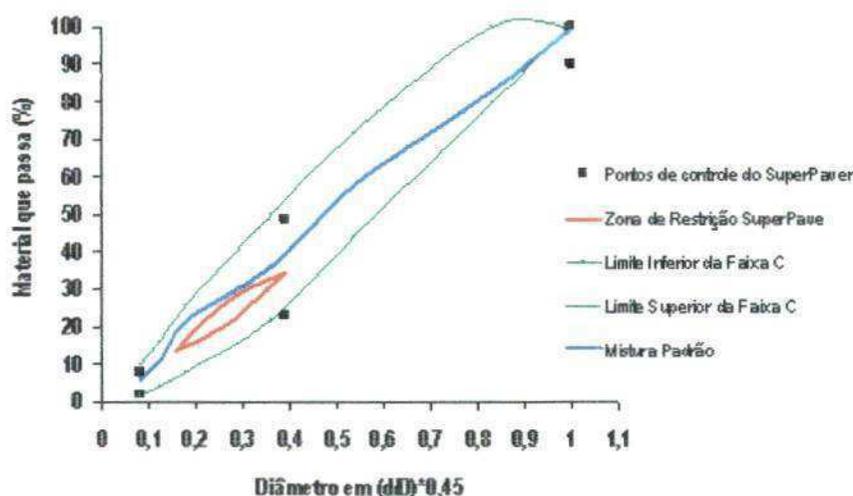


Figura 2.18 - Curva de distribuição dos tamanhos de partículas para o tamanho nominal máximo de 19 mm
[Fonte: Santana., 2009]

2.5.1 - Compactação da mistura asfáltica

Entre 1988 e 1993 foi criado nos Estados Unidos um projeto SHRP com o intuito de prover uma nova metodologia capaz de apresentar modelos e ensaios mais realistas e de prever defeitos como deformação permanente e trincas por fadiga. Seus resultados foram publicados com orientações sob o nome de SUPERPAVE . O grande diferencial deste procedimento para o Marshall, compactação por impacto, é a forma de compactação, por amassamento, onde é utilizado um Compactador Giratório Automático (SGC - Superpave Gyrotory Compactor) capaz de distribuir os agregados dentro da mistura de maneira mais próxima à do campo (Figura 2.19).

O desenvolvimento do conceito da compactação giratória é atribuído aos engenheiros *Philippi, Raines e Love*, do Departamento de Rodovias do Texas, na década de 1930. O primeiro compactador giratório do Texas era manual e foi usado em pesquisas de 1939 a 1946 (MARQUES, 2004).

Os pesquisadores do SHRP selecionaram o compactador giratório para uso em projeto de mistura e em trabalhos de controle de qualidade no sistema SUPERPAVE por ele possuir protocolo de operação similar ao compactador giratório francês. Atualmente, segundo HARMAN et al. (2002) apud Marques (2004) existem mais de 2000 compactadores, em oito modelos diferentes, nos EUA .



Figura 2.19 - Layout do Compactador Giratório e suas configurações

No Programa SHRP foram realizados estudos com quatro dispositivos de compactação (o compactador giratório Texas, por rolagem Exxon, o soquete Marshall e o compactador por amassamento linear Elf) para determinar o que simularia mais adequadamente a compactação que ocorre no campo. As conclusões extraídas desta fase dos estudos, descritas abaixo, foram relatadas por COMINSKY et al. (1998):

- análises estatísticas indicaram que o método giratório produz amostras similares às do pavimento. Os compactadores *Exxon* e *Elf* apresentaram a mesma probabilidade de produzir amostras similares às amostras de pavimentos e o compactador Marshall de base rotativa apresentou a menor probabilidade;

- o compactador Marshall quebra os agregados mais freqüentemente durante a compactação que os outros três compactadores;

- quando comparado ao compactador por rolagem *Exxon*, o compactador giratório Texas parece ser a melhor escolha para preparar amostras de laboratório para ensaios de rotina de projeto de misturas de concreto asfáltico. Deve-se chamar a atenção que, baseado em outros estudos, a distribuição de vazios de ar das amostras compactadas pelo giratório é menos similar às de campo que as amostras compactadas pelo compactador por rolagem. Esta diferença, entretanto, não afeta desfavoravelmente as propriedades das misturas medidas.

Estudos realizados por Marques (2004) relatam que o compactador giratório pode ser usado como uma ferramenta efetiva para o controle em laboratório da compactação de misturas asfálticas realizadas em campo. Entretanto, em todos os casos, foi observado que no procedimento de compactação Marshall são obtidos corpos-de-prova com condições volumétricas diferentes aos obtidos com o SGC. O autor infere que "a compactação Marshall não deve ser usada para o controle da qualidade de misturas asfálticas em campo

quando projetadas pelo sistema SUPERPAVE."

A redução da percentagem de vazios do compactador giratório relativo ao compactador Marshall já havia sido observado por D'Angelo et al. (1995) apud Marques (2004). Eles estudaram cinco misturas diferentes, produzidas por cinco usinas, que foram comparadas usando os procedimentos de compactação Marshall e de SUPERPAVE. Os resultados indicaram que as amostras compactadas por amassamento (SGC) apresentaram variabilidade nos vazios de ar menor que as amostras compactadas por impacto (Marshall). Segundo o autor, baseado somente no índice de vazios, ambas apresentaram bom desempenho para aplicações de controle de qualidade de misturas asfálticas.

Segundo Brown e Cross (1991) o método Marshall é baseado na hipótese que as amostras compactadas em laboratório vão representar, aproximadamente, a densidade da mistura em serviço após vários anos de tráfego. Se a densidade de projeto é baixa, deformações permanentes vão aparecer como resultado dos baixos teores de vazios devido a consolidação do pavimento sob tráfego.

Mendéz (2005) cita as seguintes vantagens do compactador giratório:

- simula melhor as condições de clima e carga;
- pode compactar misturas com agregados maiores;
- consegue identificar problemas de compactação;
- fácil de realizar um controle de qualidade.

Entretanto, o professor Carl Monismith, da Universidade de Berkeley, enumerou uma série de limitações com a uniformidade das amostras produzidas pelo compactador giratório, tanto na direção radial quanto na direção vertical e, considerava esta uniformidade crítica ao se determinar as propriedades de engenharia em ensaios de desempenho em laboratório.

CAPITULO 3

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, relacionados aos aspectos inerentes aos critérios adotados, materiais utilizados e as especificações utilizadas para os estudos das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais e das misturas asfálticas projetadas. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Departamento de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT).

Os métodos não constantes nas normalizações são descritos em detalhes. A Figura 3.1 apresenta a seqüência de atividades e dos ensaios realizados. Os materiais utilizados nesta pesquisa, com exceção dos resíduos, foram disponibilizados pela Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior - ATECEL. O resíduo do Granito foi disponibilizado pela empresa de beneficiamento de rochas ornamentais POLIGRAN, de Campina Grande, PB. O resíduo de Caulim foi cedido por empresas localizadas às margens da BR-230, no Município de Soledade, Estado da Paraíba.

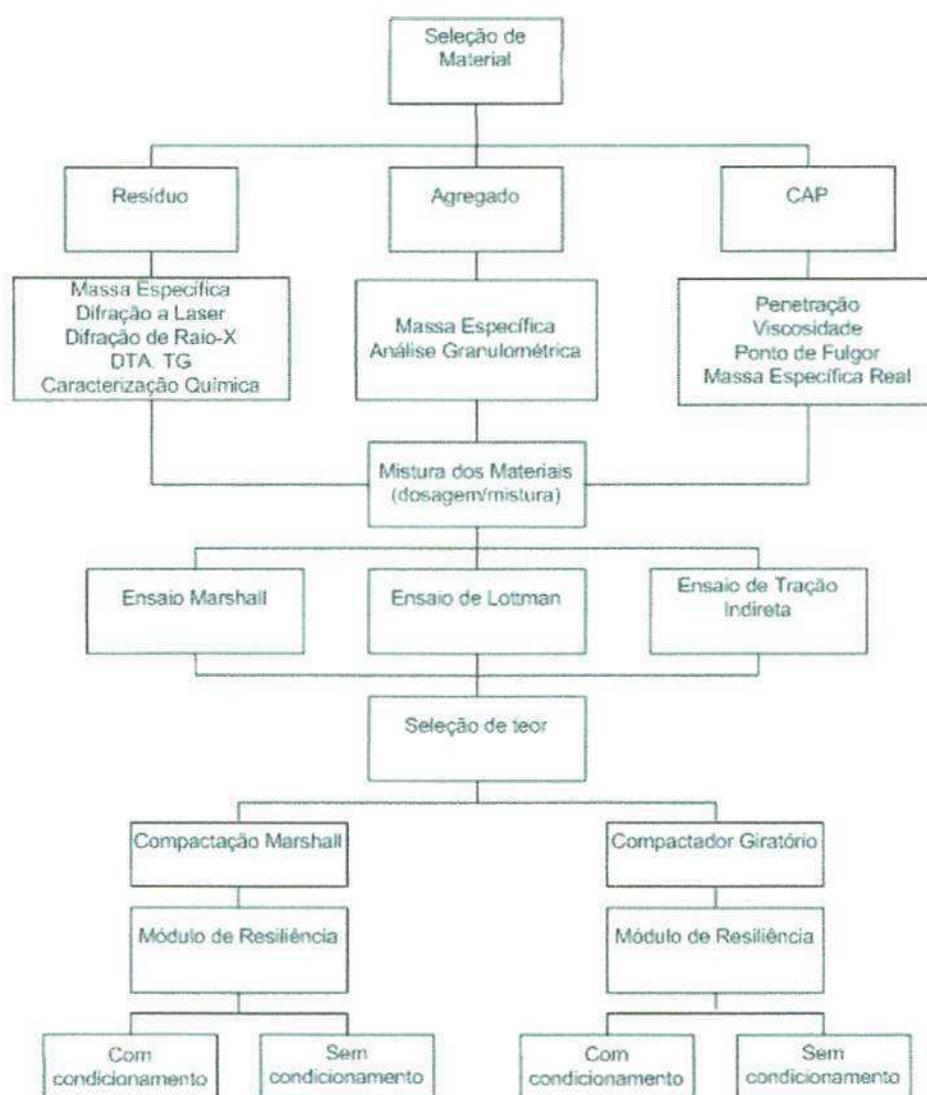


Figura 3.1 - Sequência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa

3.1 - MATERIAIS

3.1.1 - Agregados Graúdos

Os agregados graúdos utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram de brita de rocha granítica, designados como comerciais (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Agregado de rocha granítica – Brita 19 ou ¾"

3.1.2 - Agregados Miúdos

No que se refere aos agregados miúdos, optou-se por usar uma areia de rio, do tipo quartzosa (Figura 3.3), e pó de pedra, de rocha granítica (Figura 3.4), de uso comum em obras de engenharia da região Nordeste.



Figura 3.3 - Agregado areia quartzosa



Figura 3.4 - Pó de pedra

3.1.3 - Resíduo do Caulim

O resíduo oriundo do beneficiamento tem sua disposição inadequada na região em que é produzido acarretando efeitos nocivos ao meio ambiente. Por outro lado, sua composição física similar aos agregados miúdos e fileres utilizados na pavimentação, a exemplo da cal e do cimento Portland, como revelou estudos anteriores realizados com este material foram fatores adotados como critérios para sua utilização nesta pesquisa.

Baseado nos critérios citados no parágrafo anterior e visando diminuir a susceptibilidade das misturas asfálticas à presença de água, o resíduo do Caulim foi utilizado com o intuito de verificar seu comportamento físico e mecânico como filer, material de enchimento, (Figura 3.5).

Coletado nos depósitos a céu aberto localizados no município de Soledade, o resíduo foi lavado na peneira ABNT Nº 200 e seco em estufa de acordo com a norma (DNIT-ME 043/95).

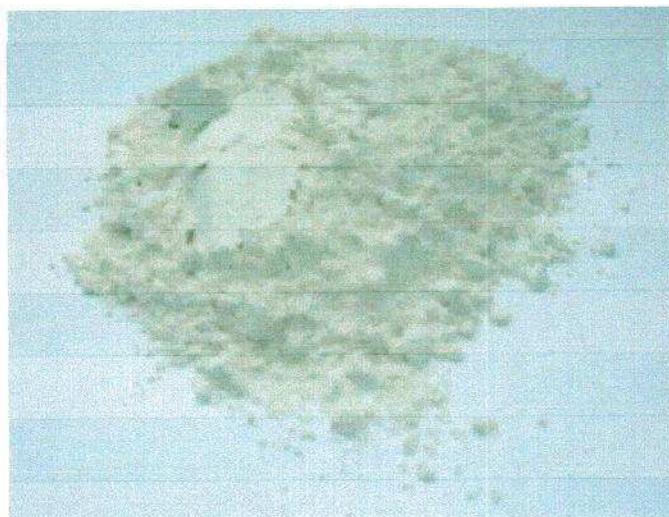


Figura 3.5 - Resíduo do Caulim

3.1.4 - Resíduo do Granito

De maneira similar ao resíduo do Caulim, a disposição inadequada e as semelhanças das propriedades físicas e mecânicas do resíduo gerado a partir do corte de rochas ornamentais, resíduo do Granito, bem como os estudos anteriores sobre sua utilização em obras de construção civil, foram fatores que influenciaram na escolha deste como material de pesquisa.

O resíduo de Granito, material da pesquisa, é encontrado sob a forma pulverulenta, resultado do corte e beneficiamento das rochas ornamentais. As amostras foram coletadas em áreas pertencentes a empresa de beneficiamento POLIGRAN – Campina Grande (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Resíduo do Granito

3.1.5 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP utilizado na pesquisa foi do tipo 50/70 cujas especificações estão de acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), a qual define os parâmetros de aceitação e classificação (Figura 3.7). A Tabela 3.1 apresenta as informações sobre as propriedades físicas do CAP utilizado neste trabalho.



Figura 3.7 - Cimento Asfáltico de Petróleo

Tabela 3.1 – Características físicas do cimento asfáltico de petróleo segundo a ANP

Ensaio	Valor
Penetração (100g, 5s a 25°C)	50-70
Ponto de Fulgor (°C)	295 (mínimo)
Densidade (g/cm³)	1,020
Viscosidade Saybolt Furol (135°C/s)	320

3.2 - MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram abordadas como métodos de trabalho informações contidas na literatura corrente, bem como os resultados obtidos a partir de ensaios realizados em laboratórios.

Os métodos de ensaios utilizados foram propostos pelo DNIT, Normas Brasileiras – NBR, American Society for Testing and Materials – ASTM e American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO.

Foram realizados ensaios de caracterização física e química dos materiais, além de ensaios mecânicos nas misturas asfálticas para verificação do efeito da adição dos resíduos (fileres) sobre a susceptibilidade das misturas asfálticas à presença de água baseado nos parâmetros: Estabilidade, Resistência à Tração (RT), Relação da Resistência à Tração (RRT) e Módulo de Resiliência com o auxílio dos equipamentos Marshall, Pórtico de Tração Indireta por Compressão Diametral, Pórtico de Lottman e de Aplicação de carga repetida, respectivamente.

Os corpos-de-prova das misturas asfálticas foram compactados segundo a metodologia Marshall (compactador automático) e com auxílio do Compactado Giratório (SGC-SUPERPAVE).

3.2.1 - Ensaios de Caracterização Física e Química

a) Massa Específica

As normas do DNIT ME 081/98, DNIT - ME 084/95 e DNIT - ME 093/94 estabelecem, respectivamente, os procedimentos adotados para determinação da massa específica dos agregados graúdos, agregados miúdos e do resíduo. O ensaio foi realizado no laboratório da ATECEL em Campina Grande.

b) Distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres

Os ensaios para a obtenção da distribuição dos tamanhos das partículas por peneiramento e por sedimentação foram realizados no laboratório da ATECEL segundo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Em conjunto foi realizado o ensaio de difração a laser, onde foi utilizado o método de dispersão de partículas em fase líquida, associado com um processo de medida óptica através de difração a laser, para determinação da distribuição dos tamanhos das partículas do material que passou na peneira de nº 100. O aparelho utilizado foi analisador de partículas por difração a laser, "granulômetro", marca Cilas 1064 LD, com faixa analítica de 0,04 a 500 microm e emissores de laser secundários (Figura 3.8). A análise foi realizada no laboratório da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.

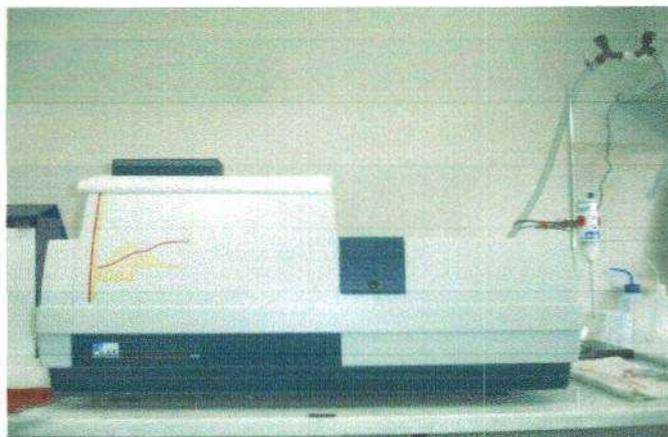


Figura 3.8 - Analisador de partículas por difração a laser, "granulômetro"

c) Análise química

As amostras dos materiais foram submetidas à análise química, segundo técnicas clássicas e instrumentais adotadas por técnicos do Laboratório de Análise Mineral do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande.

d) Análise térmica

- *Análise térmica diferencial (DTA-Differential Thermal Analysis)*

A análise térmica diferencial (DTA) foi utilizada para determinar as faixas de mudança de temperaturas endotérmicas e exotérmicas dos resíduos de Caulim e de Granito. O experimento foi realizado com o auxílio do aparelho de análise térmica Shimadzu, modelo DTG-60, em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de $1010\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, com massa inicial de $10,1\text{mg}$ e temperatura máxima de 1000°C . Os ensaios foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba.

- *Termogravimetria (TG)*

A termogravimetria (TG) foi utilizada para a determinação das faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas dos resíduos de Caulim e de Granito. As análises foram realizadas em aparelho de análises térmicas SHIMADSU, modelo DTG-60, em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de $1010\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, com massa inicial de $10,1\text{mg}$ e temperatura máxima de

1000°C. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba.

e) Difração de raios-X

Para determinação dos principais elementos que compõem os resíduos de Caulim e de Granito, as amostras foram submetidas a análise mediante a utilização de um equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de Cuka α , tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$ e $\lambda = 1,54\text{\AA}$ (Figura 3.9). As difração de raios-X foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.



Figura 3.9 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Difração de raios-X

f) Classificação dos Resíduos Sólidos

A Classificação dos resíduos sólidos de Caulim e de Granito foi realizada segundo os procedimentos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Esta estabelece os critérios para a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e à saúde pública, e a inerticidade e toxicidade. As amostras foram preparadas por meio dos extratos lixiviados (NBR 10005) e solubilizados (NBR 10006) e submetidas ao ensaio de Espectroscopia por Absorção Atômica.

3.2.2 - Ensaio com o cimento asfáltico de petróleo

A caracterização física do Cimento Asfáltico de Petróleo, CAP, foi realizada de acordo com as normas contidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização do CAP

ENSAIOS	METODOLOGIA
Viscosidade Saybolt Furol	ABNT – MB 517
Penetração	DNIT-ME 003/99
Ponto de fulgor	DNIT-ME 148/94
Massa específica	DNIT ME 117/94

3.2.3 - Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos sobre o CAP e as misturas asfálticas para verificação da interação dos fileres com o CAP foram realizados com o auxílio do Viscosímetro Saybolt-Furol, do ensaio Marshall, de Tração indireta por Compressão Diametral, do Lottman modificado e do Módulo de Resiliência.

