

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDROS PLANOS COMO FÍLER EM MISTURAS  
ASFÁLTICAS - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS

Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Campina Grande

dezembro/2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDROS PLANOS COMO FÍLER EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E  
MECÂNICAS

Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e Engenharia de  
Materiais como requisito parcial à obtenção do  
título de MESTRE EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientadora: Dra. Crislene Rodrigues da Silva Morais

Co-orientador: Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande

Dezembro/2008

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

L935u  
2008

Lucena. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes.

Utilização de resíduos de vidros planos com fíler em misturas asfálticas – propriedades físico-químicas e mecânicas / Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena.— Campina Grande. 2008.

123 f. : il. color

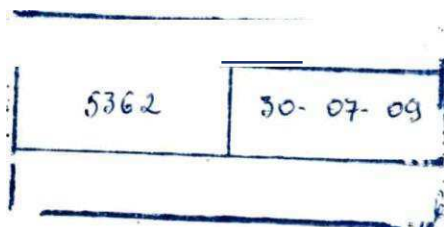
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientação: Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Morais, Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

1. Fíler. 2. Resíduos. 3. Susceptibilidade. I. Morais, Crislene Rodrigues da Silva. II. Rodrigues, John Kennedy Guedes. III. Título.

CDU 625.85(043)



# FOLHA DE APROVAÇÃO

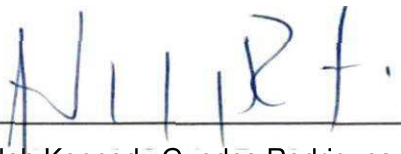
Autor: Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Título: Utilização de resíduos de vidros planos com fíler em misturas asfálticas – propriedades físico-químicas e mecânicas

Dissertação defendida em: 24/04/2009

Banca Examinadora

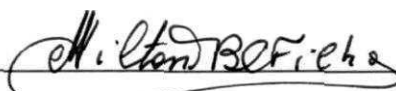
(Assinatura):



Prof. D.5c. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG/DEC

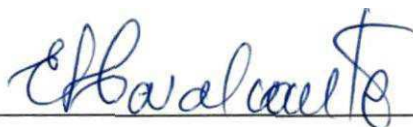
(Assinatura):



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 - UFSfDEC

(Assinatura):



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

Escola de Engenharia de Séo Carlos / Universidade de São Paulo - EESC/USP

“Valeu a pena? Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena.  
Quem quer passar além do Bojador  
Tem que passar além da dor.  
Deus ao mar o perigo e o abismo deu,  
Mas nele é que espelhou o céu.”

(Fernando Pessoa)

## DEDICATÓRIA

Às razões da minha vida:

-A meus pais, Analúcia e Lucena, por todo o amor incondicional, apoio e orientação;

-Aos meus irmãos, Adriano e Luciana, por todo o companheirismo e ajuda;

## VITAE DO CANDIDATO

- Engenheira Civil pela UFCG (2007)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de misericórdia e iluminação, força constante nos momentos de dor e angústia.

A orientadora Crislene Rodrigues da Silva Moraes pelos ensinamentos, orientação, apoio e incentivo durante todo o período de dissertação.

Ao orientador John Kennedy Guedes Rodrigues pelos conhecimentos transmitidos desde da graduação em engenharia, pelo direcionamento e orientação deste trabalho, pelo apoio, estímulo e atenção.

As professoras Soraya Alves de Moraes e Lisiane Navarro de Lima Santana pelo tempo dedicado à apreciação dessa dissertação e oportunas sugestões.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais: Márcia, Geraldo e Ananias pois em algum momento deram sua contribuição na realização deste trabalho;

A Associação Técnico-Científica Ernesto Luís de Oliveira Júnior- ATECEL pela disponibilização de toda infra-estrutura, materiais e funcionários para a realização dos ensaios desta pesquisa.

Aos funcionários da ATECEL por toda a ajuda na realização dos ensaios e amizade.

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.

A minha irmã Luciana Lucena pelo usucapião do seu computador.

As amigas de curso Louise Brasileiro e Vera Freitas pela amizade demonstrada em diversas ocasiões.

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

## UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDROS PLANOS COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS

### RESUMO

O desenvolvimento tecnológico trouxe como conseqüência a geração de resíduos industriais e a escassez de matérias primas. Uma das soluções viáveis e aplicadas em todo mundo para minimizar a geração de resíduos é sua utilização de resíduos na cadeia produtiva economizando o uso dos materiais convencionais e minimizando o volume de resíduos lançados nos lixões e aterros das cidades. Os cacos de vidro são produtos considerados 100% recicláveis, todavia a categoria de vidro plano não é utilizada para este fim, pois pode induzir o aparecimento de trincas no objeto reciclado. Por este motivo são lançadas toneladas de vidro diariamente em terrenos baldios e lixões. O resíduo vítreo além de ocupar volume e reduzir a vida útil do local, pode provocar ferimentos nas pessoas que freqüentam os lixões e aterros, tornando uma porta de entrada para os microorganismos presentes no resto dos resíduos existentes no local. Uma das formas encontradas para utilização do resíduo do vidro plano foi sua utilização como fíler em misturas asfálticas. A caracterização do resíduo comprovou que trata-se de um material composto predominantemente de sílica, o que o torna eletricamente neutro, com elevado ponto de fusão, alta viscosidade, além de produzir materiais com elevada resistência mecânica. Por meio da realização do ensaio Marshall e do ensaio de tração diametral por compressão indireta avaliou-se como satisfatória a atuação do resíduo vítreo como fíler, uma vez que os resultados dos parâmetros observados atendem as recomendações impostas pelas normas do Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte - DNIT. Os resultados apresentados pelo ensaio de Lottman mostraram bons resultados de razão de resistência à tração, ficando acima do valor mínimo de 0,80, recomendado pelo Superior Performing Asphalt Pavements - SUPERPAVE. O ensaio de módulo de resiliência comprovou os resultados obtidos nos demais ensaios.



## ABSTRACT

The main consequences of the technological development are the generation of industrial residues and the scarcity of raw materials. The utilization of residues in the productive chains has been used in the whole world as a viable solution to reduce the quantity of residues, thus economizing the use of conventional materials and minimizing the amount of residues launched in urban garbage dumps and landfills. The shard glasses are considered to be 100% recyclable, although the plain glasses are not used to these purposes once they can induce cracks in the produced recycled object. Thus, tons of glasses are thrown away into the garbage dumps and vacant lots. The glass residues beyond the high volume they occupy in the landfills and garbage which consequently reduces the lifespan of these places, can lesion the people which manipulate these residues, turning these lesions into a portal of entry of the existent microorganisms. The utilization as a filler in asphaltic mixtures is one of the applications suggested to the residue of plain glasses. The residue's characterization showed that the shards are basically silica composites, what make's then to be electrically neutral, with a high fusion point, high viscosity and produces materials with a high strength. Through the Marshall Immersion Test and of the Tension Test, it can be concluded that the residues can satisfactorily act as a filler, once the results of the observed parameters reaches the recommendations of the norms of the Infrastructure and Transports National Department – DNIT. The achieved results with the Lottman test presented a high tensile strength ratio, with a value superior to the minimum value of 0,80 recommended by the Superior Performing Asphalt Pavements- SUPERPAVE. The resilient modulus test attested the achieved results of the other tests.

## PUBLICAÇÕES

LUCENA, L. C. de F. L. ; MORAIS, C. R. S. ; RODRIGUES, J. K. G. ; LUCENA, A. E. de F. L. ; LUCENA, L. de F. L. . Utilização de Resíduo Vítreo como filer em Misturas Asfálticas. In: Reunião Anual de Pavimentação. Anais Recife- PE. Setembro, 2008.

LUCENA, L. C. de F. L. ; MORAIS, C. R. S. ; RODRIGUES, J. K. G. ; LUCENA, A. E. de F. L. ; LUCENA, L. de F. L. . Utilização de Resíduo Vítreo para diminuir a susceptibilidades de misturas asfálticas a presença de água.. In: 18 CBECiMat- Congresso brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais Anais. Porto de Galinhas-PE. Novembro, 2008.

## SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	17
1.2 Introdução .....	18
1.1 Objetivos .....	20
	21
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	
2.1 Desenvolvimento Sustentável .....	22
2.2. Resíduos .....	24
2.3 Vidro.....	27
2.3.1 Vidro Plano.....	29
2.4 Misturas Asfálticas.....	31
2.4.1 Propriedades das misturas asfálticas .....	31
2.4.2 Susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água.....	32
2.4.2.1 Deteriorações no revestimento devido à presença de água.....	36
2.4.2.2 Ensaio para avaliar a susceptibilidade de misturas asfálticas a presença de água.....	42
2.4.2.3 Tratamentos .....	49
3.0 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	55
3.1 Materiais.....	57
3.1.1 Agregados Graúdos .....	57
3.1.2 Agregados Miúdos .....	58
3.1.3 Resíduo Vítreo .....	58
3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	60
3.2 Métodos.....	61
3.2.1 Ensaio de Caracterização.....	61
3.2.1.1 Massa Específica .....	61
3.2.1.2 Análise Granulométrica .....	61
3.2.1.3 Análise química .....	62
3.2.1.4 Análise térmica.....	62
3.2.1.4 Difração de Raios-X .....	63
3.2.1.5 Espectroscopia de infravermelho .....	63
3.2.1.6 Ensaio com o Cimento Asfáltico de petróleo .....	64
3.2.2 Ensaio Mecânicos .....	64
3.2.2.1 Viscosidade Saybolt- Furol.....	64
3.2.2.2 Ensaio Marshall.....	64
3.2.2.3 Ensaio de Compressão Diametral.....	66
3.2.2.4 Ensaio de Lottman .....	66
3.2.2.5 Ensaio de Módulo de Resiliência .....	68
4.0 RESULTADOS .....	71
4.1 Caracterização dos Materiais .....	72
4.1.1 Massa Específica .....	72
4.1.2 Distribuição dos tamanhos dos grãos dos fíleres .....	72
4.1.3 Análise Química .....	73
4.1.4 Análise Térmica.....	74
4.1.5 Difração de Raios-X .....	75
4.1.6 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (IR) .....	76

4.1.7 Ensaio de caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	76
4.2 Ensaios com cimento asfáltico de petróleo e fíler.....	77
4.3 Ensaios com misturas de agregados graúdo e miúdo, fíleres e CAP.....	78
4.3.1 Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados e dos fíleres .....	78
4.3.2 Ensaio Marshall.....	80
4.3.2.1 Estabilidade.....	80
4.3.2.2 Relação Betume/ Vazios .....	81
4.3.2.3 Vazios.....	82
4.3.3.4 Vazios do agregado Mineral –VAM .....	83
4.3.3 Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral .....	84
4.3.4 Ensaio de Lottman.....	86
4.3.5 Ensaio de módulo de resiliência.....	87
4.4 Considerações finais .....	91
5.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .....	93
5.1 Conclusões.....	94
5.2 Sugestões de pesquisas futuras .....	95
6.0 REFERÊNCIAS.....	97
7.0 ANEXO.....	109

## LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1-	Roteiro para identificação de problemas de falha de adesividade .....	38
Fluxograma 2-	Fluxograma de Trabalho.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Composição de vidros comerciais.....	28	Tabela
2-	Ensaio de sensibilidade a umidade em agregado solto.....	42	Tabela 3-
	Ensaio de sensibilidade a umidade em misturas compactadas....	42	Tabela 4-
	Vantagens e limitações do ensaio Marshall.....	47	
Tabela 5-	Características do cimento asfáltico.....	60	
Tabela 6-	Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização do CAP.....	64	
Tabela 7-	Análise Química das matérias-primas e do resíduo vítreo.....	73	
Tabela 8-	Caracterização do CAP utilizado na pesquisa.....	77	
Tabela 9-	Distribuição dos tamanhos das partículas na elaboração do traço.....	79	
Tabela 10-	Requisitos do VAM .....	84	
Tabela 11-	Dados de VAM.....	84	
Tabela 12-	Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento .....	89	
Tabela 13-	Propriedades mecânicas: estabilidade, tração diametral indireta e relação da resistência á tração (RRT) para o teor de 5% de fíleres .....	92	
Tabela 14-	Ensaio com o auxílio do pórtico de Lottman.....	112	
Tabela 15-	Ensaio Marshall (sem imersão).....	114	
Tabela 16-	Ensaio Marshall (com imersão).....	115	
Tabela 17-	Dados do VAM .....	116	
Tabela 18-	Dados do ensaio de módulo de resiliência.....	121	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Resíduos depositados no lixão.....	26
Figura 2-	Ilustração do mecanismo de desgastes devido a susceptibilidade.....	33
Figura 3-	Trinca em forma de couro de jacaré .....	39
Figura 4-	Exsudação .....	40
Figura 5-	Panelas de deterioração.....	40
Figura 6-	Desagregação.....	41
Figura 7-	Afundamento de trilha de roda.....	41
Figura 8-	Esquema do ensaio de Lottman.....	43
Figura 9-	Evolução do módulo de resiliência em diferentes níveis de saturação.....	45
Figura 10-	Ilustração do ensaio de compressão diametral e estado de tensões gerado.....	46
Figura 11-	Esquema representativo do ensaio Marshall.....	48
Figura 12-	Esquema do ensaio de compressão diametral.....	49
Figura 13-	Agregado do tipo granítico – Brita 19 ou ¾”.....	57
Figura 14-	Agregado do tipo quartzoso.....	58
Figura 15-	Pó de Pedra.....	58
Figura 16-	Vidro Plano.....	59
Figura 17-	Apiloamento do vidro.....	59
Figura 18-	Moinho de bolas.....	60
Figura 19-	Cimento asfáltico de petróleo utilizado na pesquisa (CAP).....	60
Figura 20-	Equipamento utilizado para realização do ensaio de difração a laser.....	62
Figura 21-	Equipamentos utilizados para realização do ensaio de difração de raios-x.....	63
Figura 22-	Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova.....	65
Figura 23-	Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall.....	65
Figura 24-	Equipamentos utilizados para realização do ensaio de tração.....	67
Figura 25-	Equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência (a) Corpo-de-prova com LVDTs (b) equipamento.....	69
Figura 26-	Software do ensaio de módulo de resiliência (a) processamento dos dados (b) cálculo do MR.....	70
Figura 27-	Distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo do Vidro obtida por difração a laser.....	73
Figura 28-	Curva de ATD.....	74
Figura 29-	Curva de TG.....	75
Figura 30-	Difratograma de Raios-X da amostra de resíduo de vítreo com varredura de $2^\circ < 2\theta < 80^\circ$ .....	75
Figura 31-	Espectro no infravermelho da amostra de resíduo de vidro plano..	76
Figura 32-	Valores de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fíleres cal e resíduo em função do incremento da relação fíler/CAP50/70 sobre amostra do ensaio.....	78
Figura 33-	Curva de distribuição granulométrica – agregados.....	79
Figura 34-	Curva de distribuição granulométrica.....	80

Figura 35-	Estabilidade Marshall.....	81
Figura 36-	Relação betume/vazios Marshall.....	82
Figura 37-	Vazios Marshall.....	83
Figura 38-	Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão.....	85
Figura 39-	Relação da resistência retida à tração.....	86
Figura 40-	Módulo de resiliência para a percentagem de 4% de fíler em misturas com condicionamento e sem condicionamento.....	87
Figura 41-	Resultados do módulo de resiliência de todas misturas agrupados por temperatura (25°C).....	88
Figura42-	Relação de módulo de resiliência total e instantâneo para a percentagem de 4% de fíler.....	90
Figura 43-	Relação de módulo de resiliência total de acordo com a AASHTO e a NCHRP para a percentagem de 4% de fíler.....	91
Figura 44-	Distribuição dos tamanhos das partículas do obtida por difração à laser.....	118
Figura 45-	Distribuição dos tamanhos das partículas do obtida por difração à laser-dados.....	119



## SÍMBOLOS E ABREVIações

\$ <sub>f</sub>	Fração Volumétrica de “Filler”.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials e American
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luís de Oliveira Júnior
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
TG	Termogravimetria
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo.
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
DTA	Análise Térmica Diferencial.
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.
DNP	Departamento Nacional de Petróleo.
DRX	Difração de Raios-X.
EPA	Environmental Protection Agency.
NBR	Norma Brasileira Registrada.
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements

CAPÍTULO 1  
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 Introdução

A necessidade do desenvolvimento sustentável em favor da preservação dos recursos naturais tem levado a pesquisa da reutilização de materiais, anteriormente descartados no meio ambiente, em diversas cadeias produtivas.

A preocupação com os resíduos oriundos das atividades industriais e a sua inserção, novamente, no ciclo produtivo é uma atividade recente no Brasil, ao contrário do que ocorre em países como os Estados Unidos e países europeus como a Alemanha e a Holanda que fazem uso desta prática desde a década de 60.

A adoção de uma política de incentivo para o reaproveitamento dos resíduos desperdiçados pelas obras civis pode reduzir a quantidade de matérias-primas extraídas das jazidas e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental pela reutilização e reciclagem dos rejeitos minerais (OLIVEIRA, 2002).

Os materiais reutilizados devem agregar aos produtos propriedades mecânicas, físicas e químicas similares àquelas obtidas quando utilizados os materiais convencionais. Uma das linhas de utilização dos resíduos industriais é a pavimentação.

A malha rodoviária brasileira constitui a principal via de circulação de bens e pessoas do país. Dentre os 1.670.000 km existentes, apenas 8% são pavimentadas. A grande maioria das rodovias pavimentadas no Brasil é de recobrimento asfáltico (LEITE apud SILVA et al., 2002).

Apesar da grande relevância que este tipo de malha tem para o crescimento econômico do país, as rodovias, sejam estaduais ou federais, encontram-se em estado precário acarretando riscos aos seus usuários, bem como dispêndio financeiro aos órgãos administrativos com suas constantes manutenções.

De acordo com Pinheiro (2004) a péssima situação da malha rodoviária brasileira pode ser atribuída a diversos fatores além do revestimento em si, como a falta de manutenção, sobrecarga de caminhões, fundações não

apropriadas, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria inadequada, má sinalização, má execução, etc.

A falta de um adequado sistema de drenagem ou a adoção de mecanismos que evitem a presença de água no interior das misturas asfálticas contribuem para o aparecimento de defeitos nos pavimentos como trincas, afundamento de trilha de roda, exsudação, buracos, desagregação, entre outros.

O crescente número de veículos pesados com excesso de carga, devido a inexistência de balanças nas rodovias, aliados a susceptibilidade das misturas asfálticas a presença de água pode vir a prejudicar a vida útil do pavimento podendo levar a ruína em apenas dois anos um pavimento projetado para durar dez anos.

Um dos meios de minimizar os danos provocados por este agente é a adoção de fíler nas misturas, melhorando assim o desempenho reológico, mecânico, térmico e a susceptibilidade à presença da água. Entre os fíleres comumente utilizados encontram-se a cal e o cimento Portland .

A substituição dos fíleres 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.

Apesar de o vidro ser 100% reciclável ele é não-biodegradável o que provoca um grande problema ambiental quando simplesmente descartado, pois ocorre o acúmulo de grande quantidade desse material que não é degradado pela natureza em aterros sanitário ( VASQUES et al., 2006).

O vidro plano por possuir composição química diferente e menor demanda do que os vidros de embalagens, não são considerados recicláveis, pois pode induzir o aparecimento de trincas nos materiais reciclados.

A utilização do resíduo de vidro plano como fíler em misturas asfálticas é uma alternativa que deve ser estudada.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo Geral

Este trabalho teve por objetivo analisar o comportamento de misturas asfálticas que utilizam o resíduo de vidro plano como fíler em relação a susceptibilidade da água.

### Objetivos Específicos

- realizar a caracterização química e física dos componentes da mistura asfáltica (cal, agregado miúdo e graúdo, CAP e o resíduo vítreo);
- avaliar o uso de fíleres convencionais e do resíduo vítreo como forma de minimizar os danos devido a susceptibilidade à presença de água;
- analisar o comportamento de misturas asfálticas submetidas ou não à presença de água, observando a tendência ao aparecimento de fissuras devido à fadiga.

CAPÍTULO 2  
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Desenvolvimento Sustentável

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).

Na concepção de Ferreira (2003) o processo de gestão ambiental leva em consideração todas aquelas variáveis de um processo de gestão, tais como o estabelecimento de políticas, planejamento, um plano de ação, alocação de recursos, determinação de responsabilidades, decisão, coordenação, controle, entre outros, visando principalmente ao desenvolvimento sustentável. Uma decisão ambiental, em seus diversos níveis, envolve variáveis complexas e alternativas de ação nem sempre fácil de aceitação pelos sócios, conselheiros ou pelas diretorias.

Os impactos ambientais ocasionados pela ação do homem sobre a natureza vem crescendo vertiginosamente nos últimos anos em decorrência do desenvolvimento tecnológico. Como consequência, ocorre um aumento no consumo de matérias-primas e na produção de resíduos sólidos. Estes resíduos são responsáveis pela poluição do meio ambiente devido ao acúmulo de materiais não biodegradáveis que podem trazer riscos as pessoas que os manipulam sem equipamentos de segurança.

Com o desenvolvimento industrial e de novas tecnologias, o crescimento e concentração populacional 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 devido ao volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de 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 (ÂNGULO et al., 2001).

Uma solução viável, no que concerne a destinação adequada dos resíduos gerados na construção civil, são as técnicas de reciclagem. Estas resolvem problemas, como :

- escassez de materiais naturais com as características adequadas, devido à forte utilização das pedreiras junto das obras;
- a legislação ambiental cada vez mais exigente, no que se refere à colocação em depósito dos resíduos da construção;
- elevado custo da energia que propicia a redução do seu consumo;

Paiva & Ribeiro (2005), definem a reciclagem como todas as ações que tenham como objetivo permitir a reutilização de materiais e/ou produtos, de modo a estender seu ciclo de vida e diminuir os problemas com a forma de disposição dos resíduos ou de emissão de poluentes, são consideradas atividades de reciclagem. Eles relatam ainda que nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações. A cadeia produtiva da construção civil, também denominada “construbusiness”, apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo e que qualquer sociedade seriamente preocupada com esta questão deve colocar o aperfeiçoamento da construção civil como prioridade.

