

**ANA PAULA FURLAN**

**CONSIDERAÇÕES ACERCA DA  
ADESÃO E DA SUSCETIBILIDADE À UMIDADE  
DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS  
À LUZ DE ALGUMAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil: Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. GLAUCO TULIO PESSA FABBRI**

**São Carlos  
2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

F983c Furlan, Ana Paula  
Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade  
à umidade de misturas asfálticas densas à luz de  
algumas propriedades mecânicas/ Ana Paula Furlan. --  
São Carlos, 2006.

Tese(Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2006.

Área: Engenharia de transportes


Orientador : Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

1. Propriedades mecânicas. 2. Misturas asfálticas  
densas. 3. Adesão. 4. Suscetibilidade à umidade. 5.  
Coesão. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Engenheira ANA PAULA FURLAN


Tese defendida e julgada em 04-09-2006 perante a Comissão Julgadora:

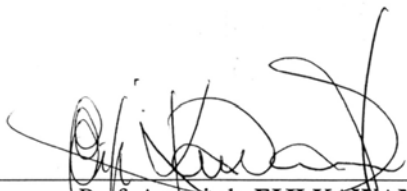
  
Prof. Dr. **GLAUCO TULIO PESSA FABBRI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovada

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. **LAURA MARIA GORETTI DA MOTTA**  
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ) aprovada

  
Prof. Dr. **JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI**  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS) aprovada

  
Dr.<sup>a</sup>. **LENI FIGUEIREDO MATHIAS LEITE**  
(Petrobrás/ Rio de Janeiro) aprovada

  
Prof. Associado **MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) aprovada

  
Prof. Associado **EIJI KAWAMOTO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
em Engenharia de Transportes

  
Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*D*edico este trabalho à minha família,  
Antonio, Iolanda e Simone,  
e ao amigo Marcão.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela orientação, pela confiança e pela paciência inesgotável;

Ao Prof. Dr. Jose Leomar Fernandes Junior, pelo apoio e pelas sugestões;

Ao Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória, pelo exemplo e pelos ensinamentos;

Ao Sr. Antonio Carlos Gigante, pelos ensinamentos e amizade, e pela cooperação no desenvolvimento dos procedimentos laboratoriais;

Ao Sr. João Domingos, pela colaboração descompromissada; auxiliando nas moldagens;

Ao Sr. Paulo Toyama, pelo apoio nas moldagens e pelos conselhos;

Ao Sr. Fabio Issao Iwanaga, pelas presteza e disciplina na programação e execução das moldagens,

Ao Sr. Edson de Moura, pelos primeiros ensinamentos sobre os danos por umidade;

Ao Sr. Adalberto L. Faxina, pelas sugestões;

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CENPES) da Petrobrás, pelo fornecimento dos ligantes utilizados nesta pesquisa;

Às Pedreiras Bandeirantes, Santa Isabel e São Jerônimo pelo fornecimento dos agregados utilizados nesta pesquisa;

Ao Engenheiro Nelson Bossolan e aos colegas da Centrovias S.A., em especial ao Departamento de Obras e de Tráfego, pelo incentivo e torcida;

Aos funcionários do Departamento de Transportes pela simpática acolhida;

Às amigas Luciana Paes, Juliana Martins e Érika Narazaki, pelo estímulo e alegria;

Aos Seraphico de Assis Carvalho pela confiança e pela torcida;

Às amigas Nívea Pons e Adriana Goulart, pela companhia e pelo bom-humor;

À Jisela A. Santanna-Greco, companheira de sala, pelos palpites valiosos e bate-papos;

Aos antigos amigos “lá do início” desta empreitada, aqui representados por Heliana e Carlos, e aos novos amigos, representados por Cira e Matheus, que a despeito do que sou são amigos;

À CAPES, pela concessão de bolsa de doutorado;

Ao CNPq, pela concessão de um ano de bolsa de doutorado.

FURLAN, A. P. (2006). Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. 120p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Este estudo apresenta uma contribuição à compreensão do fenômeno da adesão e da sua perda que as misturas asfálticas apresentam em consequência da ação da água. Para tanto, foram testados diversos tipos de misturas asfálticas à luz dos processos preconizados pela ASTM e pela AASHTO para avaliação de suscetibilidade à umidade. Foram executados vários experimentos fatoriais, que consideraram as principais variáveis influentes no fenômeno da adesão, tais como: tipo de agregado (basalto, gabro e granito), tipo de asfalto (CAP 20 e CAP 40), processo de produção de misturas (Marshall, ASTM e AASHTO), volume de vazios (4 e 7%), teor de asfalto (3) e uso ou não de cal. As propriedades monitoradas foram a resistência à tração e o módulo de resiliência. Entre outras constatações, verificou-se nesta pesquisa que a cal melhorou a adesividade das misturas na maioria dos casos; o procedimento da AASHTO mostrou-se mais efetivo na detecção de suscetibilidade à ação de água nas misturas; ensaios de módulo de resiliência indicaram variações nas características mecânicas dos corpos-de-prova que os ensaios de resistência à tração não conseguiram detectar; as misturas com asfalto tipo CAP 20 apresentaram menos suscetibilidade à umidade que as com CAP 40; o aumento no volume de vazios das misturas redundou em maior perda de adesividade e maiores teores de asfalto levaram as misturas a menores sensibilidades à água. Dentre todas as misturas estudadas, as com granito foram as que exibiram maior sensibilidade aos efeitos da água, independentemente do tipo e do teor de asfalto utilizados.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, misturas asfálticas, adesão, suscetibilidade à umidade, coesão

FURLAN, A. P. (2006). Considerations on adhesion and moisture susceptibility of asphalt mixtures by mean of mechanical properties. 120p. Ph.D. Thesis - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, 2006.

This study presents a contribution to the understanding of the adhesion phenomenon and its loss when water acts in asphalt mixtures. Several kinds of asphalt mixtures were evaluated by means of ASTM and AASHTO moisture susceptibility tests. Experiments based on factorial design were performed considering some of the main factors that act on adhesion phenomenon, such as: aggregate (basalt, gabbro and granite), asphalt (CAP 20 and CAP 40), laboratorial mixture production procedure (Marshall, ASTM and ASHTO), air voids content (4 and 7%), asphalt content (3 levels) and the presence of lime. Mechanical properties of asphalt mixtures were evaluated by resilient modulus and tensile strength. The main conclusions are: lime improved adhesiveness of asphalt mixtures for all studied cases; AASHTO's procedure was more effective to diagnostic the moisture susceptibility; resilient modulus test indicated changes in mechanical characteristics of specimens that the tensile strength did not detect; mixtures with CAP 20 exhibited less moisture susceptibility than mixtures with CAP 40; mixtures with high air voids presented higher loss of adhesiveness; mixtures with higher asphalt content tended to exhibit lower adhesiveness losses. In almost all cases, the asphalt mixtures with granite aggregate exhibited more water susceptibility, despite asphalt's kind and content.

Key words: mechanical properties, asphalt mixtures, adhesion, moisture susceptibility, and cohesion.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Característica visco-elástica dos ligantes asfálticos .....	6
Figura 2.2: Influência da viscosidade do ligante em seu poder de molhagem.....	7
Figura 2.3: Influência da tensão superficial do líquido no seu poder de molhagem.....	7
Figura 2.4: Curva típica do resultado do simulador de tráfego tipo Hamburg .....	21
Figura 2.5: Sistema de classificação de rochas Mertons & Wright .....	25
Figura 2.6: Representação dos componentes do asfalto virgem e oxidado aderido na região interfacial agregado-asfalto .....	29
Figura 2.7: Conceito dos vazios péssimos .....	33
Figura 3.1: Agregados utilizados nesta pesquisa .....	40
Figura 3.2: Distribuições granulométricas das composições obtidas para os diferentes tipos de agregados .....	41
Figura 3.3: Curvas de viscosidades e temperaturas de trabalho dos ligantes .....	43
Figura 3.4: Procedimento de mistura em equipamento adaptado .....	43
Figura 3.5: Variação das taxas de absorção dos agregados em função dos métodos de preparo da mistura .....	46
Figura 3.6: Comportamento resiliente de uma mistura asfálticas num ensaio de módulo de resiliência .....	53
Figura 3.7: Deformações resilientes total e instantânea peal AASHTO .....	58
Figura 3.8: Curva de deformação para um ciclo de carregamento.....	59
Figura 4.1: Variação relativa da resistência à tração em função dos tipos de preparação da mistura .....	64
Figura 4.2: Variação relativa do módulo de resiliência em função dos tipos de preparação da mistura .....	65
Figura 4.3: Variação relativa da RT em função do volume de vazios e da adição de cal em misturas asfálticas com CAP 20 e CAP 40 .....	68
Figura 4.4: Variação relativa do MR em função do volume de vazios e da adição de cal em misturas asfálticas com CAP 20 e CAP 40 .....	69
Figura 4.5: Variação de MR e RT para misturas com diferentes teores de CAP 20 .....	70
Figura 4.6: Variação de MR e RT para misturas com diferentes teores de CAP 40 .....	71
Figura 4.7: Relação de resistência à tração (RRT) das misturas asfálticas testadas .....	78
Figura 4.8: Relação de módulo de resiliência (RMR) das misturas testadas .....	79
Figura 4.9: Relação de resistência à tração para misturas asfálticas com agregados de basalto .....	81
Figura 4.10: Relação de módulo de resiliência para misturas asfálticas com agregados de basalto .....	82
Figura 4.11: Relação de resistência à tração para misturas asfálticas com agregados de granito .....	83
Figura 4.12: Relação de módulo de resiliência para misturas asfálticas com agregados de granito .....	83

Figura 4.13: Resultado de RRT para misturas com CAP 20 e CAP 40 em diferentes teores de asfalto .....	85
Figura 4.14: Resultado de RMR para misturas com CAP 20 e CAP 40 em diferentes teores de asfalto .....	86
Figura 4.15: Relação entre o MR total e instantâneo calculados pelo método da AASHTO e da NCHRP .....	87
Figura 4.16: $MR_{total}$ versus $MR_{instantâneo}$ obtidos pelo método da AASHTO e pelo método da NCHRP .....	88
Figura 4.17: Taxa de variação de $MR_T$ para a faixa de temperaturas baixas .....	90
Figura 4.18: Taxa de variação de $MR_T$ para a faixa de temperaturas de serviço .....	91
Figura 4.19: Taxa de variação de $MR_I$ para a faixa de temperaturas de serviço .....	92
Figura 4.20: Comportamento de RR em função de $MR_T$ e $MR_I$ .....	94
Figura 4.21: Comportamento do atraso em função de $MR_T$ e $MR_I$ .....	95
Figura 4.22: Comportamento de RR na faixa de temperatura de serviço .....	96
Figura 4.23: Comportamento de RR e do atraso antes e depois do condicionamento .....	97
Figura 4.24: Efeito dos fatores influentes em $MR_{T\ NCHRP}$ .....	100
Figura 4.25: Efeito das interações em $MR_{T\ NCHRP}$ .....	100
Figura 4.26: Corpos-de-prova de misturas com agregados de granito após o condicionamento pela AASHTO e pela ASTM .....	102
Figura 4.27: Quadro de resumo das propriedades das misturas testadas antes e depois do condicionamento .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Concentração das soluções de carbonato de sódio .....	12
Tabela 2.2: Parâmetros que afetam a adesão .....	13
Tabela 2.3: Concentração das soluções de carbonato de sódio da norma brasileira .....	13
Tabela 2.4: Ensaio de avaliação de suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas ....	18
Tabela 2.5: Características dos equipamentos simuladores de tráfego .....	20
Tabela 2.6: Características dos asfaltos (baseada em Lottman, 1978) .....	29
Tabela 2.7: Variação da propriedade das misturas asfálticas .....	37
Tabela 3.1: Porcentagens das frações determinadas por Ruthfucs .....	40
Tabela 3.2: Características dos agregados .....	41
Tabela 3.3: Características dos asfaltos.....	42
Tabela 3.4: Resultados da dosagem Marshall .....	44
Tabela 3.5: Absorção de asfalto pelo agregado para os três procedimentos de preparo de mistura .....	46
Tabela 3.6: Características da cal utilizada .....	47
Tabela 4.1: Propriedades das misturas asfálticas preparadas de diferentes modos .....	63
Tabela 4.2: Propriedades das misturas asfálticas com diferentes volumes de vazios .....	67
Tabela 4.3: Propriedades das misturas asfálticas com diferentes teores de asfalto .....	70
Tabela 4.4: Características e propriedades das misturas tipo Marshall .....	75
Tabela 4.5: Características e propriedades das misturas tipo ASTM .....	76
Tabela 4.6: Características e propriedades das misturas tipo AASHTO .....	77
Tabela 4.7: Relação das propriedades após o condicionamento ASTM D 4867 das misturas asfálticas testadas .....	80
Tabela 4.8: Resultados de RRT e RMR para misturas com agregados graníticos testadas em três diferentes teores de asfalto .....	84
Tabela 4.9: Módulos de resiliência total e instantâneo de tipos variados de misturas asfálticas em três temperaturas (10, 25 e 40°C).....	89
Tabela 4.10: Níveis de redução de $MR_I$ para a faixa de temperaturas de serviço .....	92
Tabela 4.11: Recuperação retardada das misturas asfálticas em três temperaturas .....	93
Tabela 4.12: Variação de RR para a faixa de temperatura de serviço .....	96
Tabela 5.1: Efeito do tipo de agregado na adesão e na suscetibilidade à umidade.....	113
Tabela 5.2: Efeito do tipo de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade.....	114
Tabela 5.3: Efeito do teor de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade.....	114
Tabela 5.4: Efeito do volume de vazios na adesão e na suscetibilidade à umidade.....	115
Tabela 5.5: Efeito da adição de cal na adesão e na suscetibilidade à umidade.....	116

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vii
<b>1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Organização do trabalho .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1. Fundamentos da Adesão .....	5
2.1.1. Propriedades do material aderente.....	5
2.1.2. Propriedades do material aderido .....	8
2.1.3. Mecanismos de adesão .....	8
2.1.3.1. <i>Energia interfacial</i> .....	9
2.1.3.2. <i>Reação química</i> .....	9
2.1.3.3. <i>Orientação molecular</i> .....	9
2.1.3.4. <i>Teoria mecânica</i> .....	9
2.1.4. Modos de ruptura da ligação asfalto-agregado.....	10
2.2. Avaliação da adesividade de misturas asfálticas.....	10
2.2.1. Avaliação da adesividade e susceptibilidade a umidade .....	11
2.2.1.1 <i>Ensaio de avaliação visual</i> .....	11
2.2.1.2 <i>Ensaio de propriedades mecânicas</i> .....	14
2.2.1.3 <i>Avaliação de susceptibilidade a umidade com equipamentos simuladores de tráfego</i>	19
2.2.1.4 <i>Outros ensaios</i> .....	21
2.3. Propriedades dos agregados, asfaltos e misturas asfálticas influentes na adesão e	
na susceptibilidade à umidade.....	24
2.3.1. Introdução .....	24

2.3.2. Propriedades dos agregados .....	24
2.3.3. Propriedades dos asfaltos .....	28
2.3.4. Propriedades das misturas asfálticas .....	32
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1. Considerações iniciais.....	38
3.2. Materiais.....	39
3.2.1. Agregados.....	39
3.2.2. Asfaltos .....	42
3.3. Temperaturas de trabalho.....	42
3.3. Misturas Asfálticas.....	43
3.3.1. Absorção de asfalto pelo agregado .....	45
3.3.2. Aditivo na mistura asfáltica .....	47
3.4. Métodos.....	48
3.4.1. Programa experimental.....	48
3.4.2. Avaliação da influência do ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas convencionais e com cal .....	49
3.4.3. Avaliação da influência do volume de vazios diferentes na adesão e suscetibilidade ao dano por umidade de algumas misturas asfálticas densas convencionais e com cal.....	50
3.4.4. Estudo sobre a influência da preparação da mistura na adesão e na suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas convencionais e com cal.....	51
3.4.5 Ensaio de propriedades mecânicas.....	52
3.4.5.1. Módulo de resiliência.....	52
3.4.5.2. Resistência à tração.....	54
3.4.5.3 Observações visuais.....	55
3.5. Tratamento de dados.....	55
3.6. Projetos complementares.....	55
3.6.1. Estudo complementar sobre o comportamento resiliente de misturas asfálticas a diferentes temperaturas e sua relação com a adesão.....	56
3.6.2. Determinação do módulo de resiliência pela AASHTO e pela NCHRP.....	57
3.6.3. Outros parâmetros de rigidez de misturas asfálticas.....	59
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
4.1. Considerações iniciais.....	61
4.2. Comportamento das misturas asfálticas pré-condicionamento.....	62
4.2.1. Considerações sobre a preparação das misturas e a presença de aditivos.....	62
4.2.2. Considerações sobre o volume de vazios e a presença de aditivo.....	66
4.2.3. Considerações sobre o teor e o tipo de ligante e a adição de cal.....	69
4.3. Comentários sobre características das misturas asfálticas observadas nos projetos.....	72

4.4. Comportamento das misturas asfálticas depois do ciclo de condicionamento.....	74
4.4.1. Resultados relacionados ao modo de preparação da mistura, do tipo de agregado e da presença de aditivo na adesão e na suscetibilidade ao dano por umidade de misturas asfálticas.....	75
4.4.2. Resultados relacionados à influência do volume de vazios, do tipo de agregado, do tipo de asfalto e da presença de cal.....	80
4.4.3. Considerações sobre o teor e o tipo de ligante e a adição de cal.....	84
4.5. Projeto Complementar.....	86
4.5.1. Considerações sobre a suscetibilidade térmica e dano por umidade de misturas asfálticas .....	87
4.5.2. Considerações sobre outros parâmetros de rigidez das misturas asfálticas.....	93
4.5.3. Considerações sobre a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas e seu comportamento após o condicionamento .....	95
4.5.4. Comportamento dos parâmetros de rigidez após o condicionamento térmico da ASTM D 4867 .....	97
4.6. Tratamento estatístico.....	99
4.7. Observações visuais.....	102
4.8. Comentários Finais.....	104
4.8.1. Comportamento sobre as misturas asfálticas.....	104
4.8.2. Propriedades das misturas asfálticas após o condicionamento.....	107
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>111</b>
5.1. Resposta aos primeiros questionamentos.....	112
5.2. Outras constatações .....	116
5.3. Algumas constatações sobre o projeto complementar.....	118
5.4. Conclusões.....	121
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO 1</b>	
<b>ANEXO 2</b>	
<b>ANEXO 3</b>	
<b>ANEXO 4</b>	
<b>APÊNDICE A</b>	
<b>APÊNDICE B</b>	

# CAPÍTULO 1

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 1.1 Introdução

A causa de defeitos como a desagregação e o descolamento (*stripping*) em revestimentos asfálticos, normalmente, é atribuída a problemas na ligação adesiva desenvolvida na interface agregado-asfalto que, juntamente com as ações do tráfego e da água, contribuem para progressão dos danos, propiciando o aparecimento de buracos e panelas. Ambos os defeitos resultam da “perda” de adesividade ou de ligações adesivas deficientes entre os materiais. A adesão é um fenômeno que advém do contato entre a superfície de dois materiais diferentes e dá-se pela afinidade desenvolvida entre eles, mantendo-os unidos. Nas misturas asfálticas cabe ao cimento asfáltico (*aderente*) aderir ao agregado (*aderido*) e manter a mistura coesa; isto acontece devido a propriedades do ligante como tensão superficial, poder de molhagem e viscosidade, e do agregado, como composição mineralógica, forma, textura superficial e absorção.

Há várias teorias que explicam os fundamentos da adesão sob diferentes enfoques, assim como o mecanismo como ocorre o fenômeno e os modos de ruptura da ligação adesiva. Há também muitos fatores influentes na adesividade (ou perda dela), e ainda não foi possível compilá-los numa teoria mais abrangente, principalmente no que se refere às misturas asfálticas, ficando restrita a algumas áreas do conhecimento; entretanto, de certa forma, essas teorias auxiliam no entendimento do fenômeno e alicerçam sua avaliação praticamente.

Por muitos anos a adesão entre asfalto e agregado foi avaliada a partir das propriedades físico-químicas dos materiais ou fundamentada na termodinâmica e por isso restringia-se a algumas áreas do conhecimento. O entendimento do fenômeno da adesão era subjetivo e específico ao par agregado-asfalto e focado em propriedades desejáveis dos materiais para o desenvolvimento da adesão. Entretanto, supondo que a dosagem das misturas seja suficiente

para selecionar materiais compatíveis e que o controle tecnológico conduza a misturas asfálticas de qualidade, ficaria por conta dos agentes externos (clima, tráfego e presença de água) a responsabilidade pelo aparecimento de defeitos como desgaste e *stripping*.

Nas últimas décadas, parece ter aumentado a “urgência” na definição de um método de ensaio que avaliasse o efeito da perda da adesividade no desempenho e durabilidade das misturas e, com isso, muitos métodos de ensaio foram propostos, considerando, principalmente, dois elementos: a mistura compactada e um condicionamento simulador da mistura em serviço. Assim, foi incluída a idéia de que mesmo uma mistura composta por materiais selecionados e “compatíveis” entre si pode, com o tempo ou precocemente, apresentar problemas devido a influências externas e tornar-se susceptível ao dano progressivo de suas ligações adesivas, comprometendo seu desempenho e sua durabilidade. Com isso surgiram métodos com a finalidade de medir propriedades mecânicas que se relacionassem com a adesividade ou a perda dela. Nesse caso, considera-se que a ligação adesiva bem desenvolvida entre asfalto e agregado deve ser resistente a ações como: vibrações mecânicas, deterioração térmica, ataques químicos e exposição à água.

Os métodos de ensaio passaram a avaliar a variação de alguma propriedade da mistura quando submetida a esforços que resultassem na tração e descolamento da película e algum fator para seu condicionamento que refletisse as condições do pavimento em serviço.

O fator mais comumente atribuído como origem dos problemas de uma mistura asfáltica é a água, que atua de forma diferenciada, mas sempre danosa, por isso, em grande parte dos métodos, há água como agente causador do dano na mistura, aliada, por vezes, a variações térmicas e/ou carregamentos cíclicos.

Os danos por umidade não caracterizam modos de ruptura propriamente, mas um processo condicionante, acelerado pela presença de água, que pode levar à ruptura por outros defeitos, como: afundamentos em trilhas de roda, trincas por fadiga e/ou desagregação (com evolução para buracos e panelas).

O diagnóstico da perda de adesividade ou da ação da água em revestimentos em serviço apresenta uma dificuldade inerente, uma vez que, normalmente, está associado à evolução de outros defeitos, por exemplo, a desagregação e o *stripping*. A desagregação é a desintegração da camada de rolamento e caracteriza-se, inicialmente, pela perda dos finos, evoluindo para o deslocamento dos agregados maiores, podendo chegar a delaminação, buracos e panelas. O *stripping* é caracterizado pelo descolamento do ligante da superfície do agregado pela água e pelos esforços do tráfego que causam tração na película de asfalto.



Ainda que ambos os defeitos possam resultar da “pouca afinidade” ou de ligações deficientes entre os materiais e dos esforços de tração, eles ocorrem de forma diferenciada; na desagregação o agregado descola-se da superfície da camada de rolamento e esse defeito evolui em direção das camadas inferiores; no *stripping* a evolução é ascendente, iniciando-se na fibra inferior da camada de rolamento. O fator comum e acelerador desses defeitos é a presença da água, que pode atuar de diversas formas: infiltrando-se e alojando-se entre agregado e asfalto, descolando-o; “lavando” o asfalto quando aliada às cargas do tráfego; amolecendo o asfalto por emulsificação, comprometendo a coesão da mistura, entre outros.

## **1.2 Objetivos**

Os problemas de adesão em misturas asfálticas são de difícil caracterização, pois envolvem um grande número de variáveis que, isolada ou conjuntamente, atuam como agentes condicionantes e aceleradores no desenvolvimento de diversos mecanismos de deterioração.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma contribuição para o entendimento do fenômeno da adesão e da perda dela por ação da água em misturas asfálticas densas, à luz de propriedades mecânicas das misturas, avaliando-se a influência de alguns dos principais fatores interferentes no fenômeno.

Adicionalmente, este trabalho avalia a suscetibilidade térmica dessas misturas asfálticas e sua relação com os comportamentos característicos que elas apresentam diante da ação conjunta da água e de ciclos térmicos.

## **1.3 Organização deste trabalho**

Este trabalho é composto por 5 capítulos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda três itens principais sobre a adesão:

1. Seus fundamentos: onde se apresenta uma breve introdução às principais propriedades relacionadas aos materiais e às teorias que tentam explicar a adesão, enfatizando o sistema agregado-asfalto;
2. Sua avaliação em misturas asfálticas: onde se mostra uma evolução e as mudanças de enfoques dos métodos de laboratório para a avaliação da adesividade;

3. Seus fatores influentes em misturas asfálticas: onde se discorre sobre as características dos ligantes asfálticos e agregados que participam no desenvolvimento da adesão, assim como algumas propriedades da mistura asfáltica que podem torná-la mais susceptível à perda de adesividade e à ação da umidade.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais que foram utilizados e aplicados nessa pesquisa e os métodos para a avaliação de propriedades mecânicas das misturas asfálticas, a saber: módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e realizadas análises comentadas de comportamento, além de um tratamento estatístico baseado na ANOVA, que ratificou as análises técnicas e permitiram a construção de modelos de comportamento a partir das misturas asfálticas testadas.

No capítulo 5 é feito um relato das principais constatações deste trabalho e possíveis generalizações quanto ao comportamento dos variados tipos de misturas asfálticas, em consequência da ação da água.

## CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. FUNDAMENTOS DA ADESÃO

#### 2.1.1. Propriedades do Material Aderente

Como num sistema formado por três fases, agregado, asfalto e ar, as propriedades das misturas asfálticas dependem de sua consideração como um todo, porém sofrem a influência direta das propriedades e características dos materiais separadamente. Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são adesivos termoplásticos, que podem ser manuseados a quente para aplicação em pavimentos e que assumem um comportamento visco-elástico a temperaturas próximas às de serviço. Embora os CAP, como ligantes, participem somente com 5% em peso, cerca de 10% em volume, numa mistura asfáltica, eles imprimem respostas específicas quanto às solicitações do tráfego devido à sua característica visco-elástica, combinando dois tipos de comportamentos, um elástico instantâneo, que é a resposta imediata para cargas de curto período de duração, e outro elástico retardado, que se desenvolve em função do tempo de duração da carga.

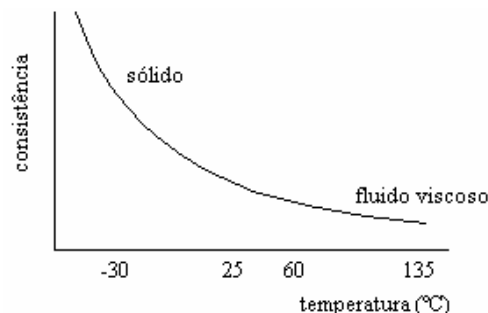
A desconsideração de algum fator influente que implique numa dosagem inadequada pode acarretar alguns problemas típicos, por exemplo, a presença do ligante asfáltico em excesso torna a mistura menos resistente aos esforços de tração, determina maior fluência, em outras palavras, é uma mistura mais “mole”, e, portanto, mais susceptível a deformações permanentes. Por outro lado, misturas com teores muito baixos de ligante asfáltico podem apresentar maior resistência à tração e menor susceptibilidade à deformação permanente, porém são frágeis e menos duráveis.

A composição dos cimentos asfálticos de petróleo varia bastante em função do tipo de petróleo e do processo de refino do qual é produto, mas, de forma geral, é constituído por

hidrocarbonetos, saturados e aromáticos, e resinas, solúveis em n-heptano, denominadas maltenos, e asfaltenos.

Os asfaltenos são compostos polares e polarizáveis de maior peso molecular e maior teor de heteroátomos (nitrogênio, oxigênio, enxofre, vanádio, níquel e ferro), que se apresentam em micelas individuais peptizadas em resina, ou em aglomerados, associados através de ligações mais fracas (forças de *Van der Waals*) induzidas pelos heteroátomos presentes. A presença de aglomerados de asfaltenos influencia nas propriedades reológicas dos CAP, que também é fortemente influenciada pela temperatura.

A viscosidade indica o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas internas em líquidos, nos asfaltos é resultado da sua composição química e da influência da temperatura. Com o aumento da temperatura, as forças intermoleculares e a viscosidade diminuem, aumentando o poder de molhagem do asfalto e, conseqüentemente, sua área de recobrimento na superfície de um agregado. A Figura 2.1 ilustra transição da fase sólida ao fluido viscoso de um CAP em função da temperatura.

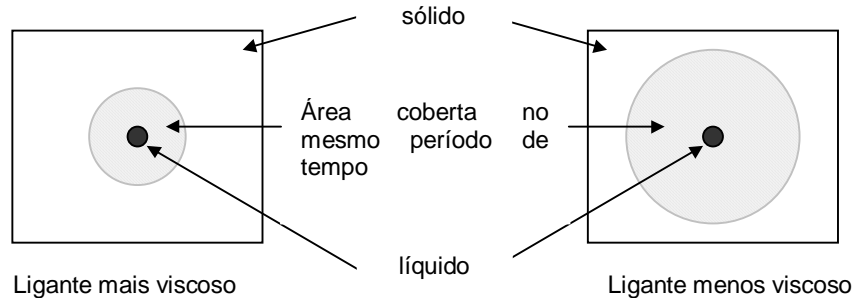


**Figura 2.1:** Característica visco-elástica dos ligantes asfálticos  
(baseado em MOTTA *et. al.*, 1996)

A viscosidade dos asfaltos é utilizada a fim de adequá-los ao tipo de utilização e ao meio ambiente ao qual a mistura asfáltica será exposta, por isso, em alguns casos, pode ser desejável optar por ligantes mais viscosos. Com relação à adesão, espera-se que ligantes mais viscosos possuam a mesma capacidade de adesão que os menos viscosos; as características que os diferenciam são relacionadas ao poder de molhagem e a resistência ao descolamento por um agente externo. O poder de molhagem de ligantes mais viscosos é menor e, assim, a sua área de cobertura na superfície de um agregado é menor. A Figura 2.2 ilustra a influência da viscosidade do ligante em seu poder de molhagem (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

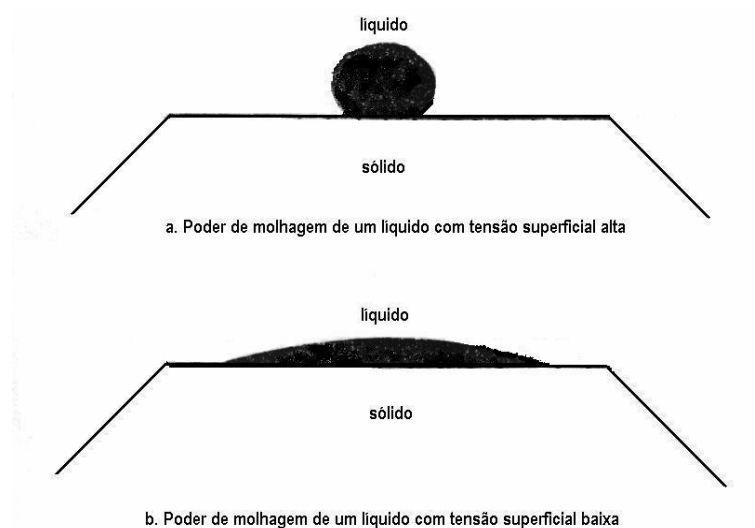
Pode-se depreender do esquema ilustrativo da Figura 2.2 que, para uma mesma temperatura, os CAP apresentam poder de molhagem diferentes de acordo com viscosidade; vale salientar que esta característica não tem relação direta com a afinidade físico-química,

isto é, o poder de adesão não fica comprometido pelo fato de o asfalto ser mais ou menos viscoso.



**Figura 2.2:** Influência da viscosidade do ligante em seu poder de molhagem (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

A mudança de consistência dos asfaltos é o que viabiliza as operações de mistura com o agregado, e é controlada através de uma faixa de viscosidade do asfalto, assegurando que o asfalto numa determinada temperatura apresente-se numa viscosidade capaz de espalhar-se na superfície do agregado e, havendo afinidade físico-química, desenvolva adesão. A figura 2.3 ilustra um esquema da diferença entre do poder de molhagem de um líquido de alta e de baixa tensão superficial (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).



**Figura 2.3:** Influência da tensão superficial do líquido no seu poder de molhagem (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

O fator determinante para o desenvolvimento da adesão é a “atração” entre os materiais, dada pelas cargas eletrostáticas de suas superfícies. Assim como outros líquidos, os asfaltos apresentam forças atrativas intermoleculares que mantêm sua coesão (forças coesivas), porém na sua superfície as forças de coesão não estão igualmente distribuídas entre

moléculas vizinhas, e o rearranjo destas forças cria uma força maior na superfície, denominada tensão superficial.

Assim, a tensão superficial é resultado do balanceamento das cargas elétricas da superfície do líquido, e obedece à seguinte regra: quanto menor for a tensão superficial resultante maior será seu poder de molhagem. Uma medida do poder de molhagem é representada pelo ângulo formado entre a superfície sólida que deverá ser aderida e o adesivo, também chamado de ângulo de contato.