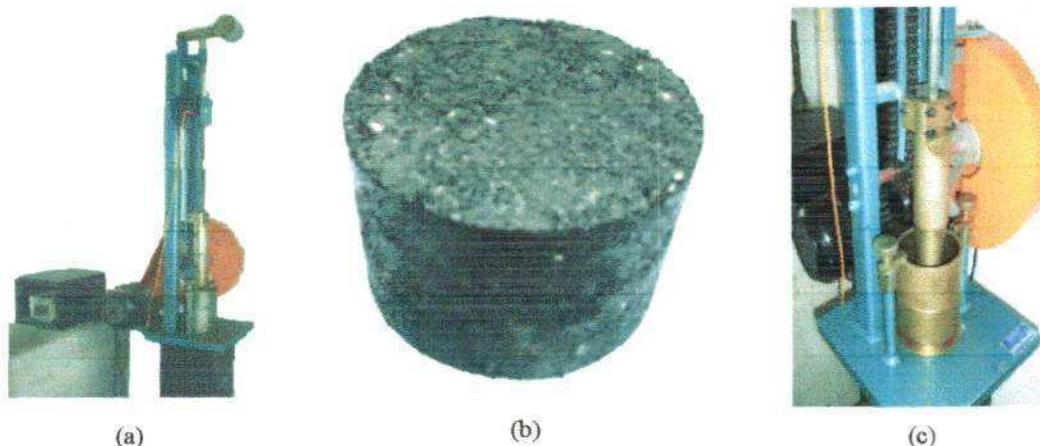
a) Viscosidade Saybolt- Furol

O ensaio de viscosidade Saybolt-Furol foi realizado em duas etapas: na primeira foram realizados com o CAP 50/70 e o filer cal. Na segunda etapa foram realizados com o mastique (CAP + residuo) nas proporções de 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10,0%, 15,0% e 20,0% em relação ao volume de CAP. Procurou-se com isso, verificar o comportamento do mastique, em termos de viscosidade indireta, com o incremento de fileres (residuo de Caulim e Granito).

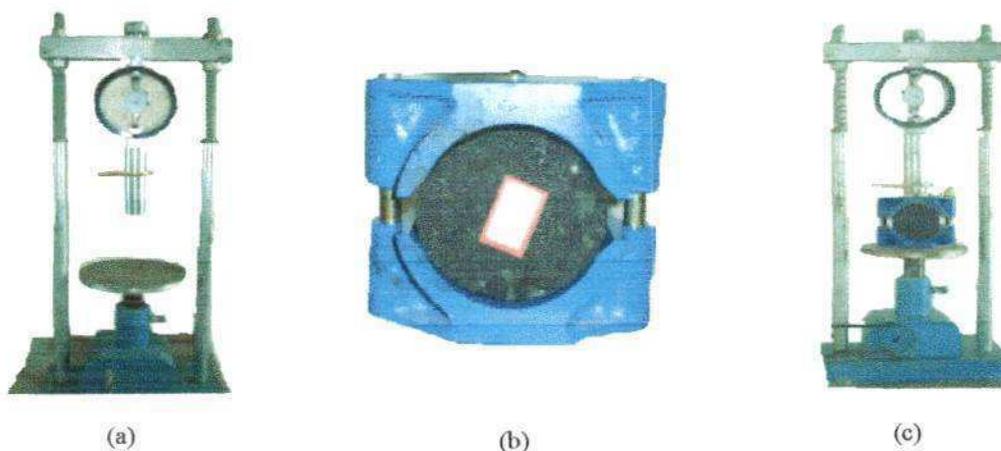
b) Ensaio Marshall

O ensaio Marshall foi realizado segundo a norma do ME 043/95 do DNIT com corpos-de-prova compactados de forma automática. Foram realizados ensaios Marshall com corpos-de-prova com incremento da quantidade de fileres de 3,0%, 4,0%, 5,0% e 6,0%. A relação entre o teor de filer e o de asfalto, em peso, foi fixada para o limite inferior de 0,6 e para o limite superior >> 1,2. Estes, por sua vez, preconizados pelo programa SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) e sugeridos por Roberts et al. (1996).

Para realização dos ensaios Marshall, moldaram-se 6 corpos-de-prova, para cada um dos 4 teores, prefazendo um total de vinte e quatro corpos-de-prova (24) para cada residuo e foram compactados com 75 golpes por face. Destes, foram rompidos três com imersão em água e três sem imersão. O experimento foi realizado no laboratório da ATECEL. As Figuras 3.10 e a Figura 3.11 apresentam os equipamentos utilizados nesta fase.



**Figura 3.10 - Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova
(a) Compactador (b) Corpo-de-prova (c) Soquete + Cilindro**



**Figura 3.11 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall
(a) Prensa (b) Molde (c) Prensa + Molde**

c) Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral foi realizado segundo a norma– ME 138/94 do DNIT com a utilização de um compactador automático. Os corpos-de-prova foram preparados com o teor ótimo de CAP de 4,5%, com o índice de vazios variando entre 3 a 5%, e com teores de fileres variados. O intuito deste procedimento foi verificar a influência do teor de filer no comportamento da mistura asfáltica em relação à adesividade ao efeito deletério da água.

Nesta etapa foram moldados quatro (04) corpos-de-prova para cada percentual de filer, totalizando trinta e dois (32) corpos-de-prova, sendo dezesseis (16) para o filer residuo de Granito e dezesseis (16) para

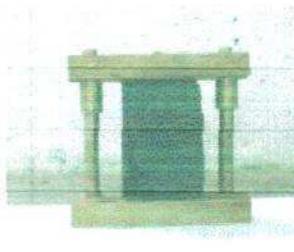
o resíduo de Caulim. Todos foram compactados com 75 golpes por face e rompidos dois (02) corpos-de-prova com imersão e dois sem imersão a uma temperatura de sessenta graus Celsius (60°C).

d) Ensaio de Lottman

O ensaio de Lottman foi realizado segundo a norma ME 138/94 do DNIT e T 283-02 da AASHTO, com o auxílio da prensa Marshall e o pórtico de Lobo Carneiro (Figura 3.12). Este ensaio também é adotado para a verificação da susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água nos três níveis pela metodologia estabelecida pelo programa SUPERPAVE.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de tração indireta (a) Banho Maria (b) Pórtico de Lobo Carneiro (c) Bomba de vácuo

Os ensaios de Lottman Modificado foram realizados com corpos-de-prova moldados de acordo com as seguintes etapas:

- Primeira Etapa: Mistura CAP + agregados + resíduo de Granito: variando o teor de filler entre 3 e 6%;

- Segunda Etapa: Mistura CAP + agregados + Caulim: variando o teor de filler entre 3 e 6%.

Foram moldados dezesseis (16) corpos-de-prova para o filler de resíduo de Granito, sendo oito (8) submetidos ao condicionamento e oito (8) sem condicionamento. No ciclo de resfriamento, a temperatura utilizada foi de dez graus Celsius (10°C).

Na execução dos ensaios de Lottman Modificado, o procedimento utilizado obedeceu a seguinte ordem:

Primeiro: rompimento aleatório dos corpos-de-prova moldados com o resíduo de Granito submetidos ao condicionamento;

Segundo: rompimento aleatório dos corpos-de-prova moldados com o resíduo de Granito não submetidos ao condicionamento;

Terceiro: rompimento aleatório dos corpos-de-prova moldados com o resíduo de Caulim submetidos ao condicionamento;

Quarto: rompimento aleatório dos corpos-de-prova moldados com o resíduo de Granito não submetidos ao condicionamento.

O processamento dos resultados obtidos com realização dos ensaios de Lottman foi feito com a equação [01], onde foram calculados os valores de Resistência à Tração (RT) para cada corpo-de-prova rompido. Com os valores da RT foi possível calcular a relação entre as Resistências à Tração Indireta por compressão Diametral (RRT).

$$RT = \frac{2P}{\pi tD} \quad [01]$$

Onde:

P – carga lida (kgf)

t - altura do corpo-de-prova (cm)

D - diâmetro do corpo-de-prova (cm)

Para Lottman (1978) apud Furlan (2004) a presença de água congelada nos poros da mistura asfáltica simula as tensões de tração no CBUQ, devido à expansão causada pela formação de cristais de gelo. Como consequência desta expansão, pode haver ruptura de ligações adesivas mais frágeis ou de

agregados porosos ou fissurados, comprometendo a durabilidade da mistura. Entretanto, na Região Nordeste, dificilmente a temperatura dos revestimentos asfálticos pode apresentar valores inferiores a dezoito graus Célsius negativo (-18°C), como estabelecidos pela norma T 283-02 da AASHTO. Por isso, nesta fase experimental os corpos-de-prova foram submetidos a uma temperatura próxima ao valor de 10 graus Célsius, o qual é a menor temperatura que pode ocorrer em algumas localidades, no período de inverno, da região Nordeste.

e) Compactação por amassamento – Compactador Giratório

A utilização do Compactador Giratório SUPERPAVE (Figura 3.13) foi feita pelo fato do equipamento permitir a moldagem de corpos-de-prova com maior área superficial e melhor controle de altura das amostras em relação ao método Marshall. Além do fato da compactação por amassamento se aproximar melhor daquela obtida no campo (NASCIMENTO et al., 2006).

Foram moldados corpos-de-prova com o auxílio do SGC da EESC/USP com o objetivo de realizar ensaios de Módulo de Resiliência, de Resistência à Tração, e realizar o ensaio de Lottman Modificado (com condicionamento de corpos-de-prova à -18°C).

Os corpos-de-prova foram moldados com o teor de 4,5% de ligante, em massa, com aplicação de um valor médio de 100 giros (pressão vertical de 600 kPa, angulo e velocidade de giro de 1,25° e 30 rpm, respectivamente). O teor de filer de 5 % foi adotado por ter sido o que apresentou melhores resultados dos ensaios mecânicos citados anteriormente.

A compactação por amassamento foi estabelecida por critérios volumétricos fixando-se as alturas de corpos-de-prova com base na norma ME 043/94 do DNIT que tomam como referência o compactador Marshall de diâmetro de base de 10,0 cm, altura de 6,3 cm e massa de 1200g.

Nesta fase experimental foram moldados quatro (04) corpos-de-prova para cada tipo de filer, resíduos de Granito e Resíduo de Caulim, sendo que metade foi submetida ao condicionamento "Lottman" e a outra metade sem condicionamento.

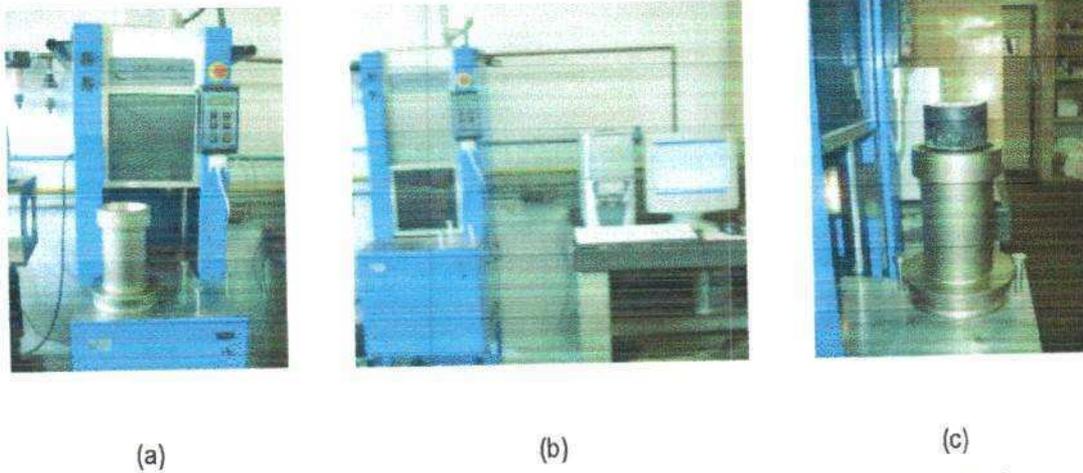


Figura 3.13 - Compactador giratório (a) Molde e equipamento (b) Ensaio em execução (c) Extração do corpo-de-prova

f) Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de MR de misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetida no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente a tensão gerada, numa dada temperatura. O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado de acordo com as normas E 468-90 da ASTM e ME 133/94 (DNIT, 1994). A Figura 3.14 apresenta o equipamento utilizado nesta fase experimental.

Nesta fase experimental foram rompidos quatro (4) corpos-de-prova com o auxílio do compactador giratório (em média 100 giros – critério volumétrico) moldados para cada tipo de filer (5%), resíduo de Granito e Resíduo de Caulim, sendo que metade foi submetida ao condicionamento "Lottman" e a outra metade sem condicionamento.

Nesta fase experimental foram rompidos quatro (4) corpos-de-prova com o auxílio do compactador Marshall (75 golpes) moldados para cada tipo de filer (5%), resíduo de Granito e resíduo de Caulim, sendo que metade com submetidas ao condicionamento "Lottman" e a outra metade sem condicionamento.

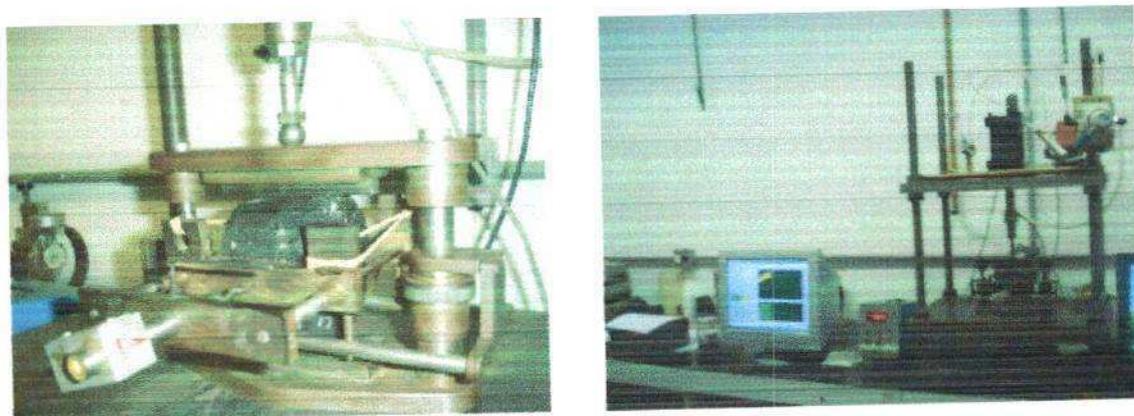


Figura 3.14 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência

Para a execução do ensaio e do processamento dos dados, foram utilizados dois programas de computador desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) pelo professor Glauco Túlio Persa Fabrii. A Figura 3.15 e a Figura 3.16 apresentam as janelas de trabalho do programas de computador utilizados nesta fase experimental.

Na fase inicial de realização do ensaio os primeiros 30 a 40 ciclos de carregamento foram considerados períodos de condicionamento e os ciclos restantes, cerca de 60 a 70, foram considerados para o cálculo do MR.

A adoção de 30 a 40 ciclos de carregamento foi descrita e justificada por Furlan (2006) por entender que durante o período das primeiras aplicações de carga podem resultar em valores do MR incorretos devido a acomodações do corpo-de-prova, ou seja, a fase visco-elástica pode não ser "alcançada". Deste modo, a autora sugere que os primeiros ciclos de carregamento devam ser eliminados para uma melhor homogeneidade e qualidade dos resultados.

Foi fixada, para os ensaios, uma deformação inicial da ordem de 2,5 a 3,0 milésimos de milímetro. Este procedimento foi adotado para preservar a integridade do material sem propiciar o aparecimento de sinais de fadiga.

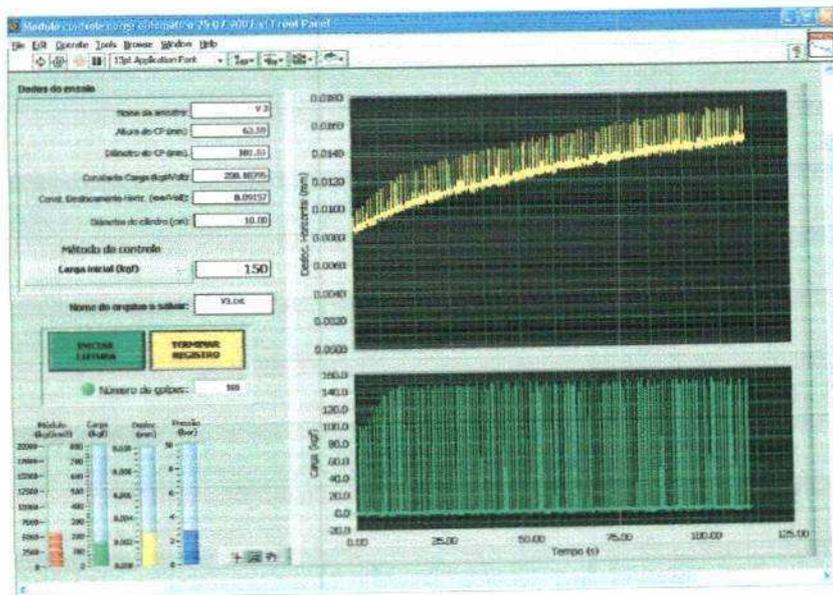


Figura 3.15 - Janela de trabalho do programa utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência

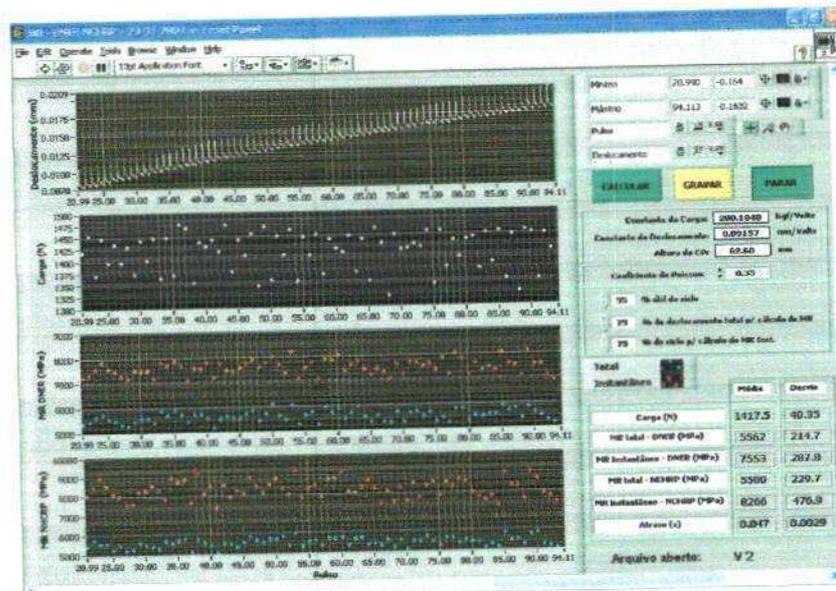


Figura 3.16 - Janela de trabalho do programa utilizado para o processamento dos dados e cálculo do MR

CAPITULO 4

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e realizadas as inferências relacionadas ao objetivo do trabalho.

4.1 - SOBRE A CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DOS MATERIAIS

4.1.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam, respectivamente, os resultados da distribuição do tamanho das partículas do resíduo da serragem de Granito e do resíduo do Caulim obtidos com a realização do ensaio de sedimentação.

Tabela 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas da serragem de Granito - ensaio de sedimentação
[Fonte: Fernandes (2007)]

Diâmetro médio das partículas (μm)	67	48	34	23	20	10
Massa que passa (%)	94,15	88,83	88,83	83,51	67,55	56,92
Diâmetro médio das partículas (μm)	09	06	05	03	02	01
Massa que passa (%)	46,28	30,32	20,21	14,89	10,11	3,72

Tabela 4.2 - Distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo do Caulim - ensaio de sedimentação
[Fonte: Fernandes (2007)]

Diâmetro médio das partículas (μm)	73,00	52,00	37,00	25,00	18,00	13,00
Massa que passa (%)	89,70	84,17	84,17	84,17	84,17	78,63
Diâmetro médio das partículas (μm)	09	07	05	03	02	01
Massa que passa (%)	73,10	62,02	50,95	34,33	25,47	12,18

As distribuições dos tamanhos das partículas dos fileres de Caulim e de serragem de Granito são apresentados no gráfico indicado (Figura 4.1). Observa-se que ambos os materiais atenderam às especificações do DNIT quanto às exigências para ser filer.