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: o esgotamento 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 & LEIS, 1994).

A técnica de se reutilizar materiais em misturas asfálticas é mais recente, mas não menos importante. Com a promoção da reutilização nestas pode-se evitar a exploração excessiva de jazidas minerais, já tão escassas em



algumas regiões do país, principalmente perto dos grandes centros urbanos (CASTRO, 2003).

## 2.2 Resíduos

A associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), segundo diretrizes da NBR 10004/2004 define resíduos sólidos como:

“São considerados resíduos sólidos industriais, os resíduos em estado sólido e semi-sólido que resultam da atividade industrial, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas residuárias, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água”.

Concomitante ao desenvolvimento industrial e a crescente urbanização surgiu a problemática da geração de resíduos principalmente os de difícil degradação. Tal fato tem gerado preocupações nos pesquisadores ambientais, 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 a população.

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.

De acordo com Lima (2003) para atender as exigências, contidas nas leis ambientais e defendidas pelos movimentos ecológicos existentes em todo mundo, no que se refere ao manejo ambiental e do gerenciamento de resíduos sólidos decorrentes das atividades industriais, diversos empresários têm procurado obedecer a estas para evitar multas devido a danos ecológicos.

Algumas empresas procuram diminuir a poluição provocada por efluentes industriais utilizando tecnologias de tratamentos de despejos. Apesar de esta medida ser eficaz, seu custo é relativamente elevado e tende a aumentar à proporção que as instalações envelhecem.

Estas tecnologias podem ser substituídas pela busca de soluções internas para a poluição gerada nos processos de fabricação por meio da

adoção de “práticas Limpas”. Esta é definida como a introdução de um processo menos poluidor, ou a recuperação de matéria prima perdida e recirculada na fabricação, ou ainda a valorização de um resíduo que poderá dar origem a um subproduto (MARTINS ,1997).

Um dos métodos que está sendo colocado em prática em todo o mundo é a utilização de resíduos sólidos industriais em mistura asfáltica. De acordo com suas dimensões e propriedades estes podem substituir os agregados ou fíleres convencionais sem alterar o comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas.

A ABNT lançou em 1987, e atualizou em 2004, um conjunto de normas para padronizar, em nível nacional, a classificação de resíduos. A NBR10004 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 o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Entre os aspectos que conferem periculosidade ao resíduo pode-se citar a inflamabilidade, a corrosividade, a reatividade, a toxicidade e a 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 desionizada, a 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 Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000), constatou que no Brasil são produzidos diariamente cerca de 126 mil toneladas de resíduos sólidos. Quanto à disposição final o mesmo estudo identificou que 63,6% dos municípios brasileiros depositam seus resíduos sólidos em "lixões", 18,4% dispõem tais resíduos em aterros controlados e que apenas 13,8% utilizam aterros sanitários. A destinação final de resíduos sólidos é, portanto, um problema que a maioria dos municípios brasileiros enfrenta sem a adequada solução (OLIVEIRA, 2007).

Os lixões não são uma maneira correta de se dispor o lixo, são depósitos a céu aberto, mantidos em grandes áreas, normalmente afastados dos centros urbanos, cuja área apresenta resíduos de toda natureza. Nos lixões, dezenas de pessoas disputam restos que possam ser reaproveitados, garantindo o mínimo necessário à sobrevivência. Adultos, crianças e animais domésticos misturam-se aos detritos, criando um ambiente favorável à disseminação de doenças (NEDER, 1995 apud OLIVEIRA, 2007) (Figura 1).



Figura 1- Resíduos sólidos no lixão

Fonte: Pesquisa direta, 2008

A disposição de resíduos sólidos sem tratamento não pode continuar sendo vista como a solução mais adequada, pois quando estes são estocados em aterros sanitários e lixões, eles roubam espaço físico, degradam a natureza

e apresentam risco permanente de contaminação do meio ambiente (SAUTEREY, 1978 apud NASCIMENTO et. al., 2006).

Dentre os materiais presentes na composição de lixo urbano, os resíduos vítreos, conhecidos como “cacos de vidro”, representam em média 3% dos resíduos sólidos. O Brasil produz em média 800 mil toneladas de vidro por ano, sendo que desse total 220.000t /ano são recicladas, o que corresponde a 27,6% do total gerado, este índice de reciclagem de vidro tem crescido a cada ano, em 2006 este percentual chegou a alcançar 45% (ABIVIDRO, 2006).

### 2.3 Vidro

Segundo Zanotto (1989) vidros são materiais de estrutura desordenada que apresentam o fenômeno de transição vítrea. O vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, obtida através do resfriamento de uma massa a base de sílica em fusão.

De acordo com Reuter (1994), vidro é um material transparente ou translúcido, liso e brilhante, duro e frágil obtido pela associação e fusão de substâncias minerais que não se cristalizam na solidificação.

Os vidros podem ser classificados quanto a sua finalidade ou devido a sua composição química.

Quanto a sua finalidade de uso, eles podem ser vidros para embalagem (garrafas, potes, frascos,...), vidro plano (janelas, portas, fachadas, automóveis), vidros domésticos (tigelas, travessas, copos, pratos,...) e vidros técnicos (lâmpadas, tubos de TV, vidros para laboratório entre outros).

Quanto a sua composição química temos:

- Silica vítrea – é obtida pelo aquecimento da areia de sílica ou cristais de quartzo.
- Silicatos alcalinos - os óxidos alcalinos são incorporados nas composições dos vidros como carbonatos.
- Vidros sodo-cálcicos - apresentam entre 8 e 12 por cento em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17 por cento de óxido alcalino (principalmente óxido de sódio). Usualmente, existe uma pequena quantidade de alumina (0,6 a 2,5%) para aumentar a durabilidade química.

- Vidros de chumbo – este tipo de vidro apresenta óxido de chumbo (na sua formulação) ;
- Vidros borossilicatos – a presença de boro diminui a coesão tridimensional da estrutura de vidros ao silicato. Devido a isso, este é freqüentemente usado como fluxo em substituição aos óxidos alcalinos;
- Vidros alumino-silicatos – é adicionada a alumina (óxido de alumínio) em uma formulação de vidro silicato alcalino.

Akerman (2006) apresenta na Tabela 1 composições típicas de diversos vidros comerciais.

Tabela 1 - Composição de vidros comerciais

		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	PbO
Sodo-cálcicos	Embalagem	72,0	2,0	-	12,5	1,0	11,0	1,5	-
	Plano	71,0	1,0	-	13,5	0,5	10,0	4,0	-
	Lâmpada	73,0	1,0	-	16,5	0,5	5,0	4,0	-
Borossilicato	Pyrex	79,0	2,0	13,0	5,5	-	-	-	-
	Fibra isolamento	66,0	1,5	3,5	15,5	1,0	8,0	4,0	-
Chumbo	Cristal	56,0	-	-	4,0	12,0	2,0	2,0	24,0
	Néon	63,0	1,0	-	8,0	6,0	-	-	22,0
	Lente	32,0	-	-	1,0	2,0	-	-	65,0
Aluminoborossilicato	Farmacêutico	72,0	6,0	11,0	7,0	1,0	1,0	-	-
	Fibra reforço	55,0	15,0	7,0	-	-	19,0	4,0	-
	Tubo combustão	62,0	17,0	5,0	1,0	-	8,0	7,0	-

Fonte: Akerman (2006)

Segundo dados da ABIVIDRO (2006) são produzidas 2.130 toneladas de vidro por ano no Brasil. Todavia, apenas 43% destes sofrem um processo de reutilização, enquanto em países da Europa esse percentual atinge 75%.

A reciclagem do resíduo do vidro consiste em utilizar os que já foram descartados como fonte de manufatura de novos materiais. Esses sistemas de tratamento de resíduos sólidos contribuem para preservar os recursos naturais e diminuir a poluição (OLIVEIRA, 2007).

Apesar de o vidro ser um resíduo sólido classificado pela NBR 10004 como pertencente à classe 2B- inerte (não poluente), ele não é biodegradável, ou seja, é um material que não se decompõe, ficando no meio ambiente por tempo indeterminado, reduzindo assim a vida útil de vários lixões e aterros sanitários em função de uma ocupação volumétrica muito elevada .

O vidro é um material inorgânico e que não entra em combustão, o vidro não produz alterações biológicas ou de contaminação da atmosfera quando da sua incineração. A sua degradação química e a erosão física são muito lentas e inóculas em termos ambientais. Por outro lado, a demora da biodegradação do vidro, quando exposto ao meio ambiente, pode ser associada a um aspecto negativo deste material (LIMA & ROMEIRO FILHO, 2001).

Embora os resíduos de vidro não seja o lixo mais incômodo, sob o ponto de vista da toxicidade, ele necessita de atenção devido ao seu volume crescente e requer soluções. Estes são simplesmente lançados, de maneira aleatória e irregular na beira de estradas, em terrenos ou nos lixões da cidade podendo provocar ferimentos e doenças nas pessoas que os manipulam.

Essa disposição inadequada acarreta uma série de problemas para a população que retira dos lixões e aterros o seu sustento. Os “cacos de vidro” apresentam um perigo a saúde das pessoas uma vez que podem provocar cortes profundos, ou seja uma porta de entrada de microorganismos patogênicos presentes no local.

### 2.3.1 Vidro Plano

O vidro plano é uma mistura (fundida e transformada em massa homogênea a 1.600°C) de aproximadamente 70% de sílica ou areia, o agente vitrificador, e outros 30% de sódio, magnésio, alumina, potássio e cálcio, dessa mistura original saem produtos de vidro plano. Esses vidros podem ser classificados em muitas categorias, segundo diferentes critérios técnicos, como, por exemplo, o processo de produção, o acabamento, o nível de transparência, a coloração e assim por diante. São hoje algumas dezenas de produtos, dos temperados para boxes, portas e janelas aos laminados para os setores automotivo e de arquitetura, dos refletivos para construção civil aos espelhos para o setor moveleiro e aos térmicos para a indústria de eletrodomésticos (PILKINGTON, 2008).

O processo de conformação do vidro plano temperado consiste em aquecer o vidro a alta temperatura em forno adequado e resfriá-lo bruscamente por meio de jatos de ar. Como o vidro é um mau condutor de calor as superfícies externas se resfriam e se contraem, enquanto que o seu interior permanece fluido a altas temperaturas. Na medida em que a massa é resfriada

ela tende a se contrair, o que é impedido pelas partes externas que já estão rígidas. Quando a temperatura do vidro se equilibra com a do ambiente desenvolvem-se tensões de compressão na superfície e de tração na parte interna. Estas tensões conferem ao Vidro Temperado uma resistência a esforços mecânicos cinco vezes maior do que a de um vidro comum submetido às mesmas condições.

Apesar do vidro ser 100% reciclável, os vidros planos não se enquadram nesta categoria pois podem induzir o aparecimento de trincas nos produtos reciclados.

O vidro plano por possuir composição química diferente e menor demanda do que os vidros de embalagens, não são considerados recicláveis, no entanto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com resultados satisfatórios para a sua reciclagem, tais como: isolante térmico; substituição de cascalho na pavimentação asfáltica; uso de material fragmentado como substrato para sustentação de raízes e meio de retenção de água em hidroponia (ASSIS, 2006).

O reuso de agregados primários ou o uso de resíduo de materiais na pavimentação asfáltica tem acarretado grande benefício à sociedade. Agregados provenientes do ferro e do aço ou do vidro moído têm sido considerados bons substitutos dos agregados convencionais, pois apresentam comportamento físico semelhante e podem ser facilmente processados, britados e reduzidos a tamanhos adequados à produção de misturas asfálticas de base e de revestimento (AIREY et. al., 2004).

Os resíduos gerados durante o processamento de vidros planos acarretam um desperdício de material que poderia ser utilizado como fíler ou material de drenagem, todavia este vem sendo utilizado como agregado em misturas asfálticas (AYREI et. al., 2004).

Pesquisas recentes apontam várias alternativas tecnológicas para reciclagem desses materiais, como exemplos têm a incorporação de resíduo de vidro a produtos fabricados à base de argila. Esta é uma alternativa considerada natural, devido à compatibilidade entre a composição química destes produtos. O resíduo vítreo é um material facilmente acessível, e seu uso em uma formulação de massa cerâmica em substituição ao feldspato, conduz a uma forte redução da temperatura de fusão destas. Outra vantagem importante

do uso de caco de vidro é seu baixo nível de óxidos corantes como o ferro, o que promove uma brancura excelente aos produtos (RICCO,1993 apud NASCIMENTO, et. al., 2006 ).

Roberts et al. (1996) relata que na década de 70 foram realizados ensaios em laboratório e em campo, nos Estados Unidos e Canadá, para avaliar a incorporação de vidro como agregado em misturas asfálticas. Em campo, a mistura asfáltica foi aplicada em 45 cidades com baixo volume de tráfego. Os resultados indicaram como eficiente a utilização do vidro como agregado, todavia limitaram que estes teriam que passar na peneira 3/8 (9,5 mm) para serem utilizados para tal finalidade.

## 2.4 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas são materiais de pavimentação constituído de ligante asfáltico e agregado mineral. Como elas contém tanto agregado mineral e ligante asfáltico, o comportamento da mistura é afetado pelas propriedades de seus componentes individuais, e pela relação entre eles (LEITE, 1996).

Davila (2005) ressalta que o objetivo no projeto de uma mistura asfáltica é a determinação da proporção ótima de agregado e asfalto que garanta um melhor desempenho do pavimento.

O ligante é um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga e susceptibilidade térmica e caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura . O ligante é um material aglutinante de cor escura, derivado do petróleo, composto principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Pode ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilização de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS et al., 1998).

O revestimento constitui a última camada na composição dos pavimentos asfálticos. É a camada que recebe diretamente a ação de carga do tráfego e a que está mais diretamente exposta às intempéries climáticas, devendo ser, portanto, tanto quanto possível impermeável. Tem o papel de melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e



segurança, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura (SENÇO, 1997 & BERNUCCI et al., 2007 apud OLIVEIRA,2007).

A parte mineral das misturas asfálticas é constituída por agregados graúdos e miúdos e o fíler. O fíler serve de material de enchimento de vazios, contribuindo para o fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Sua adição aumenta a viscosidade do meio coesivo (resistência à deformação) (MOTTA & LEITE, 2000 apud MOURÃO, 2003). Dessa forma, a função básica do fíler nas misturas é preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos e miúdos, o que acarreta o fechamento das misturas, fornecendo um maior equilíbrio estrutural e o aumento de sua estabilidade. A sua adição torna as misturas impermeáveis.

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

Os fíleres utilizados convencionalmente são a cal e o cimento. Todavia esta sendo avaliado o aproveitamento dos resíduos industriais em misturas asfálticas, agregando-lhe valor e diminuindo seu impacto ao meio ambiente.

#### 2.4.1 Propriedades das misturas asfálticas

A NBR- 7207/82 define pavimento como:

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

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

Todavia, a ação das intempéries aliada as oscilações críticas impostas pelo tráfego reduz a vida útil do pavimento. A intemperização 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-químico em contato com a água (MEDINA, 1997).

A presença de água pode aumentar a tendência de uma mistura a deformação permanente. Quando existe uma modificação da estrutura do pavimento em estado seco para o úmido, tem-se uma diminuição da resistência da mistura quando este é susceptível a presença de água (DAVILA, 2005).

#### 2.4.2 Susceptibilidade de misturas asfálticas à presença de água

A relevância de impermeabilização adequada do revestimento é impedir a penetração da água e conseqüentemente o envelhecimento prematuro da mistura. Quando se tem um alto número de vazios na mistura, devido a uma compactação deficiente, esta se torna susceptível a infiltração da água e do oxigênio que causam oxidação, desintegração e conseqüentemente diminuição da estabilidade mecânica das misturas.

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 mástico (asfalto e fíler) e os agregados.

Esta susceptibilidade ocasiona um defeito conhecido internacionalmente por "stripping", ele acelera a degradação estrutural do pavimento associado ao aparecimento de trincas e deformações plásticas. A Figura 2 apresenta a redução da tensão do mástico devido a difusão da água no interior da mistura e a redução da adesão entre o mástico e o agregado. Enquanto apresenta uma redução da resistência interna da mistura, concomitantemente aparecem danos como trilha de roda, exsudação, trincas, etc. (KIM & LUFIT, 2006).

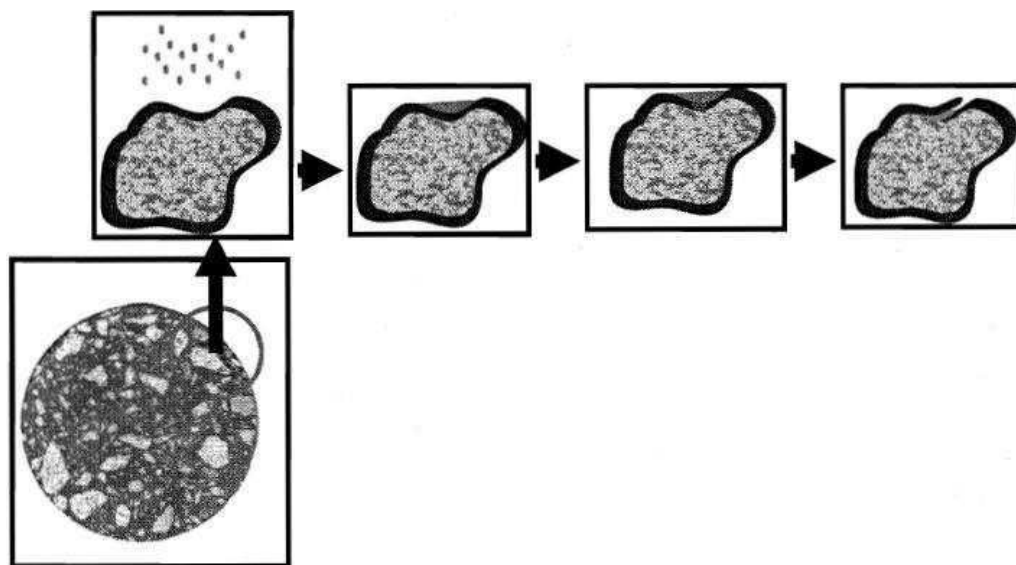


Figura 2 - Ilustração do mecanismo de desgastes devido a susceptibilidade

(Fonte: KIM & LUFIT, 2006)

O fato de que a adesão entre o asfalto e o agregado é reduzida pela presença de água e que a coesão do ligante asfáltico em si também é afetada é do conhecimento dos técnicos da área desde a década de 1920. Os primeiros trabalhos sobre esse tema foram conduzidos por Nicholson (1932), Riedel e Weber (1934), Saville e Axon (1937) e muitos outros. O trabalho apresentado por Saville e Axon apresenta os resultados dos ensaios de fervura e imersão e sua comparação com resultados de campo de misturas feitas com diferentes tipos de agregados. O trabalho apresenta fotografias de revestimentos apresentando desagregação pela má adesividade que poderiam muito bem ter sido fotografada em pavimentos atuais, indicando que os problemas de adesividade não começaram por causa das alterações na composição dos asfaltos no início da década de 1980 (LIBERATORI & CONSTATINO, 2006).

Em misturas asfálticas, a adesividade entre o ligante e agregado é efetivada devido a duas características: a capacidade do ligante de envolver o agregado e a habilidade deste, por sua vez, de promover a aderência do ligante à sua superfície. A primeira propriedade é conhecida como adesividade ativa e a segunda como adesividade passiva. A aderência entre o agregado

mineral e o ligante depende do estreito contato entre os dois materiais e da atração de suas superfícies (LYTTON, 2004).

O problema da perda de adesividade ocorre devido a uma ligação adesiva deficiente, que pode estar aliada a uma solitação capaz de descolar o ligante do agregado, ou ainda pela ação diversificada da água na interface ligante-agregado. Além da afinidade do ligante de aderir ao agregado, é imprescindível o conhecimento das propriedades e grau de absorção de ligante pelos agregados, para assegurar a durabilidade das misturas asfálticas. Pois a medida que a porção de ligante é absorvida, diminui a espessura do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, tornando as misturas mais frágeis e susceptíveis às ações da água ( GOUVEIA et al. , 2004).

A perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: (i) a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do ligante, (ii) a susceptibilidade a presença de água e (iii) a presença de sujeira e finos na superfície do agregado. Essa perda de adesão do ligante com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de asfalto (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e devido a presença de água (LYTTON, 2004).

Como a adesão do filme asfáltico se desenvolve na superfície do agregado, é de suma importância que ocorra boa interação química entre eles. O descolamento do filme asfáltico ocorre devido ao efeito da água, tanto na forma de vapor quanto líquida e está relacionada as características dos materiais, climáticas, tráfego, projeto e construção da via, entre outros. Se existe uma má interação entre o ligante e o agregado, o descolamento do filme asfáltico pode levar o revestimento à ruína em curto espaço de tempo (LIBERATORI & CONSTATINO, 2006).

No que se refere a deterioração devido a presença de água, esta depende da interação entre agregado, ligante e água. As forças de adesão e coesão em uma mistura asfáltica, seja na presença de água ou não, podem ser calculadas usando a teoria das energias de superfície e ângulos de contato, desenvolvida por GOOD e VAN OSS (1992). A deterioração devido a susceptibilidade a presença de água em uma mistura asfáltica ocorre em

função da saturação pela água e da exposição a cargas repetidas. O mecanismo de deterioração do revestimento evidencia a maior atração que a água tem, em comparação com a atração que o ligante tem, pela superfície dos agregados (LYTTON, 2004)

Andeson & D'Angelo (2003) descrevem que a revista *AI's ES-10, Causas e Prevenções da Perda de Adesão nos Pavimentos Asfálticos*, publicou que a água é a principal variável que provoca a perda de adesão e coesão nas misturas asfálticas e que qualquer fator que contribua para a presença desta no interior da mistura também é responsável. A mesma publicação relata que se houver um bom projeto e uma drenagem adequada ele não tenderá a perder adesão, mesmo que o agregado esteja sujeito a fadigar.

A reologia do sistema ligante - fíler influencia, fortemente, a coesão que pode ser mensurada indiretamente utilizando os ensaios de estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. A presença de água tende a diminuir a resistência coesiva da mistura (NEVES FILHO, 2006).