Medidas de ângulo de contato, bem como de tensão superficial, foram comuns até a década de 1960, com métodos baseados na avaliação físico-química do asfalto e nas leis da termodinâmica, através da análise de *gotas* de ligantes asfálticos, que exigiam instrumentos laboratoriais específicos e técnicas de precisão. Deste conhecimento acumulado, estabeleceram-se valores para ângulos de molhagem como valores característicos de ligantes bons e maus agentes de molhagem. Ângulos menores que  $90^\circ$  implicam em ligantes com baixo poder de molhagem, enquanto que ângulos maiores que  $90^\circ$  determinam alto poder de molhagem (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

### **2.1.2. Propriedades do material aderido**

O desenvolvimento da adesão entre materiais depende também das características e propriedades da superfície a ser aderida. São vários os fatores relacionados ao agregado que influenciam no fenômeno da adesividade, entretanto, no que se refere às suas propriedades físico-químicas destacam-se a composição mineralógica e as cargas eletrostáticas superficiais. O enfoque voltado aos constituintes minerais do agregado fundamentou sua classificação como ácidos e básicos, de acordo com o teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Constatou-se que um menor teor de sílica na constituição do agregado tornava-o mais susceptível a desenvolver ligações adesivas com o asfalto. Por outro lado, agregados com maiores teores de sílica não desenvolvem boa adesividade com o asfalto, “preferindo” a água, por isto são chamados hidrofílicos. Além dessa classificação, é comum considerar a polaridade da superfície dos agregados, como o asfalto também possui cargas na sua superfície, ele tende a ligar-se ao agregado satisfazendo uma *demanda* de energia de polaridade inversa. Neste fundamento também se baseia a teoria do mecanismo de adesão da energia de superfície, que se verá a seguir.

### **2.1.3. Mecanismos de adesão**

A seguir algumas das teorias são apresentadas, brevemente, a fim de explicar o mecanismo da adesão entre agregado e asfalto; vale ressaltar que cada uma delas corresponde parcialmente ao fenômeno, mas nenhuma delas explica-o totalmente (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968, TAYLOR e KHOSLA, 1983, HICKS, 1991).

#### **2.1.3.1. Energia Interfacial**

O conceito da energia interfacial considera a adesão como um fenômeno termodinâmico relacionado à energia da superfície dos materiais. Nesta teoria, líquidos polares, reduzem sua energia superficial livre para condições estáveis termodinamicamente de energia mínima, são mais atraídos para a superfície do agregado que líquidos não polares. A teoria não faz nenhuma referência à estrutura molecular nem às forças exigidas para a ruptura da ligação, e é a mais aceita dentre as outras.

#### **2.1.3.2. Reação Química**

A teoria desenvolve o conceito de que os materiais são constituídos de compostos químicos que reagem entre si. Quando um agregado é umedecido por um cimento asfáltico, ocorre sua “absorção” por reação química. As reações químicas entre o asfalto e agregados ácidos não são tão fortes quanto para agregados básicos. Por isso problemas de adesividade e *stripping* são mais freqüentes em misturas asfálticas com agregados ácidos.

#### **2.1.3.3. Orientação molecular**

Esta teoria estabelece que ao entrar em contato com o agregado, as moléculas de asfalto orientam-se para satisfazer a demanda de energia do agregado. As moléculas de asfalto podem orientar-se em direção da polarização dos íons na superfície do agregado. A água pode satisfazer mais rapidamente esta demanda de energia, pois sendo um dipolo tem vantagens diante das moléculas polares e não polares do asfalto.

#### **2.1.3.4. Teoria Mecânica**

Na teoria mecânica o conceito envolvido é a textura superficial e o intertravamento mecânico do adesivo na superfície do sólido. Considera-se que o adesivo entra nos poros e irregularidades da superfície fornecendo o intertravamento do sistema. Essa teoria, de certa forma, explica a razão pela qual agregados polidos são piores no desenvolvimento da adesividade que agregados de textura rugosa.

#### 2.1.4. Modos de ruptura da ligação asfalto-agregado

A ruptura das misturas asfálticas ligadas à ruptura da película adesiva, caracteriza-se pela formação de um plano de ruptura interfacial, completo ou parcial, na ligação entre asfalto e agregado; outro modo de ruptura é a coesiva, que se caracteriza pela ruptura do ligante. As condições de ocorrência da ruptura coesiva das misturas são somente explicadas em termos reológicos, enquanto que, nas rupturas adesivas, a presença (alojamento) de água na mistura asfáltica implica no desencadeamento do descolamento e/ou arrancamento da película de asfalto da superfície do agregado (*stripping*). A seguir são explicados os modos de ruptura adesiva:

- Deslocamento*: a água desloca a película de asfalto da superfície do agregado;
- Desprendimento*: a umidade do agregado antes da mistura separa-o o asfalto;
- Emulsificação espontânea*: a água é incorporada pelo asfalto e emulsifica-o;
- *Pressão nos poros*: a água aprisionada nos vazios da mistura saturada, aliada às cargas do tráfego, percola sob pressão, descolando a película de asfalto;
- Lavagem hidráulica*: em condições úmidas as repetições do tráfego pesado proporcionam ciclos de compressão, que expõem o ar dos vazios da mistura, e relaxação, que absorve água pela criação de um vácuo parcial.

## 2.2 AVALIAÇÃO DA ADESIVIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

É possível classificar os ensaios de avaliação de adesividade e de danos por umidade em função dos diferentes enfoques dos métodos. Este item tem como objetivo revisar alguns dos principais métodos de ensaios desenvolvidos para a avaliação da adesividade, considerando quatro categorias:

- Ensaios de avaliação visual;
- Ensaios de avaliação de propriedades mecânicas;
- Ensaios em equipamentos simuladores de tráfego;
- Ensaios especiais



## 2.2.1 Avaliação da adesividade e susceptibilidade a umidade

### 2.2.1.1. Ensaios de avaliação visual

Os ensaios de avaliação visual, como o nome antecipa, verificam pela observação visual algum descolamento da película de asfalto que recobre o agregado. Os métodos de ensaios desenvolvidos na primeira metade do século passado privilegiavam esse conceito, avaliando se a ligação adesiva sofria a ação danosa da água ou de alguma solução aquosa mais agressiva. Estes ensaios indicam, subjetiva e empiricamente, a afinidade entre os materiais e comparam misturas asfálticas compostas por diferentes materiais ou com incorporação de aditivos. A maior crítica com relação a esse tipo de ensaio é sua baixa correlação com as ocorrências no pavimento em serviço, contudo sua praticidade e baixa tecnologia, tornam sua utilização aplicável em situações onde se requeira agilidade e rapidez de resultados.

Em caráter pioneiro, Nicholson propôs em 1932, um ensaio para a determinação empírica da tensão de adesão desenvolvida entre agregado-asfalto, que consistia da imersão em água e agitação mecânica de agregados cobertos com cimento asfáltico. No ensaio, a amostra de mistura asfáltica passa por um período de cura de 1 h a 60° C, em seguida é imersa em água e submetida à rotação de 39 rpm por 15 min. A extensão do dano provocado pela água é medida por avaliação visual da cobertura original da película de asfalto. Na versão modificada, proposta em 1942, a velocidade de rotação e a temperatura foram mudadas para 44 rpm por 15 min a 25° C, seguido de um ciclo de rotações adicionais por 15 min a uma temperatura entre 40 e 50° C. (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

Muitos outros métodos foram desenvolvidos na primeira metade do século passado, dentre os mais populares destacam-se os métodos de Dow<sup>1</sup> ou Tyler<sup>2</sup>, Lee<sup>3</sup>, Riedel e Weber<sup>4</sup> e Ensaio de fervura (*Boiling Test*) da *American Society for Testing and Materials*, ASTM D 3625.

Segundo Mazidjadeh e Brovold (1968), o Ensaio de Lavagem (*Dow or Tyler Wash test*) aliava imersão em água e agitação mecânica à avaliação do descolamento da película de asfalto. Nesse procedimento, a amostra após sua cura, é imersa em água destilada e agitada mecanicamente por 30 min, em seguida é avaliada visualmente. O critério de avaliação baseia-se numa “taxa” de descolamento da película de asfalto por meio de notas, por

<sup>1</sup> DOW, A. (1936). *The Wash Test in Differentiating Aggregate for Colprovia Paving Mixtures*. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 8, pp. 75-78..

<sup>2</sup> TYLER, O.R. (1938). *Adhesion of Bituminous Films to Aggregates*. Engineering Bulletin, Purdue University Research Series No. 62, Purdue University Experiment Station, Lafayette, Indiana.

<sup>3</sup> LEE, A. R. (1936). *Adhesion in Relation to Bituminous Road Materials*. Journal of the Society of Chemical Industry, vol. 55, pp. 101-104.

<sup>4</sup> RIEDEL, W e WEBER, H (1933). *On Question of the Adhesion of Bituminous Binders to Various Stones*. Asphalt Teer Strassenbautechnik, Vol. 33, pp. 677, 693, 713, 729 749, 793, 809.

exemplo, uma nota 0 indica que não houve descolamento, enquanto que notas entre 8 e 10 indicam descolamentos em grau de severidade alto.

Um método de ensaio proposto por Lee em 1936, denominado Ensaio da Chapa de Zinco (*Zinc Plate Test*), consistia da imersão estática em água de uma amostra de tratamento superficial. A amostra de ligante é espalhada sobre uma placa de zinco e os agregados são pressionados no filme asfáltico, após 24 horas de imersão em água, o grau de aderência do agregado ao ligante é avaliado visualmente.

De acordo com Mazidjاده e Brovold (1968), no ensaio original de Riedel e Weber, uma amostra de graduação específica coberta com ligante é imersa em água fervente por 1 min, a seguir é medida a extensão do dano na película de asfalto. Na versão modificada deste ensaio foi substituída a água fervente por soluções de carbonato de sódio em 6 teores, de 0 até 6,625 gramas/litros proporcionalmente, como pode ser observado na tabela 2.1 abaixo:

**Tabela 2.1:** Concentração das soluções de carbonato de sódio

N.º da solução	Concentração molar da solução de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de sódio (gramas/litro)
0	Água destilada	0
1	M/256	0,414
2	M/128	0,828
3	M/64	1,657
4	M/32	3,313
5	M/16	6,625

(Fonte: Mazidjاده e Brovold, 1968)

Cada um dos ensaios enfoca a importância de algum parâmetro na propriedade da adesividade e tem como o elemento comum a presença de água; para exemplificar, na Tabela 2.2 encontram-se resumidos os parâmetros considerados na avaliação da adesividade dos ensaios de *Dow* ou *Tyler*, *Lee* e *Riedel e Weber*.

O estudo sobre os efeitos da água em misturas asfálticas publicado em 1954 pelo *Highway Research Board*<sup>5</sup>, relatou os resultados de dois pesquisadores, Geissler e Knight, que utilizando o ensaio proposto por Riedel e Weber, extraíram conclusões diferentes dos autores do método. Geissler afirmou que a composição mineralógica não é importante na adesão, enquanto que Knight, aliando ao ensaio um estudo microscópico, enfatizou a textura superficial como o elemento influente na adesão. Isso mostra uma divergência conceitual, que talvez seja exacerbada pela consideração de que somente um dos fatores seja o influente na adesão, ao invés de um conjunto.

<sup>5</sup> *Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures*. Highway Research Board Bibliography 17, 45 pages, 1954.

**Tabela 2.2:** Parâmetros que afetam a adesão

Investigador e método	Conclusões encontradas
Dow <i>Absorção de ligante</i>	<i>Composição mineral:</i> A natureza do sólido afeta o valor de absorção do ligante. Em ordem decrescente de absorção, a “escala” obtida foi: granito, feldspato, rocha de Kentucky e quartzo. O autor não considerou a forma dos grãos importante.
Lee <i>Deslocamento de ligante</i>	<i>Agregados secos:</i> Descolamentos mínimos ocorrem em agregados secos cobertos com asfalto, <i>Natureza do ligante:</i> Descolamentos variam de acordo com a natureza do ligante. Ligantes de alta viscosidade descolam menos facilmente que ligantes de baixa viscosidade.
Riedel e Weber	<i>Textura da Superfície:</i> Não é importante. <i>Tensão superficial:</i> Não é importante. <i>Porosidade:</i> Não é importante. <i>Composição mineral:</i> Determina a adesão.

(Adaptado de Mazidjاده e Brovold, 1968, p.8).

No Brasil, a avaliação da adesividade das misturas asfálticas é feita através dos resultados dos ensaios do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem de adesividade miúda (DNER ME 79/63) e graúda (DNER ME 78/63). Os ensaios de adesividade miúda consistem da avaliação visual do descolamento da cobertura do cimento asfáltico da superfície dos agregados, após uma amostra não compactada de agregados de dimensões únicas (fração passada na peneira com abertura de 0,60 mm e retida na 0,30 mm), cobertas por ligante, ter sido submetida a um banho em soluções aquosas ferventes por 1 min a 110° C com diferentes teores de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, conforme é apresentado na Tabela 2.3.

À semelhança do ensaio Riedel e Weber mencionado anteriormente, no ensaio de adesividade miúda o descolamento da película de cimento asfáltico das amostras é observado a cada solução. Uma escala de conceitos é utilizada para classificar a qualidade da ligação adesiva; quando há descolamento com água destilada a adesividade é considerada má, algum descolamento nas soluções 1,2 e 3 a adesividade é satisfatória, da solução 4 a 8 é boa, e a solução 9 é ótima.

**Tabela 2.3:** Concentração das soluções de carbonato de sódio da norma brasileira

N.º da solução	Concentração da solução de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	N.º da solução	Concentração da solução de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
0	Água destilada	5	M/16
1	M/256	6	M/8
2	M/128	7	M/4
3	M/64	8	M/2
4	M/32	9	M/1

Os ensaios de apreciação da adesividade graúda têm um princípio semelhante ao da adesividade miúda, pois tratam de avaliações feitas através da observação visual da cobertura de asfalto em agregados de dimensões únicas, (fração passada na peneira com abertura de 19,1 mm e retida na peneira com abertura de 12,7 mm), imersos em água morna (40° C), por um período de tempo de 72 h. Os critérios de aceitação desses ensaios são do tipo “passa-não passa”, baseados no descolamento da película de asfalto; assim, qualquer descolamento perceptível visualmente deve ser considerado, podendo ser: satisfatório, quando não há descolamento, ou não satisfatório quando há descolamento parcial ou total da película.

O Departamento de Estradas e Rodagem do estado de São Paulo também possui um método de ensaio para a apreciação da adesividade entre agregado e materiais betuminosos, similar ao ensaio de adesividade miúda do DNER, com exceção de algumas particularidades, no DER ME 149-61 a fração de agregado avaliada é a passada na peneira com abertura de 4,76 mm e retida na peneira com abertura de 2,38 mm.

#### **2.2.1.2. Ensaios de propriedades mecânicas**

Os ensaios mais recentes de avaliação dos danos por umidade em misturas asfálticas envolvendo propriedades mecânicas, consistem da apreciação de alguma alteração no valor de uma propriedade mecânica tomada como referência. As misturas avaliadas são submetidas a algum tipo de condicionamento do tráfego e/ou ambiental e são comparadas com misturas similares não-condicionadas. Os resultados são apresentados em forma de porcentagem de perda da propriedade, sendo que as amostras sem condicionamento, normalmente, apresentam maiores valores da propriedade de referência que aquelas submetidas ao condicionamento. O tipo mais comum de condicionamento utilizado nos últimos anos consiste em saturar parcialmente o corpo-de-prova, o que, normalmente, é executado por meio da aplicação de vácuo para a indução da entrada da água no mesmo. Atingida a saturação desejada, o corpo-de-prova é submetido a algum tipo de condicionamento térmico simulador de tensões e/ou temperaturas.

Nessa linha, os ensaios mais populares atualmente normalizados são o AASHTO T 283 e o ASTM D 4867, que avaliam os danos causados pela presença de água. O método de ensaio para a determinação da resistência de misturas asfálticas ao dano por umidade induzida (AASHTO T 283) evoluiu das pesquisas de Lottman (1978, 1983). Resumidamente, o método de ensaio preconiza algumas condições para preparação de corpos-de-prova, como o envelhecimento da mistura não compactada por um período de 16 h a 60° C, a compactação é

executada de tal forma que resulte em volumes de vazios de  $7 \pm 1\%$  ou iguais ao do pavimento em serviço, e ainda, a saturação parcial com água desses vazios. Para a saturação parcial do corpo-de-prova compactado é utilizada uma bomba de vácuo na pressão de 26" Hg, que proporciona a entrada da água. Atingida a saturação desejada, que deve estar contida no intervalo entre 55 e 80%, procede-se o condicionamento térmico, que é composto por um ciclo de congelamento, que se constitui de  $-18^{\circ}\text{C}$  por 16 h, e um de descongelamento, que consiste da imersão em água a  $60^{\circ}\text{C}$  por 24 h.

Lottman (1978) propôs inicialmente três "níveis" de condicionamento, sendo que cada nível representava um determinado estágio da vida do pavimento em serviço. Assim, os corpos-de-prova sem condicionamento representavam um pavimento recém construído, compactado e *curado*, e que ainda não sofrera nenhuma influência externa. Um segundo grupo, submetido à saturação parcial à vácuo, representava uma situação na qual o revestimento sofre a ação deletéria da presença de água. E um terceiro grupo, que aliava os efeitos da saturação à vácuo a ciclos de condicionamento térmico, simulava os danos causados pelo tráfego e o meio ambiente.

O condicionamento térmico simula as tensões de tração nos corpos-de-prova de misturas asfálticas, devido à expansão causada pela formação de cristais de gelo. Como consequência dessa expansão pode haver a ruptura de ligações adesivas mais frágeis, ou ainda, de agregados porosos ou fissurados (desde que descobertos da película de ligante), comprometendo a durabilidade da mistura. Esse comportamento muito se assemelha ao ensaio de durabilidade (DNER - ME 89-94) aplicado em agregados, para obter uma indicação da sua durabilidade ao longo do tempo. Nesse ensaio, uma amostra padronizada de agregado é submetida a ciclos de molhagem e secagem numa solução super saturada de sulfato de sódio ou sulfato de magnésio, que impregna os poros do agregado. O efeito da cristalização do sal durante a secagem provoca uma pressão de expansão, provocando trincamento e vesículas nos agregados.

Para Parker e Gharaybeh, não há consenso sobre um condicionamento que promova o *stripping*. A validade do ciclo de congelamento tem sido questionada, por tal condicionamento não se relacionar ao *stripping*. Alguns pesquisadores acreditam que a imersão pode ter efeito governante na perda da resistência da mistura asfáltica, que dependendo do período de tempo estimula o desenvolvimento do mecanismo do *stripping*.

O envelhecimento, a saturação parcial e os ciclos de congelamento e descongelamento constituem uma rotina de simulação do meio ao qual da mistura asfáltica é exposta ao longo do tempo; como resultado desta simulação há alterações nas propriedades das mesmas, que

é avaliado por um ensaio de propriedade mecânica. O principal ensaio utilizado para a comparação entre as misturas é o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, que é executado nos dois grupos de amostras após a estabilização da temperatura a 25° C por um período de 2 h. De posse da resistência à tração dos grupos, em termos médios, é verificada a variação da propriedade através da relação entre a resistência à tração condicionada e a não condicionada (RRT), conforme expressão 2.1.

$$RRT = \frac{\overline{RT_2}}{\overline{RT_1}} \quad (2.1)$$

Onde:

RRT = relação de resistência à tração (%);

RT<sub>1</sub> = resistência à tração média do grupo condicionado;

RT<sub>2</sub> = resistência à tração média do grupo de controle.

A utilização de um ensaio de engenharia como o de resistência à tração ou ainda, o módulo de resiliência após o condicionamento, determina a variação média da propriedade medida, entretanto a causa dessa mudança é variável. A perda de adesão por *stripping* ocorre entre agregado-asfalto, enquanto que a perda de coesão ocorre no asfalto intersticial. A perda “efetiva” medida através do módulo de resiliência, por exemplo, pode ser a combinação entre a perda adesiva e coesiva, mas não se distingue uma da outra. Quanto ao ensaio de resistência à tração, a perda é medida em termos médios, e por isso acarreta imprecisões desde a moldagem do corpo-de-prova até o ensaio propriamente dito.

O desvio de um procedimento de ensaio é um conceito genérico, relacionado à consistência ou à diferença sistemática entre os diferentes resultados de ensaios de um processo, e um valor de referência aceitável da propriedade medida. Solamainan e Kennedy (2000), avaliando a repetibilidade e reprodutibilidade de um método semelhante ao AASHTO T 283, não conseguiram obter um valor de referência aceitável da resistência à tração para os materiais testados e por isso não foi sugerido nenhuma taxa ou desvio.

Para Tunnicliff e Root (1984) seria importante entender como e quanto o volume de vazios e grau de saturação influenciam nos resultados de ensaios e em que medida levam a conclusões erradas, deste modo, ao fixar limites para volume de vazios e grau de saturação pode-se estar privilegiando melhoras em termos de repetibilidade, reprodutibilidade, além de proteger o avaliador contra decisões equivocadas.

O critério de definição da *suscetibilidade* de uma mistura asfáltica preconizado pela AASHTO T283/89 é de  $RRT \geq 70\%$ ; na versão AASHTO T283/99 compatibilizada para o método SUPERPAVE<sup>®</sup> o critério é de  $RRT \geq 80\%$ . O que se tem é uma razão, ou um “ponto de separação” que classifica misturas suscetíveis aos danos por umidade, ratificado pela comparação com dados de pavimentos em serviço.

Essa correspondência “parcial” entre os dados de laboratório e campo estimulou a utilização deste ensaio na previsão “quantitativa” dos danos por umidade em misturas asfálticas. Para Lottman (1983) as taxas de resistência retida são relacionadas quantitativamente à redução do coeficiente estrutural da camada de revestimento asfáltico. A vida útil do pavimento é uma versão proporcionalmente simplificada dos danos por umidade pelo uso da regra de dano por fadiga cumulativa de Miner.

Outro método de avaliação da sensibilidade à umidade de misturas asfálticas é o ASTM D 4867; nesse método são moldados corpos-de-prova com misturas não envelhecidas num volume de vazios de  $7 \pm 1\%$  e divididos em dois grupos: um não condicionado e outro condicionado.

O condicionamento consiste em submeter um grupo de corpos-de-prova à imersão em água a  $60^\circ\text{C}$  por 24 h. Após o condicionamento e estabilização da temperatura dos corpos-de-prova, são executados ensaios para a determinação da resistência à tração por compressão diametral e avaliada a relação de resistência à tração, de forma similar ao AASHTO T 283.

O critério de aceitação das misturas é de  $RRT \geq 70\%$  (TUNNICLIFF e ROOT, 1995). Os resultados dos ensaios AASHTO T 283 e ASTM D 4867 associam os danos por umidade a uma idade do pavimento, de 4 a 12 anos e 0 a 4 anos, respectivamente, devido aos tipos de condicionamentos aos quais são submetidas as misturas asfálticas não compactadas, e por isso convencionou-se classificá-los de ensaios de dano por umidade em longo prazo (AASHTO T 283) e em curto prazo (ASTM D 4867).

Na Tabela 2.4 são apresentados alguns dos principais métodos de avaliação dos danos por umidade que se baseiam em variação de propriedades mecânicas devida a algum tipo de condicionamento.

**Tabela 2.4:** Ensaios de avaliação de *suscetibilidade* a umidade de misturas asfálticas

Ensaio	Características do corpo-de-prova	Características de preparo da mistura	Condicionamento	Critério de aceitação
<i>Susceptibilidade Térmica</i> (Skog e Zube, 1963)	101 x 61mm vazado no centro		Saturação a vácuo	
<i>Imersão-Compressão</i> (ASTM D1075 e AASHTO T 165)	n=6 réplicas 101,6 x 101,6mm Vv= 6%	Cura da mistura: 25°C	Imersão em água: 40°C por 4 dias ou 60°C por 1 dia	Relação de propriedade retida: E>70%
<i>Lottman</i> (NCHRP 246)	n=9 réplicas Moldagem <i>Marshall</i> Vv= 6-8% ou do campo.	1) Envelhecimento: Mistura não compactada 60°C por 1 6h	Vácuo: 660mmHg por 30min Grau de saturação: 55-80%	Relação de propriedade retida: RT>70%
<i>Tunnicliff e Root</i>	n=6 réplicas Moldagem <i>Marshall</i> Vv= 6-8% ou do campo.	Condicionamento de moldagem: 2h na temperatura de compactação (similar ao AASHTO PP2).	<i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: -17°C por 15h 2) Descongelamento: 60°C por 24h	Relação de propriedade retida: RT>70%
<i>ASTM D 4867</i>	n=6 réplicas Moldagem <i>Marshall</i> Vv= 6-8% ou do campo.	Condicionamento de moldagem: 2h na temperatura de compactação (similar ao AASHTO PP2).	Vácuo: 500mmHg por 5min Grau de saturação: 55-80%	Relação de propriedade retida: RT>70%
			<i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: não há 2) Aquecimento: 60°C por 24h	
			Vácuo: 500mmHg por 5min Saturação: 55-80%	Relação de propriedade retida: RT>70%
			<i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: não há 2) Aquecimento: 60°C por 24h 3) Imersão (opcional): 25°C por 15min	
<i>Lottman Modificado</i> AASHTO T-283	n=6 réplicas Moldagem <i>Marshall</i> Vv= 6-8% ou do campo.	1) Envelhecimento: Mistura não compactada 60°C por 16h	Vácuo: 500mmHg Por 5 min ou até o máximo de 30 min Grau de saturação: 55-80%	Relação de propriedade retida: RT>80%
		Condicionamento de moldagem: 2h na temperatura de compactação (similar ao AASHTO PP2)	<i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: -18°C por 16h 2) Descongelamento: 60°C por 24h 3) Imersão: 25°C por 2h	



### 2.2.1.3. Avaliação de suscetibilidade a umidade com equipamentos simuladores de tráfego

De acordo com Majidzadeh e Brovold (1968), a utilização de simuladores de tráfego para fins de avaliação de adesividade e danos por umidade foi desenvolvida, entre 1930 e 1940, sua vantagem é aliar o efeito combinado da presença de água e as cargas de tráfego. A medida da perda de adesividade baseia-se na presença de agregado solto na superfície ou no número de revoluções necessárias para a ruptura.

De forma pioneira, Mack<sup>6</sup> desenvolveu um equipamento para a simulação de tráfego em pista circular para avaliar a adesividade e *stripping* de misturas asfálticas. A mistura asfáltica curada e submersa em água, era posicionada na trajetória dos pneus e submetida a cargas. O acúmulo de material solto nessa superfície era considerado um sinal de deterioração da mistura. O ponto de ruptura era definido em função da variação da quantidade de material solto e o número de revoluções.

Na Inglaterra, o desenvolvimento dos simuladores de tráfego foi impulsionado pelo equipamento de Lee e Nicholas<sup>7</sup>. Esse equipamento era composto de 3 rodas ( $l = 2''$  e  $\varnothing = 8''$ ) que aplicavam uma carga de 10 lb em 3 corpos-de-prova de misturas permeáveis imersos em água, numa temperatura de 40° C. Originalmente a velocidade era de 20 ciclos/min, mas passou a 25 ciclos/min. Algumas das vantagens da utilização dos simuladores de tráfego relacionam-se à própria simulação das condições às quais o pavimento é solicitado em serviço como: temperatura, carga e volume de tráfego. A tabela 3.6 mostra as características de alguns equipamentos atuais simuladores de tráfego.

Há um interesse crescente na utilização dos simuladores de tráfego para avaliar o desempenho de misturas asfálticas, assim como *stripping* e deformação permanente. Conceitualmente, estes ensaios simulam o efeito das cargas de tráfego em movimento. Na Tabela 2.5 são apresentadas algumas características de alguns dos principais equipamentos simuladores de tráfego, onde se pode notar que o simulador *Hamburg* (HWST) possibilita a execução do ensaio em placas compactadas de misturas asfálticas imersas em água quente, que além de versátil, é uma característica desejável na avaliação dos danos por umidade (PAN e WHITE, 1999).

<sup>6</sup> MACK, C (1938). *Research on Bituminous Road Materials*. Canadian Chemistry and Process Industry, vol. 93 No. 1, 365-6.

<sup>7</sup> LEE, A. R. e NICHOLAS, J.W. (1954). *Adhesion in the Construction and Maintenance of Road*. Adhesion and Adhesives, Fundamentals and Practice. Society of Chemical Industry, London.

**Tabela 2.5:** Características dos equipamentos simuladores de tráfego

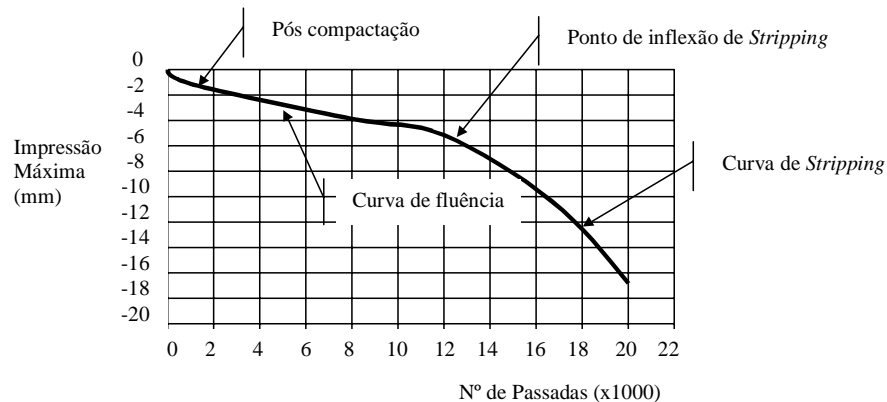
Equipamento	LCPC (França)	GLWT (Inglaterra)	APA ()	HSWT (Alemanha)
Parâmetros				
Nº de réplicas	2	3	3	3
Dimensões do corpo-de-prova	> 100x160x500 mm	> 17x125x300 mm	Prismáticos e cilíndricos	> 40x305x305 mm
Temperatura do ensaio e meio ambiente	35-60°C Seco	40-60°C Seco	40-60°C Seco ou imerso	25-70°C Imersos em água
Dimensões e tipo das rodas e pneus	Ø=400 mm e=90 mm pneumático	- Alumínio com pressurizador	- Alumínio com pressurizador	Ø=203,5 mm Aço inoxidável
Pressão de pneus	690 kPa	700 kPa	690 kPa	
Carga	> 5000 N	> 445N	> 445N	> 697 N
Velocidade	1,6 m/s	0,6 m/s	-	0,33 m/s
Critério para deformação máxima	<i>Deformação Máx.:</i> 10% da espessura do c.p.  <i>Nº de passadas</i> 30000	<i>Deformação Máx.:</i> 7,6% da espessura do c.p.  <i>Nº de passadas</i> 8000	-  <i>Nº de passadas</i> 8000	<i>Deformação Máx.:</i> 4% da espessura do c.p.  <i>Nº de passadas</i> 20000

A Figura 2.4 mostra um resultado típico do simulador *Hamburg*; nela se identificam os fenômenos de pós-compactação, curva de fluência, ponto de inflexão e curva de stripping. Para Hines<sup>8</sup> *apud* Aschenbrener *et al* (1995), a curva de fluência relaciona-se com a deformação permanente devido à fluência plástica, é o inverso da taxa de deformação na região linear da curva de deformação, e inicia-se ao final da pós-compactação. O ponto de inflexão é relacionado à resistência da mistura asfáltica aos danos por umidade, após este, inicia-se a curva de stripping que indica a severidade dos danos por umidade, progredindo até o final do ensaio (ou uma impressão máxima padronizada).

A norma do *Hamburg* preconiza como critério para deformação máxima cerca de 20 mm de afundamento, que é o mais severo quando comparado aos outros equipamentos simuladores

<sup>8</sup> HINES, M (1991). *The Hamburg Wheel-Tracking Device*, Proceedings of the Twnty-Eighth Paving and Transportation Conference, Civil Engineering Department, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.

mencionados; por este motivo sua aplicação e seus critérios de aceitação vêm sendo questionados. Aparentemente, as misturas asfálticas utilizadas na Alemanha, onde originou o equipamento, têm características particulares e enquadram-se facilmente aos critérios, entretanto, assumi-los diretamente em outros países não é indicado, sendo necessária uma adequação dos procedimentos de condicionamento e ajuste da temperatura de ensaio, como já proposto para o estado do Colorado (ASCHENBRENER *et al* , 1995).



**Figura 2.4:** Curva típica de resultado do simulador de tráfego tipo *Hamburg* (ASCHENBRENER *et al* , 1995)

No Brasil, a utilização dos ensaios com simuladores de tráfego resume-se em experiências de algumas universidades e centros de pesquisa. Como se trata de um processo incipiente, os primeiros resultados de pesquisas brasileiras utilizando os “simuladores” dizem respeito ao afundamento em trilhas de roda, sem relacionar o desempenho com descolamento. Moura (2001), avaliando o efeito de aditivos melhoradores de adesividade em misturas asfálticas, testou, dentre outros ensaios, o simulador francês LCPC e concluiu que o equipamento não conseguiu detectar a variação das propriedades na avaliação da adesividade, mas que pode ser promissor, se executados procedimentos de condicionamento eficientes.

#### 2.2.1.4 Outros Ensaios

##### *Ensaio de Abrasão Deval*

O ensaio francês de abrasão Deval avalia a *suscetibilidade* de uma mistura asfáltica à ação da água. Majidzadeh e Brovold (1968) relataram que resultados de pesquisas laboratoriais mostraram que a perda de massa por abrasão no meio aquoso corresponde à má adesividade entre ligante e agregado.

Após um período de cura de 4 dias, o corpo-de-prova *Marshall* é colocado em um dos cilindros ( $\varnothing = 200$  mm e  $h = 340$  mm) do equipamento juntamente com água a  $2^\circ$  C até cobrir em 25 mm, e são fechados hermeticamente e aplicadas 1000 revoluções a 33 rpm. Em seguida o corpo-de-prova é retirado, secado e pesado, para a avaliação da perda de massa relativa à inicial.

#### *Ensaio Cantabro*

O ensaio *Cantabro* (NLT 328/86), de origem espanhola, foi desenvolvido para medir o desgaste de misturas porosas pela perda de massa de um corpo-de-prova submetido à abrasão. Em resumo, o ensaio consiste em submeter um corpo-de-prova *Marshall* a 300 revoluções a 33 rpm no equipamento de abrasão Los Angeles sem as esferas metálicas. Em seguida verifica-se a perda de massa com relação à massa original do corpo-de-prova, pelo índice apresentado na expressão 4.2.

$$P = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

P = índice de perda de massa (%);

$P_i$  = massa inicial do corpo-de-prova (g);

$P_f$  = massa final do corpo-de-prova (g).