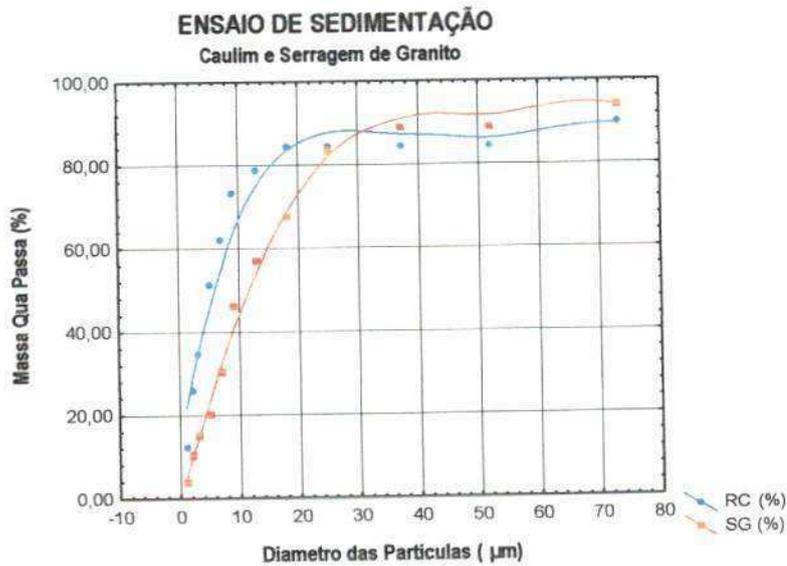


Figura 4.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos fileres obtida por Sedimentação
[Fonte: Fernandes (2007)]

As caracterizações físicas do resíduo do Caulim e da serragem de Granito, do material que passa na peneira N° 100, realizada a partir da análise da distribuição dos tamanhos das partículas, obtida com o aparelho analisador de partículas por difração à laser, encontram-se na Figura 4.2 e Figura 4.3.

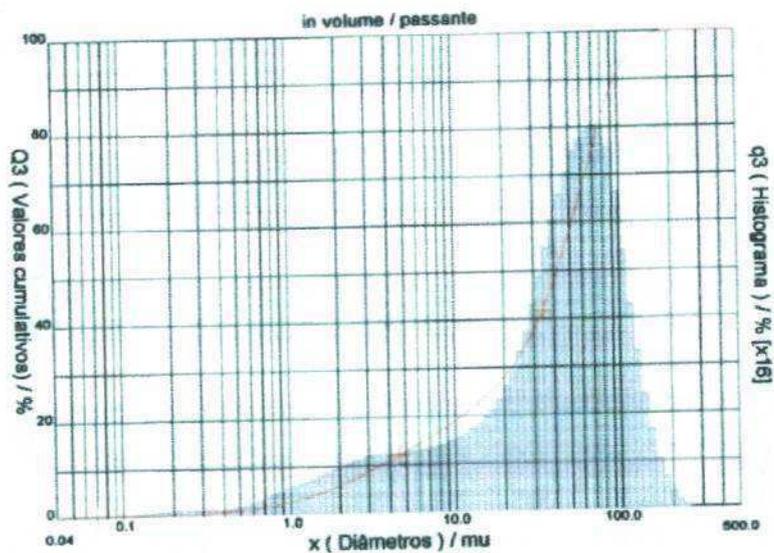


Figura 4.2 - Distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo do Caulim obtida por difração à laser
[Fonte: Fernandes (2007)]

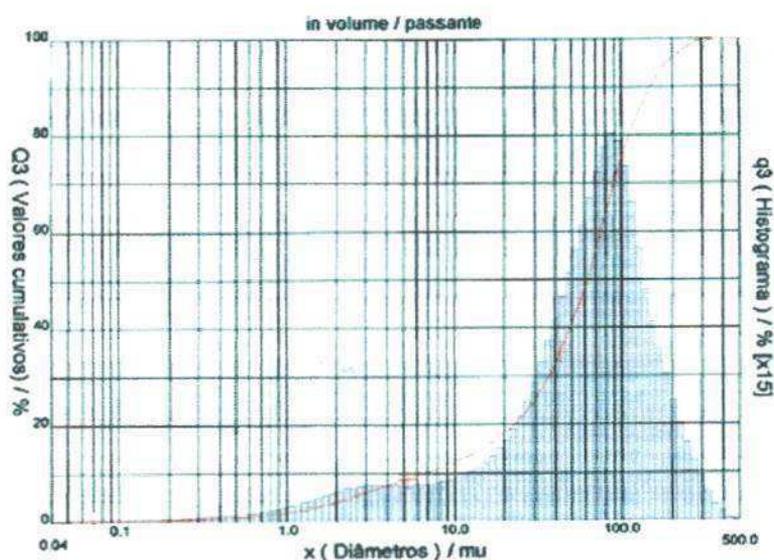


Figura 4.3 - Distribuição dos tamanhos das partículas da Serragem de Granito obtida por difração a laser
[Fonte: Fernandes (2007)]

Os fileres utilizados atendem às especificações do DNIT, que classifica um resíduo como filer, para o uso na pavimentação, quando passa 95 a 100% na peneira ABNT de nº 80 e pelo menos 65% na peneira ABNT de nº 200. A distribuição dos tamanhos das partículas do Caulim é mais fina, ou seja, 80% do filer Caulim têm diâmetro inferior a 75 µm, enquanto que para o filer serragem de Granito esse percentual é de 65%.

Os resultados alcançados, com os ensaios de difração a laser, não corroboram o observado com os resultados obtidos com os ensaios convencionais. A discrepância desses valores pode ser explicada pelas limitações técnicas do ensaio de sedimentação e a atuação do defloculante sobre as partículas dos fileres.

4.1.2 - Massa Específica

a) Massa Específica do agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi do tipo granítico (ME 081/94, DNIT) apresentando diâmetro máximo de 19,1 mm e massa específica aparente de 2,56 g/cm³.

b) Massa Específica dos agregados miúdos

Um dos agregados utilizados, foi do tipo areia quartzosa (ME 084/94, DNIT) apresentando diâmetro

máximo de 4,75 mm e massa específica aparente de 2,62 g/cm³. O pó de pedra apresentou densidade de 2,70 g/cm³ e equivalente areia igual a 85,5%.

c) Massa Específica Real do filer

As amostras dos residuo de serragem do Granito e de caulim apresentaram massa específica real de 2,67 g/cm³ e de 2,58 g/cm³, respectivamente.

4.1.3 - Análise Química

A Tabela 4.3 apresenta a composição química da Serragem de Granito em seu estado natural. Observando os valores, infere-se que o residuo pode ser classificado como um silicato-aluminoso com elevado teor de sílica e quantidades significativas de Al₂O₃ e Fe₂O₃.

Tabela 4.3 - Composição química da Serragem de Granito no estado natural
[Fonte: Fernandes (2007)]

Amostra	PF (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
Residuo do Granito	4,44	59,61	5,98	11,77	4,48	traços	2,70	3,63

Para uma melhor caracterização do residuo do Caulim, foi realizada análise química (AQ) convencional. A Tabela 4.4 apresenta a composição química do residuo em seu estado natural. A composição química do residuo apresentou elevado teor de sílica, SiO₂, e de Al₂O₃, classificando-o como silicato-aluminato.

Tabela 4.4 - Composição química do residuo do Caulim no estado natural
[Fonte: Fernandes (2007)]

Amostra	PR(%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	RI(%)	K ₂ O(%)
Residuo do Caulim	10,25	50,56	0,40	36,40	traços	traços	0,37	0,80	1,10

4.1.4 - Análise Térmica

A Figura 4.4 apresenta as curvas de análise termodiferencial e termogravimétrica do residuo de Caulim. A curva de DTA apresenta uma banda endotérmica de pequena intensidade entre 100 e 200°C característica da presença de água livre. Em 600 °C ocorre a presença de um pico endotérmico correspondente à presença de hidroxila e a transformação de quartzo alfa em quartzo beta, e em 950°C ocorre a presença de pico exotérmico correspondente a nucleação de mullita. A curva de TG apresenta perda

de massa total de 9,12%, devido as perdas da água livre e de hidroxilas. O valor da perda de massa corrobora a perda ao rubro de 10,25% encontrada no ensaio de caracterização química.

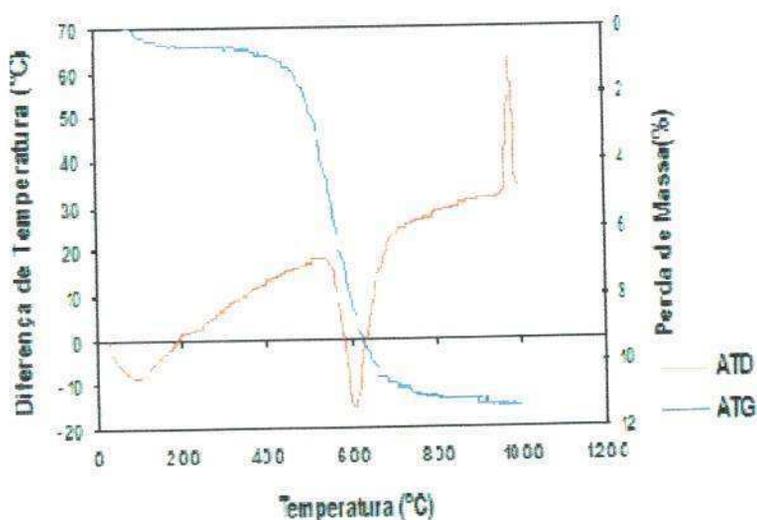


Figura 4.4 - Curva termodiferencial e termogravimétrica do resíduo do Caulim
[Fonte: Fernandes (2007)]

A Figura 4.5 apresenta os resultados da DTA e a Figura 4.6 da TG do resíduo da serragem do Granito.

A partir da análise da curva de DTA, pode-se inferir:

- entre 90°C e 120°C perda de água livre – pico endotérmico;
- entre 550°C e 600°C transformação de quartzo alfa em quartzo beta – pico endotérmico;
- entre 700°C e 750°C perda de hidroxilas da mica – pico endotérmico;
- entre 750°C e 800°C recristalização da mica – pico endotérmico;
- entre 800°C e 820°C decomposição de carbonato de sódio – pico endotérmico;
- entre 605°C e 700°C combustão de matéria orgânica na forma de grafite – pico exotérmico.

Os resultados da TG indicam a perda de massa de 0,03% entre 60 e 262°C, de 0,50% entre 262°C e 516°C e 3,31% entre 516°C e 850 °C. Totalizando uma perda de massa de 3,84%. Nota-se que este valor está próximo à perda ao rubro (4,44%) encontrada na análise química.

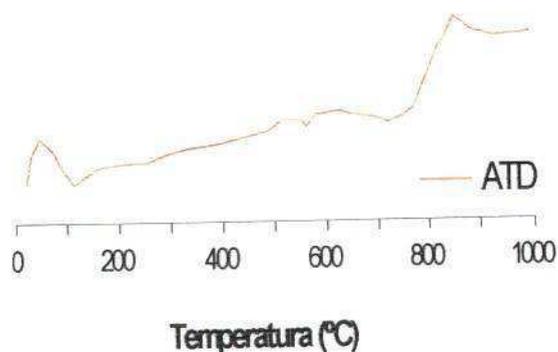


Figura 4.5 - Análise Termodiferencial do resíduo de serragem de Granito
[Fonte: Fernandes (2007)]

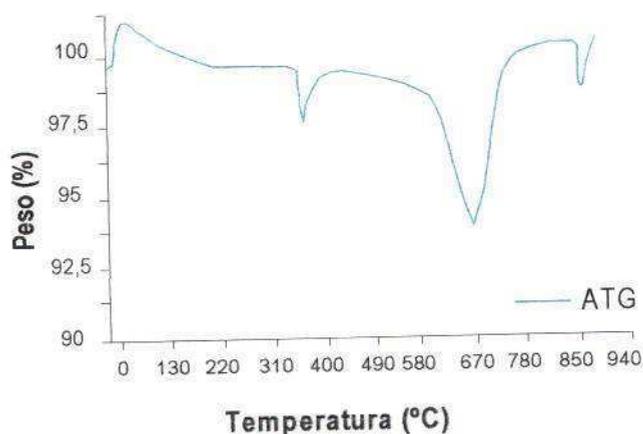


Figura 4.6 - Análise Termogravimétrica do resíduo de serragem de Granito
[Fonte: Fernandes (2007)]

4.1.5 - Difração de Raios-X

A partir do difratograma de Raio-x é possível identificar a composição mineralógica em materiais. Os resultados obtidos com o ensaio de difração de raios-x, para o resíduo de Caulim bem como as suas especificações estão ilustrados na Figura 4.7. Os resultados apresentaram a presença de caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,07 Å e 3,56 Å, e de pequena quantidade de mica, caracterizada por 10,04 e 4,97 Å e quartzo (SiO₂) caracterizado pela distância interplanares 3,34 Å.

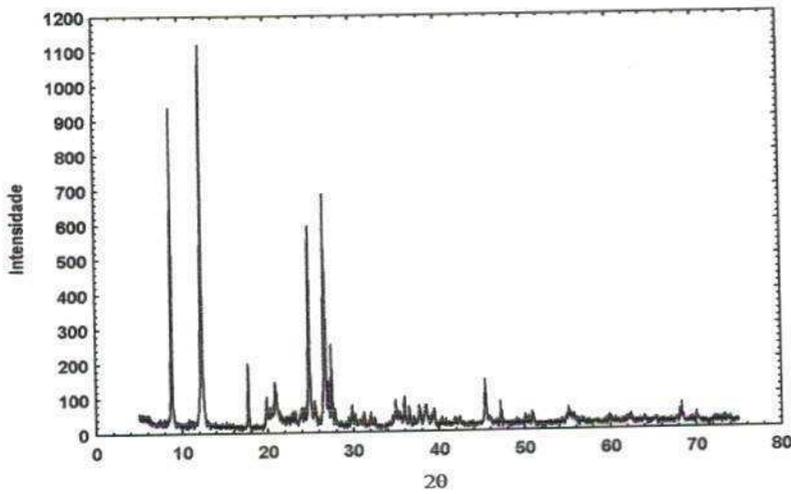


Figura 4.7 - Difração de raios-x do residuo do Caulim
[Fonte: Fernandes (2007)]

A Figura 4.8 apresenta a difração de raios-X da Serragem de Granito. "Observando-se o difratograma encontra-se nas fases do residuo estudado quartzo (SiO_2), caracterizado pela distância interplanar de $3,34\text{\AA}$ microlina (feldspato potássio - $\text{KAl Si}_3\text{O}_8$), caracterizado por $4,24$ e $3,20\text{\AA}$ albita (feldspato sódio- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), caracterizado por $4,03$ e $3,19\text{\AA}$ e em menor quantidade mica moscovita, caracterizado por $3,03$ e $2,13\text{\AA}$ " (NEVES, 2002).

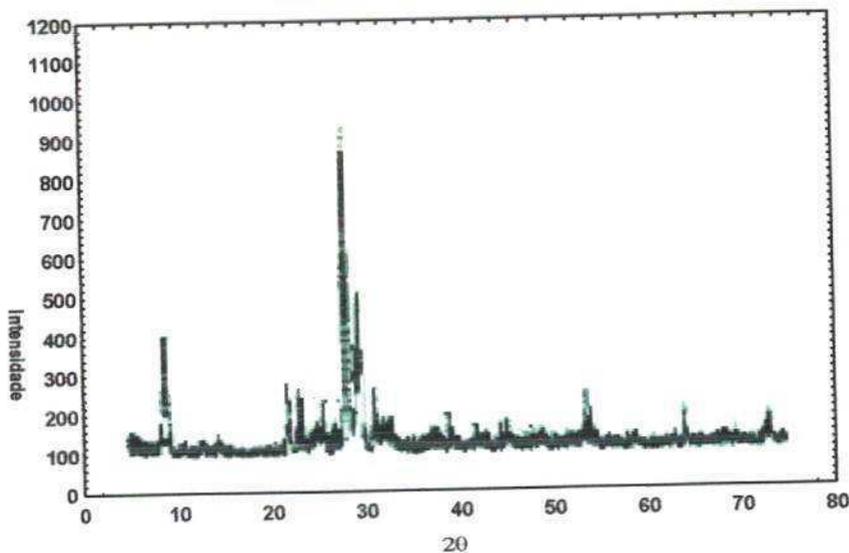


Figura 4.8 - Difração de raios - X do residuo da Serragem de Granito
[Fonte: Fernandes (2007)]

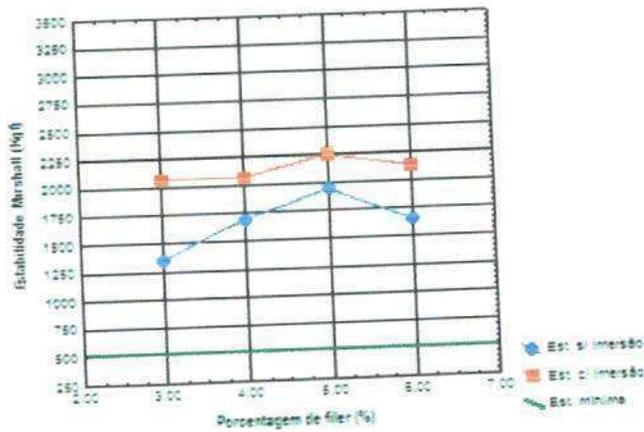


Figura 4.12 - Estabilidade Marshall para o filler serragem do Granito com teores de filler de 3,4,5 e 6%

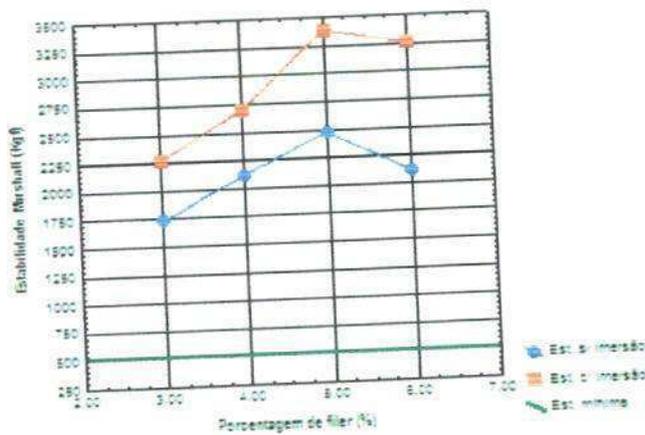


Figura 4.13 - Estabilidade Marshall para o filler resíduo de Caulim com teores de filler de 3,4,5 e 6%

De acordo com o DNIT a estabilidade mínima exigida é de 500 kgf para 75 golpes para tráfego alto com N superior a 5.10^6 . Este valor foi alcançado para todos os corpos-de-prova moldados. Essa tendência crescente até o valor de 5% seguido de uma queda foi explicado por Momm (1998) apud Amaral (2000).

"A proporção de finos é responsável pela distribuição espacial dos granulares de maior tamanho nos concretos asfálticos. Havendo grande proporção de finos, os grãos graúdos permanecem flutuando entre os finos na massa de concreto asfáltico. O contato grão a grão pode não existir. O concreto asfáltico com esta composição, além de ter sua resistência mecânica comprometida, expõe maior quantidade de granulares finos, apresentando superfície menos rugosa.

Por outro lado, nas misturas em que a proporção de grãos finos é pequena, a superfície será formada somente pelos grãos graúdos. Nessa situação, o contato inter-grãos ocorre entre os grãos de maior

dimensão. A superfície será rugosa, formada pela distribuição espacial dos granulares graúdos" (MOMM,1998).

O incremento do filler Caulim, segundo os resultados obtidos, teve como consequência um aumento considerável da estabilidade, quando comparado com os mesmos percentuais do filler serragem do Granito. Estes por sua vez, podem tornar a mistura quebradiça e susceptível ao fenômeno da fadiga.

Foi observado nos ensaios um aumento nas dimensões dos corpos-de-prova confeccionados com o resíduo de Caulim. Este fato deve-se às propriedades do material, que por ser expansivo proporcionou essa característica.

b) Vazios do agregado Mineral -VAM

O VAM mínimo recomendado pela metodologia SUPERPAVE é o mesmo exigido pelo método DNIT (norma 031/2006 – ES). A razão para o estabelecimento de um valor mínimo para o VAM é baseado na espessura mínima que o filme de asfalto deve ter para garantir a durabilidade da mistura.

Na Tabela 4.9 estão apresentados o VAM mínimo necessário em função do tamanho máximo nominal do agregado e na Tabela 4.10 estão inseridos os valores encontrados para a mistura asfáltica, onde foram utilizados o resíduo do Caulim e de serragem do Granito.