De acordo com Epps et al. (2003), a presença de água nos pavimentos é responsável pela maioria dos danos ocasionados às estradas de rodagem. Com isso, a mistura asfalto-agregado poderá sofrer a perda da ligação entre o ligante asfáltico e o agregado, ou seja, da adesão. Além disso, o ligante terá suas propriedades como rigidez, viscosidade e outras alteradas.

Yoon e Tarrer (1988) apud Neves Filho (2006) evidenciaram que, na mistura asfáltica na presença de água, o ácido carboxílico do ligante ( $R-COOH$ ) se separa no ânion ( $R-COO^-$ ) e no próton ( $H^+$ ). Esta separação gera uma polaridade negativa no ligante na região de interface com o agregado. Como o agregado molhado apresenta carga negativa na sua superfície ocorre o aparecimento de uma força repulsiva entre os dois materiais, o que favorece a perda de ligação química.

O mecanismo de atuação da susceptibilidade de misturas a presença de água é complexo e tem sido estudado meios de simplificar a explicação deste. Uma das maneiras encontradas foi a identificação das fraturas asfalto/agregado, todavia quando na presença de água, ocorre uma interação

sinérgica de mecanismos de forma a provocar o descolamento do filme asfáltico.

#### 2.4.2.1 Deteriorações no revestimento devido à presença de água

Apesar dos pavimentos serem projetados para uma vida útil de 10 a 20 anos, a maioria das rodovias brasileira tendem a apresentar falhas nos primeiros anos de uso mesmo submetidas a um tráfego, geralmente, inferior ao que elas foram projetadas.

De acordo com o presidente da Confederação Nacional de Transportes, Clésio Andrade (CNT, 2001):

“Num país rodoviarista como o Brasil, que transporta 62% de sua carga e 96% de seus passageiros por estradas, a melhoria do sistema viário é urgente não apenas para quem exerce a atividade do transporte, mas para todos os setores da economia e da sociedade em geral, que dela dependem para alcançar níveis satisfatórios de desenvolvimento. É o Brasil quem perde com a desatenção das autoridades e com a falta de técnicos especializados na área”.

No Brasil, a frota nacional do setor de transporte de carga cadastrada no RENAVAL é de 1.836.203 veículos, sendo que este setor movimenta nas rodovias brasileiras 60% de todas as cargas transportadas no país, o que representa 451 bilhões de toneladas x km/ano. Já em relação ao transporte de passageiros, os segmentos intermunicipal, interestadual e internacional operam 50 mil veículos, frota essa que percorre cerca de 2 bilhões de quilômetros por ano (CNT, 2003).

Conforme salientado por Darocho (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 de veículos seja coerente com a segurança e o conforto da viagem, solicitações e resistência de componentes de pavimento.

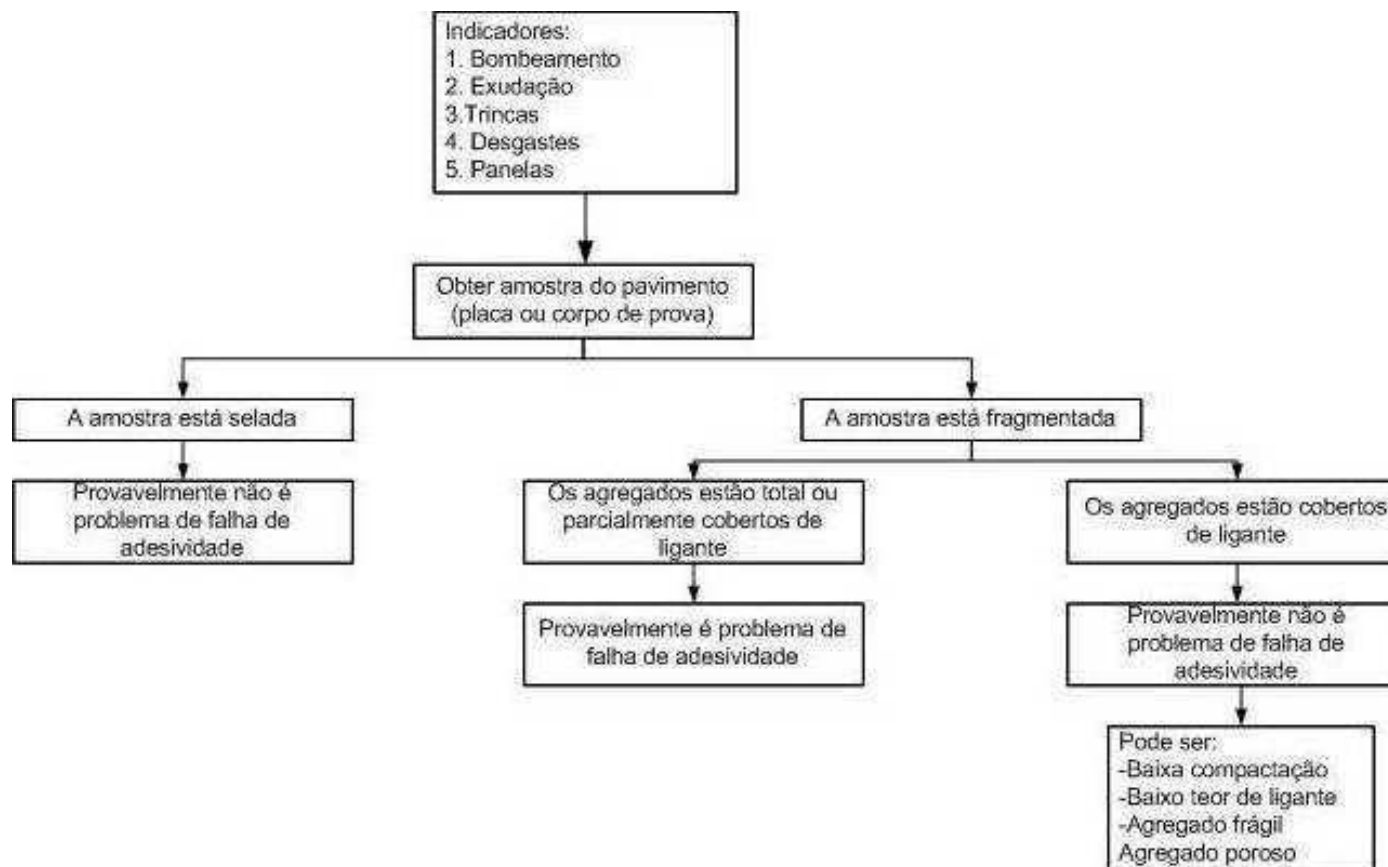
Os defeitos existentes nos pavimentos podem ocorrer devido a composição inadequada da mistura que o compõe, pelo entrosamento inadequado entre as camadas ou pela falta de resistência das camadas que o constitui. Esta perda de resistência, que pode ser ocasionada pela perda de adesão devido a presença de água, pode vir a provocar falhas ou

descontinuidades na superfície que irão afetar a qualidade de movimentação da via.

De acordo com Santos (2001) uma rodovia que apresenta defeitos no revestimento provoca o aumento do consumo de combustível em 58%, do custo de manutenção dos veículos em 38%, do número de acidentes em 50% e provoca o dobro do tempo de viagem.

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) apresenta no Fluxograma 1 um método de identificação de problemas no pavimento devido a falhas de adesividade.



Fluxograma 1- Roteiro para identificação de problemas de falha de adesividade  
 Fonte : Hicks et al.(2003)



Os mecanismos ocasionados pelas falhas de adesão e coesão poderão acelerar os seguintes tipos de defeitos: trincas, exsudação, afundamento de trilha de roda, buraco e desagregações.

- trincas/fissuras: sua presença irá facilitar a penetração de águas pluviais, diminuindo a resistência das misturas asfálticas e provocando aspereza. 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. As trincas podem ser de vários tipos como: transversais curtas (TTC) ou transversais longas (TTL), longitudinais curtas (TLC) ou longitudinais longas (TLL), de retração (TRR), trincas de bloco (TBE) e trincas couro de jacaré (j) (Figura 3).

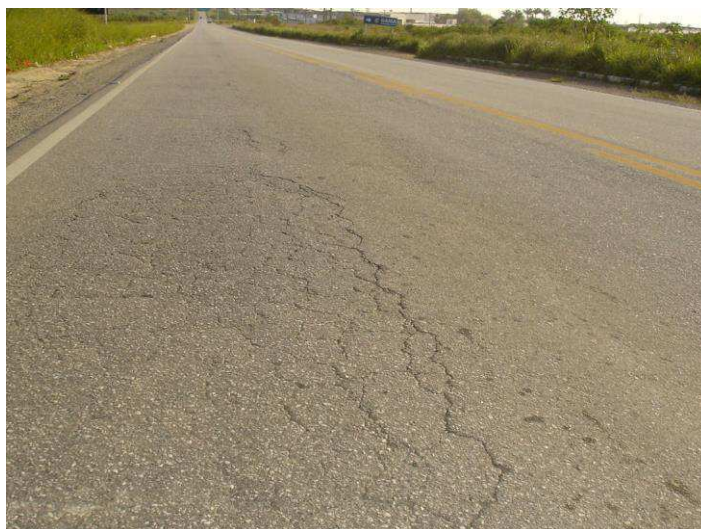


Figura 3 – Trincas longitudinais longas

Fonte: Pesquisa direta, 2008

- exsudação: é caracterizada pelo aparecimento de ligante na superfície como manchas escurecidas gerando uma película pegajosa adquirindo a aparência retratada na Figura 4. Ela ocorre quando o ligante asfáltico enche os agregados durante o tempo quente e depois os expande na superfície do pavimento, acarretando o seu acúmulo.



Figura 4 - Exsudação no revestimento

Fonte: Pesquisa direta, 2008

- panela ou buraco – São cavidades presentes no pavimento com mais de 15 cm localizadas próximos a defeitos como trincas, fissuras, deformações ou perda de agregado, pode ou não atingir camadas subjacentes. A Figura 5 apresenta um exemplo deste tipo de defeito;



Figura 5 – Painéis de deterioração no revestimento

Fonte: Pesquisa direta, 2008

- desagregação: Apresenta um desprendimento de agregados da superfície ou ainda a perda de mástique junto aos agregados. Geralmente ocorre associado

à presença da umidade, baixo conteúdo do ligante ou do envelhecimento deste. Este tipo de defeito encontra-se ilustrado na Figura 6.



Figura 6- Desagregação no revestimento

Fonte: Pesquisa direta, 2008

- afundamento de trilha de roda: são deformações permanentes entre o revestimento asfáltico ou de camadas subjacentes. Este processo tem entre suas causas a ação da água que provoca o enfraquecimento do subleito e além de provocar a aquaplanagem dos veículos, acarretará uma baixa resistência das misturas asfálticas (Figura 7).



Figura 7 - Afundamento de trilha de roda

Fonte: Pesquisa direta, 2008

### 2.4.2.2 Ensaios que avaliam a susceptibilidade de misturas asfálticas a 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 mostrado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2- Ensaio de sensibilidade a umidade em agregado solto

Ensaio	Especificação		
	ASTM	AASHTO	Outras
Azul de metileno			ISSA TB 145
Film Stripping			California Test 302
Imersão estática	D 1664*	T182	
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)

Fonte: Libertadori & Constatino (2006)

Tabela 3- Ensaio de sensibilidade a umidade em misturas compactadas

Ensaio	Especificação		
	ASTM	AASHTO	Outras
Susceptibilidade à umidade por vapor			California test 307 Desenvolvido na década de 1940
Imersão-compressão	D 1075	T165	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			

Fonte: Libertadori & Constatino (2006)

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

### Ensaio de Lottman

O ensaio de Lottman, segundo Tandon et al. (2003) foi adotado pela metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) por este ser um ensaio adequado para determinar os danos devido à presença de água.

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, isto 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 a tração (sem ter submetido a condicionamento) e o outro sofre a ruptura após ciclos de gelo e degelo. A razão entre os grupos fornece a razão de resistência a tração (RRT). A metodologia SUPERPAVE estabelece que este valor deve ser acima de 80% enquanto a ASSHTO MP 8-01 estabelece o limite mínimo para RRT de 70%. A Figura 8 apresenta o esquema do ensaio.



Figura 8- Esquema do ensaio de lottman

Fonte: TANDON et al. ( 2003)

Apesar do ensaio mencionado ser utilizado e apontado como eficaz no diagnóstico da susceptibilidade. Ele apresenta restrição a seu uso, que é o fato de trabalhar com aplicação de carga estática.

Um ensaio com aplicação de carga repetida pode simular os esforços aos quais as misturas asfálticas irão ser submetidas e deste modo conhecer melhor o seu comportamento frente às condições adversas ocasionadas pela presença de água.

### Ensaio Módulo de Resiliência

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre as tensões e deformações de materiais sob regime elástico-linear. O módulo de resiliência (MR) é determinado sob cargas cíclicas, procurando simular o tipo de sollicitação a que os pavimentos são submetidos durante a passagem de um veículo (BRITO, 2006).

Em misturas asfálticas, o módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão de tração ( $\sigma$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico de mistura asfáltica, e a deformação específica recuperável ( $\epsilon$ ) 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, cujas 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.

Quando um veículo passa sobre o pavimento, um pulso dinâmico de tensão é transmitido para o solo e isto gera deformações. As tensões e deformações geradas são os fatores que controlam o desempenho do pavimento. Logo este comportamento é diretamente influenciado pela relação tensão-deformação das misturas asfálticas (ELLIOT, 1992 apud OLIVEIRA, 2007).

Schmidt e Graf (1972) apud Neves Filho (2006) relataram que misturas asfálticas têm 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 secagem, o módulo de resiliência é restabelecido aos níveis iniciais (Figura 9).

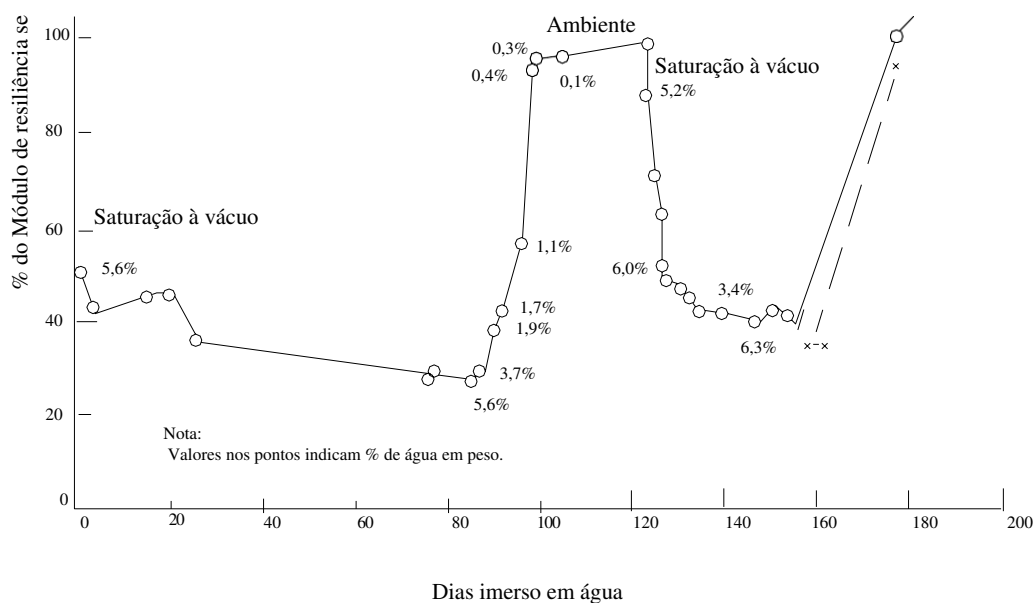
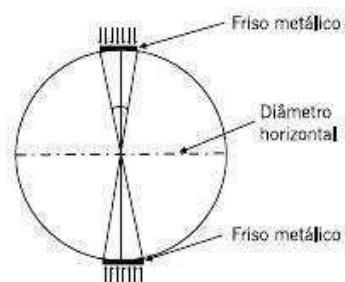
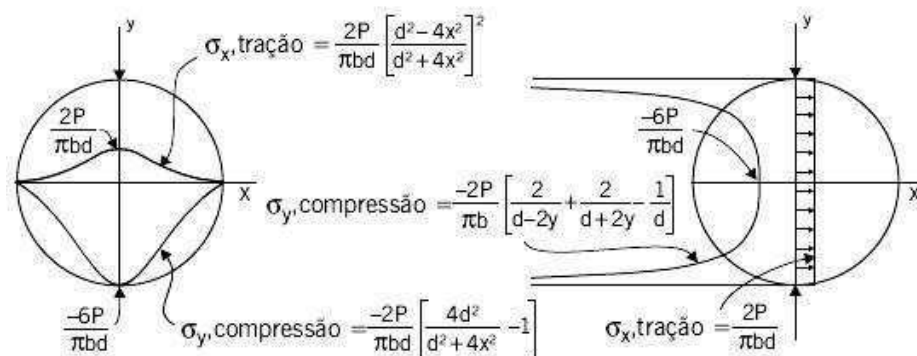


Figura 9 – Variação do módulo de resiliência em diferentes níveis de saturação  
Fonte: SCHMIDT & GRAF (1972)

A Figura 10 apresenta o esquema de ensaio.



(a) Esquema de carregamento no ensaio de MR



(b) Estado biaxial de tensões (Medina e Motta, 2005)

Figura10 – Ilustração do ensaio de compressão diametral e estado de tensões gerado

Fonte: BERNUCCI et al. (2007)

### Ensaio Marshall

O ensaio Marshall teve origem em 1939 com o engenheiro Bruce Marshall. O ensaio consiste em produzir corpos-de-prova com massa específica similares as das misturas asfálticas compactadas em campo, determinando os valores de volume de vazios, estabilidade e fluência, para garantir misturas duráveis ao controlar esses parâmetros.

O ensaio Marshall é utilizado pela maioria dos DOTs ( Pesquisa e Departamento de Transporte), 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,1996).

Com o aumento do volume de tráfego e das cargas transportadas nas rodovias, as metodologias Hveem e Marshall passaram a ser mais questionadas, em particular por produzirem misturas com massas específicas



diferentes das encontradas em campo (VON QUINTOS et al., 1991; HARVEY et al., 1994 apud PINHEIRO, 2004). Segundo ROBERTS et al. (1996), entre as décadas de 1940 e 1990, 25,0% dos departamentos de transportes norte-americanos utilizavam o método Hveem e 75,0% o método Marshall. No Brasil, o método de dosagem Marshall também foi bastante difundido e ainda hoje é o mais utilizado, tendo sofrido, porém, algumas alterações, como a exclusão dos parâmetros de estabilidade e de fluência como pré-requisitos na dosagem das misturas (VASCONCELOS, 2004). Atualmente, o teor de projeto (TP) de ligante asfáltico na metodologia Marshall é determinado baseado em parâmetros volumétricos (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Coelho (1992) apesar do método Marshall ser o mais utilizado e conhecido, ele ainda é alvo de discursões no que se refere ao modelo mecânico de ensaio, como também pelo significado dos parâmetros medidos e pelas correlações obtidas entre esses parâmetros e o desempenho das camadas nas rodovias. Uma outra restrição deve-se ao fato que o método marshall precisa ser continuamente pesquisado para fazer a correlação entre o campo e o laboratório devido as constantes mudanças nas condições de tráfego e na carga transportada.

A Tabela 4 resume as vantagens e limitações do ensaio.

Tabela 4- Vantagens e limitações do ensaio Marshall

Vantagens	Limitações
Simple, prático, rápido e eficiente para dosagem e controle da qualidade;	Não permite generalização para outras condições de contorno;
Método conhecido ao redor do mundo;	Não é possível classificar corretamente as misturas quanto às deformações permanentes;
Não necessita de aparelhagem sofisticada;	Sofre influência dos materiais, temperatura e dimensões dos corpos-de-prova
Ensaio de caracterização exigidos são simples;	As condições operacionais e condições locais e regionais afetam os resultados;

Fonte: Medeiros (2006)

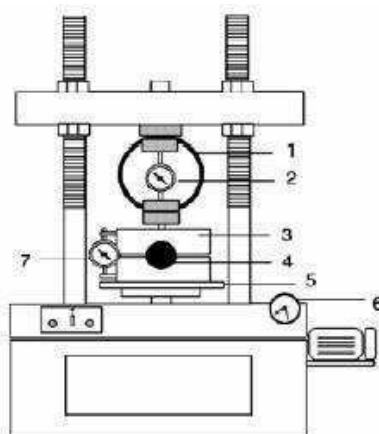
Medeiros (2006) lista os principais fatores que podem influir na estabilidade Marshall das misturas asfálticas:

- granulometria dos agregados;

- a forma e a textura superficial das partículas dos agregados;
- o tamanho máximo das partículas dos agregados graúdos;
- a relação entre as quantidades de ligantes e de agregados;
- a consistência do ligante;
- o grau de compactação da mistura
- percentagem de fíler adicionada a mistura

A Figura 11 apresenta o esquema do ensaio Marshall.

Outras restrições do ensaio são a compactação por impacto empregada no método Marshall bem como os valores de estabilidade, que não constituem um modo específico de falha, uma vez que, no ensaio mecânico empregado, coexistem tensões de compressão, tração e cisalhamento.



Legenda:

- |   |   |
|---|---|
| 1-Anel dinâmico                             | 2-Deflectômetro para medição de força aplicada    |
| 3-Estabilômetro Marshall                    | 4-Provete   |
| 5- Prato da prensa                          | 6-Seletor de velocidade de aproximação dos pratos |
| 7- Deflectômetro para medição da deformação |   |

Figura 11 – Esquema representativo do ensaio Marshall

Fonte: PAIS (2005)

### Ensaio de tração

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 mecânico de pavimentos.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga concentrada ao longo do diâmetro de um corpo-de-prova cilíndrico, considerando-o como um material elástico.

Em misturas asfálticas, realiza-se o ensaio de acordo com a norma ME 138/94 do DNIT. A Figura 12 apresenta o esquema do ensaio.