A norma preconiza um número de 8 corpos-de-prova, que são divididos em dois grupos, sendo que o segundo grupo é opcional. O grupo opcional é composto de 4 corpos-de-prova, que após moldados e pesados são imersos em água a  $60^\circ$  C por 24 h, e em seguida, outra imersão é feita a temperatura ambiente por 24 h. Ao final desse “condicionamento” o corpo-de-prova é levado ao aparelho de abrasão e, em seguida, é avaliada a perda de massa por imersão. O ensaio tem se mostrado sensível na avaliação da variação dos componentes que proporcionam coesão e resistência à desagregação das misturas asfálticas, inclusive as densas.

#### *Ensaio do Pedestal de Congelamento e descongelamento*

O ensaio do pedestal de congelamento-descongelamento tenta simular os níveis de viscosidade do asfalto em 5 anos de pavimento. Para isso, utiliza-se de corpos-de-prova de mistura asfáltica no teor de projeto, com diâmetro de 41,4 mm e altura de 19,05 mm, compactados estaticamente com energia de 2,8 kgf por 15 min, em seguida passam por um período de cura de 3 dias a  $25^\circ$  C antes da execução do ensaio.

O ensaio consiste da imersão do corpo-de-prova em água num recipiente chamado pedestal de tensão, que expõe o corpo-de-prova ao congelamento numa temperatura de  $-12^{\circ}\text{C}$  por 15 h, a seguir é feita a estabilização da temperatura em  $25^{\circ}\text{C}$ , para um ciclo de aquecimento a  $49^{\circ}\text{C}$  por 9 h. O procedimento de congelamento e descongelamento é repetido até a verificação de trincas, avaliadas visualmente.

O critério classifica misturas asfálticas como suscetíveis aos danos por umidade quando o corpo-de-prova apresenta trincas com menos de 10 ciclos. Se o corpo-de-prova suportar 20 a 25 ciclos é tido como resistente aos danos por umidade. De acordo com Parker e Wilson (1986) o ensaio prioriza a avaliação da resistência da ligação adesiva e coesão da mistura, sendo que as propriedades mecânicas ficam preteridas; outros pontos negativos a serem destacados são: o período longo de ensaio; a falta de base analítica e seu critério de aceitação não são baseados em comportamento em serviço.

#### *Sistema de Condicionamento Ambiental*

O Sistema de Condicionamento Ambiental (*Environment Conditioning System*, ECS) se mostrou eficiente na previsão de *stripping*; e é feita através da avaliação da variação do módulo de resiliência de misturas asfálticas submetidas a vários ciclos de condicionamentos específicos. O ensaio é feito em corpos-de-prova ( $h = \varnothing = 102 \pm 2 \text{ mm}$ ) de misturas envelhecidas a curto-prazo, compactadas pelo compactador giratório, para um volume de vazios de  $7,5 \pm 0,5 \%$ .

O módulo de resiliência e a permeabilidade ao ar dos corpos-de-prova são medidos desde a entrada na câmara de carga. A amostra saturada a vácuo, numa pressão de  $510 \pm 5 \text{ mmHg}$  por um período de 30 minutos, é submetida a um ciclo a  $60^{\circ}\text{C}$  por 6 horas, em seguida é aplicada um carregamento semi-senoidal de 900 N, e resfriada por 2 horas, após o final das 8 horas é executado o ensaio de módulo de resiliência (carregamento de 225 N) e avaliação da permeabilidade. Repete-se o procedimento por duas vezes mais. Para simulações de regiões frias ainda é aplicado um ciclo de congelamento de  $-18^{\circ}\text{C}$  por 6 h (TANDON *et al*, 1998). O critério de aceitação das misturas é baseado na retenção de módulo de resiliência; resultado da relação entre o módulo de resiliência médio do grupo condicionado e do não condicionado, e deve ser de, no mínimo, 70%.

## **2.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS, ASFALTOS E MISTURAS ASFÁLTICAS INFLUENTES NA ADESÃO E SUSCEPTIBILIDADE À UMIDADE**

### **2.3.1. Introdução**

O desenvolvimento da adesão assim como a suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas deve-se às suas características, composições e propriedades, seja das parcelas específicas do agregado e do asfalto, seja pelo arranjo resultante dessa combinação. Este capítulo apresenta três itens para a compreensão da influência das propriedades dos agregados, dos cimentos asfálticos e das misturas asfálticas.

### **2.3.2. Propriedades dos agregados**

Os agregados imprimem respostas específicas de comportamento quanto à resistência das misturas asfálticas. O esqueleto mineral de uma mistura asfáltica depende das características de forma, angularidade, textura e porosidade dos agregados, e essas características interrelacionam-se a outros fatores. Por exemplo, a presença de alguns tipos de minerais e de cristais, e a dureza intrínseca de alguns materiais pétreos promovem a formação de planos de ruptura característicos no processo de britagem. Macroscopicamente, essas características definem a forma e angularidade resultante do agregado produzido, e “microscopicamente”, as cargas elétricas superficiais. Desde que selecionadas, estas características podem favorecer o desenvolvimento de ligações adesivas com o asfalto, aumentar o embricamento da mistura, sua estabilidade, resistência à deformação permanente em trilhas de roda e vida de fadiga.

Para obter melhores propriedades nas misturas asfálticas, a seleção dos materiais deve considerar a composição mineralógica dos agregados disponíveis, a fim de que “atue” beneficemente na mistura com o asfalto. Curtis (1990), avaliando a interação agregado-asfalto, afirmou que a adesividade está associada, principalmente, às características do agregado, sendo particularmente regida pela composição química da superfície do agregado, enquanto que o asfalto desempenha um efeito menor.

A classificação dos materiais pétreos em função de seus constituintes minerais permite uma previsão do seu uso como agregado em pavimentação. Classificações diferentes podem ser utilizadas, sendo as mais populares as baseadas na constituição cristalina dos agregados, em função dos seus teores de sílica e alcalinos, e as baseadas na origem geológica do material, que classifica agregados ígneos como ácidos e não-ígneos como básicos. Entretanto, de forma geral, os agregados podem ser classificados em ácidos e básicos, de acordo com a quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente.

O aumento do teor de sílica num agregado aumenta sua afinidade com a água e, por isso, são chamados agregados hidrofílicos. Por outro lado, agregados básicos como basaltos, diabásios, gabros e alguns tipos de calcários, devido à menor concentração de sílica em suas composições, tendem a desenvolver melhores ligações com o asfalto que com a água, por isso, são chamados hidrofóbicos. A Figura 2.5 apresenta o sistema Mertons e Wright; trata-se de um “ábaco” que reúne alguns tipos de agregado, em função do teor de sílica e alcalinos.



Figura 2.5: Sistema Mertons e Wright (adaptado de HICKS, 1991).

A polaridade da superfície do agregado também permite avaliar a aptidão do seu uso, pois na ligação com o asfalto há um balanceamento das cargas elétricas superficiais. Yoon e Tarrer (1988) estudaram misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados, com o objetivo de determinar a importância das propriedades físico-químicas do agregado na adesão e *stripping*. Através da medida da variação do pH da água com diferentes agregados imersos, concluíram que a presença predominante de sílica nos granitos elevou a acidez da água. Esses resultados aliados a ensaios de fervura permitiram a elaboração de um ranqueamento dos agregados quanto à sua carga elétrica superficial, mostrando que as misturas com agregados que concederam ao meio aquoso um aumento do pH são mais susceptíveis ao *stripping*.

Hunter e Ksaibati (2002), avaliando misturas com agregados calcários e graníticos quanto à suscetibilidade à umidade (AASHTO T 283), concluíram que as misturas com agregados graníticos, além de levarem a menores RRT, apresentaram danos por umidade mais rapidamente (com número menor de ciclos de condicionamento), que as misturas com agregados calcários. Aparentemente, as ligações adesivas desenvolvidas na mistura granito-asfalto são mais frágeis que nas calcário-asfalto. Esta conclusão, de certa forma, concorda com o que se depreende das classificações anteriormente citadas.

A forma e angularidade dos agregados também são fatores preponderantes, em termos de resistência; agregados esféricos fornecem à mistura um intertravamento mecânico pobre, pois apresentam a tendência de se movimentar uns sobre os outros diante da atuação de uma carga, o que não ocorre com agregados cúbicos. Já os agregados lamelares apresentam maior propensão à fratura e numa mistura podem provocar tendência à estratificação, aumento do consumo de asfalto devido ao aumento da área superficial, aumento do volume de vazios e, conseqüentemente, diminuição da resistência da mistura.

Livneh e Greenstein (1972) não descartavam a utilização de agregados lamelares em misturas asfálticas, mas acreditavam haver uma relação entre a dimensão máxima e mínima que deveria ser obedecida (relação  $< 3$ ), caso contrário, implicaria em problemas de estabilidade. Esses pesquisadores acreditavam que para uma mesma densidade, as misturas apresentariam estabilidade da mesma ordem, independente das características de forma, angularidade e textura dos agregados. No que se refere à adesão, espera-se que agregados lamelares apresentem uma película de asfalto menos homogênea que agregados cúbicos, principalmente em suas arestas, e nessa região, quando solicitada, a película tende a romper com mais facilidade por ser menos espessa.

No que se refere à textura dos agregados, Kim *et al.* (1992) conseguiram demonstrar a diferença relativa entre a “força” da ligação adesiva em misturas asfálticas com agregados de textura superficial rugosa e polida. A partir de ensaios de fadiga, foi possível constatar que as ligações adesivas desenvolvidas nas misturas asfálticas com agregado polido foram mais frágeis que misturas com agregados rugosos. O plano de ruptura de corpos-de-prova compostos com agregados polidos apresentou descolamento do asfalto do agregado na interface dessa ligação, enquanto que as misturas asfálticas com agregados rugosos apresentaram agregados fraturados no plano de ruptura, evidenciando uma ligação adesiva mais resistente. O melhor comportamento mecânico da mistura com agregados rugosos deve-se à sua maior área superficial que favorece ligações adesivas com o asfalto.

Evidenciando a importância da textura dos agregados nas propriedades das misturas asfálticas, Bayomi (1992) propôs uma técnica para fornecer maior interação entre agregado-asfalto, que consiste da impregnação do agregado com cimento *Portland* hidratado (*Cement Coated Treatment, C.C.T.*). A técnica do C.C.T. considera o aumento da adesão e do atrito interno proporcionado pelo aumento da rugosidade da superfície do agregado. Essa técnica foi aplicada em trechos experimentais londrinos e iraquianos, e resultou em misturas mais resistentes, com maior estabilidade, maior resistência à deformação permanente e vida de fadiga e a diminuição de incidência de *stripping*.



Agregados graúdos rugosos podem alojar asfalto e finos em suas reentrâncias e, dependendo da quantidade, podem contribuir ao aumento da resistência da mistura, assim alguma melhora nas propriedades da mistura asfáltica pode ser produzida com a adição de fíleres selecionados. Sanders e Dukatz (1992) identificaram que há uma faixa do teor de finos de uma mistura asfáltica que contribui para diminuir problemas relacionados à deformação permanente (em cerca de 3 a 5%) e destacaram que para agregados graúdos mais rugosos, maior quantidade de finos será necessária para o intertravamento.

As características dos fíleres afetam as propriedades das misturas asfálticas, podendo trabalhar tanto como material inerte, preenchendo os vazios entre as partículas de agregados graúdos, quanto como material ativo, pela interação físico-química entre fíler e asfalto, essa interação é regida pelas características geométricas, propriedades de superfície, absorção e adesão.

Para Ishai e Craus (1996), a propriedade mais importante da interface fíler-ligante é a absorção seletiva de elementos químicos do asfalto, em nível molecular, pelos diferentes tipos de fíleres. Para esses pesquisadores, a absorção seletiva proporciona aos fíleres uma cobertura com asfalto de peso molecular alto e atividade de superfície maior, enquanto que o filme de asfalto de outras frações tem maior viscosidade e melhor propriedade adesiva.

Em alguns casos a absorção do asfalto pelo agregado diminui a espessura da película, tornando-a mais susceptível às tensões e ao intemperismo, especialmente à ação da água. De forma simplista, pode-se dizer que a porosidade efetiva de um agregado tem relação com a taxa de absorção de asfalto, indicando uma tendência que quanto maior a porosidade do material maior será a absorção de asfalto. Obviamente, esta relação dependerá de outros fatores como o tamanho dos canais e poros do agregado assim como da mobilidade do líquido absorvido, representa pela viscosidade do asfalto. Então, pode-se afirmar que diferentes tamanhos de poros controlam a absorção de diferentes líquidos dependendo de suas viscosidade, tensão superficial e ângulo de molhagem. Para Chadbourn (1999), alguma taxa de absorção pode ser benéfica a mistura asfáltica, desde que considerada e conhecidos seus efeitos nas propriedades e características das mesmas.

### **2.3.3 PROPRIEDADES DOS ASFALTOS**

A incidência recorrente de problemas com o descolamento da película de asfalto dos agregados nas misturas asfálticas motivou a investigação de fatores especificamente

relacionados ao asfalto, como consistência, viscosidade, tensão superficial e poder de molhagem.

Segundo Kandhal e Rickards (2001), um elemento que deve ter provocado o aumento da incidência de defeitos como *stripping* e desagregação de misturas asfálticas é a composição do asfalto. Esses pesquisadores argumentaram que a mudança da composição do asfalto provocada indiretamente pelo embargo árabe do petróleo, a partir dos anos 70, obrigou a utilização de materiais de origens e composições diferentes, resultando em misturas asfálticas com características e comportamentos diferentes.

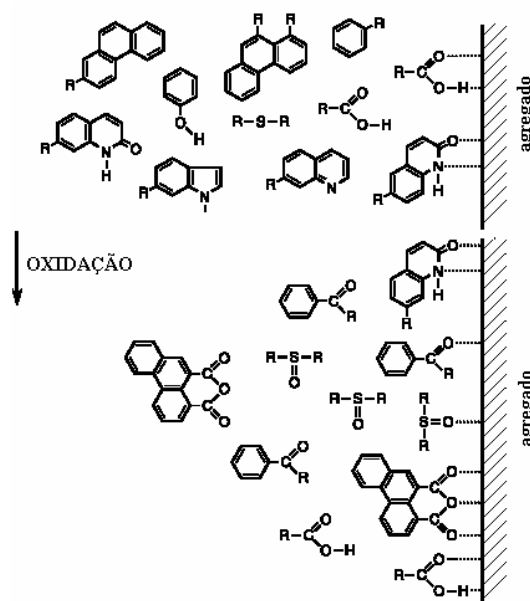
A composição do asfalto na mistura asfáltica depende e é influenciada pela interação agregado-asfalto, ou seja, a química da interface determina o grau de adesão e de sensibilidade à água, e este comportamento é único e exclusivo ao par formado. É óbvio que problemas de adesão implicam em baixa resistência ao descolamento da película de asfalto. Essa afinidade que o asfalto apresenta diante de um tipo de agregado resulta, dentre tantos outros fatores, de interações químicas particulares. Têm sido investigadas as “reações” das moléculas do asfalto na interface agregado-asfalto; já se sabe que se tratam de processos lentos e contínuos dependentes da temperatura do sistema e dos tipo e natureza do ligante e do agregado. No que se refere aos asfaltos, acredita-se que alguns componentes polares e sulfóxidos são mais resistentes à ação da água que outros tipos de compostos.

Hicks (1991) destacou a importância da presença de fenóis, nitrogênio e grupos polares no asfalto, como compostos que melhoram suas características de molhagem e adesão, devido à relativa facilidade de interação molecular com a superfície dos agregados. Por outro lado, Huang et al. (2003a e b) explicaram que a ruptura da ligação adesiva corresponde à perda de alguns componentes químicos, principalmente, elementos orgânicos polares da interação que migram da superfície do asfalto, e essa perda acontece em função da presença e do tempo de contato da água no asfalto, do seu pH e da temperatura do sistema. Huang *et al.* (2003b) observaram que na interação granito-asfalto há uma produção menor de polares orgânicos e sulfóxidos, tornando esse tipo de mistura asfáltica mais susceptível à ação da água.

Alguns compostos do asfalto produzidos no processo de oxidação parecem resistir mais à ação da água. A oxidação do asfalto dá-se no envelhecimento em curto prazo, que acontece ainda na usina, no procedimento de mistura, e caracteriza-se pela exposição do CAP a temperaturas maiores que as especificadas fazendo com que haja queima de componentes orgânicos do cimento asfáltico. Como resultado dessa queima há perda/volatilização de componentes leves do asfalto, tornando-o mais viscoso. A Figura 2.6 mostra um esquema

ilustrado das ligações na região da interface agregado-asfalto virgem e após a oxidação, nela se nota que há um aumento dos “pontos de ligação” com a superfície do agregado (HUANG *et al.* 2003b).

Apesar de alguma inércia química do asfalto, há oxidação dos componentes orgânicos do asfalto em contato com o ar, a luz e a temperatura, como verificado por Lottman (1978) a partir da comparação entre as propriedades dos asfaltos de corpos-de-prova e testemunhos de pavimentos em serviço, apresentados na Tabela 4.1.



**Figura 2.6:** Representação esquemática dos componentes do asfalto virgem e oxidado aderido na região interfacial agregado-asfalto (Huang et al., 2003)

**Tabela 2.6:** Características do asfalto (baseada em LOTTMAN, 1978)

		Ponto de Amolecimento (° F)	Viscosidade cinemática (275 °F, Cst)	Penetração
CA2 - 1	(1)	128	406	73
	(2)	139	643	40
NB1 - 2	(1)	130	374	62
	(2)	141	658	29
NJ2 - 3	(1)	128	389	73
	(2)	145	743	27
OR1 - 4	(1)	128	260	54
	(2)	138	414	26

Legenda: (1) corpo-de-prova e (2) testemunho.

Na Tabela 2.6 pode-se notar que os valores do ponto de amolecimento, viscosidade cinemática e penetração dos testemunhos extraídos de pavimentos em serviço, com idades variadas (2-12 anos), são diferentes que dos corpos-de-prova produzidos em laboratório. Isto pode ser o efeito de algum envelhecimento em longo prazo, que tornou os asfaltos mais

viscosos e mais rígidos após determinado período de tempo. Do ponto-de-vista dos danos por umidade, são benéficas as alterações provocadas no asfalto como o aumento da viscosidade, pois desse tipo de material espera-se maior resistência ao descolamento da película de asfalto pela água.

Se por um lado ligantes mais viscosos promovem o aumento da resistência ao dano por umidade, por outro, conceitualmente, reduzem a extensão da superfície de molhagem; por isso recomenda-se serem analisados sob dois aspectos: a adesão e a perda de adesão. No primeiro caso ressaltam-se fatores que influenciam no desenvolvimento das ligações adesivas como resultado da afinidade, molhagem e cobertura do agregado, enquanto que no segundo caso destaca-se a resistência da ligação adesiva frente à ação da água.

No Brasil, num estudo sobre o envelhecimento em curto prazo, Agnusdei (1975) afirmou que o poder de ligação apresentado por alguns asfaltos pode diminuir significativamente com o desenvolvimento de estruturas de associação/agregação de asfaltenos, aumentando a viscosidade do asfalto. Para esse pesquisador a perda de adesão se manifestaria em temperaturas menores que a do ponto de amolecimento e seria reversível, já que pelo calor, as estruturas formadas pela associação dos asfaltenos poderiam ser desfeitas.

Algumas pesquisas questionam as vantagens do enrijecimento, pois o aumento da viscosidade está relacionado a um baixo poder de molhagem do asfalto no agregado; o aumento de viscosidade também pode ser ocasionado por outro fator: a presença de fíleres.

Leite e Motta (2002), avaliando a incorporação de fíleres diferentes em misturas asfálticas, mostraram que independente do tipo de filer sempre há o enrijecimento dos mástiques, sendo que este fenômeno é muito mais intenso quando o filer incorporado é a cal hidratada, devido à sua maior concentração nos mástiques e à sua maior área superficial. O efeito de filer ativo da cal reduz o potencial do asfalto de se deformar em altas temperaturas, especialmente nos primeiros anos da vida útil da mistura asfáltica, quando esta é mais susceptível à deformação permanente, isto porque atua enrijecendo e reforçando o filme de asfalto (LITTLE e EPPS, 2001).

Há muito tempo a cal tem sido utilizada em misturas asfálticas, mas sua interação e efeitos no comportamento e nas propriedades mecânicas das misturas ainda não são completamente compreendidos. A cal vem se consolidando como o “agente” mais eficiente na prevenção do *stripping*, e, sinergicamente, atua aumentando a resistência à deformação permanente e reduzindo a “taxa” de oxidação (EPPS e LITTLE, 2001; SEBAALY *et al.*, 2001; SEBAALY *et al.*, 2003)

Alguns pesquisadores acreditam que a adição de cal proporciona o envelhecimento acelerado da mistura asfáltica. Sebaaly *et al.*(2001), avaliando diferentes tipos de aditivos anti-*stripping* aplicados em trechos experimentais, concluíram que, em geral, a adição de cal não teve impacto significativo nas propriedades das misturas sob as ações combinada do tráfego e meio ambiente, indicando que não houve envelhecimento acelerado.

Leite e Motta (2002), baseando-se em resultados de parâmetros reológicos, mostraram que a resistência à fadiga dos mastiques vai piorando em comparação com a do ligante original à medida que se aumenta o teor de fíler, e que a cal foi o fíler que acarretou a menor resistência à fadiga do ligante.

Para Sebaaly *et al.*(2003), a melhora proporcionada pela cal acontece quando em presença de água. Quimicamente, a cal interage com os ácidos carboxílicos do asfalto formando um produto insolúvel absorvido pela superfície do agregado. A cal fornece íons de cálcio que substituem H, Na, K e outros cátions da superfície do agregado.

Mais recentemente, outros tipos de aditivos têm sido investigados para melhorar as características dos asfaltos e misturas asfálticas, por ex: borrachas e polímeros. A borracha, produto da reciclagem de pneus inservíveis, pode ser incorporada diretamente ao CAP (via úmida) ou ao agregado (via seca), já os polímeros (EVA, SBS, etc.) são incorporados ao CAP. A adição de borracha ou polímeros não deve prejudicar as propriedades aderentes do ligante, entretanto ainda não se pode afirmar isso. Specht *et al.* (2002), avaliando a susceptibilidade à umidade (AASHTO T-283) de misturas com ligantes convencionais e modificados com borracha (via seca e úmida) e diferentes tempos de cura, concluiu que as misturas asfálticas “modificadas” apresentaram, em geral, menor RRT que a mistura de referência (com asfalto convencional), essa maior perda pode estar relacionada a alguma redução na estabilidade ou ausência de coesão da mistura asfalto-borracha.

O amolecimento do CAP devido à temperatura e emulsificação do asfalto é outro aspecto a ser considerado na perda de adesão e susceptibilidade à umidade. Kiggundu e Roberts (1988) avaliaram o fenômeno da emulsificação, submergindo amostras de dois asfaltos de viscosidades diferentes em água destilada. O asfalto menos viscoso apresentou-se opaco após um período de uma semana; o outro ligante, mais viscoso, só apresentou o mesmo aspecto visual após um período de tempo maior. Algumas semanas depois, ambos os asfaltos apresentaram uma coloração marrom, ao que foi chamado de emulsificação. Após secagem, ambos os materiais voltaram a apresentar a coloração e o brilho iniciais. Este

procedimento bastante simples parece ilustrar o que os autores chamam de emulsificação do asfalto e o seu caráter reversível (TAYLOR e KHOSLA, 1983).

A interação da água com o CAP no fenômeno de emulsificação provoca uma redução da resistência da mistura e compromete sua integridade. Este amolecimento pode alterar as propriedades da película asfáltica, assim como causar sua separação do agregado; por esses motivos a perda de coesão da mistura pode ser pensada como um efeito associado aos problemas de adesividade (KIGGUNDU e ROBERTS, 1988 e HICKS, 1991).

#### **2.3.4. PROPRIEDADES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dos fatores que influenciam no efeito do dano por umidade do pavimento, sem dúvida nenhuma o volume de vazios é um dos mais importantes, pois é neste espaço que a água se aloja. O volume de vazios é resultado da combinação de fatores da mistura asfáltica como a faixa granulométrica, o teor de asfalto, a compactação entre outros. As misturas asfálticas brasileiras são dosadas pelo Método Marshall (ABNT NBR 12891), que estipula critérios para definição do teor de asfalto de trabalho e controle executivo, como: índice de vazios, densidade aparente, relação betume-vazios, estabilidade e fluência; como estes fatores estão interrelacionados, a alteração de um destes parâmetros acarretará em mudanças na mistura em geral e, conseqüentemente, nos seus arranjo e distribuição de vazios.

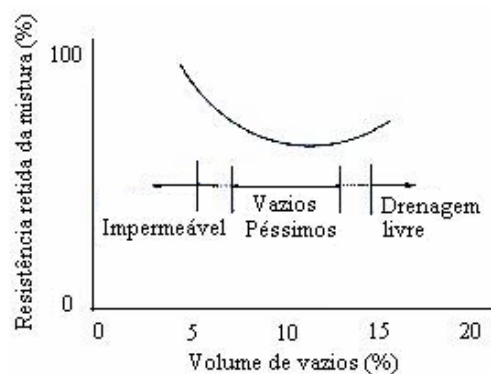
Alguns tipos de misturas asfálticas utilizadas podem ser mais susceptíveis à ação da umidade e, em geral, poderia se esperar que misturas mais abertas estariam mais susceptíveis à ação da água por permitir a sua entrada no sistema com mais facilidade. Entretanto, a entrada de água pode não ser tão danosa se houver sua percolação e escape. Por isso, espera-se que misturas mais densas, quando em presença de água, tendam a apresentar maiores danos, pois a água permanece aprisionada no sistema, deteriorando a mistura asfáltica.

Parker e Gharaybeh (1988) avaliaram misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados e faixas granulométricas e concluíram que alguns tipos de misturas são mais susceptíveis aos danos por umidade, como é o caso das misturas utilizadas para camada de ligação, que são mais abertas que as misturas utilizadas em revestimentos, e atribuíram a diferença de comportamento devido ao diferente teor de asfalto das misturas.

Atualmente, têm-se utilizado outros métodos para dosagem e controle da execução de misturas asfálticas, como o método de Hveem e o SUPERPAVE<sup>®</sup>. A mudança da filosofia dos

métodos de dosagem parece ter implementado ao processo construtivo, principalmente nos estados americanos, uma tendência para o controle tecnológico das misturas asfálticas, que consiste da aceitação da camada de revestimento e da abertura da via ao tráfego, quando a mistura asfáltica atingir um volume de vazios da ordem de 7%. Com exceção dos custos envolvidos, levantam-se questões sobre as vantagens deste procedimento.

Lottman (1978) sinalizava a importância da impermeabilidade das misturas asfálticas como elemento decisivo na prevenção de problemas com umidade, e sugeria que, numericamente, esta impermeabilidade seria atingida quando o volume de vazios da mistura fosse da ordem de 2%. Um entendimento melhor da influência dos vazios na susceptibilidade aos danos por umidade das misturas asfálticas foi definido no Conceito de Vazios Péssimos. Segundo Terrel e Al-Swailmi (1993), misturas asfálticas parcialmente saturadas com água, condicionadas por ciclos de congelamento e descongelamento, apresentam variações nas suas propriedades de resistência, sendo este efeito agravado quando o volume de vazios estiver contido num determinado intervalo, denominado vazios péssimos (*pessimum voids*) como mostra a Figura 4.3, vale destacar que segundo esse conceito os valores de Vv das misturas brasileiras estariam contidos no intervalo das misturas ditas impermeáveis.



**Figura 2.7:** Conceito de Vazios Péssimos (Terrel e Al-Swailmi , 1993)

Alguns tipos de misturas com volume de vazios altos podem contribuir para o aumento da incidência de *stripping*, como foi o caso da utilização das camadas de atrito e camadas porosas. Nos anos 70, essas misturas foram muito produzidas e alguns anos mais tarde algumas agências americanas suspenderam o seu uso por ela permitir a entrada de água no sistema. Alguns pesquisadores, em contrapartida, continuaram a estimular seu uso em conjunto com misturas impermeáveis (4 a 5%), impedindo a percolação da água para as outras camadas.

Os vazios numa mistura asfáltica são diretamente relacionados à sua densidade. Uma mistura dosada e compactada adequadamente contém volume de vazios suficientes para

prevenir deformação permanente devido à fluxo plástico e, ao mesmo tempo, prevenir a entrada de água e ar. Assim, a densidade deve ser controlada para assegurar que os vazios estejam num limite aceitável. Neste sentido, Brown (1990) sugeriu que o volume de vazios inicial de um revestimento recém construído não deve ser superior a 8% nem inferior que 3% durante a vida útil do pavimento.

Segundo Brown (1990), as especificações americanas exigem um mínimo de 95% da densidade de laboratório, e em alguns casos 98%. Outras especificações não permitem que misturas sejam compactadas para uma densidade maior que 100% da densidade de laboratório por estimular a ocorrência de deformação permanente. Supondo que uma mistura com  $V_v=4\%$  é especificada para ser compactada a, no mínimo, 95% da densidade de laboratório, resultaria num  $V_v=9\%$  após a compactação, e após alguns anos de tráfego, deveria resultar no volume de vazios desejado.

Kandhall (1994) relacionou a incidência de *stripping* a compactações inadequadas, que levam as misturas a apresentarem volume de vazios altos. Os órgãos americanos, ligados à pavimentação, especificam que o volume de vazios da camada de revestimento para liberação ao tráfego seja de 8% (que corresponde a um mínimo de 92% da densidade máxima teórica). A partir desse valor, assume-se que o pavimento densificará com o tráfego até o valor definido no projeto e na dosagem da mistura num período de 2 a 3 anos.

Harmelink e Aschenbrener (2002), avaliando a compactação de revestimento em pavimentos em serviço no Colorado, monitoraram o tempo de densificação do revestimento para diferentes tipos de tráfego num período de 10 anos e concluíram que a densificação que ocorre nos primeiros 3 anos é capaz de levá-lo a volumes de vazios próximos ao de projeto.

No Brasil, o grau de compactação do concreto asfáltico é definido como resultado da comparação entre a densidade aparente de um corpo-de-prova extraído da pista, após a conclusão dos serviços, e uma mistura de controle, podendo esse ser resultante de uma moldagem com a própria mistura no campo ou a mistura da dosagem original de laboratório. Tomando-se a densidade de projeto, com referência à densidade aparente da dosagem original, o valor considerado aceitável deverá ser de, no mínimo, de 95%. Tendo sido a mistura de controle compactada com o material de campo, o valor da densidade aparente aceitável deverá ser de 100%.

Praticamente é muito difícil controlar o teor de asfalto e a faixa granulométrica, e assim sendo, sempre há alguma alteração da “densidade aparente” para a da dosagem projetada. Este desvio pode significar uma variação de 1 a 3%, o que é suficiente para baixar um grau



de compactação aceitável de 95% para valores tão baixos quanto 92%, e, conseqüentemente, influenciar negativamente o volume de vazios, a estabilidade e outras propriedades relacionadas (BIRMAN, 1979).

O aumento da incidência de defeitos relacionados à presença de água e perda de adesividade motivou pesquisas para entender como as características e propriedades das misturas asfálticas podem influenciar positiva ou negativamente o fenômeno. Hicks (1991) aplicou um questionário a agências e órgãos americanos e, dentre outros questionamentos, indagou sobre qual era o procedimento adotado na prevenção do *stripping*. A maioria das respostas considerou, primeiramente, a utilização de aditivos melhoradores de adesividade que, de certa forma, revela alguma falta de afinidade entre os agregados e o cimento asfáltico. Em segundo lugar as respostas remetiam à melhoria dos procedimentos construtivos: controle da compactação. Em geral, os resultados indicaram que o aumento do esforço de compactação é altamente eficiente no controle dos danos por umidade devido à diminuição do volume de vazios. E, neste caso, o problema parece ser mais um resultado da presença da água aliada a outros fatores, que um problema de adesividade má. Os questionários ressaltaram também o controle da temperatura da mistura asfáltica durante sua execução, como fator de efeito significativo na redução dos danos por umidade.

Kiggundu e Roberts (1988) também aplicaram questionários em segmentos públicos e privados envolvidos com pavimentação asfáltica investigando o fenômeno do *stripping*. O questionário buscou compreender a causa e a prevenção do defeito. As respostas sobre quais eram os fatores responsáveis pelo desenvolvimento do *stripping*, apontaram dois fatores como os principais: utilização de materiais inadequados e controle inadequado das construções.

De modo geral, as preocupações relacionadas à adesividade e *stripping*, tanto dos pesquisadores quanto da "indústria" de pavimentação, incidem em ações que visem à durabilidade da mistura, através da seleção de materiais adequados, para que seja desenvolvida uma boa adesão no sistema agregado-asfalto, ou, procedimentos construtivos, que assegurem volumes de vazios adequados para a prevenção da ação deletéria da água.

Parker e Gharaybeh (1987), avaliando diferentes misturas submetidas à saturação à vácuo e ensaios de tração indireta, notaram que as misturas mais abertas são facilmente saturadas e que seus vazios são maiores mas em menor proporção de ocorrência. Outros parâmetros também foram avaliados como espessura da película de asfalto e tamanho dos vazios. Esses pesquisadores encontraram uma tendência já esperada de comportamento, isto é, quanto mais espessa for a película de asfalto na superfície do agregado maior será a retenção da

propriedade após o condicionamento, o que implica em inferir que a espessura da película de asfalto tem efeito preponderante na suscetibilidade à umidade de uma mistura asfáltica.

Kandhal e Rickards (2001) afirmaram que o descolamento da película de asfalto pela água é inversamente proporcional ao tamanho dos poros dos vazios interconectados, podendo-se esperar piores efeitos do excesso de pressão neutra em misturas densas que em misturas abertas como as camadas de ligação. Hicks (1991) explicou que numa mistura com substancial quantidade de finos, a cobertura de asfalto completa da partícula tende a ser descolada mais rapidamente da partícula de agregado, por esta exigir mais cimento asfáltico, o que, é mais difícil de satisfazer sem criar um problema na estabilidade.