Tabela 4.9 – Requisitos do VAM [Fonte: Cominsky et. al., (1998)]

Tamanho máximo nominal do agregado (mm)	VAM mínimo (%)
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

Tabela 4.10 - Dados de VAM da Mistura com resíduo do Caulim e da serragem de Granito

Corpos-de-prova	Porcentagem de filer(%)	VAM- Caulim	VAM- Granito
Amostra A	3	14,09	14,33
	4	13,73	14,26
	5	13,70	13,80
	6	13,90	13,37
Amostra B	3	14,83	14,61
	4	14,28	14,01
	5	14,06	13,75
	6	14,06	13,69

De acordo com a Tabela 4.9 o VAM mínimo exigido para um diâmetro máximo de agregado de 19 mm é de 13%. Os valores obtidos para os corpos-de-prova onde foram utilizados os resíduos como filer encontram-se acima do mínimo recomendado pelos procedimentos Marshall e SUPERPAVE.

4.3.3 - Ensaio de Resistência a Tração Indireta por Compressão Diametral

Na Figura 4.14 e na Figura 4.15 estão apresentados em gráficos os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com o fileres resíduo da serragem do Granito e Caulim. Nesta fase foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall e com a variação dos teores de filer em 3%, 4%,5% e 6%.

Todos os teores de filer forneceram valores de Resistência à Tração por compressão diametral superiores ao mínimo exigido pelo DNIT (0,65 MPa). Os valores encontrados situam-se dentro do intervalo de 0,8 a 1,5 MPa referenciados na literatura para este tipo de mistura.

Após imersão dos corpos-de-prova em água por duas horas foi observado um decréscimo da resistência a tração diametral indireta, devido ao efeito da presença d'água na mistura asfáltica.

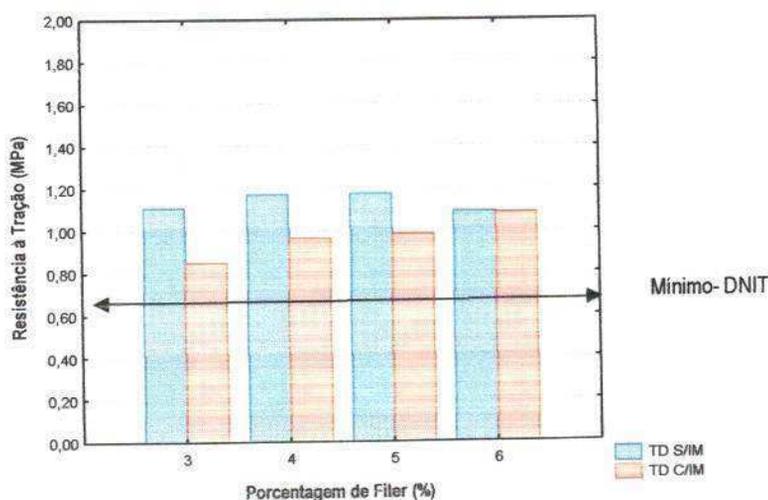


Figura 4.14 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o filer serragem do Granito

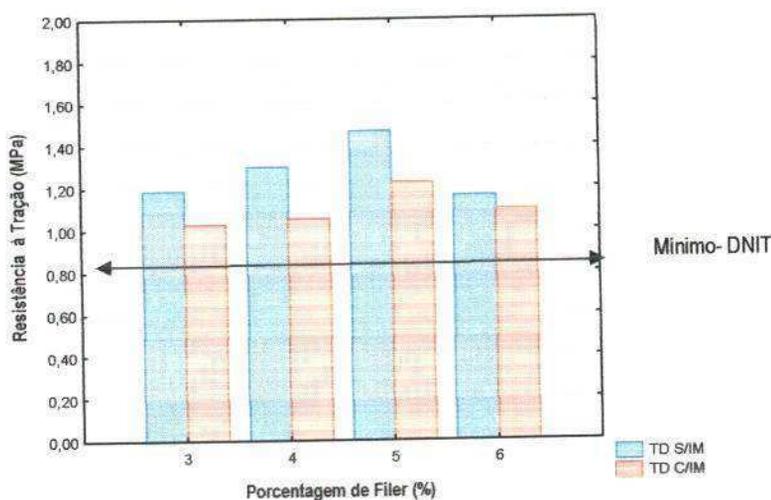


Figura 4.15 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para o filer residuo do Caulim

A adição de filer proporciona um aumento da Resistência à Tração para os teores de 3 a 5% , sofrendo um decréscimo no teor de 6%. Este comportamento foi mais evidente nos corpos-de-prova sem imersão, enquanto que os imersos apresentaram pequenas variações. Esta diminuição entre os teores de 5 e 6% ocorre devido à incorporação de filer atingir uma quantidade que começa a separar as partículas grossas, prejudicando a compactação da mistura. Os dados observados indicam que o acréscimo de filer diminui a susceptibilidade da mistura asfáltica à presença de água. A Figura 4.16 apresenta a comparação entre os

resíduos utilizados.

Lucena (2008) obteve, para o ensaio de RT, valores de resistência para o pó calcário e o resíduo oleoso variando de 0,8 a 1,2 MPa. A similaridade do comportamento dos fileres pó calcário, resíduo oleoso do cascalho de perfuração, o Caulim e o resíduo de serragem do Granito pode ser explicado por eles apresentarem quantidade significativa de SiO_2 em sua composição química.

Em termos absolutos, os valores de Resistência à Tração indireta por compressão diametral obtida com a adição do filer de resíduo do Caulim foi relativamente maior, ou seja, valor máximo de 1,45 MPa para o filer resíduo de Caulim e 1,18 MPa para o filer serragem do Granito.

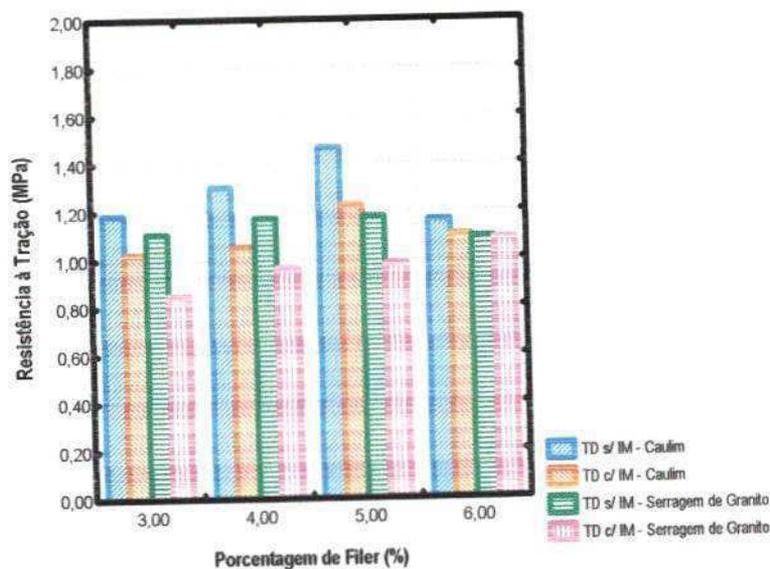


Figura 4.16 - Resistência à Tração diametral indireta para os fileres resíduo do Caulim e de serragem de Granito

4.3.4 - Ensaio de Lottman Modificado

Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova na mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando os teores de filer em 3, 4, 5 e 6%. Na Figura 4.17 ilustram-se os resultados da Relação da Resistência à Tração, RRT, obtidos com o auxílio do pórtico de Lottman, para os corpos-de-prova moldados para ambos os fileres.

Os resultados da RRT, para os teores estão acima dos que são preconizados pela AASTHO (T 283-02 da RRT > 70%) e pelo programa SUPERPAVE (RRT > 80%). É importante destacar que o teor de 3% foi o que apresentou menor valor e o teor de 6% o que teve melhor comportamento.

Para os corpos-de-prova moldados com o filer Caulim, os valores da RRT variaram entre 82% e 87%, evidenciando um caráter positivo com relação à resistência a susceptibilidade à presença de água. De modo semelhante, os corpos-de-prova moldados com o filer serragem de Granito apresentaram valores da RRT variando entre 85 e 97 %.

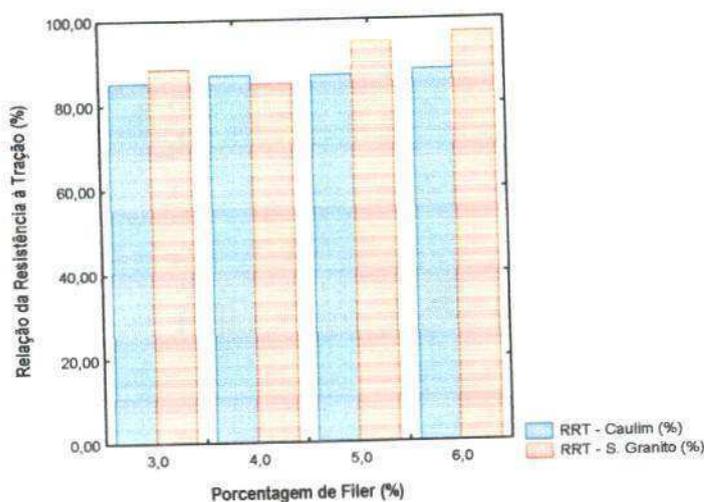


Figura 4.17 - Relação da resistência retida à tração para os fileres resíduo do Caulim e serragem do Granito

Ao considerar o teor de 5% de filer, para as misturas, observa-se que este atende as especificações contidas nas normas do DNIT e do SUPERPAVE baseado nos seguintes parâmetros: Estabilidade; Tração Indireta por Compressão Diametral; e Relação da Resistência à Tração (RRT). Entretanto, os valores de Estabilidade para os corpos-de-prova moldados com os fileres estudados, para este teor, foram significativamente altos, o que pode gerar misturas asfálticas quebradiças sujeitas ao fenômeno da fadiga.

4.3.5 - Compactador por Amassamento (SGC)/Lottman Modificado (RRT)

Com os corpos-de-prova moldados com o auxílio do compactador giratório (SGC) foram realizados ensaios de Lottman Modificado. Na Figura 4.18 apresentam-se os resultados da Relação da Resistência à Tração.

Os resultados da RRT, para todos os teores, estão acima dos que são preconizados pela AASTHO (T 283-02 da RRT>70%) e pelo SUPERPAVE (T 283-02 da RRT>80%). Tal qual observado no ensaio com a compactação Marshall, os corpos-de-prova moldados com o filer da serragem do Granito apresentaram valores superiores aos moldados com o filer do resíduo do Caulim.

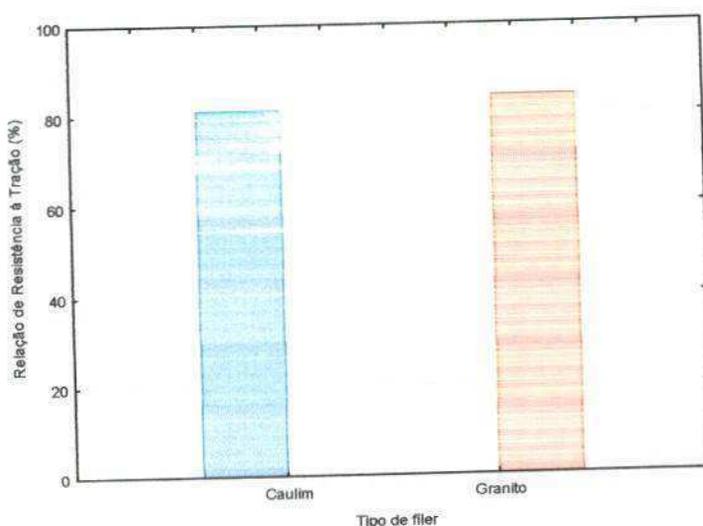


Figura 4.18 - Relação da Resistência à Tração

Os Quadros 4.1 e o Quadro 4.2 apresentam os valores nominais dos índices físicos e mecânicos dos corpos-de-prova submetidos à compactação por amassamento (SGC) inerentes aos fileres do resíduo de serragem de Granito e de Caulim (teor de 5%).

Analisando os dados da Tabela 4.11 e da Tabela 4.12 é possível inferir que ocorre uma redução nos valores de Resistência à Tração e da Relação da Resistência a Tração quando comparados aos valores obtidos com corpos-de-prova moldados por compactação de impacto (Marshall). Por outro lado, ocorre uma diminuição na percentagem de vazios com conseqüente aumento da relação betume/vazios.

Tabela 4.11 – Valores dos índices físicos e mecânicos para os corpos-de-prova submetidos a compactação por amassamento para o filer Granito

Tipo de Compactação	Vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)	Relação betume/vazios (%)	Resistência a Tração (MPa)	Relação da Resistência à Tração (%)
Compactador Giratório	2,29	2,44	87,93	0,85	84,70

Tabela 4.12 - Valores dos índices físicos e mecânicos para os corpos-de-prova submetidos a compactação por amassamento para o filer Caulim

Tipo de Compactação	Vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)	Relação betume/vazios (%)	Resistência a tração (MPa)	Relação retida a tração (%)
Compactador Giratório	1,80	2,45	91,32	0,84	81,60

Os estudos realizados por Sebaaly et al.(2001) indicaram que os métodos de compactação supracitados produzem resultados similares no que se refere à Relação da Resistência a Tração, todavia, foi observado, na pesquisa realizada com os fileres Caulim e resíduo do granito, uma queda desta relação em tomo de 28%. A diferença observada neste trabalho, com relação a RRT, poder ser devido aos condicionamentos de temperaturas de refrigeração diferenciados [10°C (Marshall) / -18°C (SGC)]. Entretanto, Sebaaly et al. (2001) ressaltaram que a etapa de refrigeração durante o condicionamento não interfere significativamente, o que não foi observado neste trabalho.

4.3.6 - Módulo de Resiliência

Com o intuito de verificar o efeito da compactação por amassamento (SGC), por impacto e a rigidez da mistura, foram realizados ensaios adicionais de Módulo de Resiliência com corpos-de-prova moldados com o teor de 5% para os fileres. Ambos os fileres atenderam às especificações do DNIT, da AASHTO e do SUPERPAVE, no que se refere aos resultados de Estabilidade, Resistência à Tração por compressão e Lottman Modificado.

a) Ensaio de Módulo de Resiliência com compactador Marshall

A Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam os valores dos módulos de resiliência para os corpos-de-prova que passaram pelas etapas de condicionamento e os que não passaram para os fileres Granito e Caulim respectivamente.

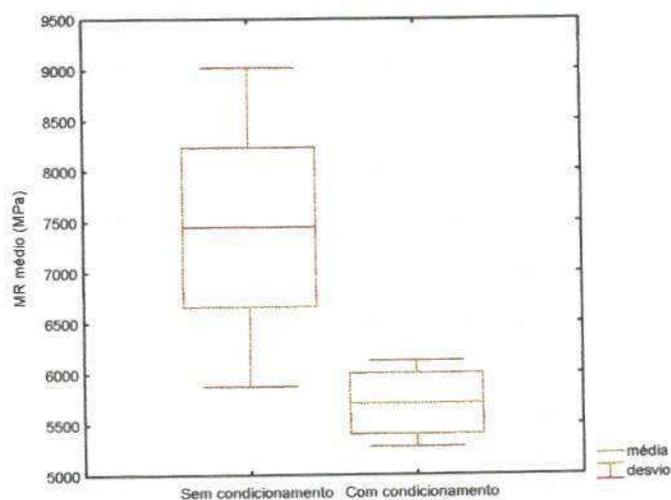


Figura 4.19 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com e sem condicionamento para o filer Granito

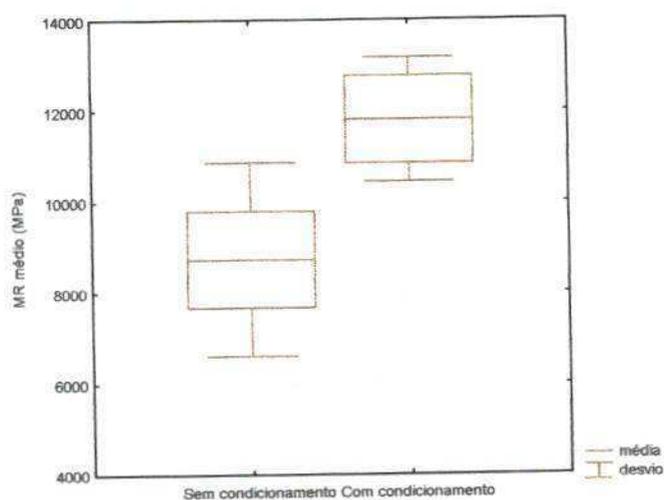


Figura 4.20 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com e sem condicionamento para o filer Caulim

De acordo com Bernucci et al. (2007) valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Os valores encontrados para o filer do Granito estão dentro do intervalo citado, todavia os módulos do filer Caulim extrapolam o valor para o limite máximo do intervalo.

Segundo David (2006) a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta uma vez que ele está relacionada à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos

dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformação e rigidez entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

Os valores do Módulo de Resiliência para as misturas onde foram utilizados o filler do resíduo do Caulim foram superiores aos obtidos para o filler da serragem do Granito. Afirmar que, quanto maior o valor de Módulo de Resiliência, melhor o desempenho da mistura asfáltica pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e "flexibilidade" suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras.

A diminuição do Módulo de Resiliência das amostras condicionadas com relação às que não sofreram condicionamento, para o filler serragem do Granito, estão de acordo com os obtidos por Schmidt e Graf (1972) apud Neves Filho (2006) onde o Módulo de Resiliência diminui cerca de 50% quando as amostras passaram por processos de saturação.

Gouveia et al. (2004) analisaram a influência na umidade nos ensaios de Módulo de Resiliência utilizando gábre e basalto como agregados. Os resultados apresentaram reduções no módulo variando em torno de 40%, resultado compatível com o encontrado para as misturas com o filler Granito.

Furlan (2006), ao estudar diferentes tipos de agregados, observou que com alguns ocorreu evidente ganho de Módulo de Resiliência, sugerindo que a água, ao entrar no sistema agregado-ligante-cal, favorece as reações que levam ao enrijecimento das misturas asfálticas, fato este que explica o ganho de módulo com as misturas com filler Caulim.

Marques (2004) avaliou três (03) misturas diferentes a temperatura de 25°C com diferentes teores de CAP, o resultado obtido encontra-se na Figura 4.21. O autor infere que as misturas com teor de CAP de 4,5% apresentaram Módulo de Resiliência variando de 4000 a 8000 MPa.

De acordo com Marques (2004) o procedimento PRO 269/94 do DNIT para projetos de pavimentos flexíveis permite a estimativa do Módulo de Resiliência da mistura em função da Resistência à Tração por meio do modelo:

$$MR = 5000.RT$$

eq [02]

Onde:

MR – Módulo de Resiliência

RT – Resistência à Tração

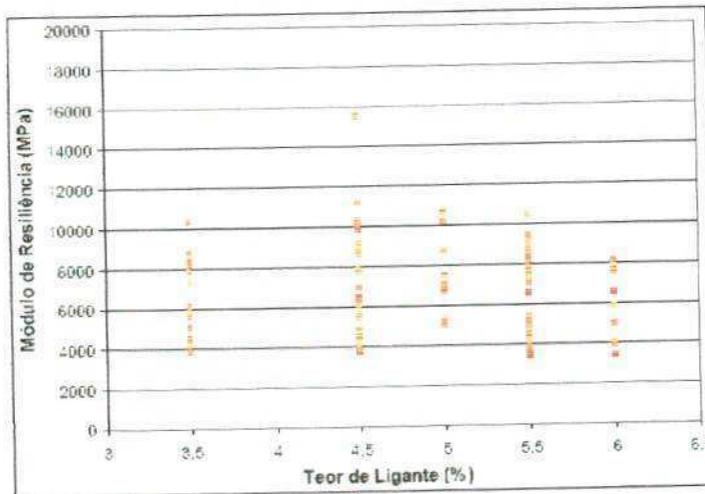


Figura 4.21 - Resultados do Módulo de Resiliência de todas misturas agrupados por temperatura (25°C)
[Fonte: Marques (2004)]

Motta & Pinto (1994) recomendam aos laboratórios que não dispõem de aparelhagem necessária para execução do ensaio de Módulo de Resiliência, o uso do ensaio de Compressão Diametral estático (ME 138/94, DNIT) como parâmetro de estimativa indireta do Módulo de Resiliência. Eles obtiveram um modelo empírico eq [03], a partir de resultados com diferentes misturas asfálticas.

$$MR = -1336 + 4174RT$$

eq [03]

Os modelos sugeridos para estimativa do Módulo de Resiliência não apresentaram resultados próximos dos alcançados para os fileres estudados neste trabalho. O erro de previsão encontrado para o resíduo do Caulim foi superior a 31% e para o de serragem do Granito 21%. O modelo que apresentou resultados mais próximos foi o sugerido pelo DNIT.