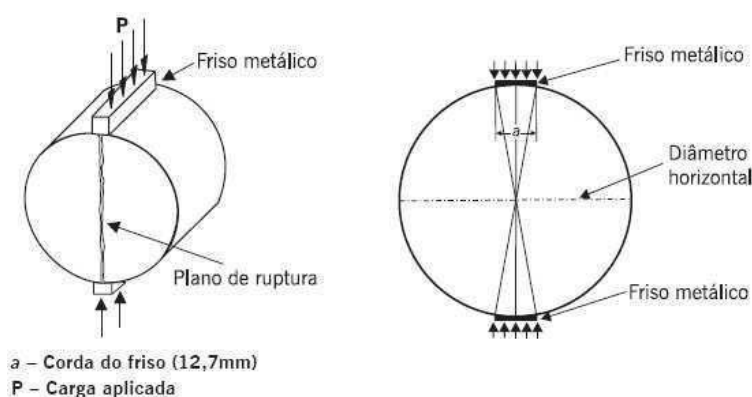


Figura 12 – Esquema do ensaio de compressão diametral

Fonte: BERNUCCI et al. (2007)

Berunucci et al. (2007) descrevem que com o envelhecimento das misturas asfálticas, o valor da resistência a tração aumenta, todavia este fator irá comprometer a flexibilidade da mistura aumentando o módulo de resiliência. Existe uma boa correlação entre o módulo de resiliência e a resistência a tração, e esta relação tende a permanecer constante com o passar do tempo.

### 2.4.3 Tratamentos

A fim de minimizar os danos provocados pela ação deletéria da água frente às oscilações cíclicas impostas pelo tráfego, foram desenvolvidas algumas técnicas que melhoram a adesão asfalto/agregado.

Entre as técnicas tem-se a adoção de um revestimento drenante, a adição de aditivos ou de fíler. As peculiaridades relativas a cada tratamento encontram-se descritas abaixo.

#### Revestimento drenante

O revestimento permeável é um tipo de pavimento que além de viabilizar o transporte de veículos, permite a infiltração onde o escoamento superficial

pode ser desviado por meio de uma superfície permeável para dentro de drenos, localizado sob a superfície do terreno. Os pavimentos permeáveis têm a propriedade de reter partículas de poluição e atuam como um filtro (PAGOTTO et al. , 1999).

Estes tipos de revestimento apresentam duas camadas, onde uma tem função estrutural sendo formada por misturas asfálticas densas convencionais e outra composta por misturas asfálticas drenante. A camada drenante é assentada sobre uma camada impermeável e permite o escoamento das águas pelos vazios. Quando a água depara-se com a camada impermeável, ela escorre devido às inclinações do perfil da estrada (OLIVEIRA, 2003).

Farias et al. (2004) apresentou as seguintes vantagens no uso do revestimento drenante: redução do fenômeno da aquaplanagem, melhora da visibilidade devido a redução “spray” (projeção de água) formado atrás dos veículos nos pavimentos molhados, menor reflexão luminoso (eliminando o fenômeno) e redução dos níveis de ruído provocados pelo tráfego. Além das vantagens acima mencionadas, a adoção deste tipo de pavimento irá reduzir a perda de adesividade entre o sistema asfalto-agregado por não favorecer o acúmulo de água no interior do pavimento, por este ser permeável e permitir o escoamento das águas.

### Uso de aditivos

Aditivos são agentes melhoradores de adesividade e são substâncias tensoativas catiônicas, na maioria das vezes, aminas. Quando adicionados a misturas, 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 através da forte atração entre os dois componentes de polaridades opostas e da conseqüente formação de ligações químicas iônicas e pontes de hidrogênio (NEVES FILHO, 2006).

Epps et al. (2003) apud Neves Filho (2006) concluíram que as propriedades do ligante variam com a composição química do asfalto, da composição química e concentração do aditivo no ligante, do tipo de dispersante utilizado e, em alguns casos, da temperatura e do tempo de

estocagem. Alguns aditivos de baixa efetividade usam óleos como agentes de dispersão, já os dopes de elevado desempenho utilizam uma pequena quantidade de dispersante.

De acordo com Hanson et al. o uso de aditivos irá reduzir a tensão de superfície do ligante e aumentar a adesão entre este e o agregado. Existem dois métodos pelos quais se pode acrescentar o aditivo às misturas asfálticas. A mais simples e econômica é adicioná-lo no estado líquido e mistura-lo com o ligante antes do agregado. A segunda maneira de acrescentar o aditivo é na mistura asfáltica.

### Fíler

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

O fíler serve como material de enchimento de vazios, contribuindo para o fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Sua adição aumenta a viscosidade do meio coesivo (resistência a deformação) (MOTTA & LEITE, 2000 apud MOURÃO, 2003). Dessa forma, a função básica do fíler nas misturas é preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos e miúdos, o que acarreta o fechamento das misturas, fornecendo um maior equilíbrio estrutural e o aumento de sua estabilidade. A sua adição torna as misturas impermeáveis.

O incremento de fíler 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, o que proporciona aumento de durabilidade. A utilização de fíleres 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).

Roberts et. al (2006) cita as principais finalidades do fíler como sendo:

- preencher os vazios e reduzir a quantidade de ligante a ser utilizada;
- enquadrar a distribuição de tamanho dos grãos nas faixas do DNIT;
- aumentar a estabilidade mecânica;
- melhorar a adesão entre o ligante e os agregados.

Medeiros (2006) lista os principais fatores que podem influir na estabilidade das camadas asfálticas:

- granulometria dos agregados;
- a forma e a textura superficial das partículas dos agregados;
- o tamanho máximo das partículas dos agregados graúdos;
- a relação entre as quantidades de ligantes e de agregados;
- a consistência do ligante;
- o grau de compactação da mistura;
- percentagem de fíler adicionada a mistura.

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

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 escoria de acaria, Branco (2004) encontrou limitações quanto ao seu uso devido a heterogeneidade dos agregados, todavia a substituição apresentou possibilidade de uso.

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 fíleres 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 a tração.

Medeiros (2006) estudou a utilização do lodo de esgoto, que passou na peneira de malha nº 200 e foi calcinado para uso como fíler em misturas

asfálticas. As misturas com lodo calcinado apresentaram comportamento semelhante às misturas com cimento (fíler convencional), embora proporcionem melhor desempenho quanto a estabilidade e relação de resistência a tração.

Lucena (2008) pesquisou a utilização do cascalho de perfuração de poços de petróleo como fíler em misturas asfálticas. Além de ser uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, seu comportamento mecânico atendeu as 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. (2003) 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 de superfície e uma alta capacidade de absorção, ela é indicada para tratamentos de misturas asfálticas suscetíveis a apresentarem danos devido à presença de água.

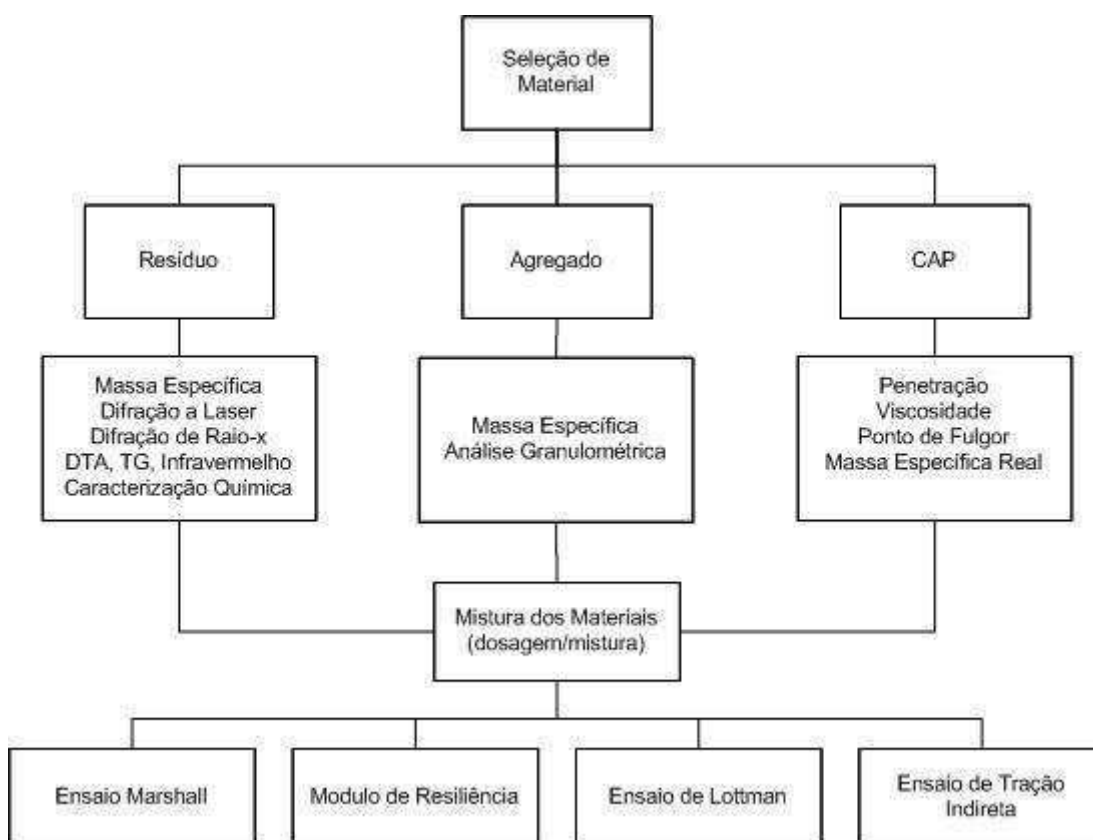
De acordo com Balige (2003) a transformação de pneus em farelos de borracha através do seu esmagamento, e incorporá-los nas misturas asfálticas podem dar um destino adequado a estes. A adição das partículas originadas irá melhorar a susceptibilidade térmica, o comportamento elástico, a resistência a 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 para diminuir a susceptibilidade à água e aumentar o módulo de resiliência e a resistência do ligante à oxidação.

CAPÍTULO 3  
MATERIAIS E MÉTODOS



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a parte experimental desenvolvida neste trabalho, apresentando os aspectos referentes aos materiais selecionados e as metodologias e especificações empregadas para a caracterização dos materiais e realização dos ensaios de resistência mecânica. Os métodos de ensaios e normas da Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) e Departamento de Infra-estrutura e Transporte (DNIT) serão apenas citados e descritos de maneira sucinta. Os métodos não constantes na normalização serão descritos detalhadamente. O Fluxograma 2 apresenta a seqüência de atividades e ensaios realizados durante a fase experimental do trabalho.



Fluxograma 2 – Seqüência de atividades e ensaios

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa, com exceção do resíduo de vidro, foram disponibilizados pela Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior - ATECEL. O resíduo vítreo foi disponibilizado pela vidraçaria Mauricéia localizada na cidade de Campina Grande- Paraíba.

#### 3.1.1 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram do tipo brita granítica, designados como comerciais (Figura 13).



Figura 13 – Agregado do tipo granítico – Brita 19 ou  $\frac{3}{4}$ "  
Fonte: Pesquisa direta, 2008

#### 3.1.2 Agregados Miúdos

No que se refere aos agregados miúdos, optou-se por usar uma areia de rio do tipo quartzosa (Figura 14) e pó de pedra do tipo granítico (Figura 15), devido a estes serem de uso comum em obras de engenharia da região nordeste.



Figura 14 - Agregado do tipo quartzosa

Fonte: Pesquisa direta, 2008



Figura 15 - Pó de Pedra

Fonte: Pesquisa direta, 2008

### 3.1.3 Resíduo Vítreo

No intuito de utilizar tratamentos que visam diminuir a susceptibilidade à presença de água, foi escolhido o resíduo do vidro plano para atuar como fíler (material de enchimento) (Figura 16). O resíduo foi gerado durante o corte e processamento do vidro em vidraçarias e fornecido pela vidraçaria Mauricéia.

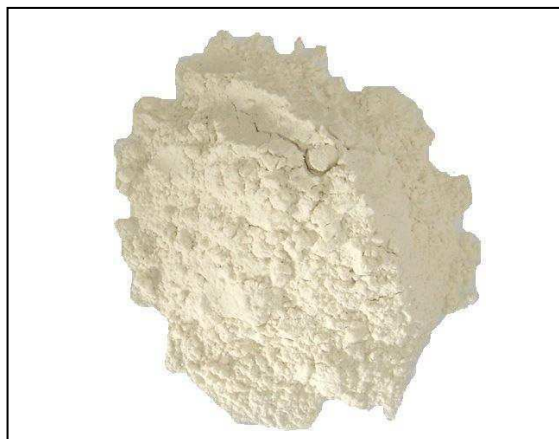


Figura 16 – Vidro Plano

Fonte: Pesquisa direta, 2008

A fim de deixar a granulometria do resíduo vítreo compatível com a normalizada para atuar como fíler, os resíduos foram submetidos a um apiloamento manual (Figura 17) e em seguida foram triturados no moinho de bolas de alumina (Figura 18). Para aplicação do resíduo vítreo em escala industrial é utilizado o moinho cuja produção, dependendo do modelo, pode chegar a 18 ton/h.



(a)



(b)

Figura 17 - Apiloamento do vidro (a) estágio inicial (b) estágio final

Fonte: Pesquisa direta, 2008



(a)



(b)

Figura 18 – Moinho de bolas (a) posicionamento dos recipientes (b) após a trituração

Fonte: Pesquisa direta, 2008

### 3.1.4 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP utilizado na pesquisa é do tipo 50/70 (penetração 100g, 5s a 25°C) cujas especificações estão de acordo com o Departamento Nacional de Petróleo (DNP) e a Agência Nacional de Petróleo (ANP), os quais definem os parâmetros de aceitação e classificação (Figura 19). A Tabela 5 apresenta os dados característicos do CAP utilizado neste trabalho.



Figura 19– Cimento asfáltico de petróleo utilizado na pesquisa  
Fonte: Pesquisa direta, 2008

Tabela 5 – Características física do cimento asfáltico de petróleo

Ensaio	Valor
Penetração (100g, 5s a 25°C)	50-70
Ponto de Fulgor (°C)	295 (mínimo)
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,020
Viscosidade Saybolt Furol (135°C/s)	320

### 3.2 Métodos

Foram abordados neste trabalho como forma de alcançar os objetivos propostos, informações contidas na literatura corrente, bem como os resultados obtidos a partir de ensaios em laboratórios.

Os métodos de ensaios utilizados foram, em sua grande maioria, 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 nos materiais, além de ensaios que avaliam a susceptibilidade das misturas asfálticas à presença de água (como os ensaios estáticos Marshall, o de tração indireto por compressão diametral, o ensaio de Lottman modificado e o ensaio de módulo resiliência).

### 3.2.1 Ensaio de Caracterização

#### 3.2.1.1 Massa específica

As normas do DNIT ME 081/98, DNIT - ME 084/95 e DNIT - ME 093/94 determinam, 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-PB.

#### 3.2.1.2 Análise da distribuição dos tamanhos dos grãos dos fíleres

O ensaio de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foi realizado no laboratório da ATECEL segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984), para atingir tal fim a amostra foi colocada em estufa calibrada à 110°C, por um período de 24 horas.

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. O aparelho utilizado foi analisador de partículas por difração a laser, “granulômetro”, marca Cilas 1064 LD, com faixa analítica de 0,04 a 500 micron e emissores de laser secundários (Figura 20). A análise foi realizada no laboratório da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.



Figura 20 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de difração a laser  
Fonte: Pesquisa direta, 2008

### 3.2.1.3 Análise química

As amostras dos materiais foram submetidas a análise química, segundo técnicas clássicas e instrumentais no Laboratório de Análise Mineral do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

### 3.2.1.4 Análise térmica

#### Análise térmica diferencial (DTA)

A análise térmica diferencial (DTA) serve para indicar as faixas de mudança de temperaturas endotérmicas e exotérmicas. As análises foram realizadas em aparelho de análise térmica 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  $1000^{\circ}\text{C}$ . 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) é útil para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas. 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  $1000^{\circ}\text{C}$ . Os ensaios foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba.

### 3.2.1.3 Difração de raios-X

Para determinação dos principais elementos que compõem os resíduos a amostra foi submetida a análise mediante a utilização de um equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de Cuka, tensão de  $40\text{kV}$ , corrente de  $30\text{mA}$ , varredura de  $2^{\circ} < 2\theta < 30^{\circ}$  e  $L = 1,54\text{\AA}$  (Figura 21). As análises de difração de raios-X foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande.



Figura 21 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de difração de raios-X

Fonte: Pesquisa direta, 2008

### 3.2.1.4 Espectroscopia de infravermelho

Esta técnica serve como complemento para identificação de um composto ou investigar a composição de uma amostra. O ensaio foi realizado no Laboratório da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande .



### 3.2.1.5 Ensaio com o cimento asfáltico de petróleo

A caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo, CAP, foi realizada de acordo com as normas contidas na Tabela 6.

Tabela 6- 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

### 3.2.2 Ensaio mecânicos

O estudo da interação do fíler com o CAP foi realizado com a análise dos resultados obtidos com o auxílio dos ensaios de Penetração e Viscosidade (ensaio com o mastique), enquanto o estudo da interação fíler, CAP e agregados foi realizado com a análise dos resultados obtidos dos ensaios Marshall, Compressão Diametral, Lottman e modulo de resiliência.

#### 3.2.2.1 Viscosidade Saybolt- Furol

O ensaio de viscosidade foi realizado em duas etapas: na primeira etapa foram realizados ensaios de Viscosidade Saybolt Furol apenas com o CAP 50/70, enquanto na segunda etapa foram realizados ensaios de Viscosidade Saybolt Furol com o mastique (CAP + resíduo de vidro) 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 relação a viscosidade indireta medida pelo ensaio Saybolt Furol, com o incremento do fíler.

#### 3.2.2.3 Ensaio Marshall

O ensaio Marshall foi realizado segundo a norma do DNIT – ME 043/95 utilizando um compactador mecânico. Com o intuito de observar o comportamento mecânico da mistura asfáltica, com o aumento da quantidade de fileres, foram realizados ensaios Marshall com incrementos de fíler, em relação ao peso do corpo-de-prova, de 2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0% . A relação

entre o teor de filler e o teor de asfalto foi fixada para o limite inferior de 0,6 (em peso) e para o limite superior  $\gg 1,2$ . Estes, por sua vez, preconizados pelo programa SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) e sugeridos por Roberts et al. (1996).

Para realização dos ensaios Marshall foram moldados vinte e quatro 24 (corpos-de-prova), dos quais foram moldados 6 copos de prova para cada percentagem do fíler e compactados com 75 golpes. De cada 6 corpos-de-prova foram rompidos três com imersão e três sem imersão. O ensaio foi realizado no laboratório da ATECEL. As Figuras 22 e 23 apresentam os equipamentos utilizados.

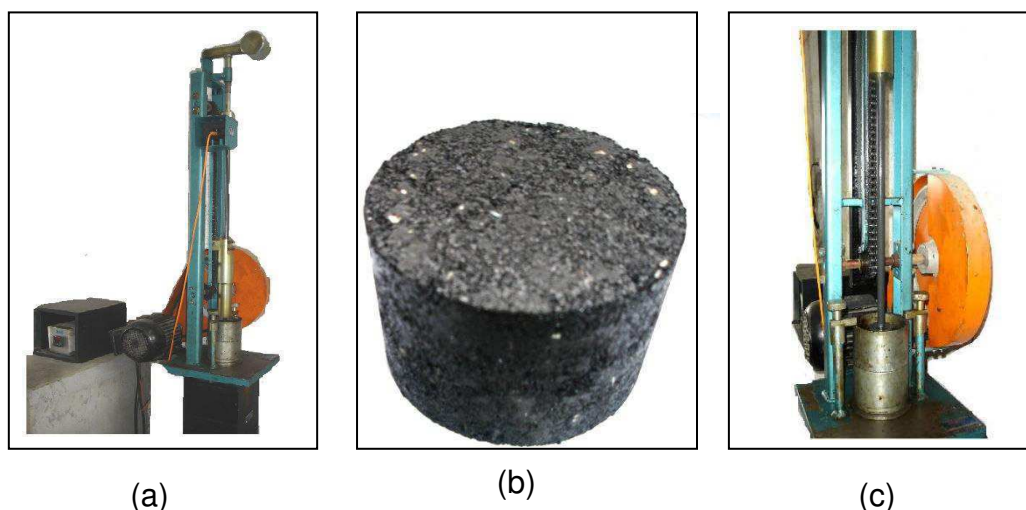


Figura 22 - Equipamentos utilizados para realização da compactação dos corpos-de-prova (a) Compactador (b) Corpo-de-prova (c) Soquete + Cilindro  
Fonte: Pesquisa direta, 2008

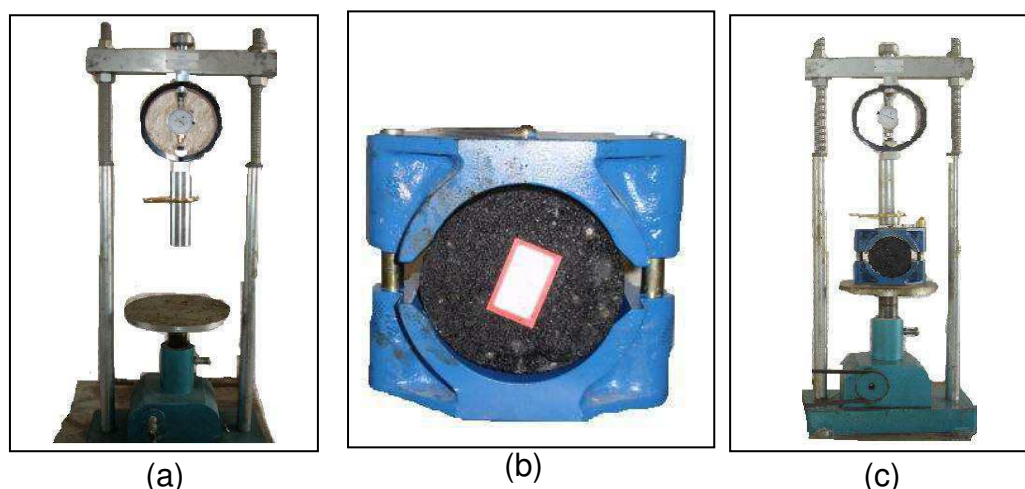


Figura 23 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio Marshall (a) Prensa (b) Molde (c) Prensa + Molde

Fonte: Pesquisa direta, 2008

Mourão (2003) e Wesseling (2003) mostram que com relação ao período de desempenho das misturas asfálticas, o ensaio Marshall utiliza os mesmos processos de condicionamento utilizado no Lottman Test, que apresenta um período estimado de 4 a 12 anos de previsão de análise do efeito da adesividade nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

De acordo com Moura (2001) apud Mourão (2003) o condicionamento não simula condições climáticas ocorridas em campo. Na verdade, este procedimento serve para submeter às misturas asfálticas em condições extremas de solicitação a fim de evidenciar e separar as misturas asfálticas mais resistentes à ação deletéria da água de outras.