É usual que a espessura da película possa influenciar nas propriedades das misturas positiva ou negativamente, por exemplo: espessuras de películas menores podem causar uma ausência de coesão da mistura; oxidação acelerada ocasionada pelo contato com a luz e o ar, e maior susceptibilidade à ação da umidade. Porém tanto a espessura de película quanto o tamanho de poros e alguns parâmetros relacionados são de difícil quantificação, e são, geralmente, utilizados em termos médios, e por isso podem acumular erros de previsão (CHADBOURN, 1999).

A conceituação de um problema de adesividade é muito difícil, pois envolve várias características e propriedades que, específica ou conjuntamente, influem no desempenho ou durabilidade da mistura. Outros elementos que não estão intrinsecamente ligados às características da mistura, também podem contribuir ao desenvolvimento dos defeitos relacionados à perda de adesividade ou lavagem da mistura asfáltica, são eles: temperatura, tráfego.

O efeito da temperatura não é único, depende também do par agregado-asfalto, ou seja, da interação entre os constituintes dos materiais. Pan e White (1999), avaliando a susceptibilidade aos danos por umidade de diferentes misturas, mostraram que o efeito da temperatura em misturas com agregados de calcário é menor, quando próximas da faixa de temperatura de serviço, que as misturas com agregados de dolomita, o que pode ser explicado pelas interações entre os materiais de diferentes composições.

Pela exposição à ação do clima e intempéries ao longo dos anos dá-se o chamado envelhecimento a longo prazo de uma mistura asfáltica, que resulta no seu enrijecimento e, se por um lado aumenta a resistência à deformação permanente, por outro pode tornar a mistura frágil/quebradiça. A Tabela 2.7 mostra os valores de porcentagem de asfalto e resistência à tração de misturas asfálticas produzidas em laboratório e retiradas do

pavimento em serviço; com exceção da mistura 4 (OR1), todas as amostras apresentaram maiores resistências quando comparadas às misturas “virgens”. Nota-se que há ganho de resistência à tração, o que deve ser resultado do envelhecimento do asfalto ao longo dos anos.

**Tabela 2.7:** Variação de propriedade de misturas asfálticas (adaptada de LOTTMAN, 1978)

		Porcentagem de asfalto (%)	Resistência à tração (55°F)
CA2 - 1	(1)	4,9	67
	(2)	5,0	102
NB1 - 2	(1)	5,4	72
	(2)	5,5	89
NJ2 - 3	(1)	5,3	71
	(2)	5,6	114
OR1 - 4	(1)	5,8	120
	(2)	6,0	100

Legenda: (1) corpo-de-prova e (2) testemunho

Ao pesquisar o envelhecimento de misturas asfálticas, Sonsnovske *et al.* (1993) afirmaram que determinados pares agregado-asfalto apresentam menor suscetibilidade ao envelhecimento, o que relacionaram com maiores resistências da ligação química (adesão) entre agregado-asfalto; para esses pesquisadores, quanto melhor for a ligação adesiva, menor será o envelhecimento.

Quimicamente, cada par agregado-asfalto tem uma interação única entre os locais ativos da superfície do agregado e os componentes reativos do asfalto. A análise físico-química de misturas asfálticas vem comprovando o bom desempenho de misturas asfálticas envelhecidas contra o descolamento pela água, o que mecanicamente é representado pelo aumento da resistência à tração e da retenção da resistência à tração diante de condicionamento com água. Petersen (2002), avaliando misturas com agregados calcários e diferentes cimentos asfálticos, verificou que o envelhecimento contribuiu para o aumento da durabilidade de concretos asfálticos quando submetidos a ciclos repetidos de congelamento e descongelamento; numericamente, as misturas sem envelhecimento suportaram apenas 1 ciclo térmico enquanto as misturas envelhecidas suportaram no mínimo 7 ciclos antes da ruptura.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um programa experimental completo, abrangendo todos os fatores controláveis que interferem num dado fenômeno, implica num número, muitas vezes, inexequível de condições experimentais; similarmente, esta pesquisa, ao abordar o fenômeno da adesão e sua perda, deparou-se com este problema. Seria interessante que o delineamento do experimento abrangesse o máximo de fatores controláveis, contudo, diante dessa impossibilidade, foram realizados alguns estudos laboratoriais cujos resultados permitiram nortear a seleção dos fatores e métodos ora considerados (FURLAN *et al.* (2004a), GOUVEIA *et al.* (2004), FURLAN *et al.* (2004b)).

Os principais objetivos dos estudos mencionados foram:

- Verificar a possibilidade de utilização de outros ensaios de determinação de propriedade mecânica (preferencialmente que mobilize a tração do material), além do de tração por compressão diametral, na avaliação dos danos por umidade induzida;
- Avaliar a influência de algumas características dos agregados nas propriedades das misturas asfálticas, assim como o comportamento das mesmas quanto aos danos por umidade induzida.

Alguns indícios de tendências de comportamento das misturas asfálticas também resultaram desses primeiros estudos, então, a escolha por determinados materiais, métodos e enfoques tornou-se mais objetiva. A escolha dos fatores considerados almeja responder a questões específicas.

A consideração do fator “tipo de agregado” busca responder questões sobre como a composição mineralógica dos agregados interfere na qualidade de suas ligações adesivas. Para isso, esse fator variou em até três níveis, que são representados pelos agregados de basalto, granito e gabro.

O fator “tipo de ligante”, variando em dois níveis (CAP 20 e CAP 40, fornecidos pela mesma refinaria), pretende responder se características diferentes de viscosidade e de poder de molhagem implicam em misturas asfálticas mais duráveis frente à ação da água.

O fator “teor de ligante” presente na mistura asfáltica é considerado em três níveis; com ele tenta-se entender a influência da espessura da película de asfalto na suscetibilidade ao dano por umidade. Similarmente, o fator “volume de vazios”, variando em dois níveis, foi considerado para verificar se a quantidade de vazios de uma mistura asfáltica aumenta sua propensão ao dano por umidade.

O fator “preparação da mistura” refere-se ao condicionamento que a mistura asfáltica passa antes da compactação propriamente dita. Esse fator varia em três níveis (Marshall, ASTM e AASHTO) e devido às suas diferenças, podem imprimir características e comportamentos variados, principalmente no que se refere à interação entre os fatores.

O fator “aditivo” varia em dois níveis que são representados pela presença ou não de cal na mistura asfáltica; a consideração desse fator pretende responder se a cal pode ser considerada e utilizada como aditivo melhorador de adesividade.

Um experimento fatorial completo envolvendo 6 fatores, sendo 3 deles em 2 níveis e 3 em 3 níveis, levaria a 216 condições experimentais, com 6 réplicas por condição, tornaria o a execução do experimento muito difícil (1296 corpos-de-prova). Assim, essa pesquisa foi planejada em três partes que, convenientemente, se entrelaçam de modo a permitir alguma análise comparativa entre os comportamentos das misturas asfálticas. O Apêndice A contém um esquema do planejamento experimental.

A seguir, neste capítulo, são apresentadas as descrições das características dos materiais e dos métodos aplicados nesta pesquisa.

## **3.2. MATERIAIS**

### **3.2.1. Agregados**

A influência do agregado na adesão e na suscetibilidade à umidade foi avaliada a partir da seleção de três tipos de agregados, sendo dois tipos de mesma composição mineralógica básica, um basalto e um gabro, e um granito. O agregado de basalto é proveniente da cidade de São Carlos - SP e foi fornecido pela Pedreira Bandeirantes; o agregado de granito foi obtido na cidade de Valinhos - SP e fornecido pela Pedreira do São Jerônimo e o agregado de

gabro foi fornecido pela Pedreira São Roque, localizada em Limeira – SP. O aspecto dos agregados é mostrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Agregados utilizados nesta pesquisa

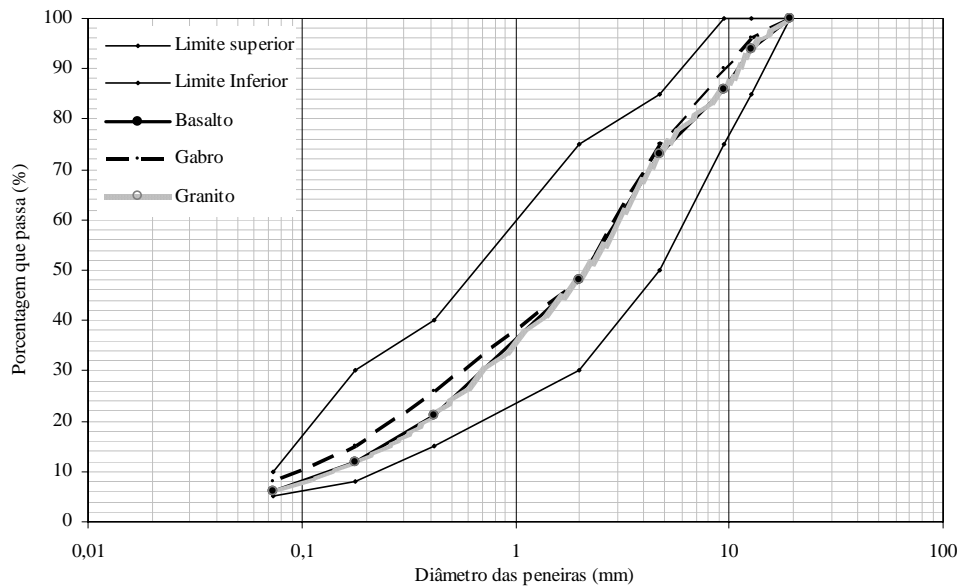
As fotos em perspectiva foram feitas a fim de mostrar, visualmente, as diferenças entre os agregados, principalmente no que se refere à forma. Observando-se essa figura nota-se que os agregados de granito e gabro têm forma mais cúbica enquanto que os agregados de basalto apresentam formas lamelares e, a partir dessas características, pode-se supor que algumas misturas asfálticas reflitam comportamentos específicos inerentes à forma dos agregados.

Após a coleta, os agregados passaram por uma lavagem e separação para compor a faixa granulométrica das misturas asfálticas. Com a separação por peneiramento foi possível saber quais as frações e suas quantidades presentes nos agregados, e a partir disso, utilizando o método de Ruthfucs, encontraram-se as combinações e quantidades das “frações comerciais” que foram necessárias para o enquadramento desses agregados nos limites da faixa C do DNER-ES 313/97.

As combinações das frações granulométricas são apresentadas na Tabela 3.1. Na Figura 3.2 são apresentadas as distribuições granulométricas para os três tipos de agregados; nela se observa que todas estão dentro dos limites da faixa C do DNER.

**TABELA 3.1:** Porcentagens das frações determinadas pelo método de Ruthfucs

	Combinação das Frações para		
	Basalto	Gabro	Granito
Pedra 1	15	12	10
Pedrisco	35	23	15
Pó de Pedra 1	50	65	61
Pó de Pedra 2	-	-	14



**FIGURA 3.2:** Distribuições granulométricas das composições obtidas para os diferentes agregados

Para a caracterização dos agregados foram executados ensaios para apreciação da adesividade do agregado ao ligante betuminoso, para agregados graúdos (DNER-ME 78/94) e miúdos (DNER-ME 79/94)

Apesar de haver relação entre os componentes mineralógicos dos agregados e o desenvolvimento da adesão ou perda dela, isso não ficou destacado através desses ensaios, uma vez que forneceram como resultados adesividade “má” e “adesividade não satisfatória” para todos os agregados testados.

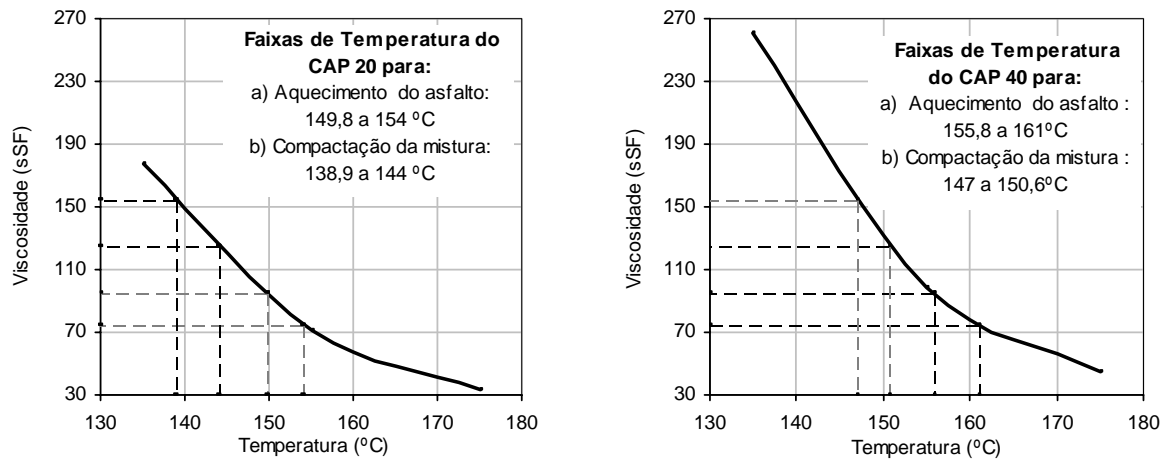
Os métodos ASTM C-127 e a ASTM C-128, para a determinação da densidade aparente e real dos agregados grossos e finos, também foram executados. Os valores indicam que os agregados de mesma composição mineralógica, basalto e gabro, possuem maior densidade que os agregados de granito. Na tabela 3.2 é apresentado um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

**TABELA 3.2:** Características dos agregados

Parâmetro	Basalto	Gabro	Granito
Adesividade ()	Má	Má	Má
Adesividade ()	Não satisfatória	Não satisfatória	Não satisfatória
Densidade Real	2,872	2,832	2,608







**FIGURA 3.3:** Curvas de viscosidade e temperaturas de trabalho dos ligantes

Com o objetivo de homogeneizar a produção das réplicas, no procedimento de mistura do agregado com o ligante foi empregado um equipamento adaptado, que tornou possível a mistura de vários corpos-de-prova simultaneamente. A quantidade produzida variou de um mínimo de 6 até um máximo de 20 corpos-de-prova. A Figura 3.4 ilustra os procedimentos de adição de um ligante a um agregado no referido equipamento e sua deposição em bandejas para posterior armazenamento em estufa. Alguma quantidade de material em excesso foi adicionada para prevenir possíveis perdas de materiais durante a mistura ou deposição da mistura asfáltica nas bandejas.



**FIGURA 3.4:** Procedimento de mistura em equipamento adaptado

### 3.3 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas testadas nesta pesquisa são, basicamente, resultantes da combinação fatorial dos três agregados, dos dois ligantes e da adição ou não da cal. Para a definição dos teores testados na dosagem dessas misturas asfálticas foi utilizado o método da superfície específica, o que permitiu uma primeira previsão do consumo de asfalto necessário para o cobrimento dos agregados. Partindo-se dessas previsões, foram realizadas três dosagens

Marshall (ABNT NBR 12891), a saber: basalto com CAP 20, granito com CAP 20 e gabro com CAP 20.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados das dosagens Marshall para os três agregados com CAP 20, nos cinco teores.

**TABELA 3.4:** Resultados das dosagens Marshall

<b>Basalto</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Vv (%)	RBV (%)
4,50	2,496	1893	3,8	5,98	64,81
5,00	2,507	2017	4,3	4,77	72,08
<b>5,50</b>	<b>2,512</b>	<b>2023</b>	<b>4,6</b>	<b>3,80</b>	<b>78,11</b>
6,00	2,512	1847	5,0	3,01	83,06
6,50	2,509	1590	5,8	2,34	87,24
<b>Gabro</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade	Fluência	Vv (%)	RBV (%)
4,50	2,395	1859	4,2	8,65	54,98
5,00	2,436	2145	5,0	6,35	65,27
<b>5,50</b>	<b>2,467</b>	<b>2297</b>	<b>5,1</b>	<b>4,38</b>	<b>75,25</b>
6,00	2,465	2259	5,5	3,68	79,75
6,50	2,452	2200	5,9	3,41	82,11
<b>Granito</b>					
Teor de asfalto (%)	Densidade Aparente	Estabilidade	Fluência	Vv (%)	RBV (%)
4,50	2,269	1398	4,2	6,90	59,21
5,00	2,280	1436	4,7	5,75	66,04
<b>5,50</b>	<b>2,296</b>	<b>1521</b>	<b>5,0</b>	<b>4,42</b>	<b>73,73</b>
6,00	2,292	1489	5,2	3,89	77,62
6,50	2,286	1321	5,6	3,47	80,77

O teor asfalto de trabalho selecionado para essas três dosagens foi 5,5%. O critério adotado para a definição dos teores de trabalho desta pesquisa baseou-se na condição de que o volume de vazios deveria ser o mais próximo de 4%, tentando atender aos limites do critério Marshall para estabilidade, fluência, densidade e RBV.

Os teores de trabalho das misturas asfálticas com CAP 40 foram admitidos como sendo iguais aos das misturas com CAP 20, e as proposições que levaram a adotar essa medida foram:

- a) as características das curvas granulométricas e, conseqüentemente, as superfícies específicas mantiveram-se as mesmas, podendo-se esperar um consumo de asfalto similar;
- b) as temperaturas normalizadas para os procedimentos de preparação, misturação e compactação implicam em faixas de viscosidade similares para os asfaltos utilizados.

### 3.3.1 Absorção de asfalto pelo agregado

A absorção de asfalto pelo agregado é influenciada por um grande número de fatores intrínsecos ao material, como os relacionados ao agregado (composição e porosidade) e ao ligante (viscosidade e composição); e fatores extrínsecos, mas inter-relacionados, como a temperatura e o período de tempo no qual o processo se desenvolve.

Os diferentes procedimentos de produção de corpos-de-prova para a avaliação dos danos por umidade alteram as características e propriedades das misturas asfálticas produzidas, sendo assim, procedeu-se uma avaliação da absorção de asfalto pelos agregados de tal forma que se pudesse quantificar a mudança produzida pelos três procedimentos de moldagem utilizados (Marshall, ASTM e AASHTO).

É importante destacar que a dosagem das misturas asfálticas obedeceu aos procedimentos e critérios do método Marshall, e no que se refere à moldagem de corpos-de-prova, essa norma preconiza que a mistura asfáltica seja compactada sistematicamente após a mistura. Entretanto, a moldagem de corpos-de-prova para a avaliação de suscetibilidade à umidade, tanto pela ASTM quanto pela AASHTO, é feita de forma diferente. Nesses métodos, a mistura solta passa por algum tipo de “condicionamento” antes da compactação.

A ASTM D 4867 preconiza que, antes da compactação dos corpos-de-prova, a mistura asfáltica seja mantida em estufa durante 2 horas na temperatura de compactação; aliás, esse procedimento é similar ao condicionamento de moldagem da AASHTO PP2. Já na AASHTO T 283, a mistura asfáltica não compactada passa uma “cura” composta por duas fases antes da compactação dos corpos-de-prova: uma, onde a mistura solta é mantida numa estufa ventilada a 60 °C por 16 horas; e outra, onde a mistura permanece em estufa na temperatura de compactação por 2 horas.

Para a determinação da absorção de ligante pelo agregado foi realizado o ensaio Rice, ASTM D 2041, para a determinação da DMM das misturas asfálticas. Com a DMM, o teor de asfalto e a densidade aparente dos agregados ( $\rho_{ap}$ ), calcularam-se a densidade efetiva do agregado, cujo valor é usado no cálculo da absorção de asfalto. Na Tabela 3.5 são apresentados os resultados de absorção para as misturas asfálticas avaliadas; foram necessárias seis combinações de fatores para cada agregado, totalizando 18 condições experimentais.

Observando-se os valores da Tabela 3.5, nota-se uma variação significativa das taxas de absorção de asfalto para os agregados de basalto e gábro, o que não ocorreu para os agregados de granito. As porosidades dos agregados, de certa forma, podem explicar o

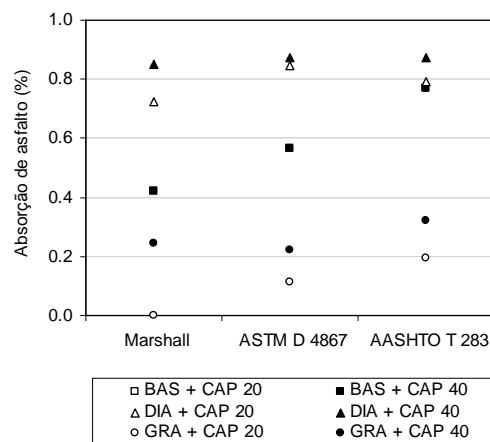
maior poder de absorção dos agregados basálticos e gábricos quando comparados aos agregados graníticos, que foram, respectivamente, 2,2, 0,6 e 3,2 %.

**TABELA 3.5:** Absorção de asfalto pelo agregado para os três procedimentos de preparo de mistura

	Basalto			Granito			Gabro		
	$\rho_{ap}$	Absorção (%)		$\rho_{ap}$	Absorção (%)		$\rho_{ap}$	Absorção (%)	
		CAP 20	CAP40		CAP 20	CAP40		CAP 20	CAP40
Marshall		0,0	0,0		0,0	0,0		0,1	0,1
ASTM D 4867	2,808	0,6	0,6	2,593	0,1	0,2	2,742	0,8	0,9
AASHTO T 283		0,8	0,8		0,2	0,3		0,8	0,9

Considerando um mesmo agregado, pode-se observar que as taxas de absorção dos diferentes tipos de ligante (CAP 20 e CAP 40) não exibiram variação significativa, com exceção das misturas Marshall com granito que, em contrapartida, foram as que apresentaram menores absorções em valores absolutos. Esse efeito da baixa variação de absorção, para os mesmos agregados, pode ser entendido pelas relações de temperatura *versus* viscosidade dos ligantes, ou seja, nas temperaturas trabalhadas, ambos os ligantes apresentam viscosidades se não similares, muito próximas, e com isso o nível de absorção em função da consistência do ligante pode ser muito próxima também.

Considerando os procedimentos de moldagem, nota-se que há variação nas taxas de absorção devido aos diferentes procedimentos de moldagem, principalmente para os agregados de basalto (BAS); já para os agregados de gabro (DIA) e granito (GRA) essa variação foi menor, chegando a se repetir em algumas condições, o que pode ser visualizado na Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Variação das taxas de absorção dos agregados em função dos métodos de moldagem

As temperaturas e os “condicionamentos” de cada procedimento de preparo das misturas propiciaram variações na quantidade de asfalto absorvida. Essa variação tem estreita relação com o período de tempo, a temperatura e, conseqüentemente, com a viscosidade do ligante; por exemplo, tempos maiores de exposição a temperaturas mais altas pode aumentar a tendência do ligante “fluir” através dos poros dos agregados. Por isso, com o objetivo de manter os volumes de vazios compatíveis com aqueles encontrados na dosagem, foi adotada uma correção no teor de asfalto em função da absorção que cada agregado apresentou quando submetido aos diferentes procedimentos de moldagem, aumentando-se a quantidade de asfalto das misturas proporcionalmente às taxas de absorção.

Por exemplo, o basalto apresentou 0,6% de absorção do CAP 20 na condição de moldagem ASTM, então, a quantidade de CAP 20 que foi adicionada à mistura nessa moldagem, foi relativa a um teor de 6,1% de asfalto em peso. Com essa medida corretiva foi possível manter os parâmetros volumétricos muito próximos aos da dosagem original para todas as combinações das misturas asfálticas (vide Anexo 1).

### 3.3.2. Aditivo na mistura asfáltica

Nos três projetos considerados no programa experimental há misturas com cal, e isso foi planejado a fim de obter um melhor entendimento sobre a influência da cal na adesão e suscetibilidade aos danos por umidade. Algumas das misturas asfálticas desta pesquisa tiveram a adição de uma cal hidratada cálcica tipo CH1 (Supercal®). A Tabela 3.6 mostra as características médias de cales similares à utilizada nesta pesquisa.

**Tabela 3.6:** Características da cal utilizada (Fonte: Supercal®)

<i>Cal Hidratada Cálcica</i>	
CaO (%)	70 a 74
MgO (%)	0,1 a 1,4
Insolúvel em HCl (%)	0,5 a 2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,2 a 0,8
Perda ao fogo (%)	23 a 27
CO <sub>2</sub> (%)	1,5 a 3,5
SO <sub>3</sub> (%)	0,1 a 0,0
CaO + MgO Base de não-volátil (%)	-
MgO Não hidratado	0,5 a 1,8

A quantidade de cal adicionada às misturas foi o equivalente para a substituição de 1% da porcentagem passada na peneira 200 (abertura 0,074mm) da faixa granulométrica testada

(Faixa C – DNER). Para isso o material era peneirado e retirado 1% na fração selecionada e substituída pela cal previamente peneirada.

### **3.4. MÉTODOS**

#### **3.4.1. Programa experimental**

O programa de experimentos desta pesquisa foi desenvolvido com a finalidade de abranger os principais fatores influentes no fenômeno da adesão e da sua perda por ação da água; entretanto, sabia-se que ao incluí-los num experimento fatorial completo produzir-se-ia um número elevado de condições experimentais. A possibilidade de tornar o projeto factível aconteceu por dois motivos: a formação de um grupo de pesquisadores (sendo um de doutorado e dois de mestrado) e a integração dos elementos das pesquisas.

Os outros dois projetos estão ligados pelo uso dos mesmos materiais e metodologia laboratorial, contudo focam aspectos ligados à rigidez, à susceptibilidade térmica e à fadiga de misturas asfálticas. A operação e o entrosamento do grupo proporcionaram muitas vantagens, destacando-se, principalmente, a produção dos corpos-de-prova, que é a fase mais desgastante fisicamente e, também, o estímulo para entender e relacionar os comportamentos e propriedades das misturas asfálticas sob os diferentes aspectos dos estudos.

O grupo de pesquisa tornou possível inclusive a utilização concomitante dos corpos-de-prova e resultados de ensaios. Ao todo foram moldados 450 corpos-de-prova que alternaram os seguintes fatores: procedimentos de preparo da mistura, ligante, agregado, volumes de vazios, adição de cal e ensaios. Desse total, esta pesquisa consumiu de cerca de 50% dos corpos-de-prova para as análises que se apresentam.

Para esta pesquisa três programas de experimentos foram desenvolvidos englobando condições experimentais que focam a obtenção de respostas específicas de um programa maior (Apêndice A), que tem como objetivo entender a adesão ou perda dela pela ação da água. É importante destacar que os dois métodos de avaliação selecionados (ASTM e AASHTO) normalizam a retenção da resistência à tração pós-condicionamento como parâmetro da susceptibilidade da mistura asfáltica à ação da água. Entretanto, algumas avaliações sobre o módulo de resiliência das misturas asfálticas foram desenvolvidas, assim sendo, os três programas que se seguem possuem uma apreciação de alguns parâmetros das misturas testadas abordando seus comportamentos resilientes.

Para evitar qualquer efeito não controlado decorrente do período de armazenamento (GIGANTE et al., 2005), a execução dos ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência dos grupos de controle e condicionados, para uma dada condição experimental, foram realizados obedecendo a um intervalo de tempo máximo de três dias. Contudo, cabe ressaltar que, em geral, os ensaios de resistência à tração de grupos da mesma condição experimental foram realizados num mesmo dia.

A seguir são apresentados mais detalhadamente os três projetos, seus objetivos e condições experimentais e, além disso, os métodos que os compõem.

### **3.4.2. Avaliação da influência do ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas sem cal e com cal**

Este programa enfocou a importância do papel do ligante na adesão e na susceptibilidade à umidade. Os fatores abordados são relacionados ao tipo, à quantidade e, indiretamente, à espessura de película de asfalto, para dois tipos de misturas: uma sem cal e, outra, com cal. As características das misturas asfálticas resultaram da combinação dos seguintes fatores:

- Preparação da mistura: ASTM
- Tipo de agregado: Granito;
- Tipo de asfalto: CAP 20 e CAP 40;
- Teor de asfalto: 5,0%, 5,5% e 6,0%;
- Aditivo: Sem cal e com cal.

A avaliação e a produção das misturas asfálticas deste programa seguiram o padrão da ASTM D 4867. Por isso, no procedimento de mistura do ligante com o agregado, a mistura asfáltica não compactada permaneceu por 2h em estufa na temperatura de compactação antes da compactação propriamente. Por sua vez, para o condicionamento térmico, os corpos-de-prova foram saturados com água destilada, com auxílio de uma bomba de vácuo, até enquadrarem-se nos limites recomendados pela referida norma (55-80%), e imersos em água a 60°C por 24h. Após a imersão a 60°C por 24h, os corpos-de-prova ficaram imersos em água a 25°C por, no máximo, 2 horas para a estabilização da temperatura e se seguiram os procedimentos de ensaios de módulo de resiliência (DNER ME 133/94) e, após, resistência à tração (DNER ME 138/94).

Este projeto teve por objetivo entender como o tipo e os teores de asfalto proporcionam às misturas asfálticas variações de comportamentos e propriedades frente ao condicionamento da ASTM. Além disso, foi avaliado se a presença da cal proporcionou alguma alteração nas características e propriedades das misturas pós-condicionamento.

### **3.4.3. Avaliação da influência de volumes de vazios diferentes na adesão e susceptibilidade ao dano por umidade de algumas misturas asfálticas densas convencionais e com cal**

Este programa abordou a influência das características volumétricas e da natureza dos materiais na adesão e na suscetibilidade ao dano por umidade. Os fatores selecionados são relacionados ao tipo de agregado e de ligante. No tocante às características volumétricas, variando os volumes de vazios das misturas, observou-se se o dano provocado pela ação da água é proporcional ao volume dela em sistemas agregado-asfalto convencionais e com cal, os fatores selecionados para este programa foram:

- Preparação da mistura: ASTM;
- Tipo de agregado: basalto e granito;
- Tipo de asfalto: CAP 20 e CAP 40;
- Teor de asfalto: 5,5%;
- Volume de vazios: 4% e 7%;
- Aditivo: Sem cal e com cal.

O preparo das misturas asfálticas deste programa foi o da ASTM; semelhante ao procedimento descrito no item anterior, mas houve uma mudança fundamental no procedimento de compactação de alguns corpos-de-prova, a fim de que apresentassem volumes de vazios de 7%. Para isso, foram realizados alguns testes em misturas convencionais com CAP 20, compactando-as com diferentes números de golpes e, com isso, pôde-se traçar uma curva de volume de vazios *versus* número de golpes, de onde se concluiu que 27 golpes por face seriam o suficiente para atingir volumes de vazios da ordem de 7%. Os efeitos do condicionamento térmico nas misturas asfálticas foram avaliados pelo ensaio de resistência à tração, de acordo com a ASTM D 4867, e também pelo módulo de resiliência (DNER ME 133/94).



### **3.4.4. Estudo sobre a influência da preparação da mistura na adesão e na susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas convencionais e com cal**

Este programa buscou entender o efeito dos procedimentos de preparo de misturas asfálticas e a influência no comportamento quanto à adesão e à perda dela por ação da água de variados tipos de misturas asfálticas, para isso os fatores considerados foram:

- Preparação da mistura: Marshall, ASTM e AASHTO;
- Tipo de agregado: basalto, granito e gábreo;
- Tipo de asfalto: CAP 20;
- Teor de asfalto: 5,5%;
- Volume de vazios: 4% ;
- Aditivo: Sem cal e com cal;
- Tipo de avaliação: ASTM e AASHTO.

Por considerar diferentes métodos de preparação de misturas asfálticas, esse programa permitiu avaliar a variação de propriedades mecânicas por eles proporcionadas, devido aos diferentes tempos de mistura e cura, e observar como essas variações influenciaram nas características de retenção de propriedades mecânicas pós-condicionamento. Além disso, foi possível avaliar comparativamente as tendências dos dois métodos de avaliação (ASTM e AASHTO), confrontando resultados de conjuntos formados por seis tipos de misturas asfálticas para cada método de moldagem.

Segundo o procedimento de moldagem Marshall, a compactação dos corpos-de-prova foi executada sistematicamente após a mistura do agregado com o ligante. Para este programa experimental, os corpos-de-prova Marshall foram saturados a vácuo e passaram pelo ciclo de condicionamento térmico conforme a ASTM D 4867, que foi explicado com maiores detalhes no item 3.4.1.

Na moldagem AASHTO, os corpos-de-prova passaram por um processo chamado de tempo de cura, no qual, após a mistura do agregado com o asfalto, a mistura não compactada permaneceu resfriando por um período de 2 horas a temperatura ambiente, em seguida, foi mantida por 16 horas a 60°C em estufa ventilada. Finalizada a “cura”, a mistura asfáltica foi aquecida na temperatura de compactação por 2 horas, e, então, compactada até atingir o volume de vazios próximo de 4%.

Para o condicionamento da AASHTO, os corpos-de-prova foram saturados com água destilada, dentro dos limites preconizados pela referida norma (55-80%), embalados em filme plástico e acondicionados, um a um, em sacos plásticos contendo 10 ml de água destilada, que foram lacrados e colocados num freezer, onde permaneceram por 16h a  $-18^{\circ}\text{C}$ . Após esse período, os corpos-de-prova foram retirados, desembalados e imergidos em água a  $60^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram por 24 horas. Após o descongelamento e aquecimento, os corpos-de-prova passaram por um período de 2 horas imersos em água para estabilização de temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ), e em seguida, foram executados os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração.

### **3.4.5. Ensaios de propriedades mecânicas**

#### **3.4.5.1. Módulo de resiliência**

Nesta pesquisa, uma das formas utilizadas para avaliar as misturas frente aos efeitos dos condicionamentos térmicos foi o acompanhamento do módulo de resiliência, pois ele permite avaliar tais efeitos num mesmo corpo-de-prova. O ensaio de módulo de resiliência foi executado a  $25^{\circ}\text{C}$ , e o procedimento consistiu da 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.