A Tabela 4.13 e a Tabela 4.14 apresentam a relação entre os parâmetros MR/RT para o filer resíduo

serragem do Granito e do Caulim, respectivamente. Existe uma relação proporcional entre os valores obtidos pelo ensaio de resistência à tração e os de Módulo de Resiliência. Altos valores da Resistência à Tração indicaram a existência de elevado Módulo de Resiliência. De acordo com Morilha Jr. (2004) a relação indica a compatibilidade entre a rigidez e a resistência da mistura, pois misturas com Módulo de Resiliência alto, necessitam de altos valores de resistência à tração devido a concentração de esforços no interior da mistura.

Tabela 4.13 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento –filer Caulim

Itens de análise	Valores
Módulo de Resiliência (MR)	8900 MPa
Resistência a tração (RT)	1,22 MPa
MR/RT	7200

Tabela 4.14 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento –filer serragem do Granito

Itens de análise	Valores
Módulo de Resiliência (MR)	7450,0 MPa
Resistência a tração (RT)	1,17 MPa
MR/RT	6360

A Figura 4.22 e a Figura 4.23 apresentam a relação entre o Módulo de Resiliência médio e o Módulo Instantâneo de acordo com o procedimento da AASHTO. O Módulo de Resiliência instantâneo, é calculado usando a deformação horizontal recuperável que ocorre durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga/descarga. O outro, chamado Módulo de Resiliência total, é calculado usando a deformação total recuperável que inclui tanto a deformação recuperável instantânea quanto a dependente do tempo durante a fase de descarregamento ou período de repouso de um ciclo (MARQUES,2004).

Segundo Brito (2006) apud Bernucci (2007) quanto mais próximos forem o Módulo de Resiliência total e o Módulo de Resiliência instantâneo, mais rápida é a recuperação elástica do material quando submetido a ação de cargas. Como a deformação elástica é um limitador no dimensionamento de pavimentos.

Os coeficientes de determinação encontrados, entre os dois módulos, para as relações baseadas em resultados de corpos-de-prova moldados com os fileres, indicam boa relação entre os Módulos de Resiliência.

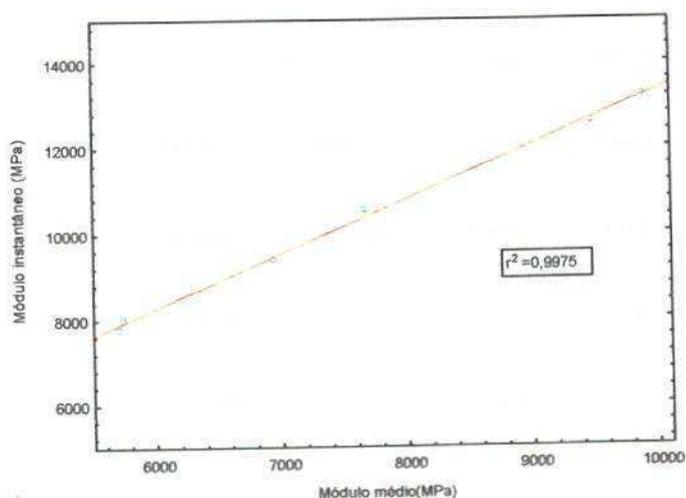


Figura 4.22 - Relação de Módulo de Resiliência total e instantâneo para a porcentagem de 5% de filer Granito

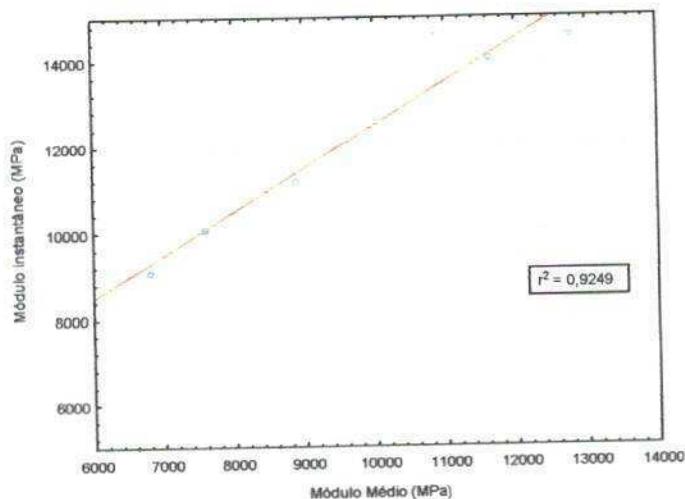


Figura 4.23 - Relação de Módulo de Resiliência total e instantâneo para a porcentagem de 5% de filer Caulim

Os Módulos de Resiliência foram estimados segundo a TP - 31 (AASHTO) e segundo a Project 1-28 NCHRP. A Figura 4.24 e a Figura 4.25 apresentam a relação entres os dois módulos, uma vez que este trabalho se restringiu à apresentação dos valores dos módulos totais obtidos segundo procedimento da AASHTO.

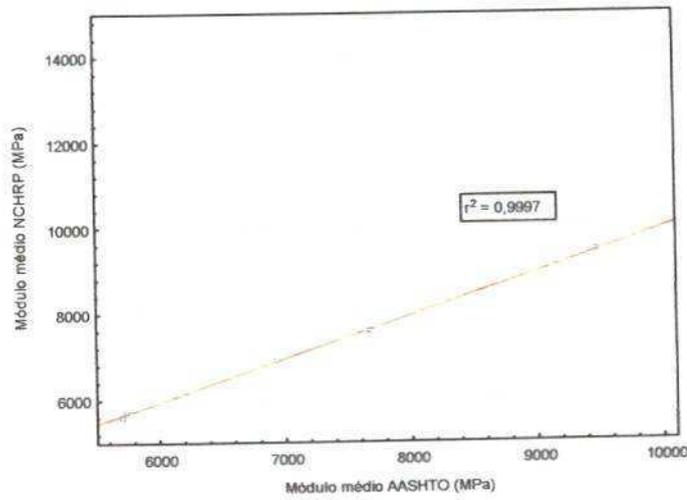


Figura 4.24 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filer Granito

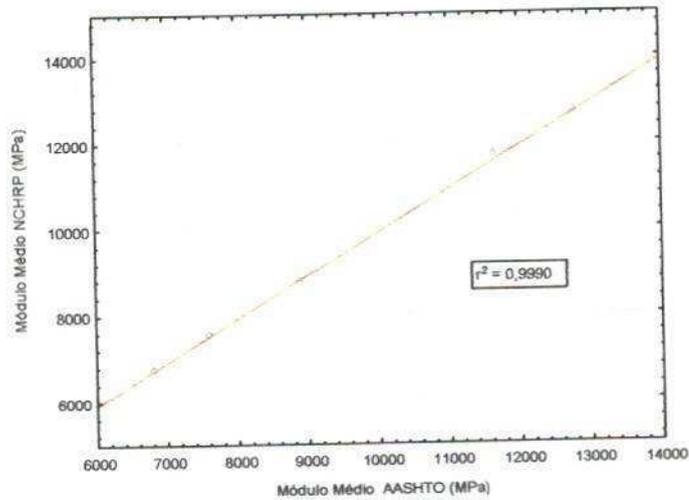


Figura 4.25 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filer Caulim

De acordo com o coeficiente de determinação (R^2) foi observada a existência de relações bem definidas entre os valores do Módulo de Resiliência obtido pelo procedimento sugerido pela AASHTO e pela NCHRP. Este comportamento foi também observado por Gigante (2007).

b) Ensaio de Módulo de Resiliência com compactador Giratório

A Figura 4.26 e a Figura 4.27 apresentam o módulo de resiliência para os corpos-de-prova que passaram pelas etapas de condicionamento e os que não passaram, para os fileres de resíduos de serragem de Granito e de Caulim, respectivamente, utilizando o compactador giratório.

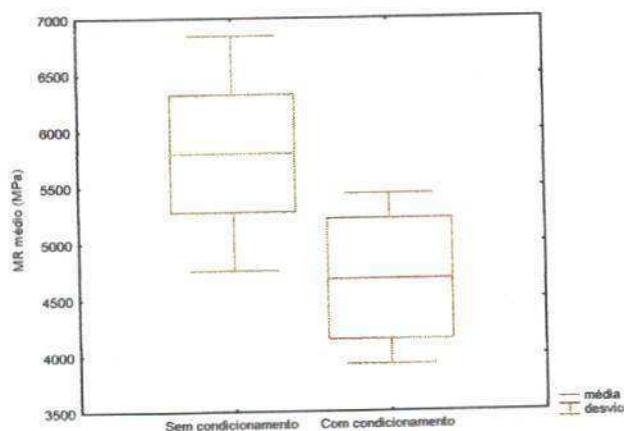


Figura 4.26 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com condicionamento e sem condicionamento para o filer Granito

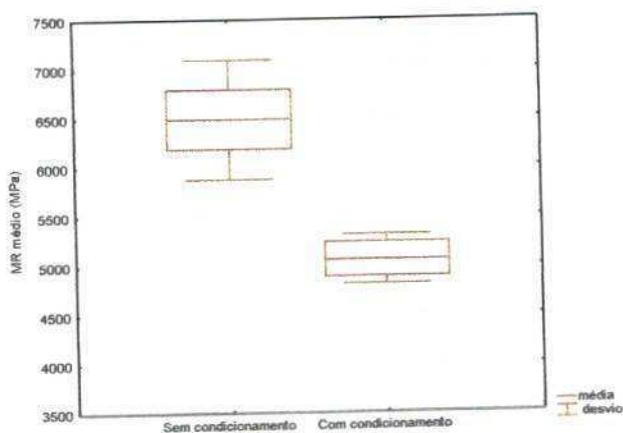


Figura 4.27 - Módulo de Resiliência para a percentagem de 5% de filer em misturas com condicionamento e sem condicionamento para o filer Caulim

Os valores dos Módulos de Resiliência obtidos, com a utilização de ambos os fileres, estão dentro da faixa citada pela literatura, com comportamento análogo ao observado com o compactador automático Marshall. A Tabela 4.15 e a Tabela 4.16 apresentam a relação entre os parâmetros MR/RT para os fileres

estudados.

Tabela 4.15 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento para o filer serragem do Granito - compactador giratório

Itens de análise	Valores
Módulo de Resiliência (MR)	5750 MPa
Resistência a tração (RT)	0,84 MPa
MR/RT	6840

Tabela 4.16 - Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento para o filer residuo do Caulim- compactador giratório

Itens de análise	Valores
Módulo de Resiliência (MR)	6500 MPa
Resistência a Tração (RT)	0,85 MPa
MR/RT	7640

Os valores encontrados para a relação MR/RT estão fora da faixa citadas na literatura. Portanto, julga-se necessário a realização de ensaios com um maior número de corpos-de-prova para aceitação ou rejeição dos resultados obtidos.

Os altos valores da relação MR/RT, podem ser aceitos desde que ocorra uma compatibilidade de deformação entre as camadas da estrutura do pavimento. É importante destacar que o Módulo de Resiliência e a Resistência a Tração da mistura asfáltica são relevantes para o dimensionamento quando se adotam métodos de dimensionamento mecanicistas ou racionais, que tem como base as tensões, as deformações reversíveis e os deslocamentos entre as camadas (DAVID, 2006).

A Figura 4.28 e a Figura 4.29 apresentam a relação entre o Módulo de Resiliência médio e o Módulo Instantâneo de acordo com o procedimento da AASHTO.

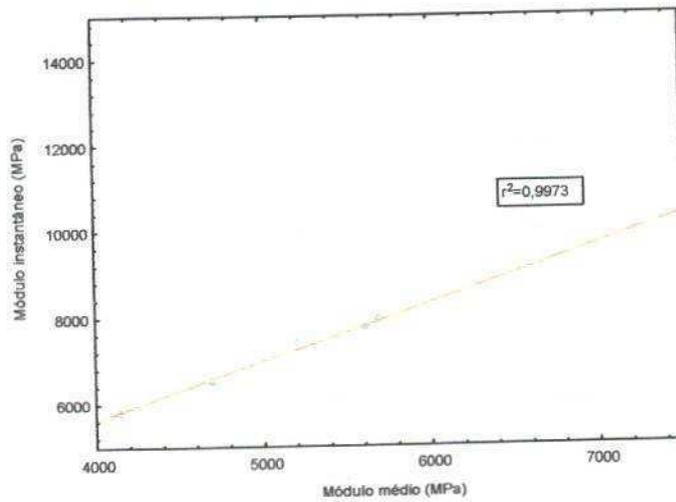


Figura 4.28 - Relação entre o Módulo de Resiliência total e Módulo Instantâneo para a porcentagem de 5% de fíler serragem do Granito

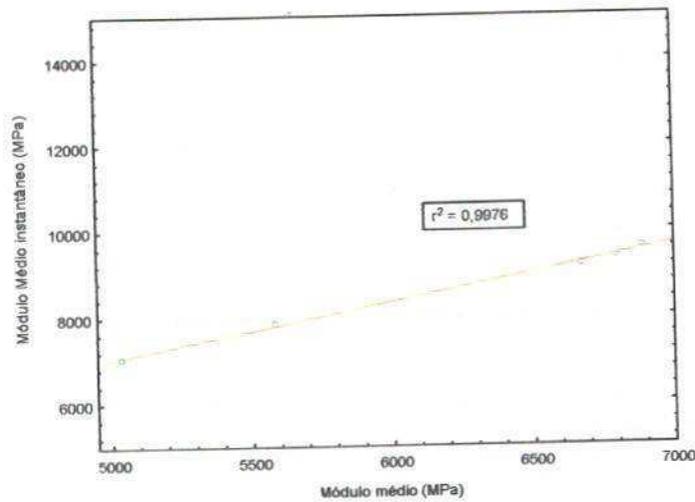


Figura 4.29 - Relação entre o Módulo de Resiliência total e Módulo Instantâneo para a porcentagem de 5% do fíler resíduo do Caulim

Os módulos de resiliência foram estimados segundo o procedimento TP-31 [AASHTO] e segundo a Project 1-28 [NCHRP]. A Figura 4.30 e a Figura 4.31 apresentam a relação entre os dois módulos, uma vez que este trabalho se restringiu a apresentação dos valores dos módulos totais obtidos segundo procedimento da AASHTO.

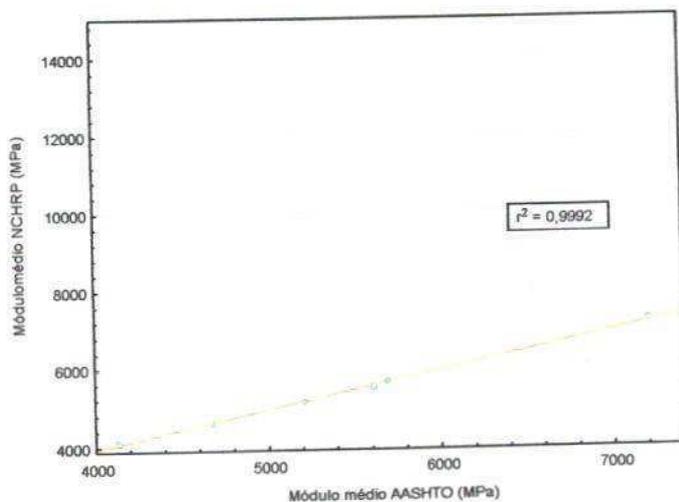


Figura 4.30 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filler serragem do Granito

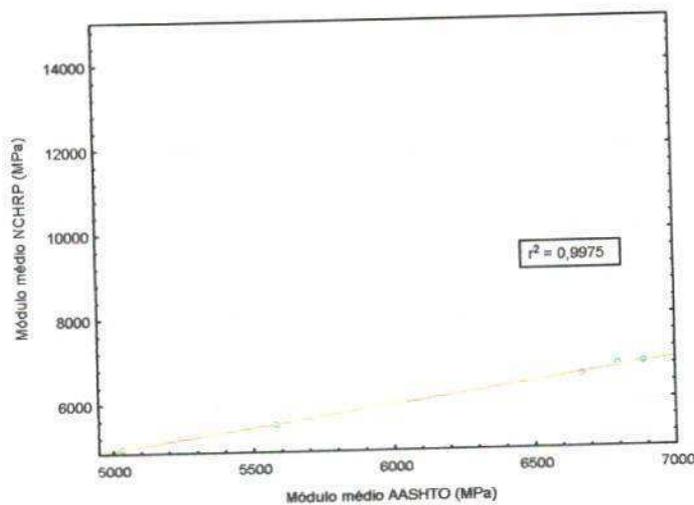


Figura 4.31 - Relação de Módulo de Resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a porcentagem de 5% de filler residuo de Caulim

Baseado no valor do coeficiente de determinação (R^2) foi observada a existência de relações significativas dos valores do Módulo de Resiliência em função dos valores de Módulos estimados pelos procedimentos da AASHTO e da NCHRP para ambos os filler.

CAPITULO 5

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS POSTERIORES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, que teve por objetivo avaliar a utilização dos resíduos do Caulim e da serragem do Granito como filer visando diminuir a susceptibilidade das misturas asfálticas a presença de água, e as perspectivas de continuidade da pesquisa.

5.1 - CONCLUSÕES

5.1.1 - Quanto aos resultados dos Ensaio de Caracterização

- ambos resíduos apresentaram quantidades significativas de sílica e óxido de alumínio, sendo classificados como silicatos- aluminatos;

- os resíduos do Caulim e da serragem do Granito apresentaram distribuição dos tamanhos das partículas aceitáveis para serem utilizados como filer;

- ocorreram leves diferenças entre os resultados dos ensaios de distribuição dos tamanhos das partículas realizados por ensaio de sedimentação e os obtidos por difração a laser. Os resultados do ensaio de difração a laser apresentaram maior precisão;

- o resíduo de Caulim pode ser classificado como do tipo "Classe I" (Perigoso) e o resíduo da Serragem de Granito como tipo "Classe II A" (Não Inerte).

5.1.2 - Quanto aos resultados dos Ensaio Marshall

- os valores da estabilidade Marshall apresentaram tendência crescente com o aumento do teor de filer. Todos os teores de filer apresentam valores de estabilidade superiores ao mínimo estabelecidos pelo DNIT;

- os maiores incrementos de estabilidade ocorreram quando os corpos-de-prova foram submetidos à imersão em água, uma vez que a presença da água deixa a mistura mais rígida;

- o filer residuo do Caulim apresentou um aumento considerável da estabilidade quando comparado com os mesmos percentuais do filer serragem do Granito.

5.1.3 - Quanto aos resultados dos ensaios de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

- todos os valores da resistência à tração foram superiores ao mínimo estabelecido pelo DNIT e apresentaram tendências crescentes com o incremento de filer;

- os corpos-de-prova que foram imersos em banho-maria apresentaram Resistência a Tração inferior aos que não sofreram imersão;

- os corpos-de-prova moldados com o filer de residuo de Caulim apresentaram Resistência a Tração superior aos que foram utilizados o residuo de serragem do Granito.

5.1.4 - Quanto aos resultados dos ensaios de Lottman Modificado

- as misturas asfálticas avaliadas apresentaram resultados da Relação de Resistência à Tração (RRT) acima dos valores mínimos recomendados pela AASHTO e pelo SUPERPAVE.

- os corpos-de-prova moldados com o filer de residuo de serragem do Granito apresentaram melhor adesividade quando comparados com os moldados com filer do residuo do Caulim.

5.1.5 - Quanto à comparação por impacto - amassamento (Marshall e Giratória)

- ocorreu uma diminuição do número de vazios quando os corpos-de-prova foram moldados por amassamento;

- a RRT obtida com a compactação por amassamento foi inferior a por impacto, havendo indicações de que esta diferença se deve aos ciclos de congelamento terem sido diferentes;

- a RRT para o filer residuo de serragem de Granito, tal qual a obtida utilizando a compactação por impacto, foi superior à obtida utilizando o filer do residuo do Caulim;

- as misturas compactadas por amassamento apresentaram valores de Resistência a Tração inferiores aos valores obtidos com o método de compactação por impacto.