Coelho (1992) indica que fatores como tempo insuficiente para obtenção de misturas homogêneas, compactação ineficiente e controle da temperatura dos materiais envolvidos podem influenciar nos resultados obtidos. Deste modo, foram tomadas as devidas precauções no controle do ensaio.

#### 3.2.2.4 Ensaio de tração indireta por compressão diametral

O ensaio de tração indireta por compressão Diametral foi realizado segundo a norma do DNIT – ME 138/94 utilizando um compactador mecânico. Os corpos-de-prova foram preparados com o teor ótimo de CAP de 4,5%, com o índice de vazios de 3 a 5%, e com a variação do percentual dos fileres. O intuito deste procedimento foi verificar a influência do teor de filer no comportamento da mistura asfáltica em relação à adesividade e o efeito deletério da água. Nesta etapa foram moldados quatro (4) corpos-de-prova para cada percentual de filer, todos compactados com 75 golpes, dos quais foram rompidos dois com imersão a sessenta graus Celsius (60°C) e dois sem imersão (em estufa a 60°C). O ensaio foi realizado no laboratório da ATECEL.

#### 3.2.2.5 Ensaio de Lottman

O ensaio de Lottman foi realizado segundo a norma do DNIT – ME 138/94 e T 283-02 da American Association of State Highway Officials (AASHTO) utilizando um compactador mecânico (Figura 24).

O ensaio Lottman foi adotado pela metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) por este ser o ensaio adequado para determinar os danos devido à presença de água.

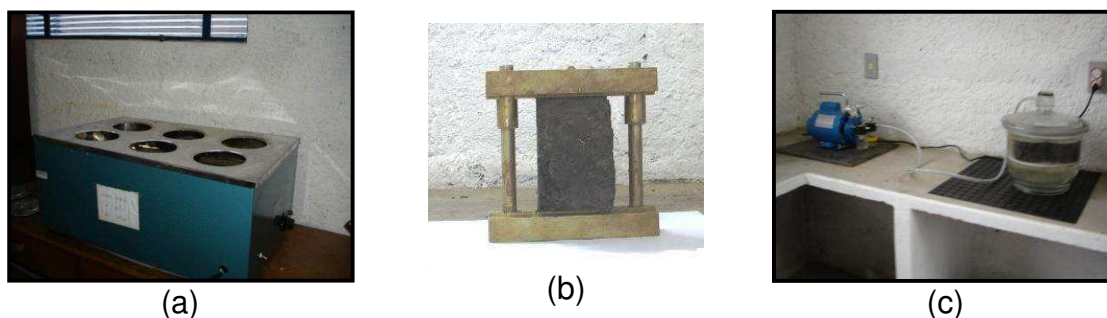


Figura 24 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de tração indireta (a) Banho Maria (b) Pórtico de Lottman (c) Bomba de vácuo

Fonte: Pesquisa direta, 2008

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, isto 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.

Na execução do ensaio de Lottman, foram adotadas as seguintes etapas:

- i) Prepararam-se seis amostras de acordo com a metodologia Marshall e separou-se em dois grupos com três amostras cada;
- ii) O primeiro grupo foi submetido ao ensaio de resistência à tração, este foi executado após a imersão em água, em sacos plásticos impermeáveis, a 25°C por duas horas, por meio da média dos três valores, determina-se  $R_t1$

As amostras do segundo grupo foram submetidas ao processo de condicionamento que apresenta as seguintes etapas:

- iii) saturadas a vácuo através da aplicação de pressão em um dessecador contendo água potável por um período de cinco minutos;
- iv) Colocaram-se os corpos-de-prova dentro de sacos plásticos e submeteu-os a refrigeração à uma temperatura de 10°C durante no mínimo 16 horas;
- v) As amostras foram retiradas da refrigeração e imersas em banho de água potável a temperatura de 60°C por um período de 24 horas;

- vi) Transferiu-se as amostras para um banho a temperatura de 25°C por um período de 2 horas;
- vii) Romperam-se os corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e determina-se o valor de Rt2
- viii) Calculou-se, através do quociente entre Rt2e Rt1 (em porcentagem), o valor de RRT – Resistência Retida à Tração.

$$\text{O valor do Rt1 e Rt2 foi dado pela fórmula : } Rt = \frac{2P}{NtD} \quad (1)$$

Onde:

P – Carga lida (kgf)

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

d- diâmetro do corpo-de-prova (cm)

De acordo com Wesseling (2003) o valor encontrado na literatura como referência de misturas com bom desempenho em relação à adesividade é de 70% (Hicks,1991) e enquanto a metodologia SUPERPAVE sugere valores acima de 80%.

Para Lottman (1978) apud Furlan (2004) a presença de água congelada nos poros de mistura asfáltica simula as tensões de tração no CBUQ, devido a 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.

#### 3.2.2.6 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de modulo de resiliência foi realizado segundo a norma da ASTM E 468-90 e pela DNIT-ME 133/94 (DNIT, 1994).

O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente a tensão gerada, numa dada temperatura (T) (BERNUCCI et. al., 2007).

Os corpos-de-prova foram moldados no compactador Marshall com 75 golpes. Foram moldados 4 corpos-de-prova com teor de CAP de 4,5% e a percentagem de fíler que forneceu os melhores resultados no ensaios mecânicos estáticos, destes duas réplicas serão submetidas ao condicionamento Lottman e duas não serão condicionadas.

O procedimento de determinação do módulo consistiu na aplicação de 100 ciclos de carregamento de magnitude fixa, com 1,0s de duração, sendo cada ciclo constituído por um período de carregamento de 0,1s e um período de repouso de 0,9s. A Figura 25 apresenta o equipamento utilizado na realização do ensaio.

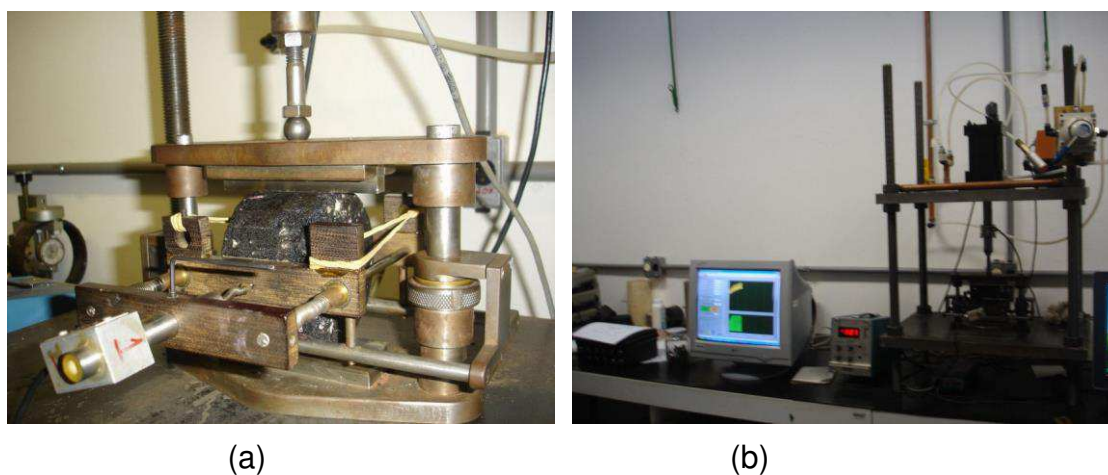


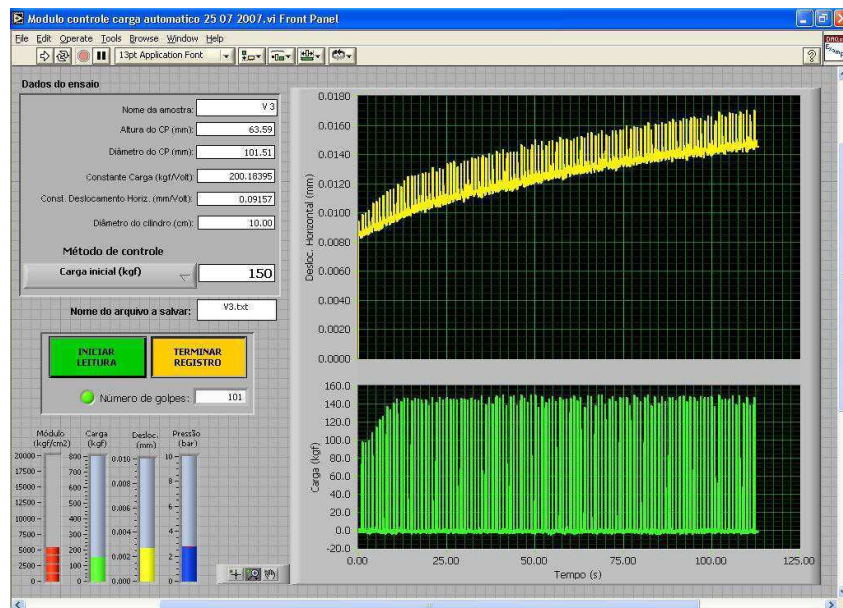
Figura 25- Equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência (a) Corpo-de-prova com LVDTs (b) equipamento

Fonte: Pesquisa direta, 2008

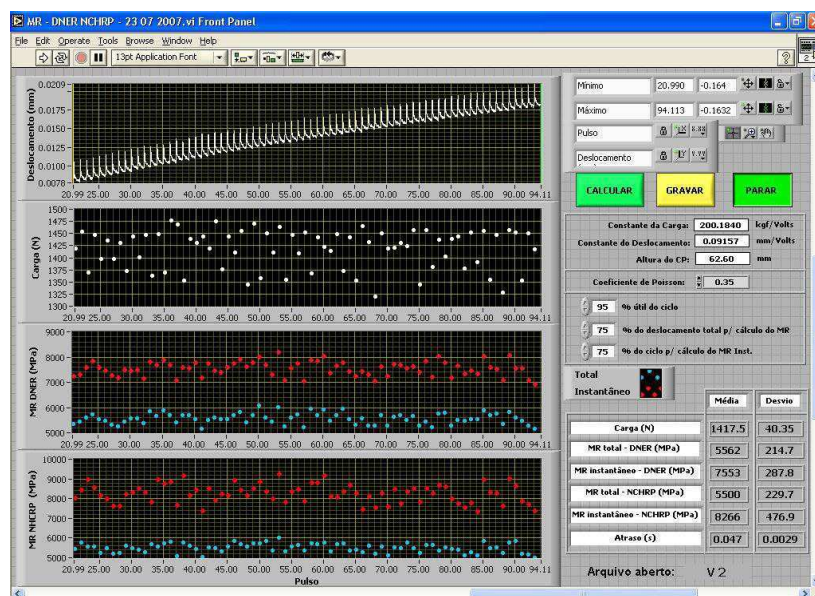
Para a execução do ensaio foi utilizado um software desenvolvido pelo professor Glauco Fabrii da Escola de Engenharia de São Carlos, neste os primeiros 30 a 40 ciclos foram períodos de condicionamento e os 60 a 70 ciclos restantes foram utilizados para determinação do módulo. A finalidade de estabelecer o início a partir de 30 a 40 ciclos de carregamento é devido a neste período as primeiras aplicações de carga poderem ser afetadas por acomodações do corpo-de-prova, deste modo, eliminando os ciclos pode-se melhorar a homogeneidade e qualidade dos resultados. A Figura 26 (a) apresenta a janela de trabalho do software. Foi fixada uma deformação inicial para os ensaios da ordem de 2,5 a 3,0 milésimos de milímetro, foi adotado este

procedimento para preservar a integridade do material sem propiciar o aparecimento de sinais de fadiga.

Para o cálculo dos valores do módulo foi utilizado outro software desenvolvido pelo professor Glauco Fabrii da Escola de Engenharia de São Carlos que utiliza as expressões e considerações oriundas da norma DNIT ME 133/94. A Figura 26 (b) apresenta a janela de trabalho do software.



(a)



(b)

Figura 26 – Software do ensaio de módulo de resiliência (a) processamento dos dados (b) cálculo do MR

CAPÍTULO 4  
RESULTADOS E DISCUSSÕES



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata da análise dos resultados obtidos com a realização dos ensaios de caracterização dos materiais, ensaios com os mastique (CAP+resíduo do vidro) e ensaios com as misturas.

### 4.1 Caracterização dos Materiais

#### 4.1.2 Massa Específica

##### Massa Específica do agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi do tipo granítico (DNIT – ME 081/94) apresentando um diâmetro máximo de 19,1 mm e massa específica aparente de 2,560 g/cm<sup>3</sup>.

##### Massa Específica dos agregados miúdos

Um dos agregados utilizados, foi do tipo a areia quartzosa (DNIT – ME 084/94) apresentando diâmetro máximo de 4,75 mm e massa específica aparente de 2,62 g/cm<sup>3</sup>. O pó de pedra apresentou densidade de 2,70 g/cm<sup>3</sup> e verificou-se através do ensaio de equivalente areia (DNIT-ME 054/97) que o pó de pedra apresenta equivalente areia igual a 85,5%.

##### Massa Específica Real do fíler

Na Tabela 7 está inserido o resultado obtido, para a amostra do resíduo do vidro, do ensaio da massa específica real dos grãos.

Tabela 7 - Massa específica real do resíduo do Vidro

	Massa específica real	Desvio padrão
Resíduo do vidro	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
	2,42	± 0,0005

#### 4.1.2 Distribuição dos tamanhos dos grãos dos fíleres

As partículas que compõem a amostra do resíduo de vidro apresentam diâmetros máximos das partículas iguais a 75 µm, visto que o mesmo, para ser utilizado como fíler foi peneirado na peneira ABNT de N<sup>o</sup> 200.

A caracterização física do resíduo do vidro, do material que passa na peneira ABNT de N<sup>o</sup> 100, realizada a partir da análise da distribuição dos tamanhos das partículas, obtida com o aparelho analisador de partículas por difração a laser, encontra-se apresentada na Figura 27 .

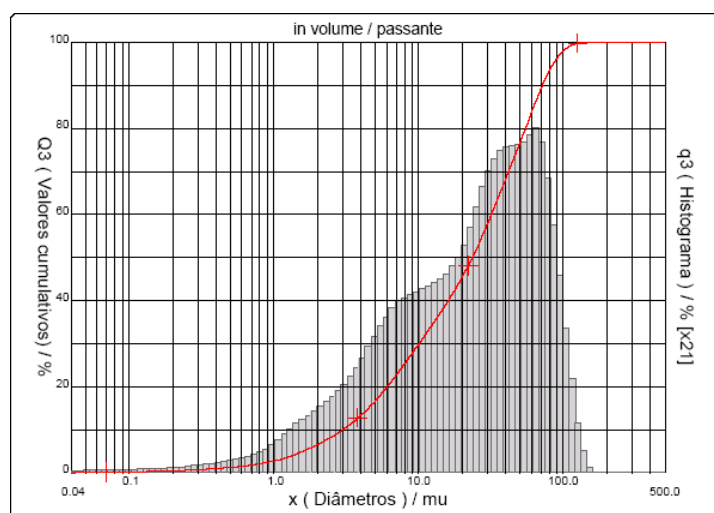


Figura 27 - Distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo do Vidro obtida por difração a laser

O fíler utilizado atende as especificações do DNIT, que classifica um resíduo como fíler quando ele passa 100% na peneira ABNT de n<sup>o</sup> 80 e pelo menos 65% na peneira ABNT de n<sup>o</sup> 200, para o uso na pavimentação, sendo a distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo de vidro mais fina, ou seja, 92% do material alvo da pesquisa têm diâmetro inferior a 75  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 Análise Química

Para uma melhor caracterização do resíduo do vidro, foi realizada análise química convencional. A Tabela 8 mostra a composição química do resíduo em seu estado natural. O resíduo vítreo possui características de vidro de soda – cal de acordo com os valores percentuais dos óxidos de sódio (7,90%) e cálcio (5,60%). Os resultados obtidos são coerentes com os valores referenciados na literatura que apresentam o vidro plano como composto por 70% de sílica e quantidades significativas de óxido de sódio e de cálcio.

Tabela 8- Análise Química das matérias-primas e do resíduo vítreo

Amostras	P.F. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	R.I. (%)
Resíduo Vítreo	0,17	69,76	8,54	traços	0,02	nd	5,60	3,43	7,90	2,94

P.F. – perda ao fogo, R.I. – resíduos insolúveis, nd – não determinado

#### 4.1.4 Análise Térmica

As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, os resultados da análise térmica diferencial e da termogravimetria para o resíduo do vidro. A curva DTA apresenta duas bandas endotérmicas nos intervalos de 700 a 750°C e entre 800 e 1000°C características da fusão do material. Na curva TG observou-se uma perda de massa insignificante o que mostra a alta estabilidade térmica do vidro plano em decorrência do seu processo de Têmpera. O valor da perda de massa encontrada corrobora os dados obtidos na análise química que apresenta perda ao fogo de apenas de apenas 0,17%.

Uma vez que as misturas asfálticas não podem atingir temperaturas superiores a 177°C e de acordo com as curvas de análises térmicas só ocorrerá alterações nas propriedades do resíduos a partir de 800°C, portanto é possível inferir que o resíduo vítreo não sofrerá influência das variações de temperaturas quando utilizado como filer nas misturas.

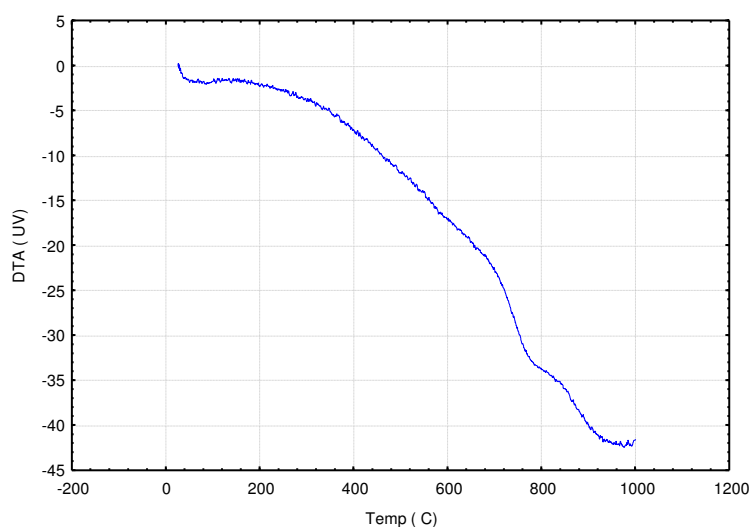


Figura 28 – Curva DTA do vidro plano na atmosfera de N<sub>2</sub> e razão de aquecimento de 10°C/min

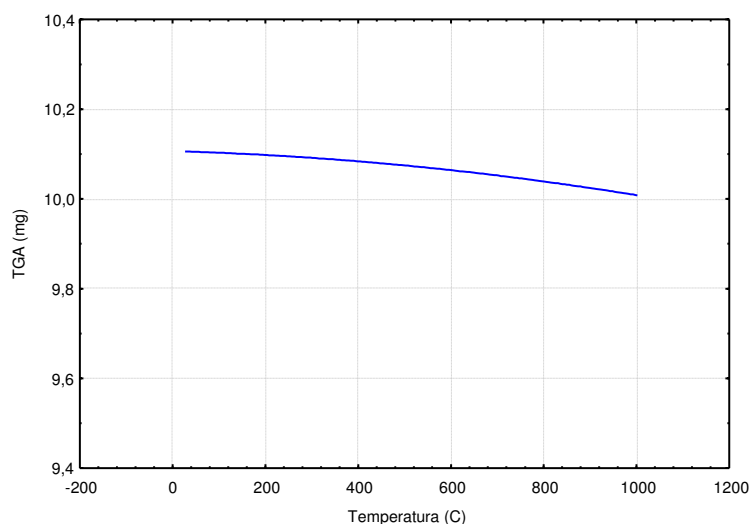


Figura 29 – Curva TG do vidro plano na atmosfera de N<sub>2</sub> e na razão de aquecimento de 10°C/min

#### 4.1.5 Difração de Raios-X

Através do difratograma de raio-x pode-se identificar de forma rápida e confiável a composição mineralógica em materiais. Na Figura 30 pode-se observar a não existência de picos agudos que são característicos de materiais cristalinos. No entanto, pode-se observar uma banda que se estende entre 13 a 40°, com máximo em torno de 26,56°, característico da presença de sílica na amostra.

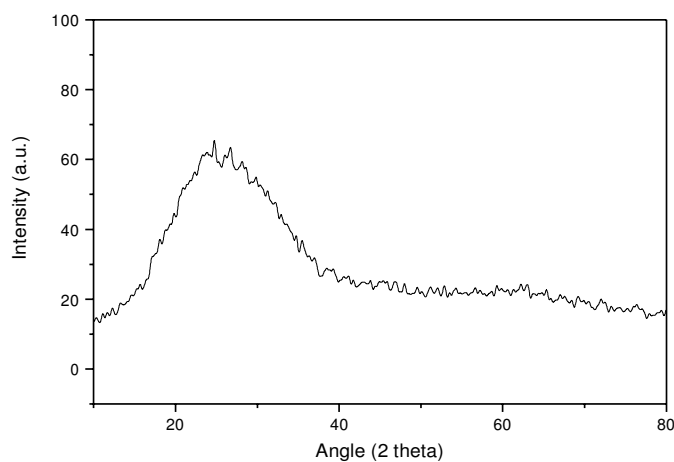


Figura 30 - Difratograma de Raios-X da amostra de resíduo de vítreo com varredura de 2° < 2θ < 80°.