Para a execução do ensaio do módulo de resiliência foi arbitrado como período de condicionamento os primeiros 30 a 40 ciclos de carregamento, e como ensaio propriamente, os 70 a 60 ciclos restantes. Esta consideração propiciou uma diminuição da variação dos valores dos módulos de resiliência ao longo do ensaio, uma vez que a resposta viscoelástica do asfalto às primeiras aplicações de carga pode: a) não ter sido “ativada”; b) ser afetada por alguma acomodação do corpo-de-prova; e/ou c) conter alguma variação, de origem desconhecida, fora dos padrões dos desvios detectados. Assim, estabelecer o início efetivo do ensaio a partir de 30 ou 40 ciclos de carregamento teve a finalidade de reduzir o desvio padrão de MR a valores inferiores a 5%, assegurando homogeneidade de resultados.

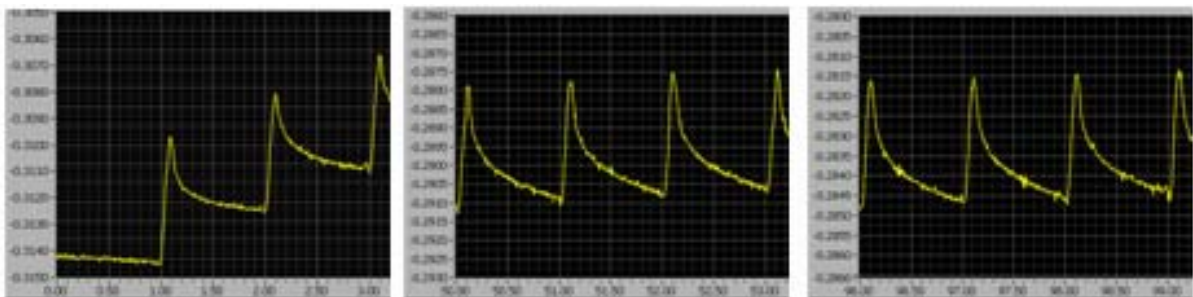
Para um melhor entendimento de como esses fatores mencionados aumentam o desvio do MR, a Figura 3.6 mostra os recortes de uma tela de um ensaio de módulo de resiliência nos ciclos: 1 a 5, 51 a 55 e 96 a 100, da esquerda para a direita. Chama-se a atenção para a parte do ciclo referente ao descarregamento e repouso, onde se nota um aumento da recuperação instantânea que se torna mais discreto à medida que o ensaio se desenvolve, essa variação, incluída na chamada “ativação” da parcela viscoelástica, pode aumentar o desvio do

resultado de um ensaio principalmente quando o alvo de observação diz respeito à recuperação instantânea representada pela porção inicial de recuperação com inclinação acentuada e delineando praticamente uma reta. Essa porção de recuperação é utilizada no cálculo do chamado módulo instantâneo.

No que se refere ao módulo total, há também alguma variação durante o período de ensaio, observada nos valores dos deslocamentos, que foram pouco superiores a 0,002 mm no início do ensaio e pouco inferiores a 0,003 mm da metade para o final do ensaio. Esse tipo de variação foi considerado na chamada “ativação” viscoelástica e também contribuiu para o aumento dos desvios em valores de MR.

A Figura 3.6 também possibilita a observação visual da mudança de comportamento de uma mistura asfáltica ao longo um ensaio, principalmente no início, onde há uma perceptível e significativa inclinação da curva (resultado da acomodação do corpo-de-prova), que da metade para o final do ensaio já não é aparente, ainda que exista, deixando clara a necessidade de um período de condicionamento.

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados em todos os corpos-de-prova dos três programas experimentais, e em alguns casos mais de uma vez, por isso achou-se conveniente fixar um valor de deformação inicial para os ensaios; para isso, a carga inicial era ajustada no início de cada ensaio a fim de que produzisse deslocamentos da ordem de 0,0025 a 0,0030 milímetros. Apesar do período de ensaio não obedecer ao método de ensaio do DNER 133/94, o procedimento adotado foi necessário para preservar a integridade do material, sem, por exemplo, propiciar o aparecimento de sinais de fadiga.



Da esquerda para a direita – 0 a 5 ciclos, 50 a 55 ciclos e 96 a 101 ciclos

**Figura 3.6:** Comportamento resiliente de uma mistura asfáltica num ensaio de módulo de resiliência

O valor do módulo de resiliência foi calculado de acordo com a norma do DNER 133/94, e é expresso por:

$$MR = \frac{F}{\Delta h} (0,9976 \mu + 0,2692) \quad (3.1)$$

Onde:

$MR$  é o módulo de resiliência em MPa;

$F$  é a carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo-de-prova, em N;

$\Delta$  é o deslocamento total (correspondente à deformação elástica ou resiliente sofrida pelo corpo-de-prova, em direção perpendicular à aplicação da carga), em mm;

$H$  é a altura do corpo-de-prova, em mm;

$\mu$  é o coeficiente de Poisson.

Os módulos de resiliência utilizados nas relações (RMR) dos procedimentos ASTM D 4867 e AASHTO T 283 referem-se aos módulos de resiliência total (DNER 133/94), que foram calculados assumindo o valor do coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) de 0,35. Adotou-se o valor 0,35 a despeito da recomendação da norma brasileira (0,30), uma vez que esse valor é comumente utilizado nos procedimentos de retroanálise de pavimentos flexíveis. Entretanto, avaliando-se o impacto da adoção do valor de  $\mu=0,35$  ao invés de 0,30, pode-se observar que sua influência é constante, conforme mostrado na expressão 3.2.

$$MR = \frac{F}{\Delta h} (0,9976 \mu + 0,2692) = \frac{F}{\Delta h} K_i \quad (3.2)$$

Tomando-se como exemplo a equação 3.2, o fator multiplicativo ( $K_i$ ) advindo da condição  $\mu=0,35$  é igual a 0,6184, e para  $\mu=0,30$  é 0.5685. Assim, a adoção  $\mu=0,35$  implicou numa majoração de 8,78% nos valores de todos MR calculados para a temperatura de 25°C. Caso haja interesse, a conversão dos MR referentes ao coeficiente de Poisson 0,35 para 0,30 pode ser efetuada multiplicando-se o valor do módulo por 0,9193. Contudo, é conveniente ressaltar que a adoção desse coeficiente de Poisson não tem reflexo nos parâmetros de resistência utilizados nesta pesquisa, uma vez que são derivados de relações entre valores de módulos, o que anula o efeito do valor do coeficiente de Poisson.

### 3.4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas foi realizado de acordo com DNER ME 138/94 na temperatura de 25°C. O ensaio foi aplicado em todos os corpos-de-prova dessa pesquisa, a fim de obter a resistência à tração, em termos médios, dos grupos de controle e condicionados, e posteriormente a relação de resistência à tração.

A resistência à tração foi determinada a partir da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi dh} \quad (3.3)$$

Onde:

$\sigma_R$  é a resistência à tração, em MPa;

F é a carga de ruptura, em N;

d é o diâmetro médio do corpo-de-prova, em mm;

h é a altura média do corpo-de-prova, em mm.

#### 3.4.6. Observações visuais

Conforme recomendam os métodos da ASTM D 4867 e AASHTO T 283, os relatórios dos ensaios devem conter apontamentos sobre as características dos corpos-de-prova após o ensaio de resistência à tração, observando se houve descolamento, quebra de agregados ou alguma particularidade. As planilhas-relatório, que constam no Anexo 1, contém as observações visuais, assim como algum comentário pertinente.

### 3.5. TRATAMENTO DE DADOS

Esta pesquisa é composta por três programas experimentais. Na ocasião de seu planejamento, foi utilizado o pacote de planejamento fatorial de experimentos do aplicativo *MiniTab* Versão 14 como a ferramenta de planejamento e avaliação dos fatores nos danos por umidade das misturas asfálticas. Entretanto, como no desenvolvimento do programa experimental foram realizados três recortes no experimento inicial e, devido ao fato destes “recortes” consistirem de experimentos completos, utilizou-se a análise de experimentos fatoriais como ferramenta para modelagem de comportamentos, que ratificou a análise das tendências observadas.

As análises dos resultados basearam-se na observação de, no mínimo, 2 e, no máximo, 3 corpos-de-prova por condição experimental. Para diminuir os desvios dos grupos de cada condição experimental foi aplicado o método de Grubbs para a identificação dos *outliers*. As propriedades selecionadas para verificar a homogeneidade do grupo foram a resistência à tração e o módulo de resiliência, por se tratarem das mesmas propriedades que foram avaliadas nos ensaios de suscetibilidade ao dano por umidade.

No Anexo 1 encontram-se as planilhas dos ensaios ASTM e AASHTO de todos os corpos-de-prova ensaiados nesta pesquisa; aqueles que foram identificados pelo método de Grubbs como *outliers* possuem a inscrição “excluído” e, nesses casos, a média do grupo foi obtida das duas réplicas restantes.

### 3.6. PROJETOS COMPLEMENTARES

Durante a execução dos ensaios algumas questões motivaram o desenvolvimento de estudos complementares que, além de auxiliarem no entendimento do comportamento das misturas asfálticas, permitiram uma atualização dos métodos empregados. Assim, foi desenvolvido um estudo complementar que tentou satisfazer duas curiosidades:

- O método para cálculo do módulo de resiliência de misturas asfálticas da NCHRP levaria às mesmas tendências observadas com o método de cálculo da AASHTO?
- Haveria alguma relação entre dano pela ação da água e a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas?

Assim, o projeto complementar combinou alguns dos fatores anteriormente utilizados e mais uma série de ensaios de módulo de resiliência executados em três diferentes temperaturas. A seguir são apresentados, mais detalhadamente, o projeto, seus objetivos e condições experimentais e, além disso, os métodos que os compõem.

#### 3.6.1 Estudo complementar sobre o comportamento resiliente de misturas asfálticas a diferentes temperaturas e sua relação com a adesão

A durabilidade das misturas asfálticas é fortemente alterada por fatores como a temperatura e ação da água. Ambos os fatores interferem ou na coesão ou na adesão da mistura asfáltica e esse fenômeno pode ser avaliado a partir de uma propriedade mecânica. Este estudo teve por objetivo avaliar a influência da suscetibilidade térmica de misturas asfálticas na adesão ou perda dela pela ação da água. Os fatores considerados foram:

- Preparação da mistura: ASTM;
- Tipo de agregado: basalto, granito e gabro;
- Tipo de asfalto: CAP 20 e CAP 40;
- Teor de asfalto: 5,5%;
- Volume de vazios: 4% ;
- Aditivo: Sem cal e com cal;

- Temperaturas: 10, 25 e 40°C.

Os corpos de prova foram compactados segundo os procedimentos da ASTM. Ao todo foram moldados 36 corpos-de-prova, que foram ensaiados em três temperaturas 10, 25 e 40°C. Manter a ordem de execução dos ensaios em 10, 25 e 40°C foi necessário uma vez que algumas misturas a 40°C, como as com CAP 20, poderiam acumular deformação não recuperável devido ao ligante estar se aproximando do seu ponto de amolecimento (49°C). Todos os ensaios de módulos de resiliência executados para o projeto complementar seguiram os mesmos procedimentos detalhados no item 3.5.1. Os cuidados nessa fase relacionaram-se à manutenção da temperatura no corpo-de-prova durante o ensaio. Para ensaios a 10°C, os corpos-de-prova foram acondicionados numa geladeira onde permaneciam por, no mínimo, 4 horas para a estabilização da temperatura. Para os ensaios a 25°C os corpos-de-prova permaneciam numa sala climatizada pelo mesmo período. Já os ensaios a 40°C exigiram um cuidado maior; os corpos-de-prova embalados em sacos plásticos permaneciam em estufa pelo mesmo período que nos outros casos, e durante o ensaio, que acontecia com a câmara fechada, havia um sistema de controle de temperatura que manteve a temperatura em  $40\pm 1^\circ\text{C}$ .

Para a execução dos ensaios a 10 e 40°C foram tomados alguns cuidados a fim de preservar a integridade do material. Em temperatura baixa a mistura asfáltica fica muito rígida e, para atingir os níveis de deslocamento que foram trabalhados a 25°C implicaria em cargas altas e um risco de alterar as propriedades do material, então, nesse caso, optou-se por um nível de deslocamento menor, cerca de 0,0020mm, mas que assegurasse leituras de qualidade. Os ensaios a 40°C também inspiraram cuidados no que se refere ao deslocamento. Para esses ensaios o deslocamento de 0.002mm também foi considerado.

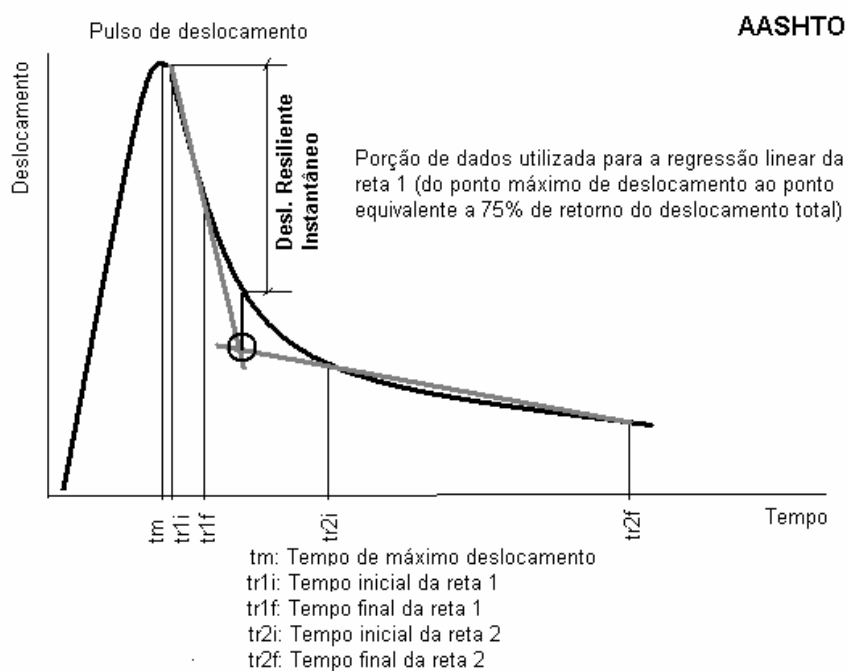
### **3.6.2. Determinação do módulo de resiliência pela AASHTO e pela NCHRP**

Diferentemente do DNER ME 133/94, que normaliza a determinação de um módulo de resiliência, outras normas (ASTM D 4123, AASHTO TP-31, e a Pesquisa 1-28 do NCHRP) mencionam dois módulos de resiliência, um, chamado total e outro, instantâneo. Ambos são calculados em função da recuperação do material. O método de cálculo da norma brasileira considera somente as deformações totais e, portanto, somente a definição do módulo total, sem mencionar a existência do módulo instantâneo. Como ainda se encontra em estudo uma atualização e melhora dos procedimentos de ensaio e de cálculo da referida norma pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, para a determinação dos módulos de resiliência total e instantâneo ( $MR_T$  e  $MR_I$ ) foi utilizado o método da AASHTO TP 31. Para a comparação dos valores dos módulos obtidos pelos dois métodos foi empregada a mesma

expressão 3.1, contudo os valores dos deslocamentos resilientes totais e instantâneos foram obtidos conforme preconizam a AASHTO e a NCHRP.

Para ambos os métodos, o módulo de resiliência total representa a recuperação da deformação propiciada pelo carregamento e é obtido utilizando-se o deslocamento total recuperado durante o período de descarregamento e repouso. Para a norma da AASHTO, o deslocamento total é dado pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e o deslocamento registrado no final do ciclo. Já para o NCHRP, o deslocamento total é obtido pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e a média dos deslocamentos registrados no intervalo de 85 a 95% da porção de repouso do ciclo.

Para o cálculo do  $MR_I$ , segundo o método da AASHTO, o deslocamento instantâneo é determinado pela diferença entre o pico de deslocamento propiciado pelo carregamento e um ponto obtido a partir do ajuste de duas regressões lineares: a) uma na porção de descarregamento, que é ajustada entre o ponto máximo de deslocamento e o ponto equivalente a 75% de retorno do deslocamento total; b) e outra na porção de repouso, ajustada entre o ponto de início e de fim do ciclo de repouso. Estas duas retas de regressão interceptam-se numa região próxima à porção da curva de descarregamento e recuperação; partindo-se deste intercepto com uma reta vertical em direção à curva obtém-se um ponto na curva de recuperação que delimita o deslocamento resiliente instantâneo, como se pode observar no esquema da figura 3.7.

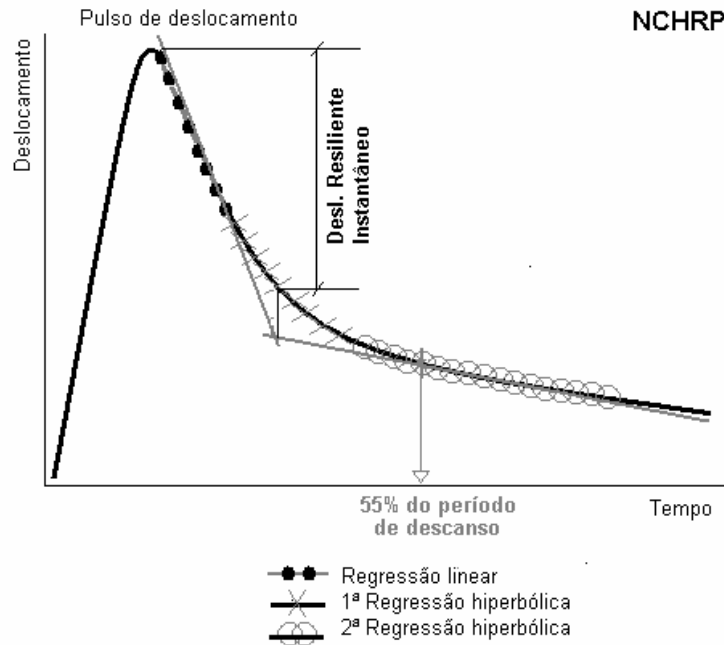


**Figura 3.7:** Deformações resilientes total e instantânea pela AASHTO

A determinação do  $MR_I$  pelo método da NCHRP é mais complexa devido à utilização de regressões hiperbólicas a fim de minimizar dispersões na determinação dos deslocamentos



instantâneos, entretanto o princípio é similar ao do método anterior. Na Figura 3.8 é ilustrada a trajetória do deslocamento em função do carregamento, onde se nota as regressões utilizadas para o cálculo do deslocamento resiliente instantâneo.



**Figura 3.8:** Curva de deformação para um ciclo de carregamento

Os deslocamentos resilientes instantâneos são calculados pela diferença entre o deslocamento máximo e um ponto na região da porção da curva, assimilada por uma hipérbole, que é definido pela intersecção entre a reta de regressão que reproduz o descarregamento e uma reta de regressão que tangencia uma hipérbole que assimila a porção final da recuperação no tempo  $t = 0,55s$ . Para a determinação desse ponto pela NCHRP é aconselhável o levantamento de alguns tempos de referência no pulso de deslocamento, que delimitam onde são ajustadas as regressões lineares e hiperbólicas. Brito (2006) articulou esquemas muito didáticos para a determinação dos deslocamentos resilientes total e instantâneo do método da NCHRP. Esses esquemas encontram-se reunidos no Apêndice B.

Foram adotados três valores para o coeficiente de Poisson, 0,20, 0,30 e 0,50 para o cálculo do módulo de resiliência nas temperaturas de 10, 25 e 40°C, respectivamente.

### 3.6.3. Outros parâmetros de rigidez de misturas asfálticas

Foram avaliados outros parâmetros obtidos a partir dos ensaios de módulo de resiliência: recuperação retardada e atraso

A *recuperação retardada* (RR) representa a recuperação no período de repouso e é indiretamente relacionada com a visco-elasticidade do material. Com RR podem-se verificar alterações de comportamento das misturas asfálticas quanto à forma da resposta resiliente e, inclusive, por exemplo, pode-se observar se um aumento do valor do módulo de resiliência implicou em misturas asfálticas mais elásticas ou mais viscosas. O parâmetro foi obtido a partir das expressões 3.2 e 3.3.

$$RR = \frac{(MR_i - MR_t)}{MR_i} \times 100 \quad (3.4)$$

$$RR = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon_i} - \frac{\sigma}{\varepsilon_T}}{\frac{\sigma}{\varepsilon_i}} = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_i}{\varepsilon_T} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

RR é a recuperação retardada, em %

MR<sub>i</sub> é o módulo instantâneo, em MPa;

MR<sub>t</sub> é o módulo total, em MPa;

σ é a tensão aplicada;

ε<sub>T</sub> é a deformação total;

ε<sub>i</sub> é a deformação elástica instantânea.

Outro parâmetro determinado a partir dos ensaios de módulo de resiliência é chamado de *atraso* e é expresso em segundos. O atraso é uma medida da defasagem entre os pulsos de carga e os de deslocamento. Foi calculado com base na diferença de tempo entre o ponto de máximo valor de deslocamento e o tempo no ponto de carga máxima. Como na RR, esse parâmetro tem relação com a viscoelasticidade do material, mas nesse caso a resposta é avaliada no período de carregamento, para a obtenção do atraso foi necessária uma rotina especial de cálculo que foi incorporado ao programa de determinação do módulo de resiliência. Tanto o programa de cálculo de MR quanto a rotina adicional para cálculo do atraso foram criadas pelo Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri em linguagem *Labview 7.1*®.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para a avaliação da adesão e da susceptibilidade ao dano por umidade. No total, os programas experimentais da pesquisa produziram 38 condições experimentais contendo três réplicas no grupo de controle (ou referência) e 3 réplicas no grupo condicionado.

A avaliação e análise dos resultados foram desenvolvidas a fim de destacar o efeito dos fatores selecionados em cada programa, e foi baseada na apreciação da tendência de comportamento de duas propriedades: o módulo de resiliência e a resistência à tração. Os resultados dos ensaios são compostos por dois grupos: um de controle (G1) e um condicionado (G2). Para as análises que se seguem, os resultados dos ensaios de resistência à tração são utilizados em termos médios para a comparação entre os dois grupos, uma vez que são formados por corpos-de-prova diferentes. Já no módulo de resiliência, por se tratar de um ensaio não destrutivo, procedeu-se um acompanhamento da propriedade nos mesmos corpos-de-prova antes e depois do condicionamento. Com isso, pretendeu-se diminuir os desvios do grupo relacionados à heterogeneidade dos corpos-de-prova.

A utilização dos métodos para a avaliação dos danos por umidade, ASTM D 4867 e AASHTO T 283, permite comparar tendências de comportamento das misturas asfálticas frente a cada tipo de condicionamento térmico. É importante destacar que, conceitualmente, os diferentes “níveis de severidade” dos condicionamentos térmicos implicam numa previsão de danos em curto e longo prazo, para a ASTM e AASHTO, respectivamente. Analisar comparativamente as taxas de suscetibilidade apresentadas pelas misturas pode apontar à utilização de um determinado método em detrimento ao outro. Assim, por exemplo, se o método da ASTM revelasse as mesmas tendências observadas no método da AASHTO, poderia se indicar essa “ferramenta”, mais simples e mais rápida, para a

implementação em procedimentos laboratoriais de avaliação de misturas asfálticas quanto ao dano por umidade.

Oportunamente, os conjuntos de dados foram tratados estatisticamente a fim de verificar o efeito dos fatores nas propriedades medidas e observar se houve concordância com a análise de comportamento.

A estrutura de avaliação por ordem de apresentação é:

1. Propriedades antes do condicionamento;
2. Capacidade de retenção de propriedade pós condicionamento;
3. Avaliação do projeto suplementar.

## **4.2. COMPORTAMENTOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PRÉ-CONDICIONAMENTO**

### **4.2.1. Considerações sobre a preparação das misturas e a presença de aditivo**

Os corpos-de-prova avaliados são produtos da combinação fatorial de três tipos de agregados, um tipo de ligante, um volume de vazios e adição ou não de cal. Ao todo foram ensaiados 54 corpos-de-prova que formaram o grupo de controle, sendo 18 condições experimentais com 3 réplicas cada uma, e para o grupo destinado ao condicionamento foram moldados mais 54 corpos-de-prova.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de resistência à tração e módulo de resiliência (total), em MPa, para as condições testadas. Esses valores são apresentados em termos médios e exibiram taxas de desvio de grupo (coeficiente de variação) inferiores 10% e 21%, para RT e MR, respectivamente. Vale lembrar que esses resultados foram previamente testados pelo método de Grubbs, que foi aplicado com o objetivo de diminuir os desvios dos grupos. Esses resultados podem ser vistos com mais detalhes nas planilhas do Anexo 2.

Observando-se os valores de RT apresentados na Tabela 4.1, enfocando os tipos de agregados, nota-se que as misturas com gabro apresentaram os maiores valores de resistência à tração, seguidas pelas misturas com granito e pelas misturas com basalto, respectivamente; o que também foi verificado para o módulo de resiliência, com exceção da mistura ASTM com granito e cal. Quanto ao procedimento de preparo da mistura, percebe-se que, à exceção da mistura com granito e cal; as misturas ASTM apresentaram valores mais altos que as misturas Marshall e AASHTO.

Sobre a resistência à tração pode-se dizer que todas as misturas sem cal apresentaram, nas condições de preparo da mistura Marshall, seus menores valores; e que as misturas basálticas com cal apresentaram valores de propriedades 10% maiores que as sem cal. As misturas asfálticas com gabro também exibiram alguma tendência de resistências mais altas (2%). Já nas misturas com granito houve um decréscimo pequeno da resistência à tração (3%) com a adição de cal.

**Tabela 4.1:** Propriedades de misturas com CAP 20 preparadas de modos diferentes

Métodos de Moldagem	Aditivo	Basalto		Granito		Gabro	
		RT (MPa)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR (MPa)
MARSHALL	sem cal	1,48	5782	1,66	6891	1,74	7461
ASTM	sem cal	1,62	6211	1,71	7354	1,90	8065
AASHTO	sem cal	1,50	5616	1,66	6462	1,86	8126
MARSHALL	com cal	1,63	8138	1,62	8839	1,78	9195
ASTM	com cal	1,68	6940	1,60	6646	2,11	12186
AASHTO	com cal	1,43	6374	1,61	8349	1,88	9148

Das misturas sem cal, as maiores resistências foram obtidas nas condições de mistura ASTM. Aparentemente, adição de cal nessas misturas promoveu um aumento de resistência à tração nas misturas basálticas e gábricas (4 e 11%, respectivamente) e uma redução da propriedade nas misturas com granito, da ordem de 7%. Quanto às misturas AASHTO, observou-se que as misturas basálticas e graníticas com cal apresentaram valores de resistência à tração menores que as misturas sem cal (da ordem de 10%); nas misturas com gabro praticamente não houve alteração.

Os resultados apontaram à tendência de que o efeito da cal nas misturas asfálticas basálticas e gábricas está relacionado a algum ganho de resistência. Entretanto, a proporção desse ganho foi menor nas misturas AASHTO, sugerindo que o tempo e as temperaturas variadas envolvidas nesses processos atuassem “desacelerando” esse enrijecimento.

As misturas asfálticas contendo agregados graníticos apresentaram tendência de redução da resistência à tração em 4, 10 e 4%, para os métodos Marshall, ASTM e AASHTO respectivamente. Ainda que a tendência de comportamento dessas misturas seja oposta ao comportamento das misturas com basalto e gabro, cabe destacar que o método da AASHTO uma vez mais proporcionou variações menores na propriedade, quando a cal foi adicionada.

A menor resistência apresentada pelas misturas graníticas com cal pode estar relacionada às interações físico-químicas, o que, em parte, explicaria a discrepância de tendências entre as misturas com granito e as misturas com basalto e com gabro (estes de composição mineralógica similar). Contudo, as variações obtidas devido à alteração de alguma variável

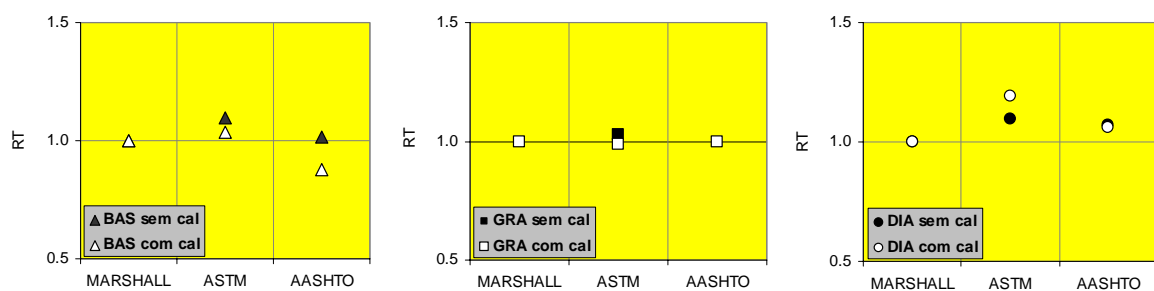
da mistura foram, de maneira geral, baixas; podendo ser confundidas, ou mesmo estar, embutidas nos desvios de grupo e/ou de ensaio.

Com o módulo de resiliência, as mesmas tendências observadas quanto à resistência à tração foram observadas nas misturas com agregados basálticos e gábricos, à exceção das mistura AASHTO com agregados basálticos. Considerando as misturas com granito, o comportamento do módulo de resiliência não concordou com a tendência observada para a resistência à tração, e não mostrou tendência aparente.

Para tentar esclarecer os efeitos dos tipos de preparação de mistura nas propriedades, os gráficos da Figura 4.1 e 4.2 mostram uma forma conveniente de análise que indica algumas tendências das misturas. Para a concepção desses gráficos, foram tomados os valores de resistência à tração e módulo de resiliência das misturas tipo Marshall como referência e, por relação, foram calculadas as variações do valor das propriedades. As propriedades na condição Marshall foram tomadas como referência, uma vez que nesse método as compactações se realizam em seguida ao procedimento de mistura, enquanto as outras envolvem outros procedimentos antes da compactação. Dessa forma, dentre outras observações pertinentes à variação do comportamento das misturas testadas, pôde-se assimilar particularidades quanto ao efeito da cal considerando diferentes tempos e temperaturas antes da compactação.

Da figura 4.1, observando-se a variação da resistência à tração das misturas Marshall para as misturas ASTM, nota-se que:

- As misturas sem cal, com basalto e com granito, exibiram uma tendência de comportamento parecida, havendo um aumento discreto da RT;
- Nas misturas com cal, com basalto e com granito, a taxa de aumento da resistência à tração foi menor quando comparada com as mesmas misturas sem cal;
- Nas misturas com gabro, o aumento da resistência à tração foi significativo para ambas as misturas, sendo mais pronunciado nas misturas com cal.



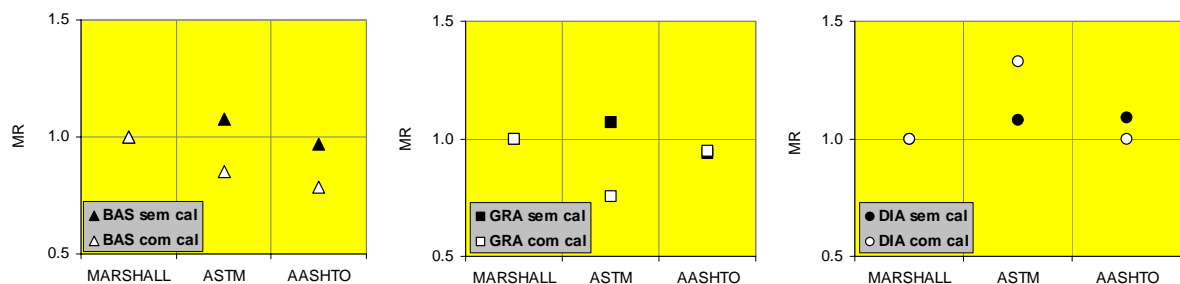
**Figura 4.1:** Variação relativa da resistência à tração em função dos tipos de preparação de mistura

Considerando-se a variação da resistência à tração das misturas Marshall para as misturas AASHTO, nota-se que:

- Nas misturas sem cal, com basalto e com granito, praticamente não houve variação nos valores da resistência à tração;
- Na mistura com cal com basalto houve uma diminuição da RT;
- Na mistura com granito com cal não houve variação da RT;
- Nas misturas com gabro, para as condições sem cal e com cal, a taxa de aumento da resistência à tração de 7% para ambas as condições.

Com base na figura 4.1, tendo os valores referenciados nas misturas Marshall, pode se afirmar que a presença da cal somente influenciou a resistência à tração das misturas com basalto moldadas pelo método AASHTO, reduzindo a propriedade em 13%; e das misturas com gabro moldadas pelo método da ASTM, aumentando a propriedade em 10%. Para as misturas restantes a presença da cal não produziu efeito na RT.

Os efeitos das variáveis (preparo da mistura, tipo de agregado e aditivo) também foram avaliados para os valores do módulo de resiliência, tomando-se os valores da mistura Marshall como referência. Na figura 4.2, são apresentados os gráficos de variação relativa do módulo de resiliência.



**Figura 4.2:** Variação relativa do módulo de resiliência em função dos tipos de preparação de mistura

Considerando-se a variação do módulo de resiliência das misturas Marshall para as misturas ASTM, nota-se que:

- As misturas sem cal exibiram aumento do módulo de resiliência, da ordem de 10%;
- As misturas com cal, com basalto e com granito, apresentaram taxas de redução significativas do módulo de resiliência, 15 e 25%, respectivamente;
- As misturas com gabro apresentaram um aumento de 33% do módulo de resiliência para misturas com cal.

Das misturas Marshall para as misturas AASHTO, nota-se que:

- a) As misturas sem cal, com basalto e com granito, praticamente não apresentaram alteração do módulo de resiliência;
- b) A mistura sem cal com gábreo apresentou uma taxa de aumento do módulo de resiliência de ordem de 10%;
- c) A mistura com cal com basalto mostrou taxa de redução do módulo de 21%;
- d) Nas misturas com cal, com granito e com gábreo, praticamente não houve alteração no módulo de resiliência.