5.1.6 - Quanto aos resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência

- para o filer do residuo de serragem do Granito, independente do tipo de compactação, os resultados encontram-se dentro da faixa citados na literatura;

- para os corpos-de-prova moldados com o residuo de serragem de Granito o condicionamento dos corpos-de-prova provocou uma diminuição no Módulo de Resiliência com relação aos não condicionados;

- o filer do residuo do Caulim apresentou valores de MR superiores ao intervalo sugerido pela literatura, todavia, estes podem ser considerados aceitáveis desde que ocorra compatibilidade de deformação entre as camadas do pavimento. O condicionamento provocou um aumento do módulo de resiliência, na compactação por impacto;

- os coeficientes de determinação indicaram boa relação entre os Módulos Instantâneos e os valores médios dos Módulos de Resiliência.

5.1.7 - Considerações Finais

Os resultados obtidos para este estudo de caso indicam que as misturas asfálticas, cuja composição contém filer do residuo de Serragem de Granito nas proporções estudadas, apresentam uma menor rigidez e uma menor susceptibilidade à presença de água quando comparadas com as misturas onde foi utilizado o filer residuo do Caulim. Entretanto, desde que seja observada, no dimensionamento do pavimento, a compatibilidade de deformação entre as camadas, os resíduos de serragem de Granito e de Caulim podem ser utilizados como filer em Concretos Asfálticos.

5.2 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Visando a continuidade e aprofundamento do objeto desta pesquisa, são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos:

- realizar ensaios de Módulo de Resiliência, com os demais teores, no intuito de verificar o binômio resistência/ flexibilidade;

- realizar ensaios com carga repetida e ensaio de fadiga em misturas contendo diferentes teores de filer sob diferentes condições de umidade;
- realizar o ensaio de Lottman modificado, utilizando os dois métodos de compactação, com diferentes temperaturas de congelamento para avaliar a influência desta na determinação da RRI;
- realização da dosagem SUPERPAVE utilizando resíduo do Caulim e da serragem do Granito como filer;
- executar e observar o comportamento de um trecho experimental utilizando os materiais da pesquisa;
- realizar uma análise econômica da proposta de utilização do resíduo do Caulim e da serragem do Granito em revestimentos asfálticos.

6 - REFERÊNCIAS

- AASHTO- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for Design of Pavements Structures**. Washington, 2001.
- AASHTO- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T-283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**. Washington, USA, 1989
- AASHTO- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO MP 8-01: standard specification for designing Stone Matrix Asphalt (SMA)**. USA, 2005
- AFNOR - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Couches de Roulement: Béton Bitumineux Drainant**. França, 1991.
- AKSOY, A. ; KURTULU, A. ; TAYFURC, S.; ÖZEN, H., Effects of Various Additives on the moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials. **Elsevier Science Ltd**. USA, 2004
- ALDIGUERI,D.R; PARENTE, E.B.; SOARES, J.B. Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material de revestimento de vias de baixo volume de trafego. In **XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em transportes**, Florianópolis, 2004
- ALONSO,L. Sólidos Resíduos. **Revista DAE-SABESP**, n 164. São Paulo, 1992
- AL-SUHAIBANI,A.;MUDAIHEEM, J.; ALFOZAN,F.. Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. Effects of aggregates and mineral filler on asphalt mixtures performance. **American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147**, 1992
- AL-SWAILMI, S., TERREL, R.L. Evaluation of Water Damage of Asphalt Concrete Mixtures Using the Environmental Conditioning System (ECS). **Journal of Association of Asphalt Paving Technologists**, Vol. 61. USA, 1992
- AMARAL, S.C., 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), Dissertação de Mestrado, USP – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 2000
- ANGULO, S.C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.São Paulo, 2000
- ASPHALT INSTITUTE. Superpave Performance Graded Asphalt binder Specification and Testing. **SUPERPAVE series No. 1 (SP -01)**. Lexington, 1997

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: RESÍDUOS SÓLIDOS: CLASSIFICAÇÃO**. RIO DE JANEIRO. 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Lixiviação de resíduos: procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Solubilização de resíduos: procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.
- BALIGE.M., First Test Sections using Bituminous Mixes with Addition of Crumb Rubber from Waste Tires, for Urban Paving Applications in Argentina. **In Asphalt Rubber World Congress**. Brasília, 2003
- BARATA, R.V., Contribuição a Estudo de Propriedades Mecânicas dos Concretos de Alta Resistência com Utilização de Materiais Comumente Encontrados na Área Metropolitana de Belém. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará. Belém, 1998
- BARKSDALE, R.D. ALBA,J. Laboratory Determination of Resilient modulus for flexible Pavement Design. **Prepared for Nacional Cooperative Highway Research Program**. Georgia, 1997
- BATISTA,I.H. & ALBUQUERQUE, C.C., Desenvolvimento Sustentável: Novos Rumos para a Humanidade. **Revista Eletrônica Abore Publicação da Escola Superior de Artes e Turismo** - Edição 03/2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA,L.M .G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES,J.B., **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros**, Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007
- BLÓIS, M.M. ET AL., Plano Diretor da Infra Estrutura Viária de Santo André. **In: 34ª Reunião Anual de Pavimentação – ABPV**. Campinas ,2003
- BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2004
- BRANDON, P.S. Sustainability in Management and Organization: the Key Issues?. **In: CIB Building Congress – Materials and Technologies for Sustainable Construction**. Suíça, 1988
- BRITO, J.A. Cidade Versus Entulho. **In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**. Comitê Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON). São Paulo, 1999
- BRITO, L. A. T. Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2006

- BROWN, E. R. & CROSS, S.A., Selection of Aggregate Properties to Minimize Rutting of Heavy Duty Pavements. In: **Meininger, R. C. (ed.) Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1992
- CARDOSO, E. da R., Estudo da Distribuição de Vazios em Misturas Asfálticas de Alto Desempenho do Tipo SMA utilizando Tomografia. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, 2004
- CARNEIRO, A.P., **Reciclagem de Entulho de Salvador para a Produção de Materiais de Construção.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia -UFBA. Salvador, 2001
- CARRISSO, R. C. C, CORREIA, J. C. G. e SANTOS, C. A. M., Caracterização Tecnológica e Ensaio de Concentração de Feldspato em Resíduos de Pedreira de Granito. **Relatório Técnico TR 2003 - 067 - 00,** CETEM. Rio de Janeiro, 2003.
- CARVALHO, E. A., CAMPOS, A. R. e PEITER, C. C., Mitigação do Impacto Ambiental provocado por Efluentes de Serrarias de Rochas Ornamentais em Santo Antônio de Pádua. **Relatório Técnico,** CETEM, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- CARVALHO, M.R.S. ; RIBEIRO, R.; CARRISSO, R., Utilização do Rejeito do Corte de Granito em Pavimentação Asfáltica. In **XIV Jornada de Iniciação Científica – CETEM.** Rio de Janeiro, 2008.
- CASTRO, L.N., **Reciclagem a Frio "In Situ" com Espuma de Asfalto.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro –COPPE, Rio de Janeiro, 2003
- CERATTI, J.A., RUWER, P.M & OLIVEIRA, J.A., Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado por polímero. In **13º Encontro de Asfalto,** IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 1996
- CIRELLI, A.S.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. , Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In **IV Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações.** IBRACON. São Paulo, 2001
- CNT- Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa Rodoviária.** CNT/SEST/ SENAT, Florianópolis, 2006
- COMYNSKY, R.J., KOLLINGWORTH, B.M. et al. Quality Control and Acceptance of SUPERPAVE Designed Hot Mix Asphalt. National Cooperative Highway Research Program, **report 409,** EUA, 1998
- COELHO, V. Considerações sobre o Método Marshall. In: **26ª Reunião Anual de Pavimentação,** Aracaju, 1992
- COOLEY JR., L. A. Permeability of Superpave Mixture Evaluation of field Permeameters. Research Engineer,

- National Center for Asphalt Technology, **NCAT Report No. 99-1**. Auburn Universit. Alabama, USA, 1999.
- CPHRP. Inventário de Resíduos Sólidos Industriais do Estado de Pernambuco. **Projeto CRH/GTZ**, 2000
- CRUZ, M. A. S. ; ARAÚJO, P. R. ; SOUZA, V. C. B. ; GOLDENFUM , J.A., Princípios de Concepção e Projeto de Estruturas de Controle do Escoamento na Fonte. In: **Reunião Final da Rede Cooperativa de Pesquisa em Engenharia e Gestão de Recursos Hídricos**. Vitória – ES, 2002
- CURTIS, C. W., Investigation of Asphalt-Aggregate Interactions in Asphalt Paviments, Chemical Eng Dept, Auburn University, USA, 1999
- DAL MOLIN, D. C. C, Verificação da Influência do Uso de Metacaulim de Alta Reatividade Proveniente do Rejeito Industrial na Resistência a Tração de Concretos. In **44 Congresso Brasileiro de Concreto**. Belo Horizonte, 2002
- D'ANGELO, J. A., PAUGH, C., HARMAN, T. P., et al., Comparison of the Superpave Gyrotory to Marshall for Field Quality Control. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, Volume 64 . USA, 1995
- DARONCHO, C., **Contribuição à Análise de Qualidade de Viagem e suas Relações com a Distribuição de Defeitos em Segmentos de Rodovias**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo- Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001
- DAVID, D., Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsinado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2006
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 1996
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ES 31/2004: **Pavimentação: Concreto Betuminoso**. Rio de Janeiro, 2004
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – EM 367/97: Especificação de Material: material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ME 043/99: **Misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ME 081/95: **Agregado graúdo: determinação de densidade real**. Rio de Janeiro, 1995
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ME 084/95: **Agregado miúdo – determinação de densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT – ME 138/94: Misturas asfálticas: determinação da resistência a tração pro compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994
- DUMKE, M. P. , Concreto Asfáltico Drenante com Fibras de Celulose, Ligante Modificado por Polímero e Asfalto-Borracha. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005
- ELPHINGSTONE, G. M., **Adhesion and Cohesion in Asphalt – Aggregate Systems**. Thesis of Doctor. Texas, 1997
- EPPS, J. ; BERGER, E.; ANAGNOS, J.N. , Treatments. In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, In: **Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements**, 2003. Anais. San Diego, Transportation Research Board. Califomia, Estados Unidos, 2003
- FALCÃO, M.F.B. e SOARES, J.B. Discussão Sobre os Modos de Ruptura Observados no Ensaio de Compressão Diametral. In **XVI Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás- IBP**. Rio de Janeiro , 2002
- FERNANDES, M.W. , **Utilização de resíduos sólidos como agregado e filler no estudo da susceptibilidade das misturas asfálticas a presença d'água**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007
- FURLAN, A. P. ; SANTOS, C. R. G. ; GIGANTE, A. C. ; FABBRI, G. T. , Algumas Considerações Acerca de Ensaio para Avaliação do Dano por Umidade em Mistura Asfáltica Densa. In: **35ª Reunião Anual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 2004
- FURLAN, A.P, Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2006
- GIGANTE, A.C. , Avaliação da susceptibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes . Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, 2007
- GOLÇALVES, J.P., **Utilização do resíduo de corte do granito como adição para produção de concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do rio grande do sul. Porto alegre, 2000
- GONTIJO, P.R.A., Fadiga de Misturas Betuminosas. Condição Essencial no Desenvolvimento Racional de Pavimentos Flexíveis. In **15 Reunião Anual de Pavimentação**. Belo Horizonte, 1980
- GOUVEIA, L.T.; FURLAN, A.P.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES JUNIOR, J. L. ; FABBRI, G. T. P. F, Considerações acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à

- Umidade. In **ANPET- Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2004
- GUNTHER, W.M.R. Minimização de Resíduos e Educação Ambiental. In: **Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública**. Curitiba, 2000.
- HARMAN, T.; BUKOWSKI, J. R; MONTIER F., et al.. The History and Future Challenges of Rotary Compaction 1939 to 2001. In: **Transportation Research Board – TRB**. Washington, USA, 2002
- HICKS ,R. G.; SANTUCCI, L; ASCHENBRENER, T. ; Introduction and Seminar Objectives., In: **Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements**, 2003. Anais. San Diego, Transportation Research Board, California, Estados Unidos, 2003
- HIGASHI, R.R., LIMA, T.L. & SPRÍCIGO,T., Análise de Viabilidade da Utilização de Misturas de Solo-Cinza Pesada para Pavimentação. In : **35ª Reunião Anual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 2004
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. IBP/Comissão de Asfalto. 6 ed. rev. Rio de Janeiro, 1999.
- JOHN, V.M.J. Panorama Sobre a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**, IBRACON. São Paulo, 1999.
- JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (livre docência) – Escola Politécnica. São Paulo, 2000
- KIM, Y. & LUTIF, J. S., Material Selection and for Moisture Damage Design Consideration of Asphalt Pavement. Nebraska Department of Roads. **NDOR Research Project Number P564**. USA, 2006
- KVUSSI,A. & HICKS, R.G., Properties of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers. **Journal of the Association os Asphalt Paving Technologists**, 1997
- LEITE, L., SILVA, P. D. E. A., BORGES, P. e RIBEIRO, R. C. C., Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas quanto ao Deslocamento. **Relatório Técnico, CEMPES**. Rio de Janeiro, 2003.
- LIBERTADORI, L.A. & CONSTANTINO, R.S., Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte. In **18º Encontro de Asfalto**, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, Rio de Janeiro, 2006
- LIMA, F. C. de A. A., **Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais: uma Alternativa de Utilização na Pavimentação**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, 2003
- LIMA, J. M., Estudo de Aproveitamento do Resíduo do Beneficiamento de Caulim como Matéria Prima na Produção de Pozolanas para Cimentos Compostos e Pozolânicos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Para. Belém, 2004

- LUCENA, A.E.F.L., **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008
- LUCENA, L.C.F.L., RODRIGUES, J.K.G., LUCENA, A.E.F.L. E MORAIS, C.A.S. Susceptibilidade das Misturas Asfálticas a Presença de Água. In: **35ª Reunião Anual de Pavimentação**. Anais. Rio de Janeiro, 2004
- LYTTON, R. L., Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures. **Capítulo de Livro editado por J. Youtcheff**. USA, 2004
- MAGALHÃES, S.T., **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, 2004
- MARQUES, G. L. A reengenharia de Processo de negócios. In: **Manufatura Integrada por computador: Sistemas integrados de Produção: Estratégia, Organização, Tecnologia e Recursos Humanos**. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- MARQUES, G. L.O. , **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2004
- MARTIN, C. M. M. S ; RIBEIRO, R.C.C.; CORREIA, J.C.G; **Avaliação Química da Utilização de Aditivos no Processo de Pavimento Asfáltico**. In **XV Jornada de Iniciação Científica – CETEM**. Rio de Janeiro, 2007
- MEDEIROS JR, M. S. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas por Meio de Módulo Dinâmico**. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, 2006
- MEDEIROS, S. A. de, **Incorporação de lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte –UFRN, Natal, 2006
- MEDINA, J. , **Mecânica dos Pavimentos**, COPPE-UFRJ, editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997
- MENDEZ, J.D., **Análisis Comparativo de Modulo Resiliente y Ensayos de Deformación Permanente em Mezclas Asfálticas Del tipo (MDC2) em Briquetas Compactadas com Martillo Marshall y Compactor Giratorio**, Pontificia Universidade Javeriana, Facultad de Ingenieria, Bogotá, 2005
- MENEZES, R.R. - **Utilização do Resíduo do Beneficiamento do Caulim na Produção de Blocos e Telhas Cerâmicos**. **Revista Matéria**, 12 (01). Rio de Janeiro, 2007
- MOHAMED, E. H., **Debonding Location in Asphalt Concrete Associated with Moisture Damage**. **Journal of Materials in Civil Engineering**. ASCE, Vol. 5, No. 4, pp.497-509, 1993

- MONTHÉ FILHO, H. F. ; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C.G.; Rejeito da Indústria de Mármore e Granito: Problemas e Soluções. **Revista Universidade Rural: Série Ciências Exatas e da Terra, Seropédica, RJ: EDUR**, v. 24, nº 1-2. Rio de Janeiro, 2005
- MOMM, L. , Estudo dos efeitos da Granulometria sobre a macrotextura superficial do Concreto Asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de doutorado. Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998
- MOREIRA, J.M.S. ; FREIRE, M. N., HOLANDA,J.N.F.; Utilização de Resíduo de Serragem de Granito Proveniente do Estado do Espírito Santo em Cerâmica Vermelha. **Revista Cerâmica**, n 49 . Madri, Espanha, 2003
- MORILHA JUNIOR, A., Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas suas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Carina, Florianópolis, 2004
- MOTTA, J. F. M. & FREIRE, A. S. Potencialidades para o Aproveitamento Econômico do Rejeito da Serragem do Granito. **Revista Rochas de Qualidade**, Edição 123. São Paulo, 1995
- MOTTA, L. M. G. , Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. In: **14º Encontro de Asfalto**, Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 1998
- MOTTA, L. M. G. ; MEDINA, J. de ; SCALCO, R. C. . ; O Projeto Estrutural de Pavimentos Flexíveis e a Dosagem de Misturas Asfálticas. In **Reunião Anual de Pavimentação - ABPv** . Teresina, 1993
- MOTTA, L. M. G. & PINTO, S., O Uso de Ensaios Estáticos na Definição de Parâmetros de Comportamento de Misturas Asfálticas. In **12º Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro, 1994
- MOTTA, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M., et al, Princípio do Projeto e Análise. **Tradução comentada da publicação FHWSA- SUPERPAVE de Misturas Asfálticas 95-003**, Federal Highway Administration, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1996
- MOURA, E. de, Estudo do Efeito de Aditivos Químicos e da Cal como Melhoradores de Adesividade em Misturas Asfálticas Densas. Dissertação de Mestrado. EPUSP-USP. São Paulo, 2001
- MOURÃO, F. A. L., **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho**. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2003
- NASCIMENTO, L.; LEITE, L.; CAMPOS, E.F.; MARQUES, G.; MOTTA, L.; et al. Uso da Tomografia Computadorizada e de Imagens Digitais para o Estudo de Misturas Asfálticas. **18º Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**. Rio de Janeiro, 2006

- NEVES FILHO, A. S. , **Avaliação da Adição de Dopes no Comportamento de Misturas Asfálticas a Quente**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2006.
- NEVES, G. A. **Reciclagem de resíduos da Serragem de Granitos para uso como matéria prima cerâmica**. Tese de Doutorado . Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2002
- NICHOLSON, V. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists. 1932
- NOGUEIRA. R. E. F. Q. ; ARGONZ, R. ; MATTOS, I. C. ; CORDEIRO, E. R. ; ARAÚJO, A. T. F. S. ; Caracterização de Resíduos Provenientes da Extração de Granitos da Serra da Meruoca (CE) Visando seu Aproveitamento como Matéria-Prima Cerâmica. In **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu, 2006
- ODA, S., **Caracterização de uma Rede Municipal de Estradas Não-pavimentadas**. Dissertação Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995
- OKIDA, J. R. , **Estudo para Minimização e Reaproveitamento de Resíduos Sólidos de Fundação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta grossa, 2006
- OLIVEIRA, C.G.M, **Estudo das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2003
- OLIVEIRA FILHO, C. M. S., Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA).Dissertação de Mestrado, UFCE, Fortaleza, 2007
- OLIVEIRA FILHO, C. M.S. & SOARES, J. B. Adesão e Coesão em Misturas Asfálticas (Melhoradores de Adesividade, Ligantes Modificados e Intertravamento). In **XX ANPET**. Brasília, 2006
- CASTRO, A. C. F.; RAIMUNDINI, S.L.; STRUMIELLO, L.D.P. ; Desenvolvimento Sustentável e Produção Mais Limpa: Estudo de Caso em uma Empresa do Setor Moveleiro. In **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz Iguaçu, 2007
- OLIVEIRA, M.J. E. ,Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem . Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2002
- OLIVEIRA, P.M.F, **Caracterização Mecânica de Misturas betuminosas preparadas com asfalto-polímero**. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1997
- PAES, J. C., Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: contribuição para o estudo das misturas betuminosas. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Portugal, 2006
- PAIVA,C.E.L & SILVA, C.E.D.B.D, Estudo da Permeabilidade de Misturas Betuminosas. In:**34ª Reunião**

Anual de Pavimentação, 2003. Campinas, 2003

PEREIRA, L.M., Influência do Resíduo de Caulim nas Propriedades Físico-Mecânica do Porcelanato. In **18 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Pernambuco, 2008

PINHEIRO, J. H.M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

PINTO, S. & PREUSSLER, E. S. Pavimentação Rodoviária - Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. **Copiarte, 2 ed.** Rio de Janeiro, 2002

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999

PONTES, Z. de J. L., Gestão Participativa : Informação, Comunicação e Decisão. Por Uma Teoria da Gestão Participativa. **Novo paradigma de administração para o século XXI**. Fortaleza, 2000.