#### 4.1.6 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (IR)

De acordo com o espectro apresentado na Figura 31 as bandas na região de  $3430\text{-}3450\text{ cm}^{-1}$ , são atribuídas as vibrações de estiramento do grupo estrutural hidroxila e do grupo OH, referente a água adsorvida presente nos materiais. As bandas entre  $3626\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ , na literatura dizem respeito ao alumínio coordenado ao sódio e hidrogênio. Na faixa de  $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$  está relacionado com vibrações de absorção relativo ao grupo Alanol (Al – O). Na região entre  $1004\text{-}1045\text{ cm}^{-1}$  características das ligações Si-O-Si e em torno de  $915\text{-}523\text{ cm}^{-1}$  correspondentes às camadas octaédricas do aluminossilicato.

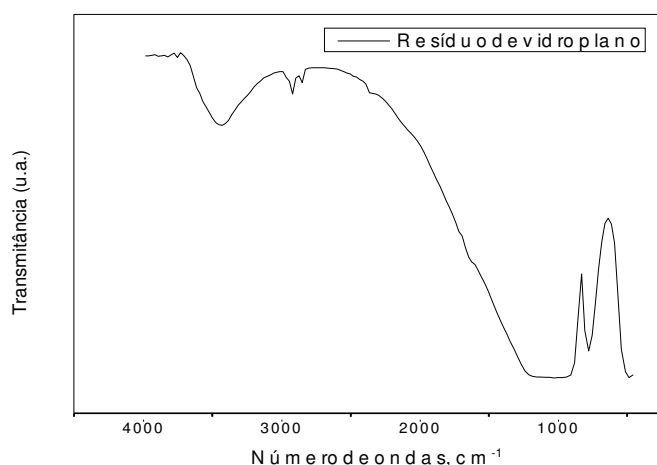


Figura 31 – Espectro no infravermelho da amostra de resíduo de vidro plano.

#### 4.1.7 Ensaio de caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP empregado na mistura foi do tipo 50/70. A densidade foi  $1,027\text{g/cm}^3$ . A caracterização do mesmo foi fornecida pela LUBNOR (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste) (Tabela 9).

Tabela 9- Caracterização do CAP utilizado na pesquisa

Ensaio	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	63	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	46 (mínimo)	48,2	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E102	141 (mínimo)	220	S
Viscosidade Brookfield 135°C- SP21 20RPM	D4402	274(mínimo)	437	Cp
Viscosidade Brookfield 150°C- SP21	D4402	12(mínimo)	219	cp
Viscosidade Brookfield 177°C- SP21	D4402	57 a 285	79	Cp
Ductibilidade a 25°C	D113	60(mínimo)	>150	Cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5(mínimo)	99,9	%massa
Ponto de fulgor	D92	235(mínimo)	298	°C
Índice de Susceptibilidade Térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1,2	
Aquecimento a 177°C	X215	Não espuma	Não espuma	

Fonte: LUBNOR(2006).

#### 4.2 Ensaio com o cimento asfáltico de petróleo e fíler

Para o estudo do comportamento mecânico da mistura asfáltica e da interação do fíler/CAP, com os incrementos dos fíleres ao CAP, foi realizado o ensaio de viscosidade Saybolt Furol. Os resultados alcançados com a realização do ensaio de viscosidade para as misturas entre o CAP e os fíleres, em função da variação em relação ao volume de CAP, foram lançados em um gráfico (figura 32).

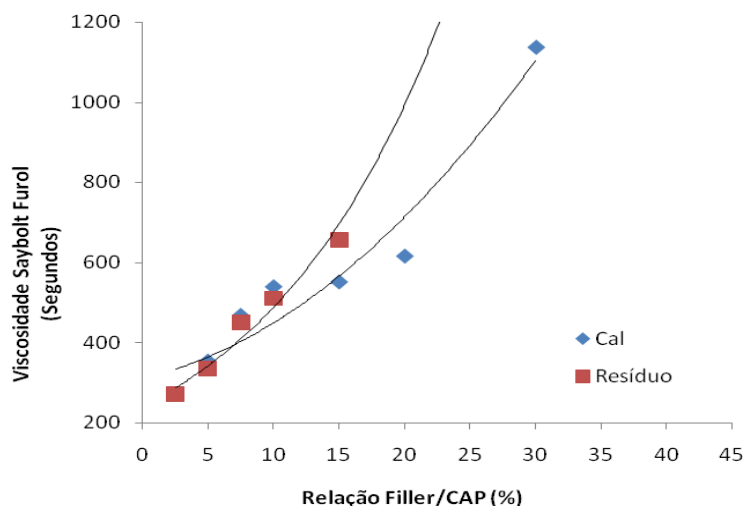


Figura 32 - Valores de viscosidade Saybolt-Furol para o CAP50/70 com os fíleres cal e resíduo em função do incremento da relação fíler CAP50/70 sobre amostra do ensaio

O gráfico da viscosidade Saybolt-Furol em função da mistura (CAP+fíler) apresenta tendência crescente segundo um modelo polinomial quadrático, acarretando um aumento da viscosidade do mastique com o incremento de fíler.

Puzinauska (1983) observou estes mesmos incrementos para viscosidade cinemática. Lucena (2008) realizou um estudo de viscosidade saybolt-furol comparando o resíduo dos cascalho de perfuração de poços de petróleo com a cal e o cimento, o resultado obtido mostrou o fíler cal como o que apresentou melhor desempenho.

Portanto, como a curva de viscosidade do fíler resíduo vítreo similar a do fíler cal, existe uma interação satisfatória entre o CAP e o resíduo.

#### 4.3 Ensaios com misturas de agregados graúdo e miúdo, fíleres e CAP

##### 4.3.1 Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados e dos fíleres

A Figura 33 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos agregados (granulometria por peneiramento NBR 7181, ABNT, 1984). Os resultados encontrados são fundamentais para a realização das dosagens experimentais da mistura asfáltica.

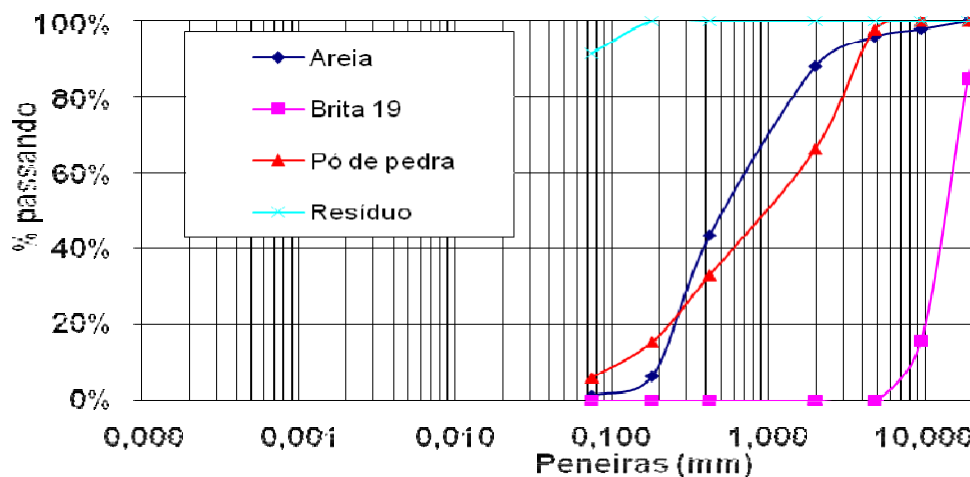


Figura 33 – Curva de distribuição granulométrica - agregados

Após caracterização física individual dos materiais foi realizada a mistura observando os limites pré-estabelecidos no domínio da faixa “B” do DNIT. A faixa B foi escolhida por ser mais aberta que a faixa C permitindo uma melhor evaporação e conseqüentemente retardando a formação de fissuras provocadas pela umidade do pavimento. A faixa B pode ser utilizada tanto na camada de rolamento ou na camada de binder. Para tal, foi realizada a estabilização mecânica com a mistura dos materiais. A composição final das misturas com o fíler resíduo do vidro estão inseridas Tabela 10. A Figura 34 apresenta a curva de distribuição granulométrica da mistura.

Tabela 10 - Distribuição dos tamanhos das partículas na elaboração do traço

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO										
	BRITA		AREIA		PÓ DE PEDRA		FÍLER		COMBIN. RESULT.	Faixa “B” DNIT	
	TOTAL	50%	TOTAL	15,0%	TOTAL	30,0%	TOTAL	5%		PT. MED.	LIMITES
11/2"	100,00	50,00	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	5,00	100,00	100	100
1"	100,00	50,00	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	5,00	100,00	97,5	95-100
3/4"	84.83	42,42	100,00	15,00	100,00	30,00	100,00	5,00	92,42	90	80-100
3/8"	15.47	7,74	97,87	14,68	100,00	30,00	100,00	5,00	57,42	62,5	45-80
Nº 4	0,00	0,00	95,85	14,38	97,68	29,30	100,00	5,00	48,68	44	28-60
Nº 10	0,00	0,00	88,14	13,22	66,22	19,87	100,00	5,00	38,09	32,5	20-45
Nº 40	0,00	0,00	43,55	6,53	33,00	9,90	100,00	5,00	21,43	21	10-32
Nº 80	0,00	0,00	6,44	0,97	15,35	4,61	100,00	5,00	10,57	14	8-20
Nº 200	0,00	0,00	1,30	0,20	6,00	1,80	91,50	4,58	6,57	5,5	3-8



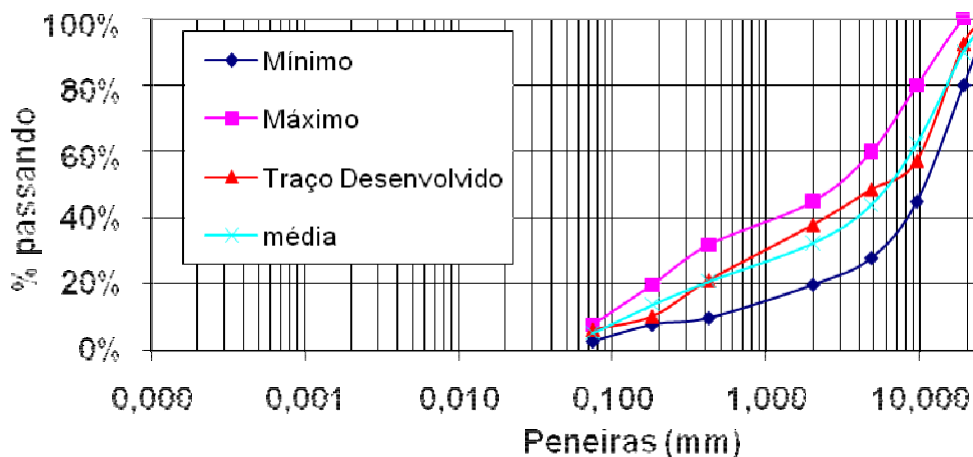


Figura 34 – Curva de distribuição granulométrica

#### 4.3.2 Ensaio Marshall

Com o objetivo de avaliar o comportamento da mistura asfáltica com a variação do teor de fíler e a susceptibilidade à presença de água, foram confeccionados 24 corpos-de-prova (12 submetidos a imersão e 12 sem imersa) variando o teor de fíler em 2, 3, 4, e 5%.

##### 4.3.2.1 Estabilidade

Na Figura 35 estão inseridos os resultados obtidos para a estabilidade Marshall relativos aos ensaios realizados com os corpos-de-prova. As respectivas curvas apresentam, também, os valores da estabilidade Marshall em função dos incrementos dos fíleres obtidos para os corpos-de-prova submetidos à imersão em água e sem imersão. Os valores de estabilidade, para os corpos-de-prova com imersão, apresentam tendência crescente até o percentual de 4%, após este valor ocorre uma queda da estabilidade. Nos corpos-de-prova sem imersão não ocorre diminuição da estabilidade no teor de 5%.

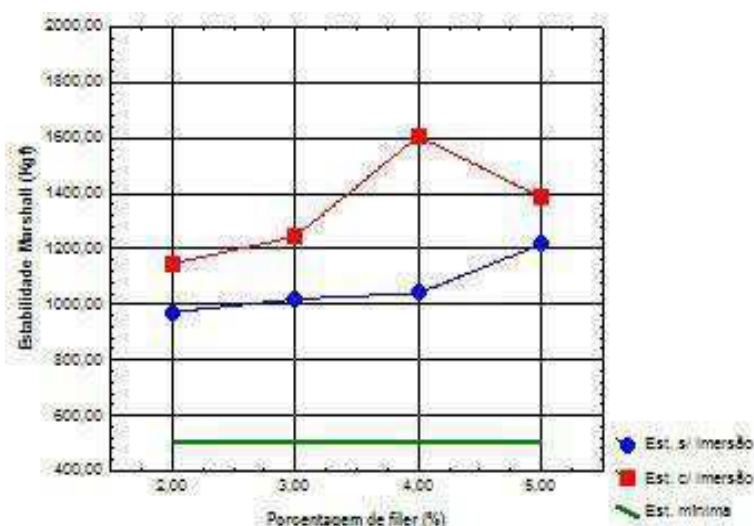


Figura 35- Estabilidade Marshall

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

A estabilidade mínima exigida para trafego alto, com  $N$  superior a  $5 \cdot 10^6$ , segundo o DNIT é de 500 kgf para 75 golpes, este valor foi alcançado para todos os corpos-de-prova moldados. O declínio da estabilidade observado após o teor de 4% nos corpos-de-prova com imersão foi explicado por Bernucci et al. (2007) que relata que ao aumentar a porcentagem do pó, os vazios são reduzidos e ocorre um aumento da trabalhabilidade da mistura asfáltica. A partir de certo ponto, o pó começa a prejudicar a trabalhabilidade, bem como a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas e alterando a capacidade de compactação da mistura.

Os valores de estabilidade dos corpos-de-prova com imersão são superiores aos sem imersão, e pode ser explicado pela infiltração da água nos vazios que deixa a mistura mais rígida.

#### 4.3.2.2 Relação Betume/ Vazios

Na Figura 36 estão apresentados os resultados obtidos para a relação betume/vazios Marshall relativos aos ensaios realizados com os corpos-de-prova. As respectivas curvas apresentam, também, os valores do parâmetro

em função dos incrementos dos fíleres obtidos para os corpos-de-prova submetidos à imersão em água e sem imersão.

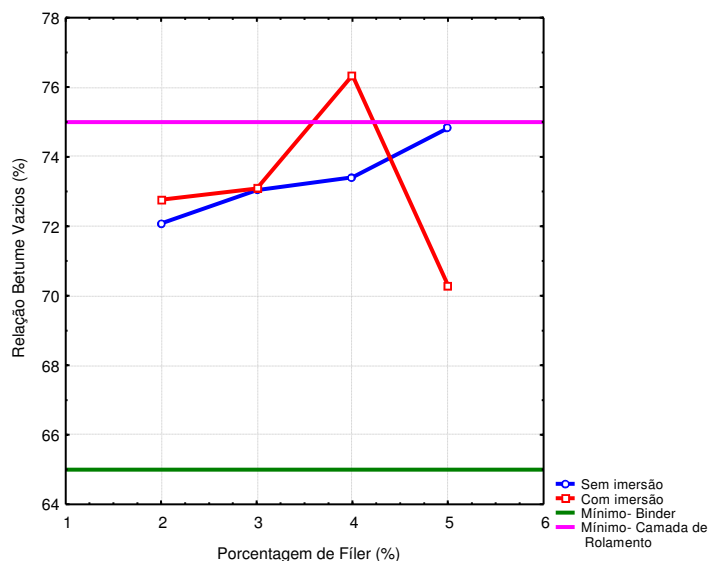


Figura 36- Relação betume/vazios Marshall

Cominsky (1998) cita a percentagem de 75% como o valor ideal para a relação betume/vazios. Em rodovias, com médio a alto volume de tráfego, valores de relação betume/vazio (RBV) menores que 65% pode causar danos prematuros ou excessivo endurecimento do CAP causando trincas e desagregações. Enquanto, valores maiores que 85% podem ocasionar danos como exsudação, corrugação e deformação permanente.

Com relação ao parâmetro RBV, os corpos-de-prova moldados com percentual de 4% atenderam as especificações do DNIT para ser utilizada na camada de rolamento enquanto os moldados com teor de 5% podem ser empregados como binder.

#### 4.3.2.3 Vazios

Na Figura 37 estão inseridos os resultados obtidos para o parâmetro relação vazios Marshall relativos aos ensaios realizados com os corpos-de-prova moldados. As respectivas curvas apresentam, também, os valores da estabilidade Marshall em função dos incrementos dos fíleres obtidos para os corpos-de-prova submetidos à imersão em água e sem imersão.

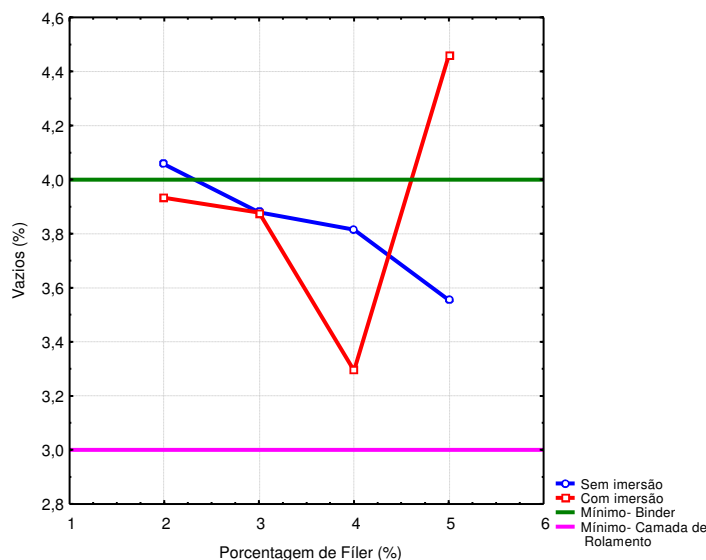


Figura 37- Vazios Marshall

Misturas com elevado número de vazios são permeáveis, menos duráveis e com menor resistência a deformação, enquanto o baixo volume de vazios (inferior a 3%) acarreta problemas de estabilidade que pode vir a ocasionar deformação permanente.

Ambas as curvas se enquadraram na faixa exigida para atuar como camada de rolamento e apenas os teores de 5% com imersão e de 2% na curva sem imersão foi superior ao mínimo exigido pela norma do DNIT para atuar como binder.

#### 4.3.2.4 Vazios do agregado Mineral -VAM

O VAM mínimo recomendado pela metodologia SUPERPAVE é o mesmo exigido pelo método Marshall. 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. A tabela 11 apresenta o VAM mínimo necessário em função do tamanho máximo nominal do agregado e a tabela 12 apresenta os valores encontrados para a mistura asfáltica utilizando o resíduo vítreo.

Tabela 11 – Requisitos do VAM

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

Fonte: Cominsky et. al. (1998)

Tabela 12- Dados de VAM

	Porcentagem de fíler(%)	VAM
Corpos-de -prova com imersão	2	14,44
	3	14,40
	4	13,92
	5	15,02
Corpos- de -prova sem imersão	2	14,53
	3	14,38
	4	14,34
	5	14,12

De acordo com a tabela 11 o VAM mínimo exigido para um diâmetro máximo de agregado de 19 mm é de 13%, portanto todos os valores obtidos para os corpos-de-prova que utilizam resíduo vítreo como fíler encontram-se acima do recomendado pela metodologia Marshall e SUPERPAVE.

#### 4.3.3 Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral

Na Figura 38 estão lançados em gráfico os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral com os corpos-de-prova moldados com o fíler de resíduo de vidro. Nesta fase foram moldados os corpos-de-prova utilizando a mesma proporção de materiais do ensaio Marshall e variando os teores de fíler de 2%, 3%,4% e 5%.

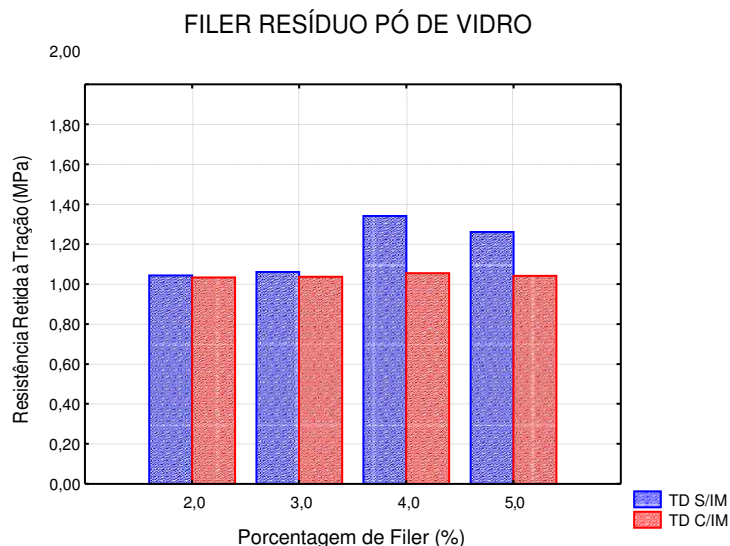


Figura 38 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Todos os teores de fíler 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 1,2 MPa referenciados na literatura para este tipo de mistura.

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

A adição de Fíler proporciona um aumento da resistência à tração entre 2 e 4% , sofrendo um decréscimo no teor de 5%. Este comportamento foi mais evidente nos corpos-de-prova sem imersão, os imersos apresentaram pequenas variações. Esta diminuição entre os teores de 4 e 5% ocorre devido à incorporação de fíler atingir uma quantidade que começa a separar as partículas grossas, prejudicando a compactação da mistura. Isto corrobora para afirmar que o acréscimo de fíler, realmente, diminui a susceptibilidade da mistura asfáltica à presença de água.

A redução na resistência a tração após a porcentagem de 4% é explicado pelo fato que a partir de certa quantidade de finos, os grãos graúdos não se tocam o que provoca a diminuição da resistência mecânica, expondo uma maior quantidade de finos e conseqüentemente uma superfície menos rugosa.