Quando comparadas às misturas tipo Marshall, observou-se que a adição da cal nas misturas ASTM, com agregados basálticos e graníticos, promoveu a redução dos valores dos módulos de resiliência. Já para as misturas com agregados gábricos, a cal atuou aumentando a propriedade.

O módulo de resiliência parece confirmar o que foi mencionado com relação à presença de cal, ou seja, que haveria uma desaceleração dos efeitos por ela proporcionados à medida que se expuseram as misturas aos tempos e temperaturas dos métodos AASHTO. Esse comportamento também se confirma para as misturas tipo ASTM, à exceção das misturas com agregados gábricos, que foram os únicos que apresentaram ganho de propriedades devido à presença da cal.

#### **4.2.2. Considerações sobre o volume de vazios e a presença de aditivo**

A combinação fatorial de dois tipos de agregados, dois tipos de ligantes, dois volumes de vazios e a presença ou não de cal levou a 16 condições experimentais. Ao todo 48 corpos-de-prova de misturas asfálticas compuseram o grupo de controle, sendo que foram moldados no teor de trabalho e de acordo com o procedimento de preparação de misturas ASTM.

Os resultados de ensaios para a determinação do módulo de resiliência e de resistência à tração são apresentados na Tabela 4.2. Esses resultados expressam a média dos grupos testados, e apresentaram taxa de variação de grupo em média de 3,5% para os valores de resistência à tração e 7,5% para os valores de módulo de resiliência. Os resultados dos ensaios para cada corpo-de-prova constam no Anexo 2.



**Tabela 4.2:** Propriedades de misturas asfálticas com diferentes volumes de vazios

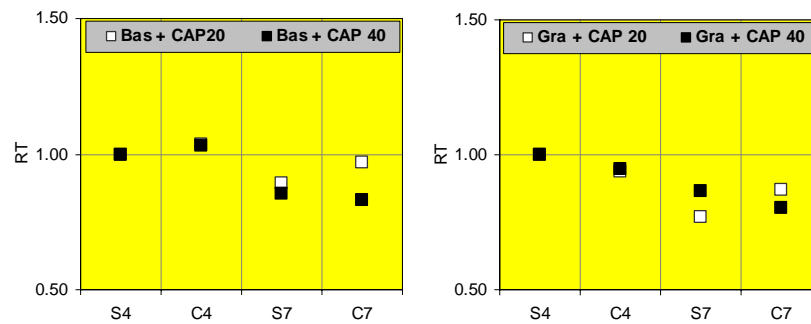
Ligante	Vv (%)	Aditivo	Basalto		Granito	
			RT (MPa)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR (MPa)
CAP 20	4%	sem cal	1,62	6211	1,71	7354
	4%	com cal	1,68	6940	1,60	6646
	7%	sem cal	1,45	4927	1,31	5296
	7%	com cal	1,58	7115	1,48	6566
CAP 40	4%	sem cal	2,82	11713	2,49	13797
	4%	com cal	2,91	13041	2,36	15871
	7%	sem cal	2,41	10767	2,16	11521
	7%	com cal	2,34	13354	2,00	16196

Os valores apresentados na Tabela 4.1 mostram que as misturas com agregados basálticos e cal apresentaram resistência maior em relação às misturas sem cal (à exceção da mistura com CAP 40 e Vv=7%), já as misturas com agregados graníticos e cal apresentaram menores valores da propriedade em relação àquelas sem cal (à exceção da mistura com CAP 20 e Vv=7%). Quanto aos resultados de módulo de resiliência, todas as misturas com cal apresentaram módulos maiores que as sem cal, exceto a mistura com granito e Vv=4%.

Observando-se os valores apresentados na Tabela 4.2, nota-se que as misturas com CAP 40, previsivelmente, apresentaram os maiores valores para ambas as propriedades. As misturas com agregados basálticos e CAP 40 exibiram, em média, valores de resistência à tração 66% maiores em relação às mesmas com CAP 20, enquanto que nas misturas com agregados graníticos essa relação é de 49%. Os módulos de resiliência também apresentaram valores maiores para as misturas com CAP 40, que em relação ao CAP 20, foram de 96% e 127%, para misturas com basaltos e com granitos respectivamente.

Similarmente à avaliação exposta no item 4.2.1, foram elaborados gráficos de resistência à tração e módulos de resiliência, tomando-se como referência o valor dessas propriedades na condição sem cal e com Vv=4%. Este procedimento foi adotado a fim de avaliar como as misturas responderam às variações do volumes de vazios e da adição de cal.

A figura 4.3 mostra os gráficos da variação relativa da resistência à tração para as misturas com basalto (Bas) e para as misturas com granito (Gra). Nas abscissas dos gráficos, as categorias com letra S correspondem às misturas sem cal; com letra C correspondem às misturas com cal; com o número 4 referem-se ao volume de vazios de 4% e, com o número 7, ao volume de vazios de 7%.



**Figura 4.3:** Variação relativa da resistência à tração em função volumes de vazios e da adição de cal em misturas asfálticas com CAP 20 e CAP 40

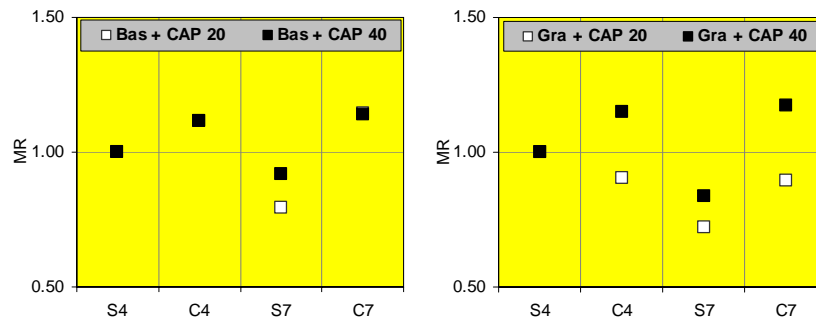
Observando-se as misturas com agregados basálticos, nota-se que:

- As misturas com  $V_v=4\%$ , tanto as com CAP 20 quanto as com CAP 40, apresentaram um discreto acréscimo de RT com a adição de cal;
- O aumento dos volumes de vazios, de 4 para 7%, nas misturas sem cal, reduziu os valores de RT em 11 e 15%, para os CAP 20 e CAP 40, respectivamente;
- Na condição com cal e  $V_v=7\%$ , as misturas com CAP 40 exibiram uma taxa de redução de RT de 17%, enquanto que nas misturas com CAP 20 permaneceram praticamente inalteradas em relação às com cal e  $V_v=4\%$ .

Das misturas com agregados graníticos, pode-se dizer que:

- A adição de cal e o aumento do volume de vazios das misturas com CAP 20 e com CAP 40 propiciaram uma diminuição de RT;
- Nas misturas sem cal, as taxas de redução de RT aumentam com o aumento do volume de vazios;
- A adição da cal nas misturas com  $V_v=7\%$  propiciou diminuição da taxa de redução de RT para as misturas com CAP 20 e CAP 40.

A Figura 4.4, mostra a variação do comportamento do módulo de resiliência, em função dos volumes de vazios e da adição de cal, para misturas asfálticas com agregados basálticos e graníticos. Inicialmente, pode se dizer que o comportamento das misturas basálticas, tanto com CAP 20 quanto com CAP 40, foram mais uniformes que as com agregados graníticos.



**Figura 4.4:** Variação relativa do módulo de resiliência em função volumes de vazios e da adição de cal em misturas asfálticas com CAP 20 e CAP 40

Da Figura 4.4, percebe-se que as misturas com agregados basálticos:

- Apresentaram ganho de rigidez quando houve adição de cal para os dois tipos de ligantes;
- Apresentaram diminuição do MR com o aumento do volume de vazios sem a adição de cal, sendo que a taxa de perda relativa foi maior para o CAP 20; aproximadamente 30%.

Para as misturas com agregados graníticos, nota-se que:

- O MR das misturas com CAP 20 diminuiu com o aumento do volume de vazios, entretanto a taxa relativa dessa redução foi menor para as misturas com cal;
- A adição de cal aumentou o MR, em 15%, das misturas com CAP 40.

Pelo exposto, entende-se que a variação do volume de vazios, de 4 para 7%, produziu as maiores reduções na resistência à tração em todas as misturas testadas, e essas reduções foram minimizadas com a adição de cal, principalmente nas misturas com agregados basálticos.

Essa tendência também foi confirmada para o módulo de resiliência nas misturas asfálticas sem cal. Já nas misturas com CAP40 e cal a rigidez, inclusive naquelas com volumes de vazios de 7%, aumentou quase que na mesma proporção em relação à mistura de 4% (16%); sugerindo que a interação da cal com o CAP 40 favorece ao enrijecimento da mistura.

#### 4.2.3. Considerações sobre o teor e o tipo de ligante e a adição de cal

Os corpos-de-prova testados combinaram as variáveis: um tipo de agregado (granito), dois tipos de ligantes, três teores de ligante e adição ou não de cal, que resultaram em 12 condições experimentais, com 3 réplicas por condição, formando o grupo de controle.

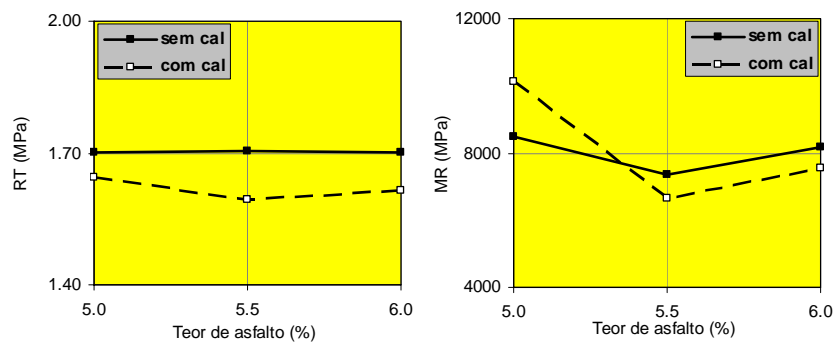
Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados, em termos médios, da resistência à tração e do módulo de resiliência, para as condições testadas. Os valores de RT apresentaram desvios de grupo inferiores a 4,5%, para MR foram inferiores a 10%, à exceção do grupo de misturas com cal e 5% de asfalto que apresentou um desvio de 18%.

**Tabela 4.3:** Propriedades das misturas asfálticas com diferentes teores de ligante

Ligante	Teor de asfalto	Granito sem cal		Granito com cal	
		RT (MPa)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR (MPa)
CAP 20	5,0	1,70	8493	1,65	10114
	5,5	1,71	7354	1,60	6646
	6,0	1,70	8163	1,61	7556
CAP 40	5,0	2,31	15344	2,36	15403
	5,5	2,49	13797	2,36	15871
	6,0	2,77	17803	2,58	13182

Inicialmente, a partir dos valores da Tabela 4.3, pode se observar que a resistência à tração e o módulo de resiliência das misturas com CAP 20 exibiram tendência de diminuição de seus valores em função do aumento do teor de asfalto. Para o CAP 40, entretanto, essa tendência não foi observada; ao contrário, à medida que se aumentou o teor de ligante, os valores das propriedades aumentaram.

A Figura 4.5 mostra as curvas de variação da resistência à tração e do módulo de resiliência para diferentes teores de asfalto. Nela se observa que a resistência à tração das misturas sem cal manteve-se praticamente inalterada com o aumento do teor de asfalto. Quanto às misturas com cal, os valores de RT mostraram uma tendência discreta de diminuição de RT com o aumento do teor de ligante; além disso, apresentaram resistências menores que as misturas sem cal.

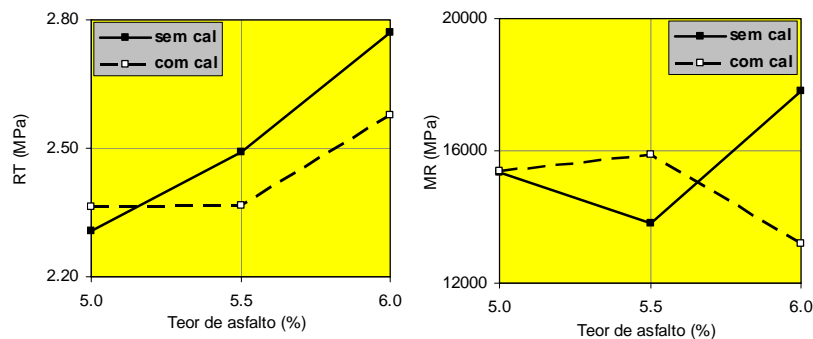


**Figura 4.5:** Variação de RT e MR para diferentes teores de CAP 20

As curvas de módulo de resiliência versus teor de asfalto apresentadas na Figura 4.5 mostram que houve uma tendência de diminuição do módulo com o aumento do teor de asfalto na mistura. Notou-se também que as misturas sem cal, à exceção do teor de 5%, apresentaram menores valores de MR em relação às com cal.

Ressalta-se que as taxas de variações de comportamento das propriedades são baixas, da ordem de 3% para os valores de resistência à tração, e 10% para os valores de módulo de resiliência; com isso pode-se dizer que as misturas apresentaram variações pequenas devido à adição da cal.

A Figura 4.6 mostra os resultados de resistência à tração e módulo de resiliência para as misturas com CAP 40. Nela se nota que a RT não exibiu o comportamento observado para as misturas com CAP 20, uma vez que houve um aumento da resistência à tração devido ao aumento do teor de asfalto, tanto para as misturas sem cal quanto para as com cal. Esse tipo de comportamento da RT seria razoável para misturas em que os teores de asfalto não teriam sido suficientes para alcançar uma espessura de película “ideal”; assim, haveria o crescimento da propriedade até um ponto máximo, normalmente encontrado próximo a um teor “ótimo”, e em seguida passaria a apresentar queda da propriedade.



**Figura 4.6:** Variação de RT e MR para diferentes teores de CAP 40

Uma possível justificativa para o comportamento da RT das misturas asfálticas com CAP 40 baseia-se na adoção de teores similares aos das misturas com CAP 20, porque ao inferir os mesmos teores utilizados baseando-se nas superfícies específicas e nas viscosidades dos ligantes, pode-se não ter alcançado o chamado teor ótimo, obtido da dosagem Marshall.

No que se refere ao módulo de resiliência, considerando o comportamento da resistência à tração das misturas sem cal, o comportamento é coerente, pois aponta para um aumento da propriedade com o aumento do teor de asfalto. Já as misturas com cal apresentaram uma tendência de queda do módulo de resiliência diante do aumento do teor de ligante.

Ao que se nota, no primeiro tramo da curva (5,0 a 5,5%), a variação de MR das misturas sem cal foi de 11%; para misturas com cal o aumento foi de 3%. Por se tratarem de valores baixos, ressalta-se que essas variações podem não ser efeitos do aumento do ligante, mas um desvio inerente à heterogeneidade do grupo e/ou um desvio de ensaio.

### **4.3. COMENTÁRIOS SOBRE CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS OBSERVADAS NOS PROJETOS**

A apresentação e análise dos resultados dos três projetos foi realizada para o entendimento do comportamento de duas propriedades das misturas asfálticas antes do condicionamento: resistência à tração e módulo de resiliência. Essas propriedades foram tomadas para serem utilizadas na avaliação da adesão e da perda dela pela ação da água por dois motivos, a) a variação da resistência à tração é utilizada pelos dois métodos de ensaio de susceptibilidade aos danos por umidade selecionados nesta pesquisa - ASTM e AASHTO; e b) a variação do módulo de resiliência parece ser uma referência promissora para a avaliação dos danos por umidade, já que permite desempenhar um acompanhamento das mudanças decorrentes da ação da água num mesmo corpo-de-prova, por ser determinada a partir de um ensaio não destrutivo.

Variados tipos de misturas asfálticas foram moldadas a fim de se obter um conhecimento global das influências de diversos fatores nos fenômenos da adesão e da perda dela. As análises que precedem estes comentários possibilitaram o entendimento sobre o comportamento das misturas asfálticas testadas e, partindo dessas análises se desenvolveram as sínteses.

#### *a) Misturas asfálticas com basalto*

Dependendo dos procedimentos envolvidos no preparo da mistura dos agregados com o ligante tipo CAP 20, as misturas basálticas apresentaram variações de propriedades (RT e MR); quando esse procedimento envolveu exposição a altas temperaturas por um dado período de tempo, essas misturas asfálticas exibiram uma tendência de aumento das propriedades, que pode ser tão maior quanto maior for a temperatura (com limites na de compactação). No procedimento que envolveu o resfriamento da mistura e posterior reaquecimento para a compactação o aumento da propriedade se dá em menor grau. Quando efetuada a adição de cal, as misturas asfálticas com agregados basálticos apresentaram uma intensidade menor do aumento das propriedades.

Em misturas com basalto e CAP 40 as tendências de aumento de propriedades devido ao tempo de exposição a altas temperaturas e à adição de cal foram as mesmas observadas para o CAP 20. Comparadas às misturas basálticas com CAP 20, as misturas CAP 40 exibiram RT e MR maiores, em 66% e 96%, respectivamente. Essas diferenças mais altas foram inclusive observadas em misturas com volumes de vazios mais altos.

*b) Misturas asfálticas com granito*

As misturas asfálticas com agregados graníticos apresentaram um comportamento tipicamente estável. Os valores de RT não indicaram tendências de comportamento consideráveis, pois a maior variação observada nessas misturas foi um ganho de 6% após a exposição a alta temperatura por duas horas (ASTM em relação a Marshall). O módulo de resiliência também apresentou esse nível de variação.

A adição de cal propiciou uma diminuição de RT em todos os tipos de misturas. Entretanto, no caso dos módulos de resiliência, a adição de cal proporcionou redução apenas nas misturas ASTM.

Quando o agregado granítico foi misturado a ligante tipo CAP 40, os valores das propriedades aumentaram muito em relação às misturas com CAP 20, sendo 49% para a resistência à tração e 127% para o módulo de resiliência. Além disso, a cal, nas misturas com CAP 40, atuou aumentando sua rigidez, à semelhança do que foi observado para o CAP 20.

Misturas com volumes de vazios elevados (7%) apresentaram valores de propriedades menores, entretanto naquelas com CAP 40, essa redução se deu em menor taxa; e com a adição de cal apresentou aumento significativo do módulo de resiliência. Interessante notar que as misturas com CAP 20 e  $V_v=7\%$ , a adição de cal favoreceu o aumento tanto da resistência à tração quanto do módulo de resiliência.

Em termos de resistência à tração, as misturas com CAP 20 com e sem cal se mostraram também estáveis em função do aumento do teor de asfalto; nesse caso, mais uma vez, somente o módulo de resiliência detectou a variação propiciada por este fator, que consistiu numa tendência de redução. Para misturas com CAP 40, o comportamento pode ser coerente se for observado que ambas as propriedades apresentaram uma tendência de aumento com o aumento do teor de ligante, mas incoerente se considerado que o aumento de asfalto efetivo na mistura a torna mais rígida.

*c) Misturas asfálticas com gábro*

As misturas asfálticas com agregados gábricos foram as mais suscetíveis aos efeitos da ação da temperatura de moldagem, do tempo e da ação da cal. Diante dos variados procedimentos de mistura de agregado-ligante, as misturas asfálticas com gábro apresentaram tendências de comportamentos semelhantes para as duas propriedades medidas, exibindo um evidente aumento principalmente quando expostas a altas temperaturas (temperatura de compactação) por um dado período de tempo.

Além de já apresentar valores de propriedades destacadamente altos, a ação da cal promoveu o aumento da rigidez desse tipo de mistura, o que, combinado aos fatores tempo de exposição e temperatura, levou a taxas de ganho de rigidez de até 33%.

#### **4.4. COMPORTAMENTOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PÓS-CONDICIONAMENTO**

As apreciações da capacidade de retenção de propriedades que se seguem são baseadas nos resultados de resistência à tração e, adicionalmente, de módulo de resiliência que cada tipo de mistura asfáltica apresentou frente a um condicionamento térmico, que pode ser ou o preconizado pela ASTM D 4867 ou o AASHTO T 283.

A apresentação dos resultados foi ordenada por projeto, de forma similar à apresentada no item 4.2, e enfatiza a análise da influência dos fatores selecionados na retenção das propriedades das misturas em função do tipo de agregado, para a classificação da mistura como sensível ou suscetível aos danos por umidade.

De forma geral, as apresentações dos resultados mostram dois gráficos, um apresenta a relação de resistência à tração (RRT), que representa a taxa de retenção dessa propriedade após o condicionamento, e é dada em porcentagem; o outro apresenta a relação de módulo de resiliência (RMR) que, de forma similar à RT, consiste da retenção dessa propriedade após o condicionamento.

Maiores detalhes sobre os valores de RT e MR pós-condicionamento são encontrados nas planilhas-relatório que constam do Anexo 1 ou na planilha-resumo dos grupos controle (G1) e condicionados (G2) do Anexo 2. As planilhas-relatório apresentam o registro fotográfico da grande maioria dos corpos-de-prova após o ensaio de resistência à tração, e um relato da observação visual dos corpos-de-prova condicionados. As planilhas-resumo apresentam os módulos de resiliência das misturas testadas, processados pelos métodos do DNER e da



NCHRP. Os módulos calculados a partir do método da NCHRP foram utilizados para algumas avaliações suplementares que serão expostas oportunamente.

#### 4.4.1. Resultados relacionados ao modo de preparação da mistura, do tipo de agregado e da presença de aditivo na adesão e suscetibilidade ao dano por umidade de misturas asfálticas

A Tabela 4.4 apresenta um resumo das características e propriedades dos grupos de controle (G1) e dos grupos condicionados (G2) das misturas preparadas seguindo o procedimento Marshall. A capacidade de retenção de propriedade pós-condicionamento térmico dessas misturas foi medida a partir da retenção de módulo de resiliência e da relação de resistência à tração, após o condicionamento térmico da ASTM D 4867.

Dos dados apresentados, observa-se alguma variação nos volumes de vazios das misturas com os três tipos de agregados; as misturas com basalto apresentaram os menores volumes de vazios, da ordem de 3,8%; as misturas com granito, por sua vez, apresentaram os maiores volumes de vazios, em média 4,3%. Nota-se também que as misturas com basalto apresentaram menor grau de saturação (Gs) quando comparadas às outras.

**Tabela 4.4:** Características e propriedades das misturas tipo Marshall

		Basalto		Granito		Gabro	
		sem cal	com cal	sem cal	com cal	sem cal	com cal
Grupo de controle (G1)	Vv (%)	3,9	3,8	4,5	4,0	4,2	4,2
	MR (MPa)	5782	8138	6891	8839	7461	9195
	RT (MPa)	1,5	1,6	1,7	1,6	1,7	1,8
Grupo Condicionado (G2)	Gs (%)	59	56	68	65	63	59
	Vv (%)	3,8	3,8	4,5	4,1	4,2	4,2
	MR (MPa)	4082	5136	4104	6049	8819	13145
	RT (MPa)	1,6	1,6	1,0	1,5	1,7	2,0
	RMR (%)	71	63	63	69	118	143
	RRT (%)	106	101	61	92	96	110

Em relação à RT, observa-se que misturas sem cal, graníticas e gábricas, exibiram perda de propriedades, sendo a menor RRT atingida pela mistura com granito (61%). Na mistura sem cal com basalto houve um ganho de resistência após o condicionamento. Quanto às misturas com cal, foi notado que houve uma pequena redução RT das misturas graníticas após o condicionamento, e um aumento da propriedade para misturas com basalto e gabro, respectivamente.

Dos resultados de RMR, pode-se observar que houve perda de rigidez nas misturas sem cal com agregados basálticos e graníticos, e, contrariamente, as misturas com gabro apresentaram um ganho de rigidez. A RMR das misturas com cal apresentou-se menor após o condicionamento das misturas com basalto e granito; a mistura com gabro apresentou um ganho significativo de rigidez.

A Tabela 4.5 apresenta o resumo das características e propriedades dos grupos de controle (G1) e dos grupos condicionados (G2), para as misturas que foram preparadas seguindo o procedimento ASTM, e passaram pelo condicionamento térmico da ASTM D 4867.

**Tabela 4.5:** Características e propriedades das misturas tipo ASTM

		Basalto		Granito		Gabro	
		sem cal	com cal	sem cal	com cal	sem cal	com cal
Grupo de controle (G1)	Vv (%)	3,9	4,0	4,2	4,2	4,3	4,1
	MR (MPa)	6211	6940	7354	6646	8065	12186
	RT (MPa)	1,6	1,7	1,7	1,6	1,9	2,1
Grupo Condicionado (G2)	Gs (%)	56	55	69	59	58	58
	Vv (%)	3,9	3,9	4,2	4,3	4,3	4,2
	MR (MPa)	4628	5390	8811	10150	7656	10484
	RT (MPa)	1,6	1,7	1,4	1,8	1,6	1,8
	RMR (%)	58	78	120	153	95	86
	RRT (%)	97	98	82	114	83	83

Os dados apresentados mostram que a resistência à tração das misturas asfálticas sem cal diminuiu após o condicionamento, e que a mistura com granito apresentou menor taxa de retenção da propriedade, seguida pelas misturas com gabro e basalto. Das misturas com cal, a com gabro exibiu a menor taxa de retenção da propriedade (83%), seguida pela mistura com basalto (98%); a mistura com agregado granítico apresentou ganho de resistência após o condicionamento.

Dos valores de RMR apresentados na Tabela 4.5, observa-se que a rigidez das misturas com agregados graníticos, sem e com cal, aumentou após o condicionamento. Para as misturas com gabro houve redução da rigidez da mistura, sendo que as com cal perderam mais que as sem cal (86 e 95%). Nas misturas com basalto, houve diminuição significativa do módulo de resiliência pós-condicionamento, entretanto na mistura com cal essa perda foi menor (78%) que na sem cal (58%).

Na Tabela 4.6 são apresentadas, resumidamente, as características e propriedades dos grupos de controle (G1) e condicionados (G2), das misturas preparadas e condicionadas de acordo com AASHTO T 283.

**Tabela 4.6:** Características e propriedades das misturas tipo AASHTO

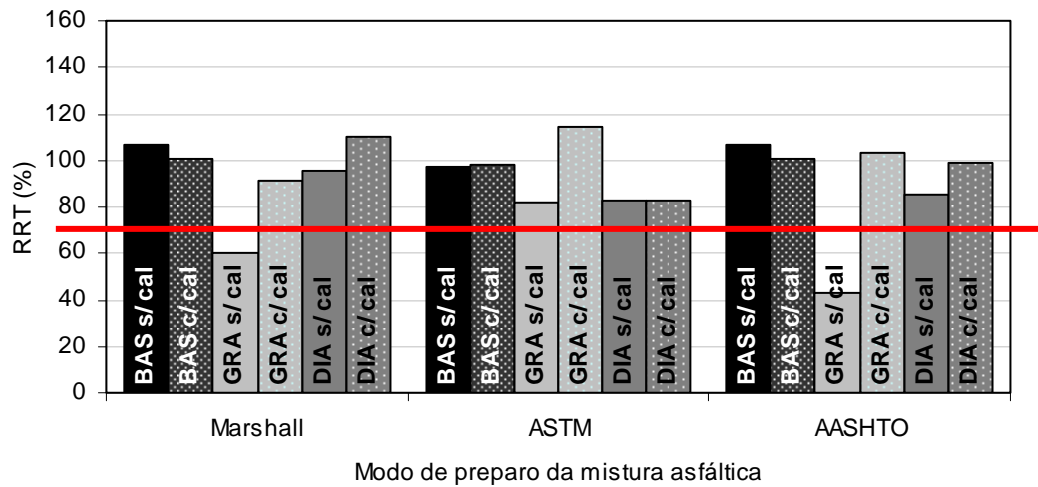
		Basalto		Granito		Gabro	
		sem cal	com cal	sem cal	com cal	sem cal	com cal
Grupo de controle (G1)	Vv (%)	4,0	3,9	4,3	4,3	4,2	4,2
	MR (MPa)	5616	6374	6462	8349	8126	9148
	RT (MPa)	1,5	1,4	1,7	1,6	1,9	1,9
Grupo Condicionado (G2)	Gs (%)	56	56	74	68	62	56
	Vv (%)	3,8	3,8	4,3	4,3	4,4	4,3
	MR (MPa)	3224	3187	1953	4507	8699	4559
	RT (MPa)	1,6	1,6	0,7	1,7	1,6	1,9
	RMR (%)	57	51	31	54	106	50
	RRT (%)	107	101	43	103	85	99

Considerando-se os dados apresentados na Tabela 4.6, observa-se para as misturas sem cal que o condicionamento promoveu a perda de resistência das misturas com granito e gabro, destacando-se a perda da propriedade da mistura com granito que foi a menor, da ordem de 60%.

Nas misturas basálticas foi registrado um ganho de propriedade de 7%. As misturas com cal, em geral, mantiveram-se praticamente inalteradas diante do condicionamento. Quanto à RMR, observando as misturas testadas, nota-se que, à exceção das misturas com gabro sem a presença de cal, todas apresentaram diminuição na sua rigidez devido ao condicionamento térmico.

Para visualizar os comportamentos das misturas testadas, na Figura 4.7 são mostradas as relações de resistência à tração (RRT) e a linha de suscetibilidade em RRT=70%. Nesse gráfico as misturas sem cal aparecem legendadas de forma abreviada como “s/ cal” e as misturas com cal, aparecem como “c/ cal”. Os tipos de agregados empregados nas misturas também aparecem legendados de forma abreviada: *BAS* refere-se ao agregado basáltico, *GRA* ao granítico e *DIA* ao gábrico.

A chamada linha de suscetibilidade foi adicionada ao gráfico para delimitar as áreas onde se separam as categorias de misturas suscetíveis e não suscetíveis aos danos por umidade. De forma geral, foi assumido o valor de 70% para todos os dois métodos de ensaio utilizados.



**Figura 4.7:** Relação de resistência à tração (RRT) das misturas asfálticas testadas

Observando-se a Figura 4.7, pode-se avaliar a tendência de comportamento que cada tipo de mistura asfáltica apresentou em consequência dos condicionamentos. De maneira geral, quanto aos danos por umidade, pode-se dizer que:

- a) As misturas asfálticas preparadas segundo a ASTM foram menos suscetíveis ao condicionamento;
- b) As misturas sem cal com agregados graníticos foram as mais suscetíveis aos danos por umidade;
- c) A cal promoveu a manutenção e/ou o aumento da retenção da resistência inicial.

As misturas basálticas, em geral, se mostraram bastante estáveis, não apresentando perdas significativas de RRT, inclusive quando se deu algum ganho de resistência, o valor não ultrapassou 10%. Essas misturas também não exibiram variações significativas devido à presença da cal, nesse caso as RRT apresentaram valores mais próximos.

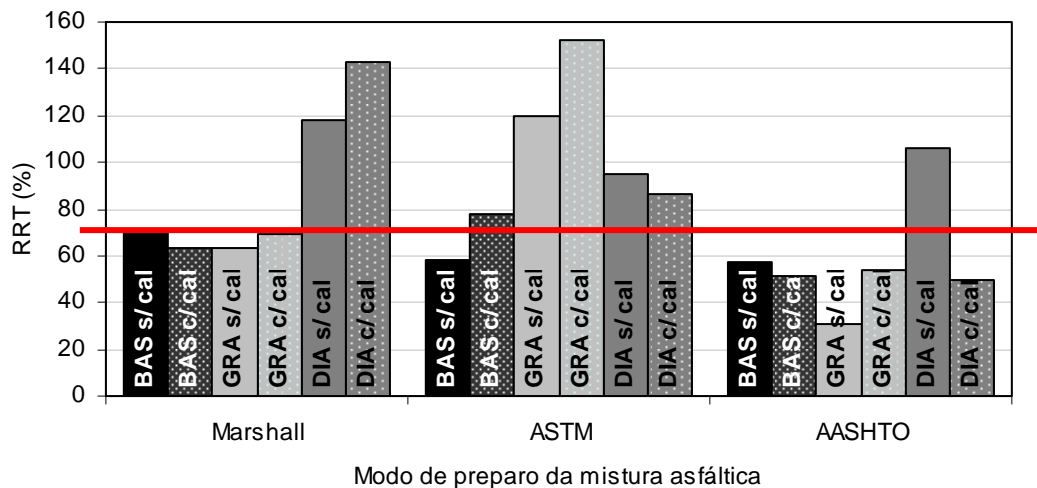
As misturas asfálticas com agregados de granito mostraram-se suscetíveis à perda de resistência diante do condicionamento, entretanto, quando se tratam das misturas com cal, as misturas graníticas apresentaram perdas menores, sinalizando ainda alguma tendência de aumento de resistência pós-condicionamento.

As misturas asfálticas com gábro apresentaram alguma tendência de perda de resistência devido ao condicionamento, que com a adição da cal em alguns casos deixou de existir, ou não alterou o comportamento de RRT.

Se fosse considerada a taxa mínima de retenção de resistência à tração igual a 70%, as misturas testadas que seriam consideradas suscetíveis ao dano por umidade seriam: as misturas graníticas sem cal preparadas de acordo com o método Marshall e condicionadas pela ASTM D 4867; e as misturas graníticas sem cal preparadas e condicionadas pela AASHTO T283.

No que se refere à combinação das condições *preparação da mistura - tipo de condicionamento* observou-se que das misturas testadas, a maior perda foi detectada para a mistura sem cal com agregados graníticos na condição *AASHTO-AASHTO*; a mistura asfáltica com agregados graníticos sem cal também apresentou a segunda maior perda na condição *Marshall-ASTM*.

A Figura 4.8 apresenta as relações de módulo de resiliência (RMR) das misturas testadas. Nessa figura foi utilizado um valor de RMR= 70% para definir uma linha hipotética de suscetibilidade; esse artifício foi utilizado a fim de evidenciar as possíveis diferenças de valores e tendências entre RRT e RMR. Vale lembrar que as legendas abreviadas que constam nas colunas desse gráfico seguem o mesmo formato das apresentadas no gráfico da figura 4.7.