PUZINAUSKAS, V.P., Filler in Asphalt Mixtures. **Research Report No. 69-2 (RR-69-2)**, Asphalt Institute. Kentucky , USA, 1983

REIS, Rafael M.I M., **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo , São Paulo, 2002

REIS, R. M.M. e SANTO, N. R.E. Micro Revestimento Asfáltico a Frio: Uma inovação Tecnológica para Tratamentos de Superfícies. **Ipiranga Asfaltos**. São Paulo, 1997

REZENDE, L.R. Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 1999

RIBEIRO, R. C. C., Uses of Granite Fines in Asphalt Production: A Form of Clean Tecnology. **Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 2004**, Vol 1. Madri, Espanha, 2006

RIEDEL, W., & WEBER, H. **Asphalt and Teer**. USA, 1934

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D.Y. ; KENNEDY, T.W.; Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, **NAPA Educational Foundation**, Lanham, Maryland, 1996

ROCHAS DE QUALIDADE., Granito, Mármore e Pedras Ornamentais. **Cetemag Desenvolve Equipamentos para Lama Abrasiva**. São Paulo. Edição 115, 1993

ROHDE, L. , **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de**

- Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007
- SANTANA, E. P., **Estudos das Propriedades Física e Mecânicas de Misturas Asfálticas Recicladadas com Materiais Fresados : Estudo de Caso BR-230.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009
- SANTOS, A.F.M.S., **Caracterização, Avaliação da Biodegradabilidade Aeróbia e Anaeróbia e Tratamento em Reator UASB do Chorume do Aterro da Muribeca.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003
- SAVILLE, V., & AXON, E. **Adhesion of Asphaltic Binders to Mineral Aggregates. Association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings of the Technical Sessions . USA, 1937**
- SCHMIDT, R.J.; GRAFF; P.E.; **The Effect of Water on the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes, Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, pp. 118–162, 1972**
- SEBAALY, P.E., **Evaluation of Moisture Sensitivity Properties of Adot Mixtures on US 93. Final Report. Arizona** Departament os Transportation. Arizona, 2001
- SIDDIQUI, Z. et al., **Variables Affecting Marshall Test Results. Transportation Research Record.** Washington, 1998
- SILVA, M. A. R. **Economia dos Recursos Naturais.** In: **Economia do Meio Ambiente: teoria e prática. Elsevier.** Rio de Janeiro, 2003.
- SILVA, S. A. C, **Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassa de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Espírito Santo. Vitória, 1998
- SILVEIRA, L.A.X., **Modelo de Decisão para Seleção de Pavimentos Urbanos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2003
- SHRP-A-341 – Strategic Highway Research Program, National Research Council, **Fundamental Properties of Asphalt- Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption.** Washington, USA, 1993.
- SOBRINHO, D. S. **Implantação de um Laboratório Industrial para Produção Experimental de Elementos Decorativos e Revestimentos de Paredes a partir de Resíduos Sólidos, Provenientes de Rejeitos de Vidros, Rochas Graníticas e Calcárias da Região.** Relatório de Iniciação Científica, DEC/ CCT/ UFPB. Campina Grande, 1998
- SOLAIMANIAN, M.; J. HARVEY; M. TAHMORESSI e V. TANDON. **Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements.** Topic 3

- http://trb.org/publications/conf/reports/moisture/03_TOP3.pdf, 2003
- SOUZA, A. A. C. Investigação Geoambiental de Solos Argilosos Contaminados por Resíduos de Petróleo. Dissertação de Mestrado, UFRJ. Rio de Janeiro, 2001
- SOUZA, F. V. **Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, PETRAN/UFC. Fortaleza, 2005
- SPECHT, L.P. , **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004
- SWART, J. H. Experience with Porous Asphalt in the Netherlands. In: **Congresso Europeo de Mezclas Drenantes**. Madri. 1997.
- TANDON, V. et al., Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. In: **Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements**, Anais. Transportation Research Board. California, Estados Unidos, 2003
- VALLE, C. E. do. **Qualidade Ambiental: ISO 14 000**. SENAC. São Paulo, 2002
- VARGAS, T. et al. Rochas Ornamentais do Brasil, seu Modo de Ocorrência Geológica, Variedade Tipológica, Exploração Comercial e Utilidades como Materiais Nobres de Construção. **Revista de Geociências** . Instituto de Geociências. São Paulo, 2001
- VASCONCELOS, K.L. et al. Avaliação do dano por umidade induzida e da recuperação de trincas em mástique. In : **18º Encontro de Asfalto – IBP**. Rio de Janeiro, 2006
- VIOLA, E. J. e LEIS, H. R. Desordem Global da Biosfera e a Nova Ordem Internacional: O Papel Organizador de Ecologismo, In. **Ecologia e Política Mundial**, 1991
- ZORDAN, S.E. **A Utilização do Entulho como Agregado, na Confeção do Concreto**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997
- ZWAN, J.T. Application of waste materials – a success now, a success in the future. In: **Waste Materials in Constructions: Putting Theory Into Practice. Proceedings**. Great Britain, 1997

7 - ANEXOS

Anexo A – Ensaio Marshall

- Constam planilhas de cálculos resultantes dos experimentos realizados.

Anexo B – Ensaio com o auxílio do pórtico de Lottman

Constam planilhas de cálculos resultantes dos experimentos, dos ensaios de Tração Indireta Compressão Diametral e ensaio de Lottman Modificado, realizados com o auxílio do pórtico de *Lottman*.

Anexo C – Ensaio de sedimentação

Constam planilhas de cálculos e gráficos resultantes do ensaio de sedimentação.

Anexo D – Distribuição dos tamanhos das partículas por difração a laser

Constam gráficos resultantes dos ensaios com o analisador de partículas por difração a laser.

Anexo E – Módulo de Resiliência

Constam as planilhas de cálculo resultantes dos ensaios de Módulo de Resiliência

7.1 - ANEXO A

7.1.1 - Ensaio Marshall

Constam planilhas de cálculos resultantes dos experimentos realizados seguindo a metodologia Marshall.

Quadro 7.1 – Planilha de cálculo do ensaio Marshall – Filer Caulim sem imersão

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																					
Filer Caulim - Sem Imersão																					
CORPO DE PROVA - %	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECÍFICO			VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE			FLUÊNCIA	
	a	b		c	NO AR		NA ÁGUA	APAR.	TEOR.	G	h	i	j	k	l		AGREG.	REL. BET. VAZIOS	m		n
			d	e	f													p	q	r	s
	POR PESO DE DE AGRÉG.	POR PESO DE DE MIST.	g	g	cm ³	d/f	-	-	-	100-4-J	-	100-4-J	100-J	1/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm	
1	4,5		1195,6	693,4	502,2	2,38	2,47	10,50	85,85	3,65	14,15	74,22	630	1286,46	1,05	1350,78	3,96				
2	3%		1192,8	690,2	502,6	2,37	2,47	10,47	85,58	3,95	14,42	72,61	995	2031,79	1,04	2113,06	4,36				
3	4,5		1193,3	695,4	497,9	2,40	2,47	10,57	86,42	3,00	13,58	77,88	780	1592,76	1,09	1736,11	4,12				
M	4,50					3,58	3,71					74,90				1733,32	4,15				
4	4,5		1195,8	696,5	499,3	2,39	2,48	10,57	86,13	3,30	13,87	76,19	750	1531,50	1,09	1669,34	3,96				
5	4%		1194,1	695,8	498,3	2,40	2,48	10,57	86,18	3,25	13,82	76,51	1155	2358,51	1,09	2570,78	3,57				
6	ro2		1193,4	695,4	498,0	2,40	2,48	10,57	86,18	3,24	13,82	76,52	972	1984,82	1,08	2143,61	4,5				
M	4,50					2,40	2,48					76,41				2127,91	4,01				
7	4,5		1188,7	694,8	493,9	2,41	2,48	10,62	86,43	2,95	13,57	78,25	1108	2262,54	1,05	2375,66	5,5				
8	5%		1192,1	695,1	497,0	2,40	2,48	10,58	86,14	3,28	13,86	76,33	1199	2448,36	1,05	2570,78	5,55				
9	ro2		1190	695,2	494,8	2,41	2,48	10,61	86,37	3,02	13,63	77,83	1150	2348,30	1,05	2465,72	4,9				
M	4,50					2,40	2,48					77,47				2470,72	5,32				
10	4,5		1190,1	695,4	494,7	2,41	2,48	10,61	86,27	3,12	13,73	77,31	903	1843,93	1,08	1991,44	5,86				
11	6%		1189	695,3	493,7	2,41	2,48	10,63	86,37	3,01	13,63	77,93	1020	2082,84	1,08	2249,47	7,5				
12	ro2		1191,1	697,1	494,0	2,41	2,48	10,64	86,47	2,90	13,53	78,60	950	1939,90	1,09	2114,49	6				
M	4,50					2,41	2,48					77,94				2118,47	6,45				

Quadro 7.2 – Planilha de cálculo do ensaio Marshall – Filer Caulim com imersão

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																							
Filer Caulim - com imersão																							
CORPO DE PROVA - %	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA		PESO		VOLUME		PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFL. CT.		ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	
FOR PESO DE AGREG.	FOR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm ³	d/f				100-i+j	100-k+l	100-m+n	100-o+p	USAR TABELA	Kg	Kg	Kg	mm					
1	4,5	1196,1	619	1196,1	692,1	504,0	2,37	2,47	10,47	85,58	3,95	14,42	72,60	3,95	1225	2501,45	0,98	2451,42	3,96				
2	3%	4,5	1173,7	608	1173,7	489,2	2,40	2,47	10,58	86,52	2,90	13,48	78,50	2,90	771	1574,38	1,08	1700,33	4,36				
3	4,5	1174,8	612	1174,8	680,7	494,1	2,38	2,47	10,49	85,74	3,77	14,26	73,55	3,77	1225	2501,45	1,06	2651,54	3,24				
M	4,50						2,38	2,47					74,88	3,54				2267,76	3,85				
4	4,5	1197,6	608	1197,6	701,1	496,5	2,41	2,48	10,64	86,75	2,61	13,25	80,30	2,61	1250	2552,50	1,08	2756,70	3,96				
5	4%	4,5	1192,5	607	1192,5	497,8	2,40	2,48	10,57	86,15	3,28	13,85	76,33	3,28	924	1886,81	1,08	2037,75	3,57				
6	ro2	4,5	1186,5	610	1186,5	496,3	2,39	2,48	10,55	85,98	3,47	14,02	75,22	3,47	1525	3114,05	1,06	3300,89	6,74				
M	4,50						2,40	2,48					77,29	3,12				2698,45	4,76				
7	4,5	1191,1	606	1191,1	697	494,1	2,41	2,48	10,64	86,57	2,80	13,43	79,19	2,80	1285	2623,97	1,08	2833,89	5,5				
8	5%	4,5	1191,6	614	1191,6	496,9	2,40	2,48	10,58	86,12	3,30	13,88	76,21	3,30	1692	3455,06	1,04	3593,27	5,55				
9	ro2	4,5	1199,5	616	1199,5	499,6	2,40	2,48	10,59	86,22	3,19	13,78	76,87	3,19	1760	3593,92	1,04	3737,68	3,96				
M	4,50						2,40	2,48					77,42	3,10				3388,28	5,00				
10	4,5	1185,2	607	1185,2	695	490,2	2,42	2,48	10,67	86,70	2,63	13,30	80,23	2,63	1520	3103,84	1,08	3352,15	5,86				
11	6%	4,5	1184,6	617	1184,6	487,8	2,43	2,48	10,71	87,09	2,20	12,91	82,97	2,20	1274	2601,51	1,04	2705,57	7,5				
12	ro2	4,5	1191,3	614	1191,3	501,9	2,37	2,48	10,47	85,12	4,41	14,88	70,37	4,41	1735	3542,87	1,05	3720,01	5,5				
M	4,50						2,41	2,48					77,86	3,08				3259,24	6,29				

Quadro 7.3 – Planilha de cálculo do ensaio Marshall – Filer Granito sem imersão

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																							
Filer Granito - Sem imersão																							
Nº	CORPO DE PROVA - %	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME		PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.			ESTABILIDADE			FLUÊNCIA
		a	b		c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s		
		cm	g	g	cm³	d/f					100-i+j	100-j	L/L*100			kg	USAR TABELA	kg	mm				
1		4,5	1192,2	688,3	503,9	2,37	2,47	10,44	85,32	4,25	14,68	71,08	682	1392,64	1,05	1462,28	3,96						
2	3%	4,5	1190,1	690,8	499,3	2,38	2,47	10,52	85,95	3,53	14,05	74,84	595	1214,99	1,04	1263,59	4,36						
3	4,5	6,28	1188,6	690,2	498,4	2,38	2,47	10,52	86,00	3,48	14,00	75,13	640	1306,88	1,02	1333,02	3,24						
M	4,50					2,38	2,47					73,69				1352,96	3,85						
4	4,5	6,18	1185,5	689,5	496,0	2,39	2,48	10,54	85,96	3,50	14,04	75,10	920	1878,64	1,04	1953,79	3,96						
5	4%	4,5	1195,4	698,8	496,6	2,41	2,48	10,62	86,57	2,81	13,43	79,09	675	1378,35	1,05	1447,27	3,57						
6	ro2	4,5	1192,7	691,4	501,3	2,38	2,48	10,50	85,57	3,94	14,43	72,72	785	1602,97	1,05	1683,12	6,74						
M	4,50					2,39	2,48					75,64				1694,72	4,76						
7	4,5	6,13	1193	700,9	492,1	2,42	2,48	10,70	87,06	2,24	12,94	82,65	980	2001,16	1,05	2101,22	5,5						
8	5%	4,5	1186,7	690,2	496,5	2,39	2,48	10,54	85,83	3,62	14,17	74,43	920	1878,64	1	1878,64	5,55						
9	ro2	4,5	1189,1	693,1	496,0	2,40	2,48	10,58	86,09	3,33	13,91	76,05	892	1821,46	1,01	1839,68	3,96						
M	4,50					2,40	2,48					77,71				1939,85	5,00						
10	4,5	6,30	1192	695,6	496,4	2,40	2,48	10,59	86,11	3,29	13,89	76,29	796	1625,43	1,01	1641,69	5,86						
11	6%	4,5	1187,8	693,4	494,4	2,40	2,48	10,60	86,16	3,24	13,84	76,56	780	1592,76	1,02	1624,62	7,5						
12	ro2	4,5	1183,7	694,2	489,5	2,42	2,48	10,67	86,72	2,61	13,28	80,33	817	1668,31	1,02	1701,68	5,5						
M	4,50					2,41	2,48					77,73				1655,99	6,29						

Quadro 7.4 – Planilha de cálculo do ensaio Marshall – Filer Granito com imersão

CORPO DE PROVA - %		% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA		PESO		VOLUME		PESO ESPECÍFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.		ESTABILIDADE			FLUÊNCIA
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v
		cm	g	g	cm ³	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
1	4,5	6,44	1197,6	690,7	506,9	2,36	2,47	10,42	85,19	4,38	14,81	70,40	4,38	944	1927,65	0,98	1889,10	3,96					
2	4,5	6,31	1198,7	692,4	506,3	2,37	2,47	10,45	85,37	4,18	14,63	71,42	4,18	1096	2238,03	1,01	2260,41	4,36					
3	4,5	6,15	1197,6	700,2	497,4	2,41	2,47	10,62	86,82	2,56	13,18	80,61	2,56	943	1925,61	1,05	2021,89	3,24					
M	4,50					2,38	2,47					74,14	3,71				2057,13	3,85					
4	4,5	6,16	1201,4	703,6	497,8	2,41	2,48	10,65	86,80	2,56	13,20	80,64	2,56	830	1694,86	1,05	1779,60	3,96					
5	4,5	6,31	1203,4	697,8	505,6	2,38	2,48	10,50	85,60	3,90	14,40	72,92	3,90	1067	2178,81	1,01	2200,60	3,57					
6	4,5	6,22	1204,5	698,1	506,4	2,38	2,48	10,49	85,54	3,96	14,46	72,58	3,96	1119	2285,00	1,03	2353,55	6,74					
M	4,50					2,39	2,48					75,38	3,47				2111,25	4,76					
7	4,5	6,10	1198,7	698,7	500,0	2,40	2,48	10,58	86,09	3,33	13,91	76,06	3,33	1060	2164,52	1,06	2294,39	5,5					
8	4,5	6,13	1197,5	703,4	494,1	2,42	2,48	10,69	87,03	2,27	12,97	82,47	2,27	968	1976,66	1,05	2075,49	5,55					
9	4,5	6,08	1199,8	698,5	501,3	2,39	2,48	10,56	85,95	3,49	14,05	75,15	3,49	1090	2223,78	1,07	2381,58	3,96					
M	4,50					2,40	2,48					77,89	3,03				2250,49	5,00					
10	4,5	6,17	1194,4	697,2	497,2	2,40	2,48	10,60	86,15	3,25	13,85	76,51	3,25	970	1980,74	1,04	2059,97	5,86					
11	4,5	6,19	1192,9	697,4	495,5	2,41	2,48	10,62	86,33	3,04	13,67	77,72	3,04	1060	2164,52	1,04	2251,10	7,5					
12	4,5	6,14	1193,2	698,7	494,5	2,41	2,48	10,65	86,53	2,82	13,47	79,03	2,82	974	1988,91	1,05	2088,35	5,5					
M	4,50					2,41	2,48					77,75	3,04				2133,14	6,29					

1.1 - ANEXO B

1.1.1 - Ensaio com o auxílio do pórtico de Lottman

Constam planilhas de cálculos resultantes dos experimentos realizados com o auxílio do pórtico de *Lottman*.

Quadro 7.5 -Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Granito com imersão

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Granito com imersão						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	corrigida kgf	r.tração (kgf/cm ²)	r.tração (MPa)
3%	6,2	9,83	528	1078,18	11,271	1,106
4%	6,16	9,55	539	1100,638	11,920	1,170
5%	6,2	9,5	542	1106,764	11,962	1,174
6%	6,18	9,95	525	1072,05	11,099	1,089

Quadro 7.6 -Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Granito sem imersão

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Granito sem imersão						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	corrigida kgf	r.tração (kgf/cm ²)	r.tração (MPa)
3%	6,13	10,6	410	837,22	8,650	0,849
4%	6,07	9,99	457,5	934,215	9,818	0,963
5%	6,11	9,95	550	1123,1	11,761	1,150
6%	6,07	9,96	512,5	1046,525	11,020	1,081

Quadro 7.7 -Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Caulim sem imersão

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Caulim sem imersão						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	corrigida kgf	r.tração (kgf/cm ²)	r.tração (MPa)
3%	6,17	9,99	495	1010,79	10,440	1,025
4%	6,07	9,98	499	1018,958	10,714	1,051
5%	6,04	9,5	550	1123,1	12,471	1,224
6%	6,07	9,95	520	1061,84	11,193	1,098

Quadro 7.8 -Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Granito com imersão

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral - filer Caulim com imersão						
% de filler	h (cm)	d (cm)	leitura kgf	corrigida kgf	r.tração (kgf/cm ²)	r.tração (MPa)
3%	6,09	9,98	565	1153,73	12,085	1,186
4%	6,21	9,98	630	1286,46	13,225	1,298
5%	6,04	9,96	690	1408,98	14,923	1,464
6%	6,07	9,95	550	1123,1	11,838	1,162

Quadro 7.9 - Ensaio de Tração Diametral Modificada de Lottman - Rtc/Rts (%) – fileres Caulim e Granito

Ensaio de Tração diametral Modificada de Lottman - Rtc/Rts (%)		
% de filer	Granito	Caulim
3	88,50	74,88
4	90,06	89,48
5	94,69	93,99
6	96,74	95,94

1.2 - ANEXO C

1.2.1 - Ensaio de sedimentação

Constam planilhas de cálculos e gráficos resultantes do ensaio de sedimentação com o hexametáfosfato.