A figura 39 apresenta os resultados obtidos por Lucena (2008) para o ensaio de tração indireta por compressão diametral. A similaridade do comportamento dos fíleres pó calcário, resíduo oleoso do cascalho de perfuração e resíduo vítreo pode ser explicado por eles apresentarem quantidade significativa de  $\text{SiO}_2$  em sua composição química.

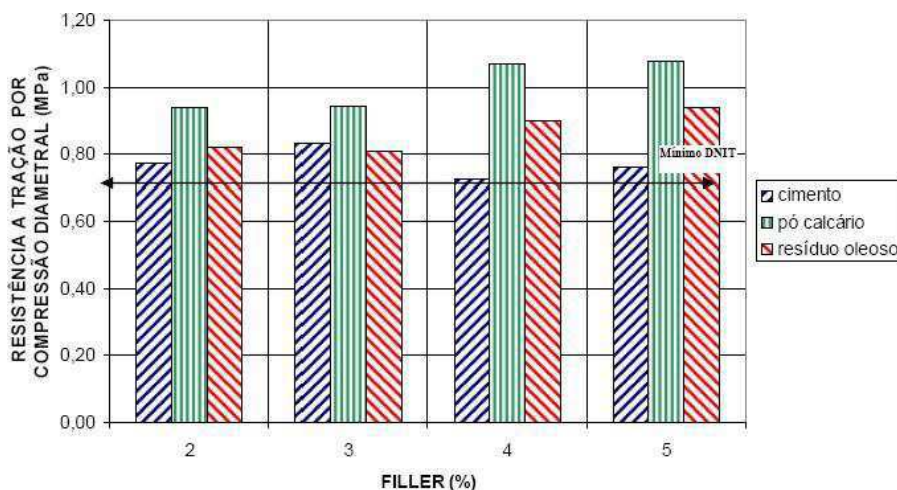


Figura 39 - Resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Fonte: Lucena (2008)

#### 4.3.4 Ensaio de Lottman

Neste ensaio foram moldados os corpos-de-prova na mesma proporção de materiais do ensaio Marshall, variando os teores de fíler em 2,3,4 e 5%. Na Figura 40 estão lançados em gráficos os resultados da relação da Resistência à Tração, RRT, obtidos com o auxílio do pórtico de Lottman, para os corpos-de-prova.

Os resultados da RRT, para os teores de 2 a 5%, estão acima dos que são preconizados pela AASTHO (T 283-02 da  $RRT > 70\%$ ) e de 3 a 5 pelo SUPERPAVE (mínimo de 80%).

É importante destacar que o teor de 2% foi o que apresentou menor resultado e o teor de 4% o que teve melhor desempenho, este fato foi observado anteriormente para os parâmetros estabilidade e resistência a tração por compressão diametral.

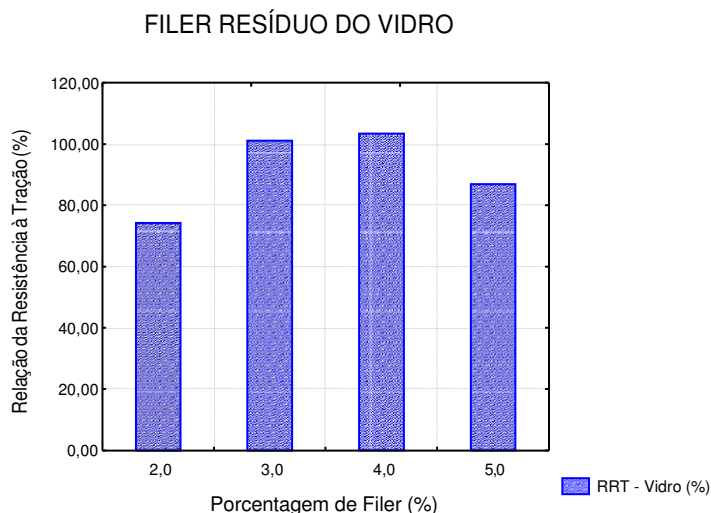


Figura 40 – Relação da resistência retida à tração

#### 4.3.5 Ensaio de Módulo de Resiliência

Nesta fase foram moldados corpos de prova com o teor de fíler de 4% para mistura, pois foi o que atendeu as especificações do DNIT, da AASHTO e do SUPERPAVE nos ensaios anteriormente realizados. A Figura 41 apresenta o módulo de resiliência para os corpos-de-prova que passaram pelas etapas de condicionamento e os que não passaram.

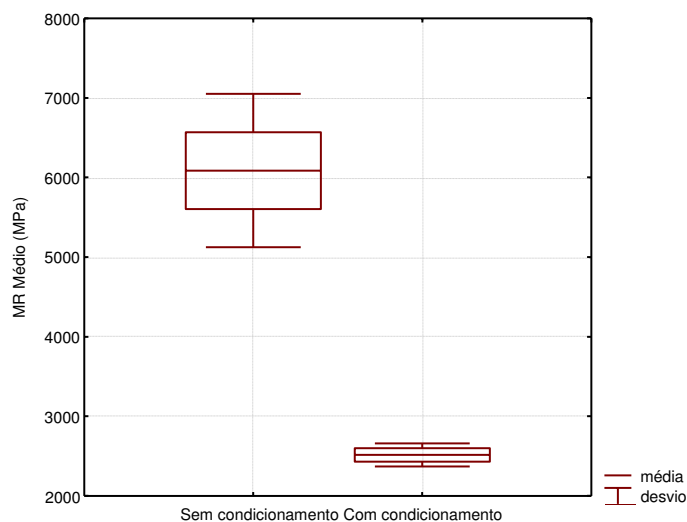


Figura 41 – Módulo de resiliência para a percentagem de 4% de fíler em misturas com condicionamento e sem condicionamento

De acordo com Bernucci et al. (2007) valores típicos de misturas asfálticas a 25<sup>o</sup> C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa.



Existe uma relação proporcional entre os valores obtidos pelo ensaio de resistência a tração e os de módulo de resiliência. Altos valores da resistência a tração indicaram a existência de elevado módulo de resiliência.

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 flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência a tração para evitar rupturas precoces (REIS, 2002). Portanto, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios pois são situados dentro da faixa de valores normalmente encontradas na literatura.

A diminuição do módulo de resiliência das amostras condicionadas com as que não sofreram condicionamento estão de acordo com o previsto por Schmidt e Graf (1972) apud Neves Filho (2006) que o módulo de resiliência tende a diminuir em torno de 50% quando as amostras passam por algum processo de saturação .

Marques (2004) avaliou 3 misturas diferentes a temperatura de 25<sup>o</sup>C com diferentes teores de ligante, o resultado obtido encontra-se na Figura 42. A figura mostra que as misturas com teor de ligante de 4,5% apresentaram módulo de resiliência variando de 4000 a 8000 MPa. Specht (2004) estudou a incorporação de resíduo de borracha como material de pavimentação e para o teor de CAP de 4,5% a temperatura de 25<sup>o</sup> obteve Módulos de resiliência no intervalo de 3000 a 6000 MPa. Os valores obtidos por ambos autores são condizentes com os encontrados para os corpos-de-prova que utilizam resíduo vítreo e não passaram pelo processo de condicionamento.

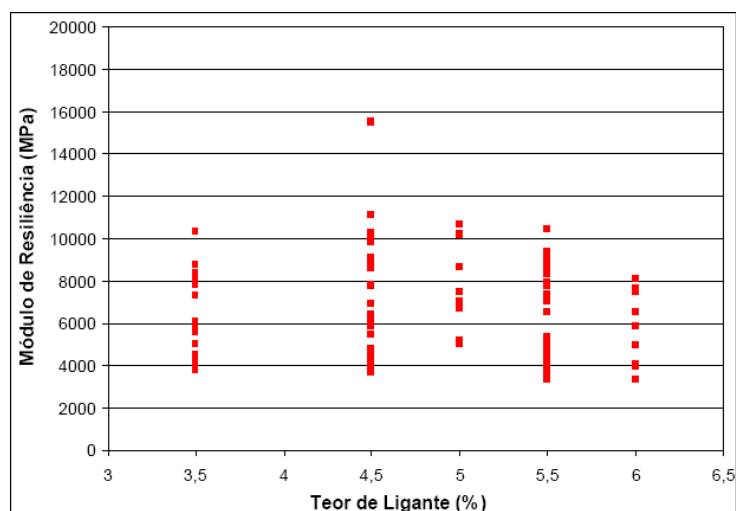


Figura 42 - Resultados do módulo de resiliência de todas misturas agrupados por temperatura (25°C)

Fonte: marques 2004

De acordo com Marques (2004) o procedimento DNER PRO 269/94 para projeto de pavimentos flexíveis permite a estimativa do módulo de resiliência da mistura em função da resistência à tração através do seguinte modelo:

$$MR = 5000 RT \quad (2)$$

Enquanto 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 (DNER ME 138/94) como parâmetro de estimativa do Módulo de Resiliência. Eles obtiveram a correlação de RT com o Módulo de Resiliência, para várias misturas ensaiadas pelo laboratório de misturas asfálticas da COPPE/UFRJ, dada pela expressão n° (3):

$$MR = -1336 + 4174xRT \quad (3)$$

Para o teor de 4% de fíler obtivemos um resistência a tração de 1,460 MPa. De acordo com a equação 2 o módulo de resiliência deveria ser de 7300 MPa enquanto o valor médio encontrado foi de 6282,6 MPa o que ocasiona um erro de previsão de 13%. O modelo sugerido por Motta & Pinto (1994) estimou o valor do módulo em 4758,04 MPa provocando um erro, em relação ao valor obtido na realização dos ensaios, de 32%. Portanto, o modelo proposto pelo

DNIT apresentou uma melhor aproximação dos resultados obtidos em laboratório e pode ser utilizado para estimativa do módulo de resiliência.

A Tabela 13 apresenta a relação entre os parâmetros MR/RT. De acordo com Morilha (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 a tração devido a concentração de esforços no interior.

Tabela 13- Relação MR/ RT para mistura sem condicionamento

Itens de análise	Valores
Módulo de Resiliência (MR)	6282,68 MPa
Resistência a tração (RT)	1,460 MPa
MR/RT	4303

Ceratti (1996) e Oliveira (1997) citam que a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração de misturas confeccionadas com ligantes asfálticos convencionais se situa entre 4500 e 5000. O valor encontrado com a utilização de resíduo vítreo foi de 4303, embora o valor seja próximo do citado pela literatura, este assunto merece uma análise com um banco de dados maior.

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

A Figura 43 apresenta 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 à dependente do tempo durante a fase de descarregamento ou período de repouso de um ciclo (MARQUES,2004).

Segundo Brito (2006) apud Bernucci (2007) quanto melhor for a relação entre 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, quanto maior for o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os dois módulos, melhor será o comportamento das misturas quando submetidas as ações cíclicas do tráfego. Portanto, o coeficiente de determinação encontrado utilizando o resíduo vítreo como fíler mostra que ocorre boa correlação entre os módulos.

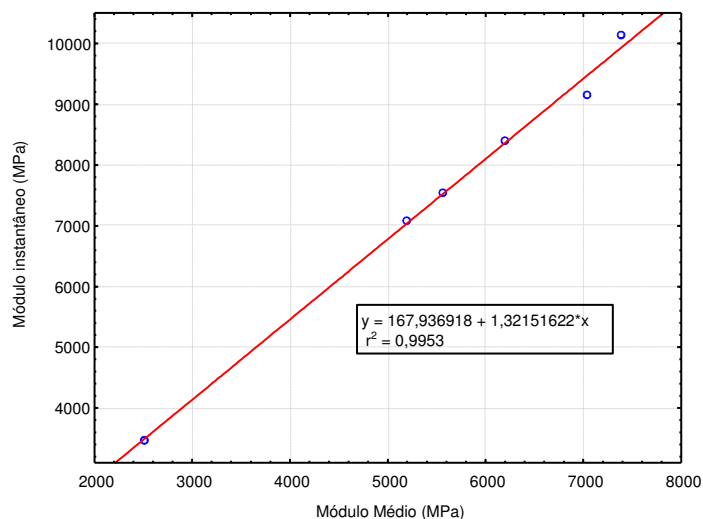


Figura 43– Relação de módulo de resiliência total e instantâneo para a porcentagem de 4% de fíler

Os módulos de resiliência foram determinados segundo a AASHTO TP-31 e segundo a NCHRP Project 1-28. A Figura 44 apresenta a relação entres os dois módulos, uma vez que este trabalho se restringiu a apresentação dos valores dos módulos totais obtidos segundo procedimento da AASHTO.

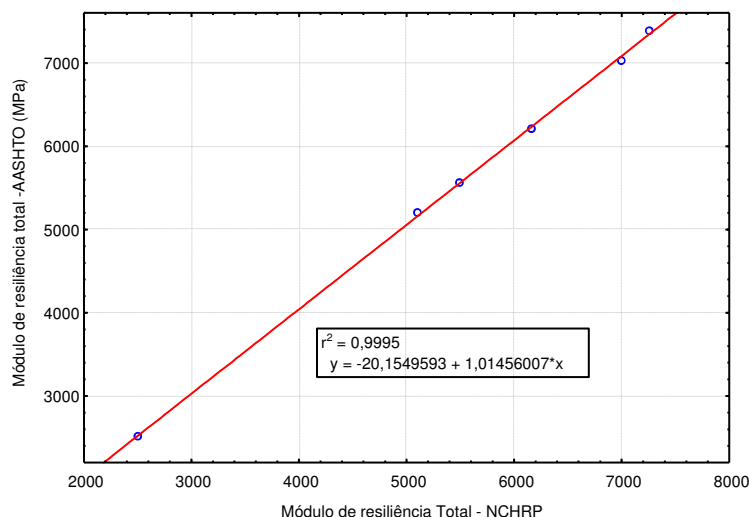


Figura 44 – Relação de módulo de resiliência total de acordo com a AASHTO E A NCHRP para a porcentagem de 4% de fíler

De acordo com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi observada a existência de relações bem definidas do ponto de vista estatística entre os valores do módulo de resiliência obtido pelo procedimento da AASHTO como o obtido pela NCHRP. Este comportamento foi também observado por Gigante (2007).

#### 4.4 Considerações Finais

Ao considerar o teor de 4% de fíler para mistura observa-se que este teor atende a todas as especificações contidas nas normas do DNIT, da AASHTO e do SUPERPAVE considerando os parâmetros: da Estabilidade; da Tração Diametral Indireta; e da Relação da Resistência à Tração (RRT) (Tabela 14).

Tabela 14 – Propriedades mecânicas: estabilidade, tração diametral indireta e relação da resistência à tração (RRT) para o teor de 4% de fíler

Material	Estabilidade Marshall (Kgf)	Tração Diametral Indireta (MPa)	Relação da Resistência à Tração – RRT (%)
Resíduo vítreo	1040,902 – 1606,41*	1,34 – 1,05*	103,41

\* Corpos-de-prova submersos em água.

Apesar dos resultados obtidos na realização do ensaio Marshall e de resistência a tração indicarem o teor de 4% como o mais resistente, é necessário a avaliação em conjunto com o módulo de resiliência para a mistura apesar de ser resistente, perder sua a flexibilidade e deste modo fadigar prematuramente. Esta análise deve envolver as demais camadas que constituem o pavimento.

O módulo de resiliência para os corpos de prova confeccionados com este teor ficou dentro do intervalo referenciado na literatura, da mesma maneira a diminuição do módulo das misturas submetidas ao condicionamento em relação as que não passaram pelo processo foi previsto por Schmidt e Graf (1972) apud Neves Filho (2006). Todavia, a relação MR/RT está fora do intervalo referenciado na literatura, necessitando de um maior banco de dados para confirmar este valor e a realização deste ensaio com os demais teores de fíler.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 Conclusões

De acordo com os ensaios realizados para avaliar a utilização do resíduo do vidro plano como fíler, visando diminuir a susceptibilidade das misturas asfálticas a presença de água, foi possível chegar as seguintes conclusões:

#### Ensaio de caracterização física e química do resíduo vítreo

- o resíduo trata-se de um vidro soda cal, composto predominantemente de óxido de silício, com pequena quantidade de óxido de cálcio e de sódio, com pequena quantidade de perda ao rubro e com elevado ponto de fusão.
- o resíduo após triturado apresentou granulometria aceitável para ser utilizado como fíler;
- o vidro plano apresentou estabilidade térmica a temperaturas elevadas, com perda de massa insignificante, o que possibilita sua incorporação ao mástico sem alterações de suas características.

#### Ensaio mecânicos de misturas asfálticas

##### Ensaio Marshall

- no caso da estabilidade houve uma tendência crescente com o incremento dos fíler. Todos os teores de fíler apresentam valores de estabilidade superiores aos estabelecidos pelo DNIT (500 kgf);
- os maiores incrementos nos parâmetros de estabilidade ocorreram quando os corpos-de-prova foram submetidos à imersão em banho Maria.

##### Ensaio de tração diametral por compressão indireta

- ao aumentar o percentual de fíler ocorre um aumento do valor da resistência a tração, porém todos foram superiores aos estabelecidos pelo DNIT (0,65 MPa).
- os corpos-de-prova que foram imersos em banho Maria apresentaram resistência a tração inferior aos que não sofreram imersão.



### Ensaio de Lottman

- as misturas avaliadas apresentaram resultados de razão de resistência à tração (RRT) acima dos valores mínimos recomendados pela AASHTO e pelo SUPERPAVE. O teor de fíler que forneceu melhores resultados foi o de 4%.

### Ensaio de módulo de resiliência

- o condicionamento dos corpos-de-prova provocou uma diminuição no módulo de resiliência com relação às não condicionadas;

- os coeficientes de determinação indicaram boa correlação entre o módulo instantâneo e o módulo médio e entre os métodos da AASHTO TP-31 e a NCHRP Project 1-28.

### Considerações Gerais

- os resultados dos ensaios Marshall, de tração diametral e o ensaio de Lottman indicaram, para a mistura estudada, o teor ideal de fíler de resíduo vítreo que pode ser incorporado na composição do material asfáltico é de 4%. Os resultados do ensaio de módulo de resiliência encontram-se dentro do intervalo referenciado na literatura. Entretanto como a relação MR/RT encontra-se fora da faixa especificada, é necessária uma maior amostragem com este teor para confirmar o valor desta relação e a realização deste ensaio com os demais teores de fíler para verificar se os demais atendem as recomendações.

## 5.2 Sugestões para futuras pesquisas

A pesquisa realizada visando a utilização do resíduo vítreo deve ser vista como um estudo inicial para outras pesquisas que permitam um melhor conhecimento das propriedades deste material quando utilizado como fíler em misturas asfálticas. Para isso, sugere-se:

- Realização de novas pesquisas utilizando outros teores de composição em misturas asfálticas;
- Realização da dosagem SUPERPAVE utilizando resíduo vítreo como fíler;
- Executar e observar o comportamento de um trecho experimental utilizando o material da pesquisa;

- Realizar uma análise econômica da proposta de utilização do resíduo vítreo em revestimentos asfálticos;
- Realizar ensaios com carga repetida e ensaio de fadiga em misturas contendo diferentes teores de fíler sob diferentes condições de umidade;
- Realizar ensaios de cisalhamento em mastique contendo teores de fíler diferentes.