**Figura 4.8:** Relação de módulo de resiliência (RMR) das misturas asfálticas testadas

Da Figura 4.8, é possível observar que o efeito do condicionamento térmico nas misturas asfálticas proporcionou, na maioria dos casos, uma diminuição da sua rigidez, expressa na diminuição dos valores de módulo de resiliência. Contudo, destaca-se o comportamento antagônico e específico de algumas misturas com granito e gabro que apresentaram aumento do módulo após o condicionamento.

Com exceção das misturas com gábre na condição *AASHTO-AASHTO*, as misturas asfálticas testadas apresentaram as mesmas tendências observadas em RRT. Entretanto, nos resultados de RMR os efeitos do condicionamento aparecem “ampliados”; por exemplo, na mistura asfáltica com agregados graníticos e cal, o aumento de resistência à tração detectado foi de 14%, no módulo de resiliência esse ganho foi de 53%. Nesse sentido pode ser questionado o quanto são significativos os valores de RRT, no que se refere às mudanças das propriedades da mistura asfáltica em consequência do condicionamento térmico, já que esse índice reflete a variação das misturas na média dos grupos.

Com o ensaio de módulo de resiliência, os resultados podem ser apreciados considerando a variação de propriedade de um grupo; porém é possível realizar um acompanhamento das variações num mesmo corpo-de-prova.

#### 4.4.2. Resultados do projeto relacionado à influência do volume de vazios, do tipo de agregado, do tipo de asfalto e da presença de aditivo

Os dados da Tabela 4.7 referem-se aos resultados do ensaio ASTM D 4867 que foram realizados em misturas asfálticas variadas considerando dois tipos de ligantes (CAP 20 e CAP40), dois tipos de agregados (basalto e granito), dois níveis de volumes de vazios (4 e 7%), e o uso de aditivo (sem e com cal). Os valores são apresentados em termos médios de grupos compostos por 3 réplicas; maiores detalhes sobre as características dos corpo-de-prova podem ser obtidos no Anexo 1.

**Tabela 4.7:** Relação das propriedades após o condicionamento ASTM D 4867 das misturas asfálticas testadas

		Misturas com basalto				Misturas com granito			
		V <sub>v</sub> (%)	G <sub>s</sub> (%)	RMR (%)	RRT (%)	V <sub>v</sub> (%)	G <sub>s</sub> (%)	RMR (%)	RRT (%)
CAP 20	sem cal	3,9	56	58	97	4,2	69	120	82
	com cal	4,0	55	78	98	4,3	59	153	114
	sem cal	7,1	68	61	98	7,1	79	83	58
	com cal	6,9	73	89	97	6,9	68	78	108
CAP 40	sem cal	4,0	59	88	94	4,3	73	69	55
	com cal	3,9	56	97	97	4,3	73	69	95
	sem cal	7,1	58	59	93	7,3	78	55	54
	com cal	6,9	61	72	101	7,2	75	59	92

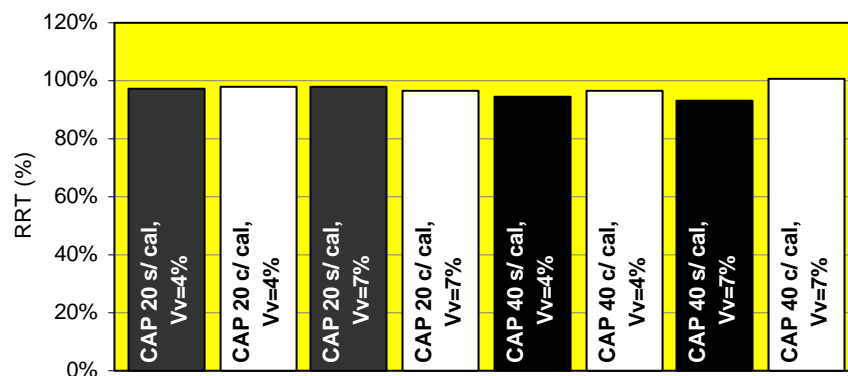
Dos valores apresentados, nota-se que há uma diferença no volume de vazios para as misturas asfálticas compostas por agregados de basalto e por agregados de granito, que, em geral, foram baixas. Além disso, nota-se que os graus de saturação (G<sub>s</sub>) atingidos apresentaram valores característicos; as misturas com agregados basálticos foram testadas

com graus de saturação (Gs) muito próximo ao limite inferior da faixa de saturação permitida. Isso aconteceu, porque durante os procedimentos de saturação houve dificuldade de saturar esses corpos-de-prova. Já com os corpos-de-prova das outras misturas os graus de saturação foram atingidos mais facilmente.

Para entender o que aconteceu na saturação dos corpos-de-prova com agregados basálticos é razoável buscar explicação na densidade das misturas asfálticas com basalto, que na dosagem Marshall, se mostraram mais densas que as outras. Em parte, essa característica pode ser conseqüência de uma maior acomodação na mistura favorecida pela forma do agregado.

Furlan *et. al.* (2004), avaliando a influência das características dos agregados na adesão e dano por umidade, observaram que os agregados basálticos apresentaram 2,5% de suas partículas alongadas enquanto que os gábricos apresentaram 0,5%. Ressalta-se que por se tratarem de materiais similares, pode se esperar que apresentem as mesmas características. Sendo assim, uma explicação para a dificuldade de se atingirem graus maiores de saturação dos corpos-de-prova de misturas asfálticas com agregados basálticos pode estar relacionada à suposição de que os vazios dessas misturas apresentem-se menos interconectados, dificultando a infiltração de água.

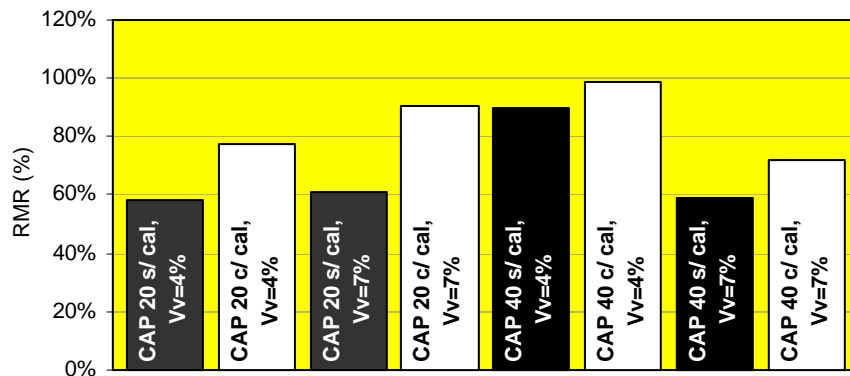
A figura 4.9 mostra as relações de resistência à tração de misturas asfálticas com basalto, convencionais e com cal, que passaram pelo condicionamento da ASTM D 4867. Nela se observa que, em geral, essas misturas apresentaram-se muito estáveis, apresentando variações discretas de comportamento quando comparadas; contudo é possível observar que as misturas com CAP 40 sem cal perderam um pouco mais da resistência à tração que as restantes. Se fosse adotada RRT mínima de 70%, nenhuma das misturas asfálticas seria considerada sensível ao dano por umidade induzida.



**Figura 4.9:** Relação de resistência à tração para misturas asfálticas com agregados de basalto

A variação do módulo de resiliência revelou outro comportamento para as misturas asfálticas com basalto. A Figura 4.10 mostra as RMR dessas misturas, e é possível observar que todas as misturas sem cal apresentaram perda de rigidez como resposta ao condicionamento; além disso, essas perdas foram muito próximas, da ordem de 40% da propriedade original, exceto para as misturas com CAP 40 e  $V_v=4\%$ , cuja perda foi de aproximadamente 10%. Com a adição de cal as misturas exibiram maiores RMR.

As misturas com CAP 40 apresentaram comportamentos mais coerentes para as condições sem cal e com cal, pois apresentaram perdas maiores para a condição de volumes de vazios maiores; essa tendência concorda com o conceito dos “vazios péssimos” (Terrel e Al-Swailmi, 1993).

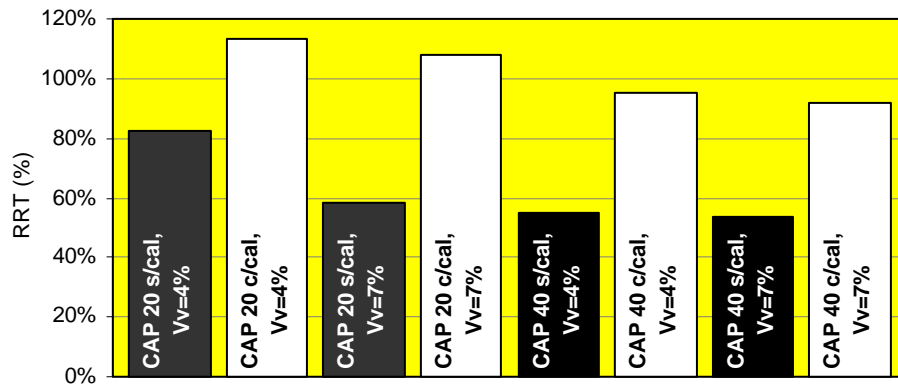


**Figura 4.10:** Relações de módulo de resiliência das misturas basálticas

Na Figura 4.11 são apresentadas as RRT de misturas asfálticas convencionais e com cal, compostas por agregados graníticos, onde se pode visualizar que todas as misturas sem cal com esse tipo de agregado apresentaram perdas significativas da propriedade original e, com exceção da mistura sem cal com  $V_v=4\%$  e CAP 20, todas seriam consideradas sensíveis aos danos por umidade ( $RRT < 70\%$ ).

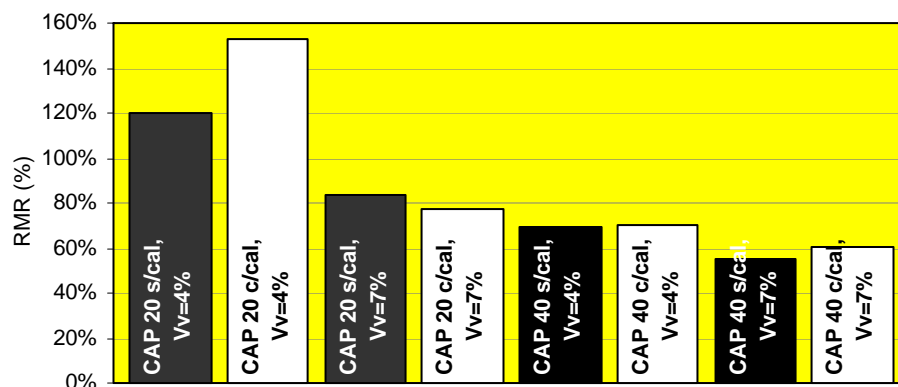
As misturas com CAP 40 apresentaram as menores retenções de propriedades, contrariamente ao que se encontra na literatura. Acredita-se que um ligante mais viscoso, produz películas mais resistentes à ação da água. Nas misturas com cal, concordando com o que foi observado anteriormente, a cal favoreceu a manutenção e/ou ao aumento das propriedades originais após o condicionamento para todas as misturas, até as misturas com CAP 40 mantiveram níveis satisfatórios de RRT.





**Figura 4.11:** Relação de resistência à tração para misturas asfálticas com agregados de granito

Para entender de forma mais abrangente o comportamento apresentado pelas misturas com granito, na Figura 4.12 são mostrados os valores de RMR. Os comportamentos observados para RRT foram ratificados pela RMR, principalmente para as misturas sem cal.



**Figura 4.12:** Relações de módulo de resiliência para as misturas asfálticas com agregados graníticos.

Os comportamentos das misturas com CAP 40 e cal são muito interessantes, porque com relação ao módulo de resiliência a mistura apresentou-se menos rígida, perdendo em torno de 40% da propriedade original; já com relação à resistência, as perdas foram menores. Considerando-se a diversidade de comportamentos e a forma como ocorrem, mantendo a RT e diminuindo o MR; isso pode ser confundido como positivo se esse comportamento não fosse inerente à presença da água em sistemas agregado-asfalto, e consequência de sua ação deletéria.

#### 4.4.3. Considerações sobre o teor e o tipo de ligante e a adição de cal

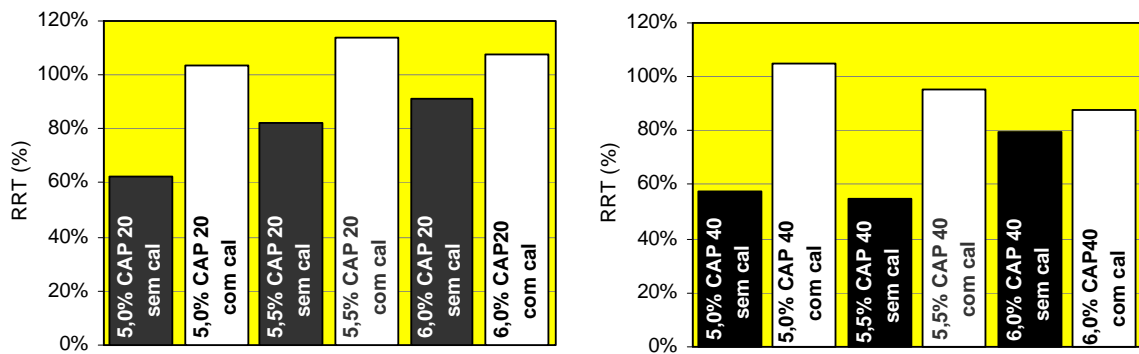
Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados de resistência à tração e módulo de resiliência e suas relações, RRT e RMR, das misturas testadas. Um dos objetivos desse projeto se refere à observação dos efeitos da variação da espessura da película de asfalto na resistência à ação da água, pelo uso de três teores de asfalto para cada tipo de mistura; o outro se relaciona ao tipo de película, através da utilização de CAP diferentes, além disso, a influência da cal nessa película.

A partir dos resultados da Tabela 4.8 percebe-se que todas as misturas sem cal testadas apresentaram diminuição da resistência à tração devido ao condicionamento (ASTM D 4867), e que essa tendência não foi observada para os resultados de módulo de resiliência. Para uma melhor visualização da tendência apresentada por essas misturas, nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentadas as RRT e RMR, respectivamente.

**Tabela 4.8:** Resultados de RRT e MR para misturas com agregados graníticos em três diferentes teores de asfalto

		Misturas com granito							
		% Ligante	Gs (%)	RT (MPa)		RRT (%)	MR (MPa)		RMR (%)
				G1	G2		G1	G2	
CAP 20	sem cal	5,0	75	1,70	1,06	62	8493	8001	99
	com cal	5,0	72	1,65	1,70	103	10114	11189	113
	sem cal	5,5	69	1,71	1,41	82	7354	8811	120
	com cal	5,5	59	1,60	1,81	114	6646	10150	153
	sem cal	6,0	57	1,70	1,55	91	8163	4546	56
	com cal	6,0	57	1,61	1,74	108	7556	5890	78
CAP 40	sem cal	5,0	74	2,31	1,33	58	15344	9652	63
	com cal	5,0	74	2,36	2,48	105	15403	14497	95
	sem cal	5,5	73	2,49	1,37	55	13797	9507	96
	com cal	5,5	73	2,36	2,26	95	15871	11027	70
	sem cal	6,0	74	2,77	2,19	79	17803	17082	94
	com cal	6,0	70	2,58	2,26	88	13182	9534	72

Na figura 4.13, as relações de resistência à tração (RRT) do gráfico à esquerda referem-se às misturas com CAP 20; as RRT do gráfico da direita referem-se às misturas com CAP 40. Para as misturas com CAP 20 depreende-se que, na medida em que se aumentaram os teores de asfalto, com conseqüente aumento da espessura da película, ocorreu um aumento de RRT, o que pode ser traduzido como um aumento de resistência à ação danosa da água. Por sua vez, nas misturas com CAP 40 sem cal, o único valor satisfatório de RRT foi observado para o teor de 6,0%, e a tendência de aumento de RRT em função do aumento do teor de asfalto não foi evidente. Todas as misturas com cal exibiram valores de RRT maiores que 70%.

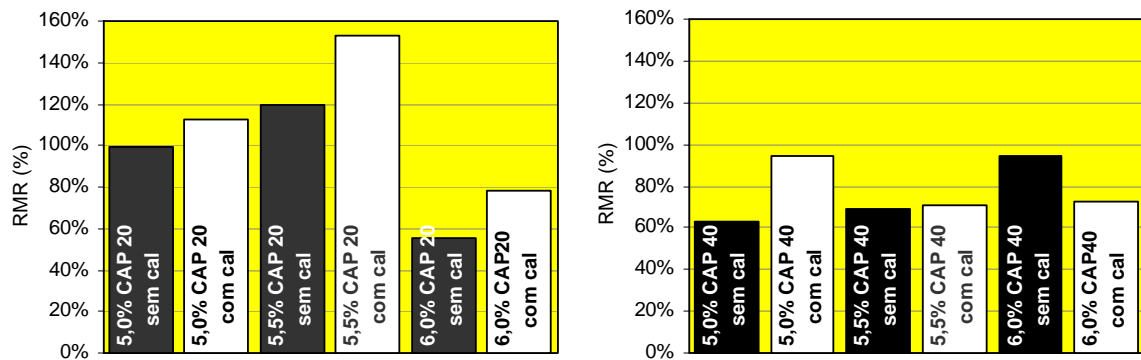


**Figura 4.13:** Resultados de RRT para misturas com CAP 20 e CAP 40 em diferentes teores de asfalto

Para as misturas com CAP 20 e cal, as RRT apresentaram valores satisfatórios, já que não foram registradas perdas na propriedade; além disso, considerando os três teores pode-se notar que seus respectivos valores de RRT delineiam uma curva onde se percebe um ponto máximo, encontrado no teor de trabalho (5,5%). Esse ponto máximo observado pode estar relacionado com um teor “ideal” de cal na mistura asfáltica, no qual ela favoreceria a resistência ao dano por umidade e ao enrijecimento do *mástique* até um “limite” e, a partir de então deixaria de atuar dessa forma.

Para as misturas com CAP 40 e cal foi observada a tendência de diminuição de RRT em função do aumento do teor de ligante. Vale lembrar que antes do condicionamento, essas misturas apresentaram um comportamento antagônico, que despertou dúvidas relacionadas à utilização de teor de trabalho inadequado, menor que o chamado ideal. Contudo, independentemente do teor ideal de trabalho das misturas com CAP 40, granito e cal, por conceito, ao aumentar a quantidade de asfalto na mistura elas deveriam ter se mostrado mais resistentes à ação da água.

A Figura 4.14 mostra as RMR das misturas com granito, observadas para os três teores de CAP 20 e CAP 40. Os gráficos indicam que todos os comportamentos observados para RRT foram confirmados para RMR, exceto para a mistura sem cal com CAP 20, que apresentou uma redução significativa de RMR, sugerindo que o condicionamento da ASTM D 4867 atuou amolecendo a mistura.



**Figura 4.14:** Resultados de RMR para misturas com CAP 20 e CAP 40 em diferentes teores de asfalto

Devido ao comportamento de RRT das misturas com CAP 40 terem sido ratificados pelo RMR, surgiram outras dúvidas, agora referentes às características intrínsecas dos materiais, questionando, principalmente, a importância do papel do ligante no desenvolvimento da adesão e da perda dela. Contudo, apesar das propriedades mecânicas serem medidas seguras para o entendimento do comportamento dos materiais, não oferece respaldo para explicações mais específicas quando esse comportamento é inerente à interação entre eles.

#### 4.5. PROJETO COMPLEMENTAR

Como mencionado no item 3.7.1, no curso dos ensaios surgiram algumas questões que motivaram o desenvolvimento de estudos complementares, com o objetivo de tentar entender os fenômenos da adesão e de sua perda por ação da água a partir de sua suscetibilidade térmica.

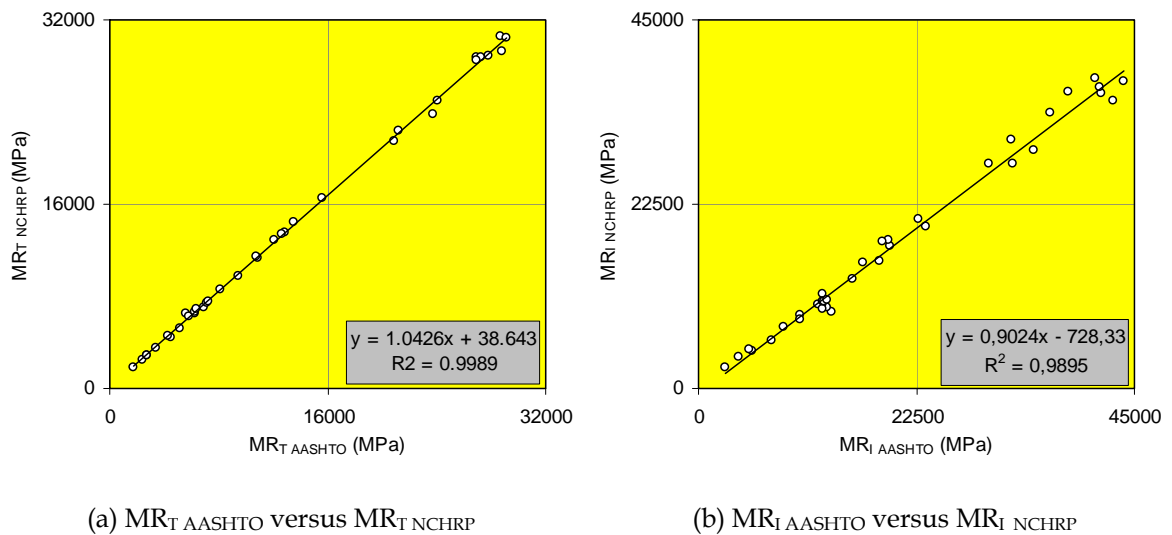
Para isso foram moldados corpos-de-prova seguindo o modo de preparo da ASTM D 4867, que é similar ao condicionamento de moldagem da AASHTO PP2, e realizados ensaios para a determinação do módulo de resiliência desses corpos-de-prova em três diferentes temperaturas (10, 25 e 40°C). As misturas testadas combinaram os fatores variados em 3 ou 2 níveis, a saber: tipo de agregado (basalto, granito e gabro); tipo de ligante (CAP 20 e CAP 40), aditivo (sem cal, com cal).

Tentando acompanhar o desenvolvimento das técnicas laboratoriais, esse estudo utilizou o método de cálculo da NCHRP para módulo de resiliência, total ( $MR_T$ ) e instantâneo ( $MR_I$ ). Da consideração desses dois módulos foi possível observar comportamentos particulares das misturas asfálticas sob diferentes temperaturas.

Antecipa-se que, oportunamente, os resultados dos projetos anteriores também foram avaliados a partir dessa nova técnica, e observados novos elementos quanto aos comportamentos das misturas antes e depois do condicionamento.

#### 4.5.1. Considerações sobre a suscetibilidade térmica e dano por umidade de misturas asfálticas

Inicialmente, para a utilização do novo método de cálculo, foram observados os valores dos módulos de resiliência de algumas misturas asfálticas quando calculadas a partir do método do DNER, que tem como base os procedimentos de cálculo da AASHTO TP 31, e pelo método da NCHRP do Relatório 1-28. Isso foi feito para verificar se havia tendências diferentes entre as variadas formas de cálculo, principalmente no módulo instantâneo que teve maior alteração no seu procedimento de determinação. Para isso, foram usados os corpos-de-prova do projeto complementar sobre suscetibilidade térmica, que foram ensaiados em três diferentes temperaturas, e os valores dos módulos calculados pelos dois métodos. A Figura 4.15 (a) mostra a curva entre os  $MR_T$  calculados pela AASHTO versus os  $MR_T$  calculados pela NCHRP; e em (b) é mostrada essa mesma relação para  $MR_I$ .



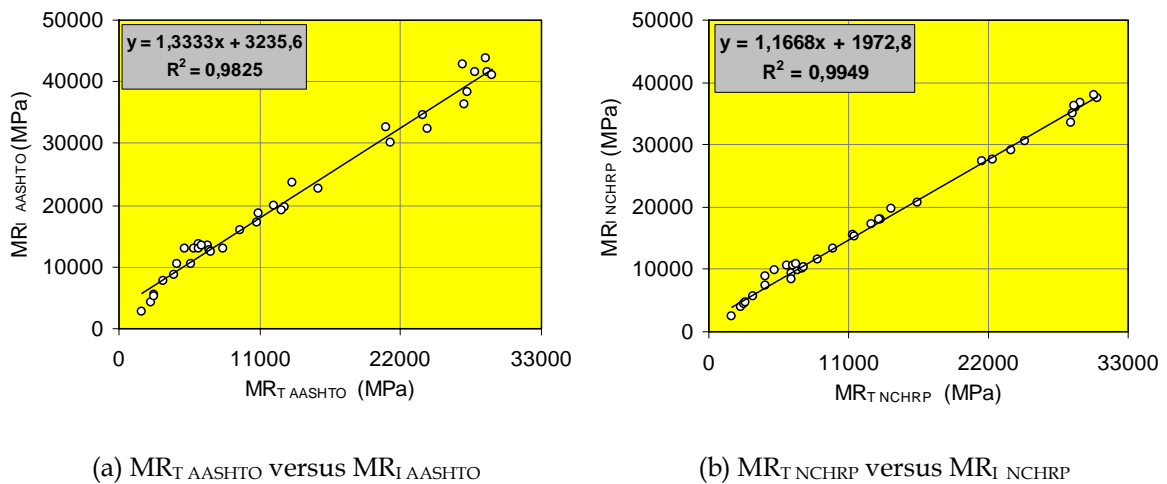
**Figura 4.15:** Relação entre os MR total e instantâneo calculados pela AASHTO e pela NCHRP

Quanto ao comportamento de  $MR_{T \text{ AASHTO}}$  versus  $MR_{T \text{ NCHRP}}$ , pode-se notar que a relação entre eles apresentou uma tendência muito próxima e ajuste com coeficiente de variação próximo de 100%. Já com relação ao comportamento do módulo instantâneo observa-se uma dispersão maior na relação entre os valores  $MR_I$ . No gráfico de  $MR_{I \text{ AASHTO}}$  versus  $MR_{I \text{ NCHRP}}$ , essa relação apresentou uma tendência que implica em valores de  $MR_{I \text{ NCHRP}}$  menores.

Essas constatações já foram observadas por Ceratti (2004) e Brito (2006). As variações de valores de  $MR_{I\ NCHRP}$  devem-se aos melhores ajustes proporcionados pelas duas regressões hiperbólicas ajustadas na curva de descarregamento e repouso do ciclo de recuperação. Também a definição dos tempos ao longo desse ciclo, utilizados na delimitação dos trechos para os cálculos dos módulos total e instantâneo, auxiliou na diminuição da dispersão dos valores de MR num dado ensaio.

A fim de visualizar o comportamento dos módulos total e instantâneo calculado pelos diferentes métodos de cálculo, na Figura 4.16 são apresentados os gráficos de  $MR_{T\ AASHTO}$  versus  $MR_{I\ AASHTO}$  (a) e  $MR_{T\ NCHRP}$  versus  $MR_{I\ NCHRP}$  (b). Observando-se os módulos calculados pelo método da AASHTO nota-se que seus valores apresentam uma dispersão discretamente maior que os módulos calculados pela NCHRP.

Nessa figura também é possível notar o efeito das diferenças entre os dois métodos de cálculo nos valores de  $MR_I$  e  $MR_T$ , revelando que cada um dos métodos conduz a uma interpretação das características de recuperação instantânea do material, podendo-se dizer que, pelo método de cálculo da AASHTO, a recuperação elástica é sistematicamente menor e, conseqüentemente, conduz a valores de módulos instantâneos maiores.



**Figura 4.16:** MR total versus MR instantâneo obtidos pelo método de cálculo da AASHTO e pelo método da NCHRP

Diante da constatação da melhor qualidade dos resultados obtidos a partir do método da NCHRP e verificado que não houve distorções entre as tendências dos dois métodos em questão, optou-se pela apresentação e discussão dos dados do projeto sobre suscetibilidade térmica considerando os módulos total e instantâneo obtidos do método da NCHRP.

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores dos módulos de resiliência, total e instantâneo, para as três temperaturas, onde se pode notar que os valores dos módulos, tanto total como instantâneo, foram muito influenciados pela temperatura. No ANEXO 4 são apresentados os valores dos módulos para os dois tipos de métodos de cálculos.

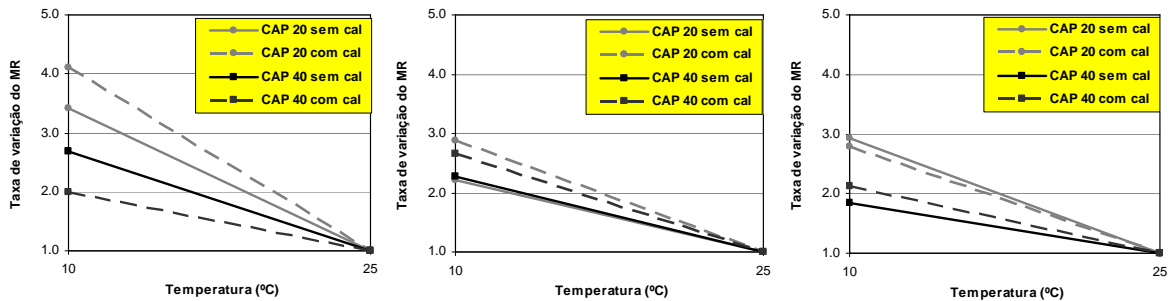
**Tabela 4.9:** Módulo de resiliência total e instantâneo de tipos variados de misturas asfálticas em três temperaturas (10, 25 e 40°C)

		Temperatura 5°C		Temperatura 25°C		Temperatura 40°C	
		MR T <sub>10</sub> (MPa)	MR I <sub>10</sub> (MPa)	MR T <sub>25</sub> (MPa)	MR I <sub>25</sub> (MPa)	MR T <sub>40</sub> (MPa)	MR I <sub>40</sub> (MPa)
CAP 20 + Basalto	s/cal	22344	27501	6558	9283	1783	2536
	c/cal	28884	36052	7023	9874	2498	3904
CAP 40 + Basalto	s/cal	30573	37513	11376	15602	4467	8973
	c/cal	28696	35081	14392	19802	5190	9750
CAP 20 + Granito	s/cal	16483	20722	7427	10161	2837	4518
	c/cal	21480	27401	7483	10327	3556	5771
CAP 40 + Granito	s/cal	29289	36820	12847	17294	6533	8326
	c/cal	30375	37945	11439	15361	6194	10667
CAP 20 + Gabro	s/cal	28764	36301	9798	13353	2876	4770
	c/cal	23801	29115	8540	11500	4499	7469
CAP 40 + Gabro	s/cal	24927	30449	13500	18049	6687	10523
	c/cal	28528	33575	13398	17938	6884	10783

Para ilustrar a forma como a temperatura influenciou a variação dos módulos de cada tipo de mistura, pensou-se em utilizar o artifício de referenciar os módulos na temperatura de 40°C, que foi a situação que levou aos menores valores observados da propriedade. Entretanto, devido à variação entre os valores dos módulos nas temperaturas a 40° e 10°C terem sido muito altas, a interpretação no intervalo intermediário, 40° a 25°, ficaria comprometida. Então se decidiu pela apresentação desses resultados tomando como referência o módulo na temperatura de 25°C.

As curvas de taxa de variação de módulo *versus* a temperatura foram construídas enfatizando duas faixas de temperatura que, convenientemente, foram chamadas de faixa de temperaturas baixas e faixa de temperatura de serviço. A faixa de temperaturas baixas abrange o intervalo entre 10 e 25°C, e a faixa de temperaturas de serviço abrange o intervalo entre 25 e 40°C, e foi chamada assim, por estar mais próxima das faixas de temperatura encontradas em serviço no país.

A figura 4.17 apresenta os gráficos de variação relativa do módulo total *versus* a temperatura para a faixa de temperaturas baixas, das misturas asfálticas testadas. Da esquerda para a direita são apresentados os gráficos das misturas com basalto, granito e gabro, respectivamente.



(a) misturas com basalto

(b) misturas com granito

(c) misturas com gabro

**Figura 4.17:** Taxa de variação de  $MR_T$  para a faixa de temperaturas baixas

A observação da taxa de variação do módulo em função da temperatura permite inferir sobre a suscetibilidade térmica da mistura, de onde se pode, a partir da inclinação da curva, visualizar qual mistura apresentou maior variação de  $MR_T$  e, conseqüentemente, foi mais suscetível à variação da temperatura.

Cada mistura comportou-se de forma específica diante da variação de temperatura, e exibiu em conseqüência disso um aumento de no mínimo duas e no máximo 4 vezes o valor da propriedade na temperatura de 25°C. Com relação aos tipos de agregados, nota-se que as misturas basálticas apresentaram variações de ordem variada dependendo do tipo de ligante e da presença ou não de aditivo. As misturas com agregados basálticos e CAP 40, apresentaram menores variações de seus módulos totais quando comparadas às com CAP 20. A adição de cal nas misturas com CAP 40 diminuiu sua suscetibilidade térmica. Quanto às misturas com CAP 20, além de terem sido mais suscetíveis à temperatura, a adição de cal nesse tipo de mistura a tornou ainda mais suscetível à temperatura, exibindo um aumento relativo de 400%.

As misturas com agregados graníticos apresentaram comportamentos mais “constantes”, e foi possível diferenciar o comportamento das misturas convencionais das com cal. Nas misturas convencionais com CAP 20 e 40 as taxas de variações do módulo foram muito próximas e menores em relação às com cal. A adição da cal provocou um aumento das variações do módulo em função da temperatura, sendo que este aumento foi maior para misturas com CAP 20.