Quadro 7.10 - Ensaio de sedimentação do filler residuo do caulim

GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO							REGISTRO	
UFCG - CCT - DEC - LABORATÓRIO DE SOLOS II							Nº: 01	
FILLER: RESÍDUO DO CAULIM								
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE HIGROSCÓPICA						RESUMO DA GRANULOMETRIA		
Cap.	Pbh	Pbs	Tara	Pss	Pa	h %	%-Pedregulho > 4,8:	
AL-02	65,12	64,71	13,94	50,77	0,41	0,81	%-Areia grossa:4,8 a 0,84	
AL-31	61,88	61,51	14,25	47,26	0,37	0,78	%-Areia media:0,84 a 0,25	
DADOS				média:		0,80	%-Areia fina:0,25 a 0,05	
Mt - Massa da Amostra Seca ao Ar						1000	%- Silte+Argila:< 0,05	
Ms - Massa Total da Amostra Seca						992,11	Total:	
Mg - Massa do Material Seco, Retido na # 2.0 mm						0,00	Retido entre 2.0 e 0.074	
Mh - Massa Úmida do material para peneiramento fino ou sedimentação						30	Argila < 0.005	
							hig mat. pas. na # 2,00 mm:	0,80
N: % do mat. que passa na # de 2,00 mm				100,00		Massa Especifica dos Grãos do Solo:		2,543

GRANULOMETRIA

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL				PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL					
#	(mm)	Material Retido		(Qg) - % passa da amostra total Qg	# (mm)	Material Retido		(Qf) - % passa da amostra total	
		Massa (g)	Mi (g)			Massa(g)	Mi (g)		
50		0,00	0,00	100,00	1,2	0,00	0,00	100,00	
38		0,00	0,00	100,00	0,6	0,00	0,00	100,00	
25,4		0,00	0,00	100,00	0,42	0,00	0,00	100,00	
19,1		0,00	0,00	100,00	0,25	0,00	0,00	100,00	
9,5		0,00	0,00	100,00	0,15	0,00	0,00	100,00	
4,8		0,00	0,00	100,00	0,074	0,00	0,00	100,00	
2		0,00	0,00	100,00					
Lavar na # 2,0 mm				Sedimentação :		100,0 g	100,0 g	Lavar na # 0,074 mm	
Cáp.Nº:	6	Prov. Nº:	1	Cáp.Nº:	5-04	Dens. Nº:	09195	Cáp.Nº:	AP-01

SEDIMENTAÇÃO

Data	Hora Observada	Tempo Decorrido	L	T (°C)	Ld	a	Diâmetro (mm)	Amostra Total (Qs)	h
22/05/06	07:50:30	0,50	1,018	26	1,0018	15,2	0,073	89,70	8,92
22/05/06	07:51:00	1,00	1,017	26	1,0018	15,4	0,052	84,17	8,92
22/05/06	07:52:00	2,00	1,017	26	1,0018	15,4	0,037	84,17	8,92
22/05/06	07:54:00	4,00	1,017	26	1,0018	14,8	0,025	84,17	8,92
22/05/06	07:58:00	8,00	1,017	26	1,0018	14,8	0,018	84,17	8,92
22/05/06	08:05:00	15,00	1,016	26	1,0018	15	0,013	78,63	8,92
22/05/06	08:20:00	30,00	1,015	26	1,0018	15,2	0,009	73,09	8,92
22/05/06	08:50:00	60,00	1,013	26	1,0018	15,8	0,007	62,02	8,92
22/05/06	09:50:00	120,00	1,011	26	1,0018	16,1	0,005	50,94	8,92
22/05/06	11:50:00	240,00	1,008	26	1,0018	16,9	0,003	34,33	8,92
22/05/06	13:50:00	480,00	1,006	28	1,0014	17,3	0,002	25,47	8,52
23/05/06	07:50:30	1440,00	1,004	26	1,0018	17,8	0,001	12,18	8,92

Quadro 7.11 - Ensaio de sedimentação do filler Serragem de Granito

GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO							REGISTRO
UFCG - CCT - DEC - LABORATÓRIO DE SOLOS II							Nº 02
FILLER: SERRAGEM DE GRANITO							
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE HIGROSCÓPICA						RESUMO DA GRANULOMETRIA	
Cap .	Pbh	Pbs	Tara	Pss	Pa	h %	%-Pedregulho > 4.8:
AL-07	41,41	41,34	14,64	26,70	0,07	0,26	%-Areia grossa: 4.8 a 0.84
AL-32	42,75	42,68	14,21	28,47	0,07	0,25	%-Areia media: 0.84 a 0,25
DADOS				média:		0,25	%-Areia fina: 0,25 a 0,05
Mt - Massa da Amostra Seca ao Ar						1000	%- Silte+Argila:< 0,05
Ms - Massa Total da Amostra Seca						997,47	Total:
Mg - Massa do Material Seco, Retido na # 2.0 mm						0,00	Retido entre 2.0 e 0.074
Mh - Massa Úmida do material para peneiramento fino ou sedimentação						30,00	Argila < 0.005
							hig mat. pas. na # 2,00 mm:
N: % do mat. que passa na # de 2,00 mm				100,00		Massa Especifica dos Grãos do Solo:	

GRANULOMETRIA

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL				PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL					
# (mm)	Material Retido		(Qg) - % passa da amostra total Qg	# (mm)	Material Retido		(Qf) - % passa da amostra total		
	Massa (g)	Mi (g)			Massa(g)	Mi (g)			
50	0,00	0,00	100,00	1,2	0,00	0,00	100,00		
38	0,00	0,00	100,00	0,6	0,00	0,00	100,00		
25,4	0,00	0,00	100,00	0,42	0,00	0,00	100,00		
19,1	0,00	0,00	100,00	0,25	0,00	0,00	100,00		
9,5	0,00	0,00	100,00	0,15	0,00	0,00	100,00		
4,8	0,00	0,00	100,00	0,074	0,00	0,00	100,00		
2	0,00	0,00	100,00						
Lavar na # 2,0 mm		Sedimentação :		100.0 g	100.0 g	Lavar na # 0,074 mm			
Cáp.Nº:	6	Prov. Nº:	1	Cáp.Nº:	5-04	Dens. Nº:	09195	Cáp.Nº:	AP-01

SEDIMENTAÇÃO

Data	Hora Observada	Tempo Decorrido	L	T (°C)	Ld	a	Diâmetro (mm)	Amostra Total (Qs)	h
22/05/06	07:50:30	0,50	1,020	26	1,0023	14,80	0,067	94,15	8,92
22/05/06	07:51:00	1,00	1,019	26	1,0023	15,00	0,048	88,83	8,92
22/05/06	07:52:00	2,00	1,019	26	1,0023	15,00	0,034	88,83	8,92
22/05/06	07:54:00	4,00	1,018	26	1,0023	14,40	0,023	83,51	8,92
22/05/06	07:58:00	8,00	1,015	26	1,0023	15,00	0,017	67,55	8,92
22/05/06	08:05:00	15,00	1,013	26	1,0023	15,60	0,013	56,92	8,92
22/05/06	08:20:00	30,00	1,011	26	1,0023	16,00	0,009	46,28	8,92
22/05/06	08:50:00	60,00	1,008	26	1,0023	16,60	0,006	30,32	8,92
22/05/06	09:50:00	120,00	1,006	27	1,0022	17,20	0,005	20,21	8,92
22/05/06	11:50:00	240,00	1,005	27	1,0022	17,40	0,003	14,89	8,92
22/05/06	13:50:00	480,00	1,004	29	1,0021	17,60	0,002	10,11	8,92
23/05/06	07:50:30	1440,00	1,003	26	1,0023	17,80	0,001	3,72	8,92

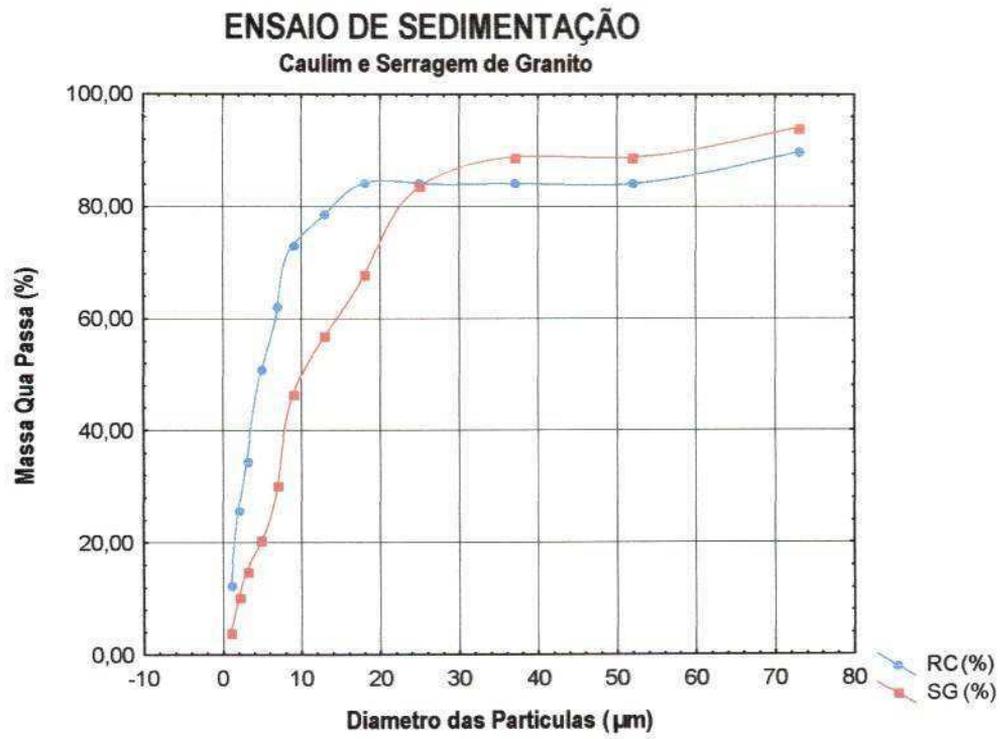


Figura 7.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos filleres obtidas por sedimentação

1.3 - ANEXO D

1.3.1 - Distribuição dos tamanhos das partículas por difração a laser

Constam planilhas de cálculos e gráficos resultantes dos ensaios com o analisador de partículas por difração a laser.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0,04 μ m - 500,00 μ m / 100 Classes

Ref. Da Amostra : R. Caulim
 Type Produit : Argila
 Client : UFCG
 Comentário : Macel

Wallace

Líquido : Água
 Agente Dispersante : Nenhum
 Operador : Heber
 Empresa : UFCG
 Localização : Campina

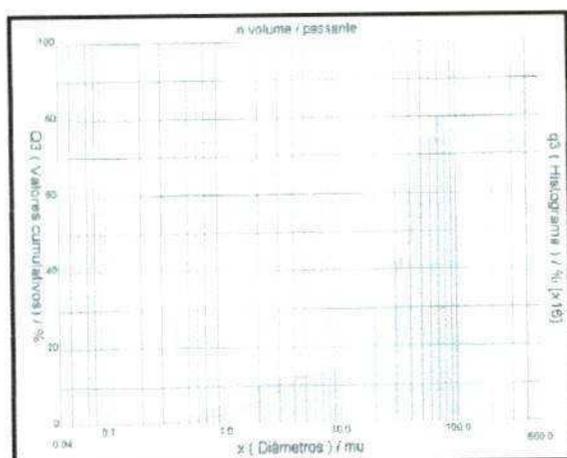
Grande

Ref. Da Amostra : S. Granito
 Type Produit : Argila
 Client : UFCG
 Comentário : Macel

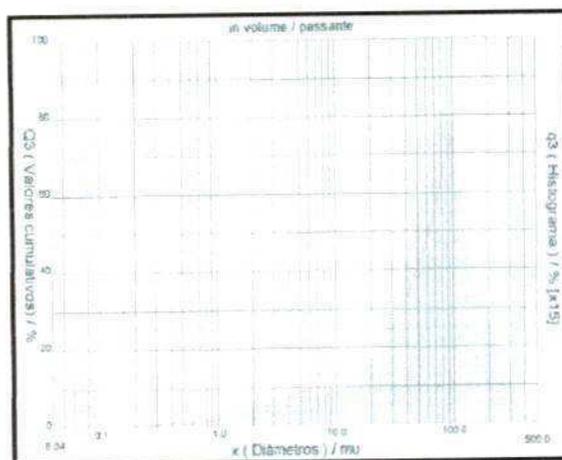
Wallace

Líquido : Água
 Agente Dispersante : Nenhum
 Operador : Heber
 Empresa : UFCG
 Localização : Campina

Grande



(a)



(b)

Figura 7.2 – Distribuição dos tamanhos das partículas do obtida por difração a laser

[(a) resíduo do Caulim (b) serragem de granito)]

1.4 - ANEXO E

1.4.1 - Módulo de Resiliência

Constam as planilhas de cálculo utilizadas no ensaio de Módulo de Resiliência.

Tabela 7.1- Dados do ensaio de Módulo de Resiliência do Caulim – compactador Marshall

Dados	Corpo -de- prova					
	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima	1.608,9	1.905,2	1.915,9	1.888,6	2.120	2.122,9
Desvio padrão de carga	36,41	28,66	28,07	20,8	22,66	20,29
Ciclo de início de cálculo	11	13	16	9	30	14
Ciclo de final de cálculo	93	96	87	99	101	78
Módulo Total - DNIT	7588,7	11652,9	8878,3	6815,3	10849,3	12780,6
Desvio Padrão Módulo Total - DNIT	354,96	741,5	482,89	293,65	522,79	898,86
Módulo Instantâneo - DNIT	10044,1	14026,1	11157,9	9067,8	14634,5	14569,8
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - DNIT	506,27	1130,48	670,59	443,95	711,45	1186,77
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - DNIT$	0,2445	0,1692	0,2043	0,2484	0,2587	0,1228
Módulo Total - NCHRP	7555,5	11687,4	8746,7	6721,3	10675,6	12659,8
Desvio Padrão Módulo Total - NCHRP	431,81	805,62	453,94	285,91	555,92	857,79
Módulo Instantâneo Real - NCHRP	10242,9	13679,8	10881,9	9166,2	16299,8	14377,1
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - NCHRP	741,42	1005,47	723,51	526,16	999,47	999,5
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - NCHRP$	0,2624	0,1456	0,1962	0,2667	0,345	0,1195
Atraso Médio	0,0047	0,0038	0,045	0,048	0,049	0,04
Desvio Padrão do Atraso	0,0034	0,0041	0,0032	0,0026	0,0042	0,0036
% útil do ciclo	95	95	95	95	95	95
% do deslocamento total p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75
% do ciclo p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75

Tabela 7.2- Dados do ensaio de Módulo de Resiliência do Caulim – compactador giratório

Dados	Corpo -de- prova					
	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima	1.240,9	1.295,2	1.221,2	1.385,9	1.414,4	556,8
Desvio padrão de carga	34,97	43,64	31,51	36,75	38,38	30,37
Ciclo de início de cálculo	12	8	10	12	8	9
Ciclo de final de cálculo	81	94	95	90	94	61
Módulo Total – DNIT	5581,1	6669,5	6888,7	6796,7	5037	1544,5
Desvio Padrão Módulo Total – DNIT	299,97	356,65	423,77	372,32	182,17	44,23
Módulo Instantâneo – DNIT	7830,2	9194,5	9595,3	9347,1	7044,2	2118,7
Desvio Padrão Módulo Instantâneo – DNIT	438,27	602,24	762,05	543,7	248,95	62,91
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - DNIT$	0,2872	0,2746	0,2821	0,2729	0,2849	0,271
Módulo Total - NCHRP	5498,5	6547,9	6833,2	6797,8	4946,6	1521,6
Desvio Padrão Módulo Total – NCHRP	284,62	400,38	459,66	434,17	183,48	38,57
Módulo Instantâneo Real – NCHRP	9817,8	10739,6	11120,1	11335,4	8795,8	2613,5
Desvio Padrão Módulo Instantâneo – NCHRP	747,47	997,54	1133,6	1017,03	523,79	114,85
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - NCHRPI$	0,04399	0,3903	0,3855	0,4003	0,4376	0,4178
Atraso Médio	0,054	0,053	0,05	0,054	0,055	0,055
Desvio Padrão do Atraso	0,0035	0,0046	0,0035	0,0036	0,0034	0,0023
% útil do ciclo	95	95	95	95	95	95
% do deslocamento total p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75
% do ciclo p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75

Tabela 7.3- Dados do ensaio de Módulo de Resiliência do Granito – compactador Marshall

Dados	Corpo -de- prova					
	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima	1.431,1	1.674,8	1.629,6	1.624,5	934,6	2.236,7
Desvio padrão de carga	36,73	34,48	31,48	42,66	35,42	30,76
Ciclo de início de cálculo	11	6	14	11	24	26
Ciclo de final de cálculo	96	96	91	98	92	101
Módulo Total – DNIT	5708,1	9471,5	7668,1	6929,1	5737,6	9886,9
Desvio Padrão Módulo Total – DNIT	254,54	565,41	562,41	326,17	314,17	503,04
Módulo Instantâneo – DNIT	7776	12568,8	10562,3	9394,4	8007,8	13194,4
Desvio Padrão Módulo Instantâneo – DNIT	390	818,51	779,73	420,7	571,44	680,1
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - DNIT$	0,2659	0,2464	0,274	0,2624	0,2835	0,2507
Módulo Total – NCHRP	5603,8	9439,1	7613,6	6870,6	5722,2	9802,7
Desvio Padrão Módulo Total – NCHRP	224,81	557,12	577,32	288,4	296,79	409,46
Módulo Instantâneo Real – NCHRP	8884,4	12819,5	12049,6	9895,2	8939,9	13501,7
Desvio Padrão Módulo Instantâneo – NCHRP	542,82	1060,88	1007,32	574,18	846,49	767,08
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - NCHRPI$	0,3693	0,2637	0,3681	0,3057	0,3597	0,274
Atraso Médio	0,052	0,043	0,053	0,049	0,049	0,049
Desvio Padrão do Atraso	0,0031	0,004	0,0034	0,0032	0,0029	0,0036
% útil do ciclo	95	95	95	95	95	95
% do deslocamento total p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75
% do ciclo p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75

Tabela 7.4- Dados do ensaio de Módulo de Resiliência do Granito – compactador Giratório

Dados	Corpo -de- prova					
	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima	1.391,2	1.117,9	1.223,4	1.216,5	942,5	1.243,8
Desvio padrão de carga	43,94	32,37	36,78	42,24	30,3	33,6
Ciclo de início de cálculo	10	5	57	5	14	14
Ciclo de final de cálculo	95	97	98	91	77	85
Módulo Total – DNIT	5608,9	4687	7204,2	5687,3	4138,5	5212,4
Desvio Padrão Módulo Total – DNIT	266,56	233,79	645,98	313,65	222,86	257,22
Módulo Instantâneo – DNIT	7740,2	6498,3	9897	7930,1	5784,7	7392,1
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - DNIT	382,07	359,29	709,84	432,89	338,05	421,14
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - DNIT$	0,2754	0,2787	0,2721	0,2828	0,2846	0,2949
Módulo Total - NCHRP	5484,1	4612,2	7139,1	5607,9	4102,8	5157,2
Desvio Padrão Módulo Total - NCHRP	238,31	226,44	559,17	280,72	214,79	226,41
Módulo Instantâneo Real – NCHRP	8965,3	7854,4	1144934	9129,8	6707,8	9999,2
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - NCHRP	538,96	576,63	1348,42	699,67	485,71	905,47
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - NCHRP$	0,3883	0,4128	0,3765	0,3848	0,3883	0,4842
Atraso Médio	0,054	0,052	0,053	0,054	0,05	0,057
Desvio Padrão do Atraso	0,0033	0,0037	0,0051	0,0036	0,0036	0,0038
% útil do ciclo	95	95	95	95	95	95
% do deslocamento total p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75
% do ciclo p/ cálculo do MR Inst.	75	75	75	75	75	75