CAPÍTULO 6  
REFERÊNCIAS

## 6 REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO – Associação Brasileira das Industrias Automáticas de Vidro.  
Anuário ABIVIDRO 2006. ABIVIDRO, São Paulo, 2006
- AIREY,G.D. ,COLLOP, A.C. e THOM,N.H. Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Slag and Glass Secondary Aggregates. In: 8th CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA, 2004. Anais. África do Sul, volume 1 , 2004
- AKERMAN, M. Apostila de Natureza, Estrutura e Propriedades do vidro. Inovação Tecnológica. (s.d.). Materiais Avançados. Disponível: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160070110>, acesso em 27 de setembro de 2008
- 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
- 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
- ANDERSON, R. M. & D ANGELO, J.D , Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage. In:Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements,2003. Anais. San Diego, Transportation Research Board, California, Estados Unidos, 2003
- ÂNGULO, S.C. et al, Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem de resíduos na construção civil, in IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001
- AASHTO- AMERICAN ASSOCIATIO OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICALS. AASHTO T-283: resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage. Washington, USA, 1989

- AASHTO- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO MP 8-01: standard specification for designing Stone Matrix Asphalt (SMA). USA, 2005
- ASSIS, O.B.G. O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. Cerâmica Industrial. São Paulo. Br. v.11 , n.53, p.105-113, 2006
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984
- BERNUCCI, L. B. et al., Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros, Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007
- BONET, I. I. Valorização do Resíduo Areia de Fundação (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em engenharia de Produção, Florianópolis: UFSC 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
- BRITO, J.A. Cidade versus entulho. In: 2 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
- 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. 13<sup>o</sup> Encontro de Asfalto, IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 1996
- COELHO, V. Considerações sobre o Método Marshall. In: 26<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Aracaju-SE, 1992
  - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE CNT, Revista da Confederação Nacional de Transporte, ano VII, número 91, pp. 15, Rio de Janeiro, 2003
  - 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
  - DAVILA, J.M., 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
  - 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 003/99: Material betuminoso: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1999
  - 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 por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994
- EPPS, J. et al. , Treatments. In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, 2003. Anais. San Diego, Transportation Research Board, California, Estados Unidos, 2003
- FARIAS, M.M., ROSENO, J.L. & CARVALHO, J.C., Anisotropia das Propriedades Hidráulicas de Asfaltos Drenantes com Agregados Calcários, 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2004
- 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
- FERREIRA, A.C.S. Contabilidade Ambiental: Uma Informação para o Desenvolvimento Sustentável. São Paulo, Atlas, 2003.
- FURLAN, A.P. et al., 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
- 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
- GOOD, R.J. & VAN OSS, C.J. . The modern theory of contact angles and the hydrogen bond component of surface energies. In M.E. Schrader and G. Loeb (Eds.), Modern approach to wettability: Theory and applications (pp. 1-27) New York: Plenum Press, 1991

- GOUVEIA et al., 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, 7. Curitiba, 2000.
- HANSON, et al., Mix Design Study for San Ramon – Barranca Highway, USA
- HICKS et al., 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
- Hunter, E.R., & KSAIBATI, K., Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes, Universidade de Wyoming, USA, 2003
- INTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (2000).Censo 2000. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/>
- JOHN, V.M.J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: 2 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. Universidade de São Paulo.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
- LEITE et al., Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas,1996, Petróleo Brasileiro S.A – PETROBAS, Rio de Janeiro ,1996



- LIBERTADORI, L.A. & CONSTANTINO, R.S., Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte, in 18° 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, R. M. R. & ROMEIRO FILHO, A reciclagem de materiais e suas aplicações no desenvolvimento de novos produtos: um estudo de caso. In 3 congresso de gestão de desenvolvimento de produto, Florianópolis, 2001
- 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 In:35ª Reunião Anual de Pavimentação, 2004. Anais. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Pavimentação- ABPV, Brasil, 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
- LYTTON, R .L., Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures. Capítulo de Livro Editado por J. Youtcheff, Submetido para Publicação, 2004
- 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
- MARTINS, G. B. H.. Práticas Limpas Aplicadas às Indústrias Têxteis de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis , 1997

- 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
- 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, H.C. et al. Utilização de Resíduos Vítreos na Obtenção de Massas Cerâmicas, In IV Congresso de Iniciação Científica –UFCG, Campina Grande, 2006
- NEDER, L.T. C "Reciclagem de Resíduos Sólidos de Origem Domiciliar: Análise da Implantação e da Evolução de Programas institucionais de Coleta Seletiva em Alguns Municípios Brasileiros" Dissertação de Mestrado, PROCAM USP, 115p, 1995.
- 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.
- NICHOLSON, V. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 30–31 , 1932
- 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
- OLIVEIRA, P.M.F, Caracterização Mecânica de Misturas betuminosas preparadas com asfalto-polímero. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1997

- OLIVEIRA, C.G.M, Estudo das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante, dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, 2003
- 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 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, N.M.S., Diagnóstico e Classificação dos Resíduos Vítreos Gerados no Município de Campina Grande – PB. Dissertação de Mestrado. Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, 2007
- OLIVEIRA, J. C. Indicadores de Potencialidade e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis, 2007
- PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; LE CLOIREC, P.; Comparison of the hydraulic behaviour and quality of highway runoff water according to the type of pavement. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, 2000, disponível em [www.elsevier.com/locate/watres](http://www.elsevier.com/locate/watres)
- PAIS, J.C. Avaliação da Possibilidade de Utilização de Areias de Macho em Misturas Betuminosas para Camadas de Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho. Portugal, 2005
- PAIVA,C.E.L & SILVA, C.E.D.B.D, Estudo da Permeabilidade de Misturas Betuminosas. In:34<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, 2003. Anais.Campinas, Associação Brasileira de Pavimentação- ABPV, Brasil, 2003
- PAIVA. P. A & SOUZA, M. A reciclagem na construção civil: como economia de custos. Revista Eletrônica Administração, Ano 2005, Edição 06 , 2005
- PILKINGTON BRASIL LTDA. A História do Vidro Plano no Brasil. Em: <http://www.pilkington.com/the+americas/brazil/portuguese/about+pilkingt>

<on/history+of+float+in+brazil/default.htm>, acessado em 28 de setembro de 2008

- PINHEIRO, J. H.M. Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco), 2004, 166 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza
- PINTO, T.P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999
- REIS, Rafael M.I M., Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado. Tese de M.Sc., EPUSP-USP, São Paulo, SP, 2002
- REUTER, J. Vidros: técnicas em vidros – coleção manuais técnicos v.10. Universidade Federal da Paraíba/UFPB – Recife-PE, 1994.
- RICCO, S. Coleta Seletiva e Reciclagem. Resíduos Sólidos e Meio Ambiente no Estado de São Paulo/ Secretaria do Meio Ambiente, Coordenadoria de Educação Ambiental, 1993
- RIEDEL, W., AND WEBER ,H., Asphalt und Teer, 1934
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; ET AL., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Educational Foundation, Lanham, Maryland, 1998.
- SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2ª edição revisada e ampliada. v.1, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1989
- SANTOS, M. A. , Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio Via Ensaio de Laboratório, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais 2001
- SAUTEREY, R. Proceedings Aiaeenpc. v.1, 37, 1978
- SAVILLE, V., & AXON, E., Adhesion of Asphaltic Binders to Mineral Aggregates. Association of Asphalt, 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
- SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. 1ªed., São Paulo, Editora Pini,1997
- SILVA, G.M, SANTOS, E.F., FEITOSA, J.P.A e SOARES, J.B. Caracterização de Borracha de Pneu Moído e de Asfalto Modificado Oriundo de Petróleo Brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Materiais,2002. Anais. Natal, volume 1, Brasil, 2002
- SOUZA, F. V., Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE, 2005
- SOUZA, J. N Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados a quente. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, Campina Grande, 2001
- 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
- VASCONCELOS, K. L. Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, 2004
- TANDON, V. et al., Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. In: Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, 2003. Anais. San Diego, Transportation Research Board, California, Estados Unidos, 2003
- 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
- VASQUES, R.A., ROCHA, V.C, FERNANDES, D.M.P. Vidro Reciclado Aplicado a Revestimentos Cerâmicos. In: 51 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2007. Anais. Bahia, Volume 1, Brasil,2007

- 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, p 23 – 49. 1991
- WESSELING, D. H. et al., Estudo Laboratorial do Comportamento de Misturas em Concreto Asfáltico com diferentes tipos de filleres. In: 34<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Campinas , ABPV, São Paulo, 2003
- YOON, H. H.; TARRER, A. R.; Effect of Aggregate Properties on Stripping; Transportation Research Record 1171, Transportation Research Board , National Research Council, Washington, D.C., 1988
- ZANOTTO, E. D. Vidros de 4.000AC a 2.000DC. Engenharia de Materiais, V.1, n.1 p. 33-36, 1989

CAPITULO 7

ANEXOS

## 7 ANEXOS

Anexo A – Ensaio com o auxílio do pórtico de Lottman

Consta a planilha de cálculos resultantes dos experimentos realizados com o auxílio do pórtico de Lottman.

Anexo B – Ensaio Marshall

Constam planilhas de cálculos e resultantes dos experimentos realizados

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

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

Anexo D – Ensaio de Módulo de resiliência

Constam os resultantes do ensaio de módulo de resiliência



## 7.1 Anexo A

### 7.1.1 Ensaio com o Auxílio do Pórtico de Lottman

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

Tabela 15 – Ensaio com o auxílio do pórtico de Lottman

Corpos-de-prova	Percentagem de filer	h (cm)	d (cm)	Leitura( kgf)	corrigida (kgf)	r.tração (kgf/cm <sup>2</sup> )	r.tração (Mpa)	rtc/rts (%)
condicionados	2%	6,25	9,96	295	602,39	6,161	0,605	
	3%	6,19	9,94	350	714,70	7,395	0,726	
	4%	6,16	9,96	390	796,38	8,263	0,811	
	5%	6,19	9,97	320	653,44	6,746	0,662	
sem condicionamento	2%	6,67	10,17		883,17	8,293	0,814	74,29
	3%	6,37	10,25		749,41	7,311	0,717	101,15
	4%	6,46	10,33		837,22	7,991	0,784	103,41
	5%	6,45	10,32		811,70	7,763	0,762	86,90

## 7.2 Anexo B

### 7.2.1 Ensaio Marshall

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

Tabela 16 – Ensaio Marshall (sem imersão)

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Fíler GEOTECNIA																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE			FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREÇÃO	CORREGIDA	
	cm	g	g	cm³	d/f	-	-	-	100-i-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm		
	POR PESO DE AGREG.	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm³	d/f	-	-	-	100-i-J	100-J	I/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	mm
1		4,5	6,29	1198,6	691,4	507,2	2,36	2,47	10,43	85,22	4,36	14,78	70,52	4,36	537	1096,55	1,02	1118,49	3,96
2	2%	4,5	6,21	1198,6	695,4	503,2	2,38	2,47	10,51	85,89	3,60	14,11	74,49	3,60	528	1078,18	1,03	1110,52	4,36
3		4,5	6,26	1195,2	690,2	505,0	2,37	2,47	10,44	85,34	4,21	14,66	71,24	4,21	330	673,86	1,02	687,34	3,24
M		4,50					2,37	2,47					72,08	4,06				972,11	3,85
4		4,5	6,19	1197,9	696	501,9	2,39	2,48	10,53	85,84	3,63	14,16	74,34	3,63	507	1035,29	1,04	1076,71	3,96
5	3%	4,5	62,30	1196,1	692,4	503,7	2,37	2,48	10,48	85,40	4,12	14,60	71,76	4,12	425	867,85	1,03	893,89	3,57
6	ro2	4,5	6,11	1198,6	695,1	503,5	2,38	2,48	10,50	85,61	3,88	14,39	73,00	3,88	503	1027,13	1,06	1088,75	6,74
M		4,50					2,38	2,48					73,04	3,88				1019,78	4,76
7		4,5	6,30	1197,4	695,1	502,3	2,38	2,48	10,52	85,61	3,88	14,39	73,07	3,88	485	990,37	1,01	1000,27	5,5
8	4%	4,5	6,29	1196,5	696,6	499,9	2,39	2,48	10,56	85,95	3,49	14,05	75,17	3,49	500	1021,00	1,02	1041,42	5,55
9	ro2	4,5	6,27	1197,7	694,2	503,5	2,38	2,48	10,49	85,42	4,08	14,58	72,00	4,08	519	1059,80	1,02	1080,99	3,96
M		4,50					2,39	2,48					73,41	3,82				1040,90	5,00
10		4,5	6,11	1184,5	690,1	494,4	2,40	2,48	10,57	85,92	3,51	14,08	75,05	3,51	564	1151,69	1,06	1220,79	5,86
11	5%	4,5	6,13	1187,6	691,3	496,3	2,39	2,48	10,56	85,81	3,63	14,19	74,41	3,63	565	1153,73	1,05	1211,42	7,5
12	ro2	4,5	61,08	1201,9	700,2	501,7	2,40	2,48	10,57	85,91	3,52	14,09	75,01	3,52	563	1149,65	1,06	1218,62	5,5
M		4,50					2,39	2,48					74,83	3,55				1216,94	6,29

Tabela 17- Ensaio Marshall (com imersão)

DOSAGEM "MARSHALL" 75 golpes																			
ATECEL Fíler GEOTECNIA																			
CORPO DE PROVA - Nº	% DE LIGANTE NA MISTURA		ALTURA	PESO		VOLUME	PESO ESPECIFICO		VOLUME - % TOTAL			VAZIOS - %			LEITURA NO DEFLECT.	ESTABILIDADE			FLUÊNCIA
	a	b		NO AR	NA ÁGUA		APAR.	TEÓR.	LIG.	AGREG.	VAZIOS	AGREG.	REL. BET. VAZIOS	TOTAL		LIDA	CORREÇÃO	CORREGIDA	
	POR PESO DE AGREG.	POR PESO DE MIST.	cm	g	g	cm <sup>3</sup>	d/f	-	-	-	100-i-J	100-J	l/L*100	-	-	Kg	USAR TABELA	Kg	<u>mm</u>
1		4,5	6,31	1201,4	692,2	509,2	2,36	2,47	10,41	85,08	4,51	14,92	69,76	4,51	524	1070,01	1,01	1080,71	3,96
2	2%	4,5	6,30	1199,4	697	502,4	2,39	2,47	10,53	86,09	3,38	13,91	75,70	3,38	560	1143,52	1,01	1154,96	4,36
3		4,5	6,28	1200	694,6	505,4	2,37	2,47	10,48	85,62	3,91	14,38	72,84	3,91	580	1184,36	1,02	1208,05	3,24
M		4,50					2,37	2,47					72,77	3,93				1147,90	3,85
4		4,5	6,24	1198,1	694,9	503,2	2,38	2,48	10,50	85,63	3,87	14,37	73,09	3,87	591	1206,82	1,02	1230,96	3,96
5	3%	4,5	6,31	1201,1	694,1	507,0	2,37	2,48	10,45	85,20	4,35	14,80	70,62	4,35	579	1182,32	1,01	1194,14	3,57
6	ro2	4,5	6,23	1193,4	694,5	498,9	2,39	2,48	10,55	86,03	3,42	13,97	75,53	3,42	622	1270,12	1,03	1308,23	6,74
M		4,50					2,38	2,48					73,08	3,88				1244,44	4,76
7		4,5	6,32	1196,6	698,6	498,0	2,40	2,48	10,60	86,29	3,11	13,71	77,31	3,11	715	1460,03	1,01	1474,63	5,5
8	4%	4,5	6,21	1195,8	699,6	496,2	2,41	2,48	10,63	86,54	2,83	13,46	79,01	2,83	927	1892,93	1,03	1949,72	5,55
9	ro2	4,5	6,41	1201,1	696,9	504,2	2,38	2,48	10,51	85,55	3,94	14,45	72,72	3,94	690	1408,98	0,99	1394,89	3,96
M		4,50					2,40	2,48					76,34	3,29				1606,41	5,00
10		4,5	6,32	1191,4	694,3	497,1	2,40	2,48	10,57	85,95	3,48	14,05	75,25	3,48	695	1419,19	1,01	1433,38	5,86
11	5%	4,5	6,25	1193,1	690,1	503,0	2,37	2,48	10,46	85,06	4,47	14,94	70,05	4,47	702	1433,48	1,01	1447,82	7,5
12	ro2	4,5	6,40	1198,3	688	510,3	2,35	2,48	10,36	84,21	5,43	15,79	65,61	5,43	630	1286,46	0,99	1273,60	5,5
M		4,50					2,37	2,48					70,30	4,46				1384,93	6,29

Tabela 18- Dados do VAM

	Porcentagem de fíler	VAM
Corpos- de - prova com imersão	2	14,92
	2	13,91
	2	14,38
	Média	14,44
	3	14,37
	3	14,79
	3	13,97
	Média	14,40
	4	13,71
	4	13,45
	4	14,45
	Média	13,92
	5	14,05
	5	14,93
	5	15,79
	Média	15,02
Corpos- de - prova sem imersão	2	14,78
	2	14,10
	2	14,65
	Média	14,53
	3	14,16
	3	14,59
	3	14,38
	Média	14,38
	4	14,39
	4	14,04
	4	14,57
	Média	14,34
	5	14,08
	5	14,18
	5	14,08
	Média	14,12

### 7.3 Anexo C

#### 7.3.1 Distribuição dos Tamanhos das Partículas por Difração à Laser

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



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

### CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04  $\mu$ m - 500.00  $\mu$ m / 100 Classes



Ref da amostra : Resíduo Vidro Leda  
 Type produit : Argila  
 Client : UFCG  
 Comentários : Calibrado  
 Líquido : Água  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Alice  
 Empresa : UFCG  
 Localização : Campina Grande - PB  
 Data : 23/04/2008 Hora : 10:15:47  
 Índice med. : 899

Ultrasom : 60 s  
 Concentração : 152  
 Diâmetro a 10% : 2.97  $\mu$ m  
 Diâmetro a 50% : 23.47  $\mu$ m  
 Diâmetro a 90% : 71.35  $\mu$ m  
 Diâmetro médio : 30.94  $\mu$ m  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/3  
 SOP : Argila

Valores cumulativos particulares

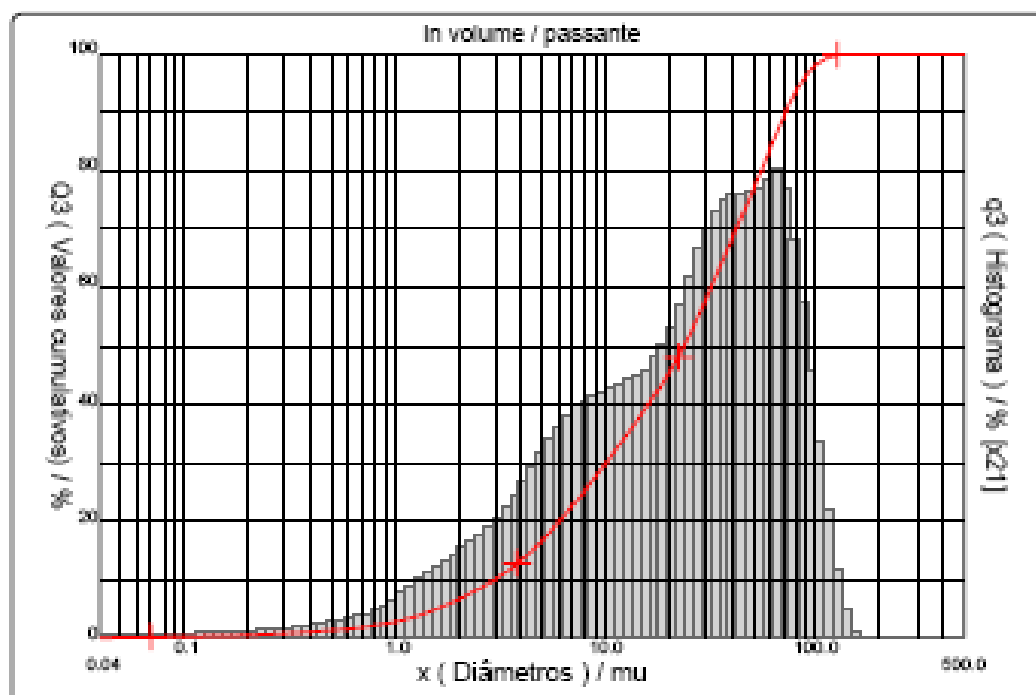
In volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
Q3	0.04	0.16	0.25	0.64	1.31	1.99	2.76	6.59	10.09	13.43
x	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00	85.00	100.0	150.0
Q3	16.72	29.87	45.50	58.02	68.42	76.65	86.67	95.08	98.12	100.00

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	25.00	40.00	75.00	85.00	100.0
Q3	7.85	15.97	47.81	62.22	140.00



Núm. de série : 392

Ref: 2-111-zv108-68A00303-03/09/v03-12.5-10.1Ph-20.5-10.8hC-0.0.0.0/000.0.15.g0.2.9.10.1.10.P4503.1.10.H.0V.5.12825

Figura 45 – Distribuição dos tamanhos das partículas do obtida por difração à laser





# DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes



Ref da amostra : Resíduo Vidro Leda  
 Type produit : Argila  
 Client : UFCG  
 Comentários : Calibrado  
 Líquido : Água  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Alice  
 Empresa : UFCG  
 Localização : Campina Grande - PB  
 Data : 23/04/2008 Hora : 10:15:47  
 Índice med. : 899

Ultrassom : 60 s  
 Concentração : 152  
 Diâmetro a 10% : 2.97 mu  
 Diâmetro a 50% : 23.47 mu  
 Diâmetro a 90% : 71.35 mu  
 Diâmetro médio : 30.94 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Médida./Limp. : 60/60/3  
 SOP : Argila

Valores cumulados característicos

In volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.04	0.16	0.25	0.51	0.77	1.04	1.31	1.58	1.85	2.13
q3	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.43	2.76	3.12	3.50	3.89	4.29	5.07	5.84	6.59	7.32
q3	0.17	0.21	0.26	0.30	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48	0.52
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	8.03	8.73	9.42	10.09	10.77	11.44	12.10	12.77	13.43	14.43
q3	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71	0.75	0.78	0.84	0.87	0.94
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	15.42	16.72	17.68	18.62	19.84	21.32	22.74	24.09	25.36	26.57
q3	0.99	1.06	1.12	1.16	1.20	1.25	1.30	1.32	1.33	1.35
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	27.72	29.87	31.85	33.69	35.41	37.03	38.56	40.04	41.46	42.84
q3	1.36	1.38	1.41	1.43	1.45	1.48	1.50	1.55	1.59	1.63
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	26.00	30.00	32.00	34.00
Q3	44.18	45.50	46.80	48.10	49.38	51.93	55.65	58.02	60.30	62.48
q3	1.68	1.74	1.80	1.89	1.95	2.07	2.22	2.33	2.39	2.43
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	64.56	66.54	68.42	71.08	72.76	76.65	78.83	80.92	83.60	85.48
q3	2.46	2.48	2.48	2.49	2.50	2.50	2.53	2.57	2.63	2.61
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	87.24	89.84	91.63	93.52	95.08	96.34	97.34	98.12	99.30	99.81
q3	2.56	2.41	2.21	1.98	1.74	1.49	1.25	1.03	0.71	0.31
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.16	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	260.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura 46 – Distribuição dos tamanhos das partículas do obtida por difração à laser- dados

## 7.4 Anexo D

### 7.4.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Constam planilhas de cálculos resultantes dos ensaios de módulo de resiliência.

Tabela 19- Dados do ensaio de módulo de resiliência

Dados	Corpo -de- prova					
	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima	1431,4	1417,5	1407,9	1480,1	1844,7	428,4
Desvio padrão de carga	40,05	40,35	35,11	48,26	31,25	27,16
Ciclo de início de cálculo	0	21	5	14	10	11
Ciclo de final de cálculo	101	94	86	89	90	92
Módulo Total - DNIT	6207,4	5561,6	7392,6	5192,7	7059,1	2514,5
Desvio Padrão Módulo Total - DNIT	245,68	214,66	377,65	190,72	342,9	145,93
Módulo Instantâneo - DNIT	8409,1	7553	10126,9	7082,5	9251	3466,4
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - DNIT	383,24	287,78	590,45	295,41	471,15	237,82
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - DNIT$	0,2618	0,2637	0,27	0,2668	0,2369	0,2746
Módulo Total - NCHRP	6166,2	5499,7	7252,4	5105	7023,8	2504,7
Desvio Padrão Módulo Total - NCHRP	258,84	229,66	389,14	183,63	297,38	151,57
Módulo Instantâneo Real - NCHRP	8708,9	8266,5	11324,2	7678,2	9170,5	4049,5
Desvio Padrão Módulo Instantâneo - NCHRP	508,38	476,9	829,97	453,08	469,27	372,64
$((MR_i - MR_t)/MR_i) - NCHRPI$	0,292	0,3347	0,3596	0,3351	0,2341	0,3815
Atraso Médio	0,048	0,47	0,049	0,049	0,045	0,051
Desvio Padrão do Atraso	0,0032	0,0029	0,0032	0,0033	0,0027	0,0042
% 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