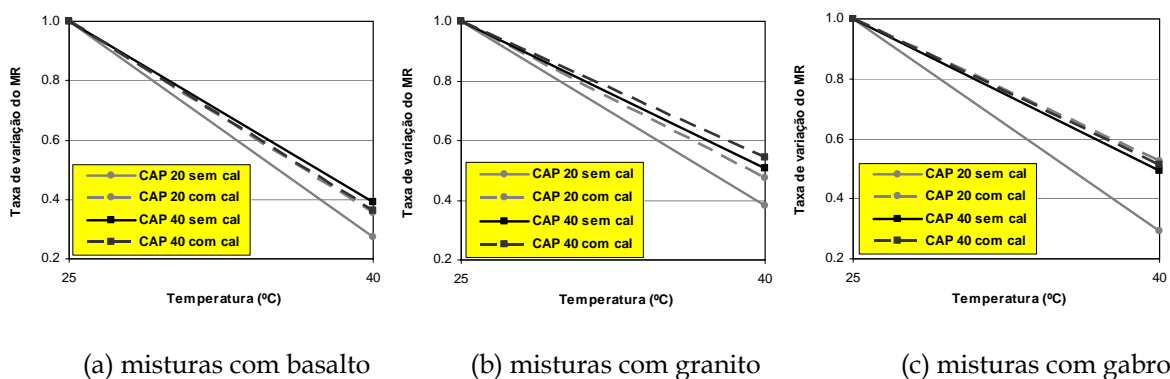


Nas misturas com agregados de gábro, as mais sensíveis à variação da temperatura foram as com CAP 20, seguidas pelas com CAP 20 e cal. Nas misturas com CAP 40, além de apresentarem taxas de variações relativas menores, a cal atuou aumentando sua sensibilidade, portanto, o inverso do comportamento observado nas misturas com CAP 20.

A suscetibilidade das misturas asfálticas observada a partir da taxa de variação relativa dos módulos totais na temperatura de 25°C também foi feita para os módulos instantâneos, e resultaram em tendências similares de comportamento, entretanto com variações discretamente menores que as encontradas a partir do módulo total.

De forma similar a que foi apresentada para a faixa de temperaturas baixas, na figura 4.18 são mostrados os gráficos de variação relativa dos módulos totais das variadas misturas para a faixa de temperaturas de serviço. Observando-se as curvas dos gráficos, percebe-se que em geral as misturas com CAP 20 foram mais sensíveis em consequência do aumento da temperatura, para todos os três tipos de agregados. Também se pode notar que para todas as misturas com CAP 20, a cal atuou reduzindo essa referida sensibilidade, principalmente nas misturas com agregados basálticos e gábricos.

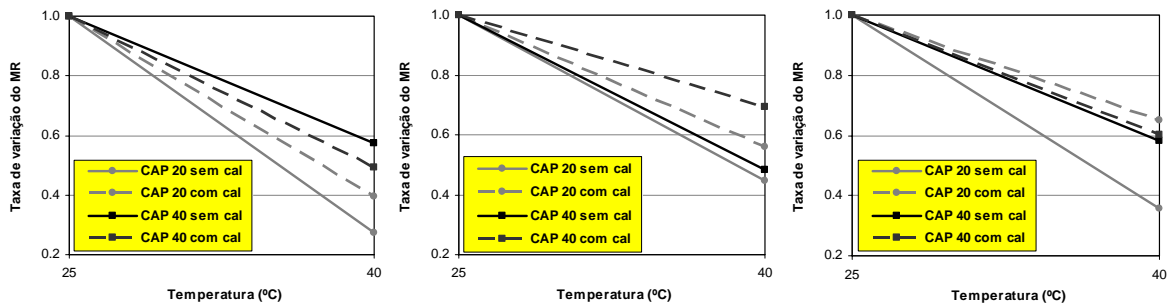
De forma geral as misturas com CAP 40 apresentaram menores variações do módulo total em função da variação de temperatura, o que, intuitivamente, era esperado desse tipo de asfalto, que dentre outras características, é mais viscoso e mais indicado para aplicações em temperaturas mais altas. Em geral a taxa de variação do módulo das misturas com esse tipo de ligante foi bastante pequena, até mesmo em misturas com cal não há tendência de variação, ficando muito próxima às misturas sem cal, sugerindo que nesses níveis de temperaturas a cal não teria tanta influência no comportamento resiliente dessas misturas.



**Figura 4.18:** Taxa de variação de  $MR_T$  para faixa de temperaturas de serviço

A Figura 4.19 mostra o mesmo tipo de gráfico apresentado para as variações do módulo total (Figura 4.18) para o módulo instantâneo, de onde pode se notar que o aumento nesses níveis

de temperatura tem um efeito maior na recuperação elástica das misturas. A partir da análise dessa Figura outro tipo de resposta sobre o comportamento das variadas misturas pode ser obtido.



(a) misturas com basalto

(b) misturas com granito

(c) misturas com gabro

**Figura 4.19:** Taxa de variação de  $MR_I$  para faixa de temperaturas de serviço

Para auxiliar a interpretação desses gráficos, a Tabela 4.10 mostra um esquema da variação do módulo instantâneo para cada tipo de mistura testado. Essa tabela foi preenchida utilizando um símbolo para destacar a proporção da redução do módulo instantâneo em função da temperatura para as misturas com basalto, granito e gabro; o número de sinais que aparecem nas células dessa tabela indica a maior ou menor variação de  $MR_I$  em função do aumento da temperatura apresentado para um grupo de misturas com o mesmo tipo de agregado.

**Tabela 4.10:** Níveis de redução de  $MR_I$  para faixa de temperaturas de serviço

	Basalto	Granito	Gabro
CAP 20 sem cal	----	----	----
CAP 20 com cal	---	--	-
CAP 40 sem cal	-	---	---
CAP 40 com cal	--	-	--

Da Tabela 4.10 pode-se concluir que todas as misturas com CAP 20 testadas apresentaram maior perda da capacidade de recuperação elástica em função do aumento da temperatura (25 a 40°C), e que, dependendo do tipo de agregado que compôs a mistura, a cal promoveu o aumento em diferentes graus dessa propriedade.

Nas misturas com CAP 40, a diminuição de  $MR_I$  parece estar mais relacionada às interações entre agregado e ligante, uma vez que não apresentaram uma tendência tão clara quanto à das misturas com CAP 20, mas, em geral, também apresentaram reduções menores da recuperação elástica com a adição de cal, exceto para as misturas com basalto e CAP 40.

É interessante notar que as misturas convencionais compostas com agregados graníticos sempre apresentaram perdas maiores de  $MR_I$  que as misturas com cal, sugerindo como uma das possíveis explicações, que a cal atuasse enrijecendo o *mástique*. Esse comportamento também é observado para as misturas com agregados de gábro, principalmente para o CAP 20; já para as misturas com CAP 40, a amplitude dessa variação é menor. O suposto enrijecimento do *mástique* pode ser considerado um efeito positivo, principalmente se esse não for um sinal de algum processo oxidativo da mistura em consequência da presença da cal, entretanto, esse é um fator de difícil comprovação à luz dos métodos de observação selecionados por esta pesquisa.

#### 4.5.2. Considerações sobre outros parâmetros de rigidez das misturas asfálticas

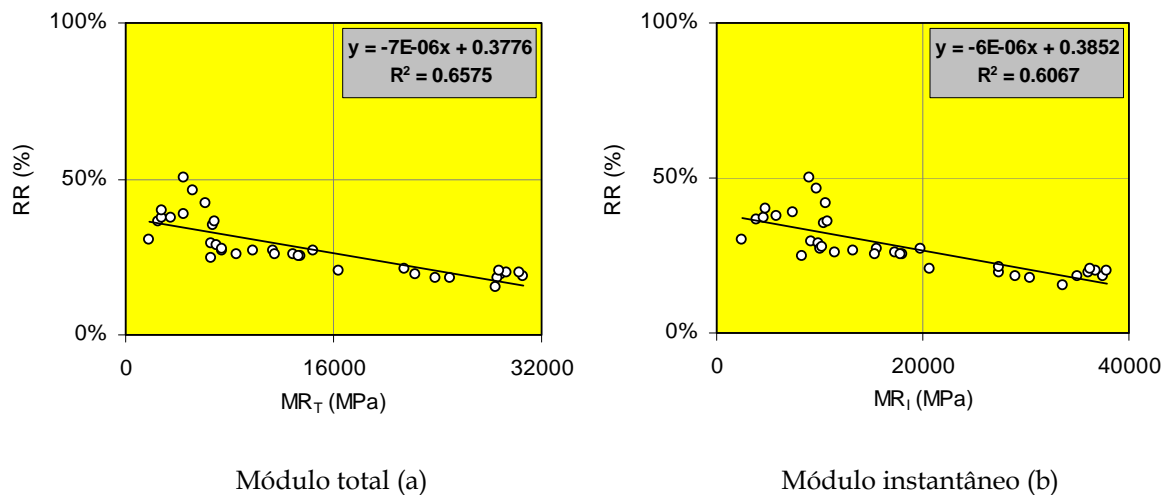
Em decorrência da execução e observação de muitos ensaios de módulo de resiliência, foram observados comportamentos diferenciados de algumas misturas asfálticas, e isso motivou uma análise de um fator aqui chamado de recuperação retardada. A recuperação retardada (RR) expressa a porção da recuperação do ciclo de repouso, no qual se encontra mobilizada a recuperação visco-elástica. Para observá-la, na Tabela 4.11 são mostradas as RR das misturas asfálticas nas três diferentes temperaturas (10, 25 e 40°C).

**Tabela 4.11:** Recuperação retardada das misturas asfálticas em três temperaturas

		RR <sub>10</sub>	RR <sub>25</sub>	RR <sub>40</sub>
CAP 20 + Basalto	s/cal	19%	29%	30%
	c/cal	19%	29%	36%
CAP 40 + Basalto	s/cal	18%	27%	50%
	c/cal	18%	27%	46%
CAP 20 + Granito	s/cal	20%	27%	37%
	c/cal	21%	28%	38%
CAP 40 + Granito	s/cal	20%	26%	25%
	c/cal	20%	26%	42%
CAP 20 + Gábro	s/cal	21%	27%	40%
	c/cal	18%	26%	39%
CAP 40 + Gábro	s/cal	18%	25%	35%
	c/cal	15%	25%	36%

A variação desse parâmetro pode ser visualizada em diferentes temperaturas; na Tabela 4.11, nota-se que nas temperaturas baixas a recuperação retardada apresentou um valor que variou de 15% a 21%; para a temperatura de 25°C, RR variou de 25% a 29%; e para a temperatura de 40°C a variação de RR foi de 25% a 50%.

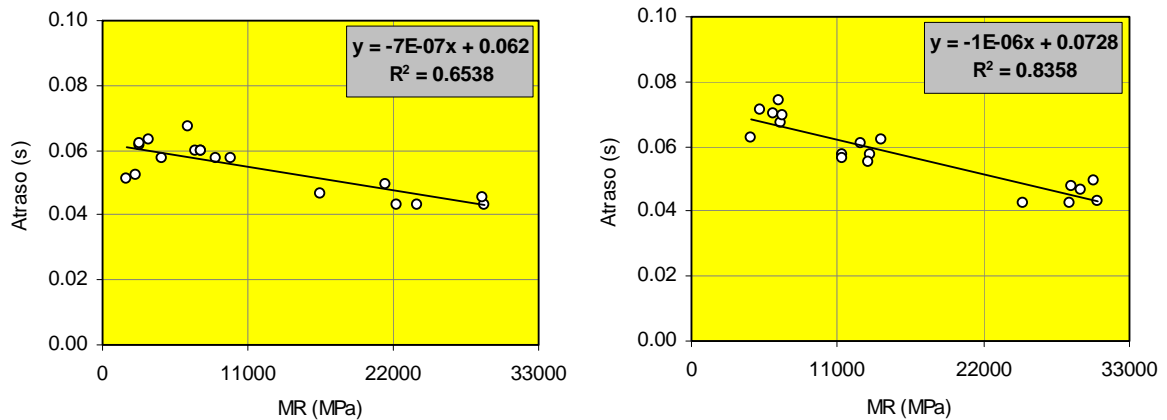
A título de exemplo, a Figura 4.20 mostra a variação da recuperação retardada em função do módulo total (a) e do módulo instantâneo (b) das misturas testadas. Nessa figura se pode observar que há uma tendência de aumento da resposta viscoelástica das misturas na medida em que a sua rigidez diminui.



**Figura 4.20:** Comportamento da recuperação retardada em função de  $MR_T$  e de  $MR_I$

As regressões apresentaram ajustes de boa qualidade, sobretudo se considerado que para a concepção desses gráficos não houve seleção de materiais com características semelhantes, neles se encontram os valores dos módulos e das RR para misturas com CAP 20, CAP 40 e das misturas com cal. Por isso vale destacar que a condição que levou a valores de módulos da ordem de 30000 MPa está vinculada a ensaios a baixas temperaturas, nesse caso há que se esperar que a recuperação da mistura asfáltica apresente um comportamento mais elástico. E, similarmente, o aumento da parcela visco-elástico das misturas está relacionado a temperaturas mais altas (40°C).

O outro parâmetro avaliado a partir dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência foi o atraso, que foi obtido a partir da diferença de tempo registrado entre o ponto de máximo valor de carga e o tempo no ponto de deslocamento máximo. Esse parâmetro também se relaciona indiretamente com a visco-elasticidade do material durante o carregamento. Para ilustrar o comportamento das misturas asfálticas testadas com relação ao atraso, a Figura 4.21 mostra a variação do atraso em função do módulo total das misturas com CAP 20 (a) e das misturas com CAP 40 (b); maiores detalhes sobre os valores dos atrasos podem ser encontrados no Anexo 3.



Misturas com CAP 20 (a)

Misturas com CAP 40 (b)

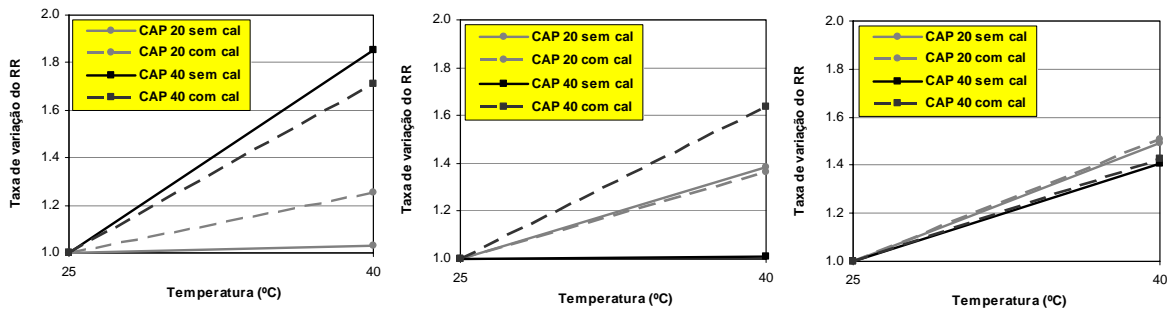
**Figura 4.21:** Comportamento do atraso em função de  $MR_T$  e de  $MR_I$ 

Da Figura 4.21 pode-se observar um aumento do atraso na medida em que as misturas se tornam menos rígidas (devido ao aumento da temperatura); nota-se ainda que para as misturas com CAP 20, a variação dos valores dos atrasos se dá dentro do intervalo entre 0,04 e 0,06 segundos. Já nas misturas com CAP 40 esse atraso varia num intervalo maior, entre 0,04 e 0,07 segundos, mostrando que nas misturas com CAP 40 a mobilização da carga requer um tempo maior que nas misturas com CAP 20, quando se tratam de temperaturas mais altas; considerando ainda que o atraso é obtido na porção de carregamento, entende-se intuitivamente que as misturas que deformam mais lentamente têm menor propensão à deformação permanente.

#### 4.5.3. Considerações sobre a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas e seu comportamento após o condicionamento

A apreciação do comportamento das misturas asfálticas após o condicionamento, relacionando-o com as suas características de suscetibilidade térmica, tentou responder a questão: Misturas mais suscetíveis à temperatura apresentam maiores perdas de propriedade frente ao condicionamento?

Para isso foram observados os comportamentos de RR e das perdas de MR apresentadas pelas misturas. Na Figura 4.22 são apresentados os gráficos de RR *versus* a temperatura; esse gráfico tem o mesmo formato dos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, ou seja, os valores de RR são referenciados na temperatura de 25°C.



(a) Misturas com basalto

(b) Misturas com granito

(c) Misturas com gabro

**Figura 4.22:** Comportamento da RR na faixa de temperatura de serviço

De forma similar ao que foi feito para a variação  $MR_I$  devido ao aumento da temperatura, a Tabela 4.12 apresenta uma esquema que ilustra a intensidade das variações de RR devido ao aumento da temperatura. Ressalta-se que o intervalo de temperatura avaliado foi a faixa chamada de temperaturas de serviço, primeiramente porque sob baixas temperaturas as misturas exibiram variações de pequena intensidade e, em segundo lugar, porque se trata de um intervalo de temperaturas inserido no intervalo de temperatura do condicionamento da ASTM.

Da Tabela 4.12 observa-se que nas misturas com basalto, o aumento da recuperação retardada em função do aumento da temperatura foi maior para as misturas com CAP 40 e CAP 40 com cal; nas misturas com CAP 20, a cal aumentou a RR em função do aumento da temperatura. Em geral, o CAP 20 apresentou menor suscetibilidade ao aumento da recuperação retardada que o CAP 40. As misturas com gabro apresentaram comportamento oposto ao das misturas com basalto. As misturas com granito sem cal apresentaram-se mais sensíveis à temperatura que as misturas com cal. Os comportamentos observados não permitem concluir nenhuma tendência geral, somente em função dos componentes da mistura, sendo assim, uma explicação razoável pode estar relacionada às interações entre ligante, agregado e cal.

**Tabela 4.12:** Variação de RR para faixa de temperaturas de serviço

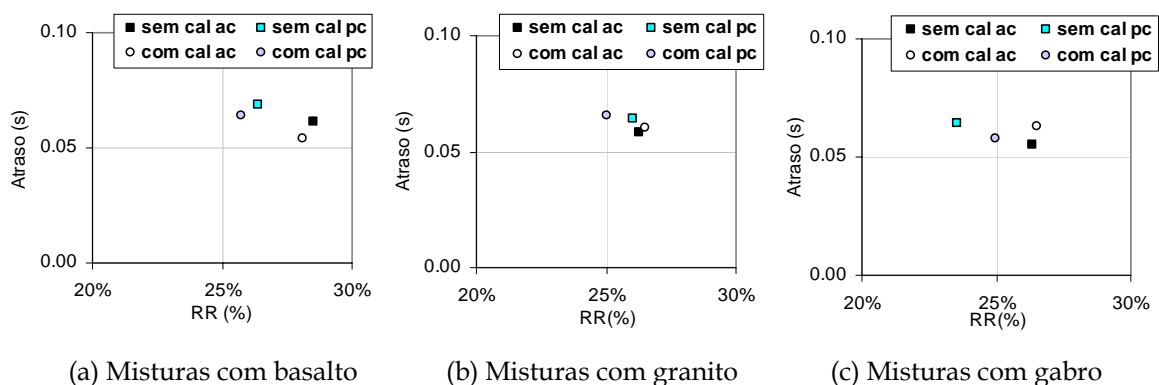
	Basalto	Granito	Gabro
CAP 20 sem cal	+	+++	++++
CAP 20 com cal	++	++	+++
CAP 40 sem cal	+++	++++	++
CAP 40 com cal	++++	+	+

Esses tipos de misturas foram avaliados quanto ao dano por umidade pelo procedimento da ASTM D 4867. Quando observada a suscetibilidade térmica das misturas, representadas pela variação de RR, e suas RMR, notou-se que as misturas que apresentaram maior variação de RR devido ao aumento da temperatura, levando a altos valores de RR, apresentaram maiores retenções do módulo de resiliência, indicando que misturas com comportamentos de recuperação viscosa mais alta podem sofrer menos com a ação da água e do condicionamento.

#### 4.5.4. Comportamento dos parâmetros de rigidez após o condicionamento térmico da ASTM D 4867

Devido aos comportamentos das misturas asfálticas com relação aos parâmetros de rigidez, eles também foram testados como indicadores de mudanças nas misturas asfálticas após o condicionamento térmico. Para isso, foram tomados os valores de RR e de atraso de misturas preparadas pelos métodos ASTM e observado como o condicionamento atuou nas misturas, isto é, que tipo de mudanças o condicionamento causou nos parâmetros de rigidez dessas misturas.

A Figura 4.23 mostra os gráficos de atraso *versus* a recuperação retardada de misturas convencionais e com cal com CAP 20, preparadas pelo procedimento da ASTM e compostas com os três tipos de agregados; a partir desses gráficos tentou-se mostrar se houve alguma variação dos parâmetros de rigidez, obtidos do ensaio de módulo de resiliência, decorrente do condicionamento. Na legenda desses gráficos são usadas de forma abreviada as condições antes do condicionamento (ac) e após o condicionamento (pc).



**Figura 4.23:** Comportamento da RR e do atraso antes e depois do condicionamento

Nesses gráficos, em abscissas foi utilizado para a escala o intervalo de RR observado para dados de MR obtidos a 25°C e no eixo das ordenadas foi considerado o período de carregamento do ensaio de módulo de resiliência.

Considerando as misturas com agregados basálticos, nota-se que após o condicionamento, ambas as misturas (sem e com cal) apresentaram alguma redução da recuperação viscosa. Entretanto, apresentaram maiores atrasos, sendo que as misturas com cal apresentam menores valores dos parâmetros de rigidez quando comparadas com as sem cal.

Nas misturas com agregados graníticos ocorreu alteração desses parâmetros devido ao condicionamento nas misturas com cal, aumentando o atraso e reduzindo a recuperação retardada, o que pode ser traduzido como um aumento da recuperação elástica do material.

As misturas com gabro, em geral, apresentaram redução de RR, mas nas com cal a tendência observada foi que houve alguma redução do atraso também, indicando que essas misturas, após o condicionamento, apresentaram-se mais elásticas, tanto na resposta ao carregamento quanto na recuperação.

Com o intuito de avaliar o reflexo das pequenas mudanças nos parâmetros de rigidez e suas relações com o comportamento das misturas após o condicionamento, foram observados corpos-de-prova testados nos três projetos; para cada grupo foi construído um gráfico similar ao da Figura 4.23 e os resultados se encontram reunidos no ANEXO 4. Observando-se o comportamento de cada tipo de mistura (Marshall, ASTM e AASHTO) quanto aos parâmetros RR e atraso e quanto às RMR, observou que:

- a) As misturas sem condicionamento apresentaram-se inseridas no intervalo definido por  $25\% < RR < 30\%$  e  $0.05s < \text{atraso} < 0.1s$  (mas em média concentradas em 0.06s, como ilustra 4.21 a);
- b) As misturas que apresentaram aumento do módulo de resiliência devido ao condicionamento migram para o intervalo  $20\% < RR < 25\%$  e  $0.05s < \text{atraso} < 0.1s$  (como mostra a Figura 4.21 c).

O condicionamento das misturas, seja ASTM ou AASHTO, alia dois elementos danosos (água e temperatura) em seus procedimentos, e é possível que ao se avaliar esses efeitos através de uma propriedade que revela a capacidade última da mistura asfáltica não sejam detectados danos nessa propriedade. Entretanto, é importante ressaltar que a ação sempre danosa da água aliada a altas temperaturas compromete a integridade do material, que em serviço é solicitado por carregamentos em níveis muito menores que a sua resistência última, sendo assim, considerando o que foi observado nos itens a) e b), pode-se depreender que o



ensaio módulo de resiliência além de detectar mudanças na propriedade, permite entender a forma como elas ocorrem, e isso pode auxiliar no entendimento do processo evolutivo da perda de adesão pela ação da água.

#### 4.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os resultados de resistência à tração e módulo de resiliência foram testados estatisticamente com base na análise da variância (ANOVA). Este procedimento foi realizado com o uso do *software MiniTab* Versão 14, que foi também utilizado para o planejamento do experimento. O tratamento estatístico dos dados foi realizado para os três programas experimentais e para o projeto complementar, contemplando duas fases desta pesquisa:

- Fase 1: Análise do comportamento das misturas asfálticas antes do condicionamento;
- Fase 2: Análise do comportamento das misturas asfálticas após o condicionamento.

Na Fase 1, os resultados de RT e MR foram analisados a fim de se observar o comportamento das misturas em função das variáveis selecionadas em cada projeto; essa análise poderia ser realizada para no mínimo seis propriedades (respostas), isto é, para MR e RT nas condições antes de depois do condicionamento, para os três projetos. Oportunamente, valores de módulos totais e instantâneos calculados pelas duas normas e os parâmetros de rigidez também foram tratados.

Este procedimento, além de ratificar as tendências observadas, permitiu a modelagem dos comportamentos que as misturas asfálticas testadas apresentaram para as condições de controle e condicionadas. Como este trabalho testou a possibilidade de avaliar a adesão e os danos por umidade à luz de duas propriedades convencionais e dois parâmetros relacionados, há um grande número de modelos para previsão de comportamento que podem ser criados. Entretanto, para exemplificar as modelagens, reservou-se a apresentação de dois modelos, sendo um para o  $MR_{T\ NCHRP}$  e outro para a RT, cujas variáveis consideradas foram somente os fatores influentes, portanto, sem interações de nenhuma ordem; com a finalidade de preservar a simplicidade dos modelos.

Por se tratarem de modelos simples, baseados em variáveis qualitativas, e de resultados que apresentam erros experimentais intrínsecos, os coeficientes de regressão obtidos, iguais a 74,72% para  $MR_{T\ NCHRP}$  e a 77,09% para RT podem ser considerados de boa qualidade. Para o mesmo modelo com  $MR_{T\ NCHRP}$ , a consideração de interações de segunda ordem entre os fatores, por exemplo, levou a um ajuste de 85%, contudo são modelos mais complicados. A título de exemplo, na Figura 4.24, são mostrados os efeitos dos fatores influentes na variável de resposta, que nesse caso foi o  $MR_{T\ NCHRP}$ , e na Figura 4.25 o efeito das interações entre os fatores.

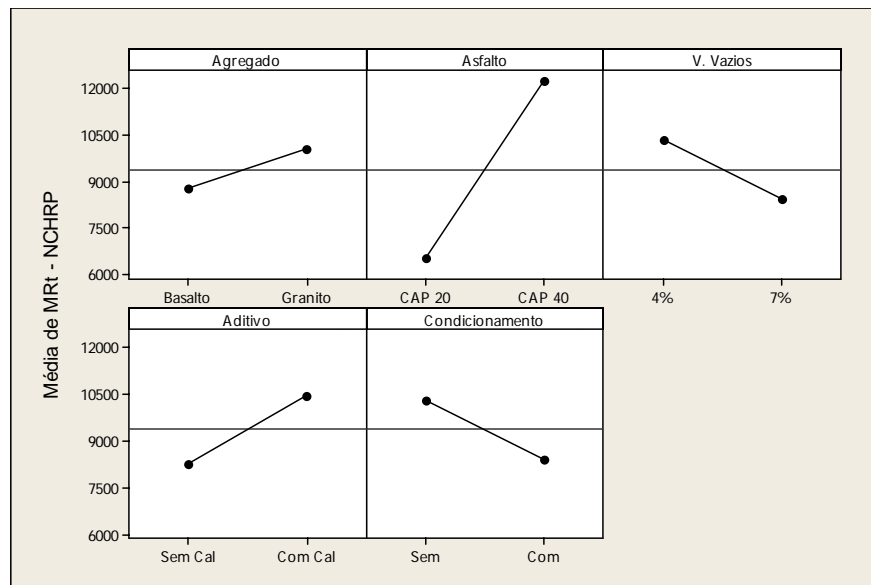


Figura 4.24: Efeito dos fatores influentes em  $MR_{T\ NCHRP}$

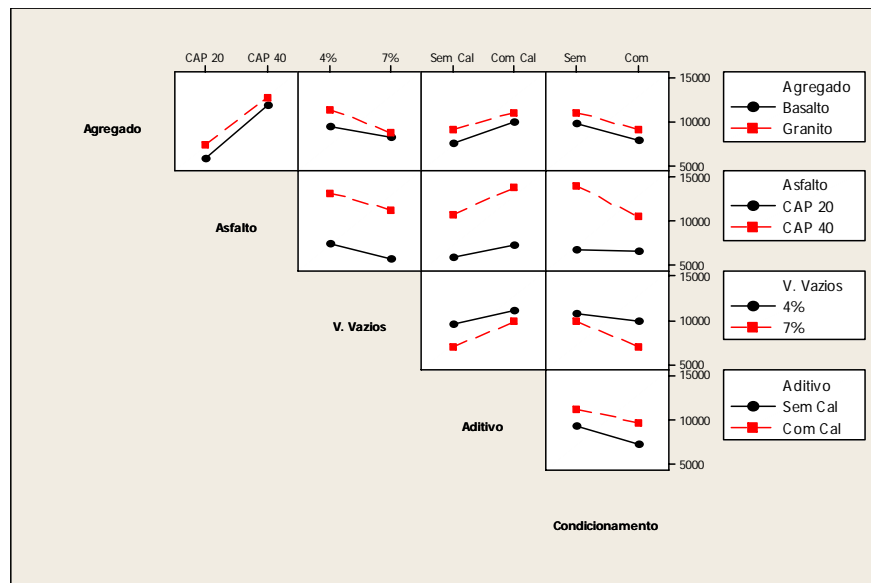


Figura 4.25: Efeito das interações para  $MR_{T\ NCHRP}$

Quanto aos modelos apresentados, foram realizados testes para verificar a distribuição normal dos resíduos, a homogeneidade da variância, e a significância das interações e as dos coeficientes do modelo. Cabe esclarecer que apesar do grande número de modelos que poderiam ser criados, nem todos satisfazem essas condições mencionadas. Os modelos apresentados dizem respeito ao projeto que considerou os seguintes fatores: dois tipos de agregados, dois tipos de ligante, dois níveis de volume de vazios e a adição ou não da cal.

A expressão do modelo de previsão para  $MR_T$  NCHRP é apresentada a seguir:

$$MR_T = 9392,4 - 641(A) - 2863(B) + 950.4(C) - 1088.3(D) + 951.6(E) \quad (4.1)$$

Onde:

A é o tipo de agregado, que varia nos níveis basalto = 1 ou granito = -1;

B é o tipo de ligante, que varia nos níveis CAP 20 = 1 ou CAP 40 = -1;

C é o volume de vazios, que varia nos níveis 4% = 1 ou 7% = -1;

D é a presença de aditivo, que varia nos níveis sem cal = 1 ou com cal = -1;

E é o fator condicionamento, que varia nos níveis sem condicionamento = 1 ou condicionado = -1.

O modelo criado para a resistência à tração é representado pela expressão a seguir:

$$RT = 1,88509 + 0.17818(A) - 0,37422(B) + 0,15866(C) - 0.09991(D) + 0,11072(E) \quad (4.2)$$

Onde:

A é o tipo de agregado, que varia nos níveis basalto = 1 ou granito = -1;

B é o tipo de ligante, que varia nos níveis CAP 20 = 1 ou CAP 40 = -1;

C é o volume de vazios, que varia nos níveis 4% = 1 ou 7% = -1;

D é a presença de aditivo, que varia nos níveis sem cal = 1 ou com cal = -1;

E é o fator condicionamento, que varia nos níveis sem condicionamento = 1 ou condicionado = -1.

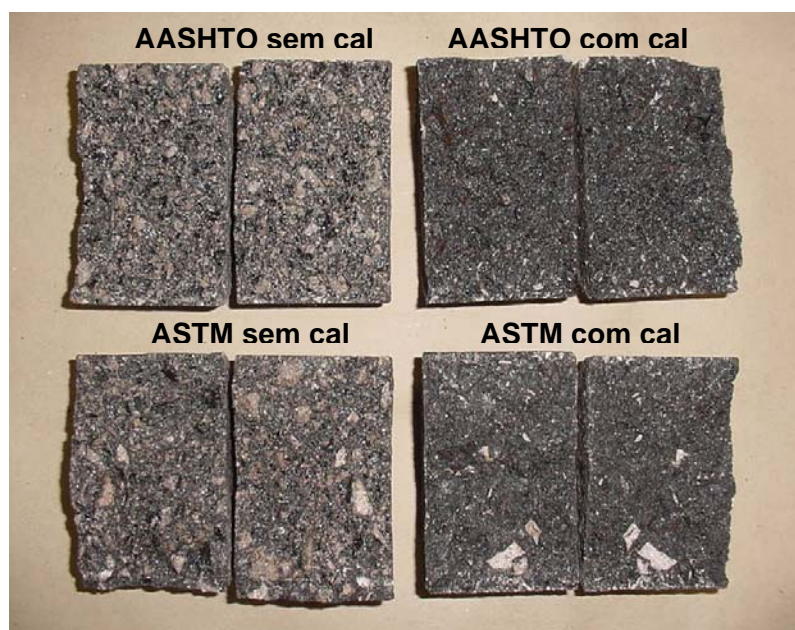
Ainda a título de exemplo, a consideração de interações de segunda ordem dos fatores para a produção do modelo para o  $MR_T$  NCHRP levou a um coeficiente de regressão de 85%, que representa um ajuste de melhor qualidade que, contudo, torna a aplicação do modelo muito mais complicada devido à grande quantidade de coeficientes envolvidos.

#### 4.7. OBSERVAÇÕES VISUAIS

A observação visual dos corpos-de-prova após sua ruptura por tração é parte dos procedimentos das normas da ASTM e da AASHTO, por isso neste trabalho procedeu-se o registro fotográfico da grande maioria dos corpos-de-prova ensaiados. Essas fotografias tornaram-se um indicador dos danos provocados pela ação conjunta da saturação e do condicionamento dos corpos-de-prova, uma vez que, para alguns casos, é possível identificar visualmente esses danos.

As planilhas relatório foram compiladas no Anexo 1. Conforme a disponibilidade, essas planilhas apresentam fotografias dos corpos-de-prova dos grupos de controle (G1) e dos grupos de corpos-de-provas condicionados (G2); nelas constam também os relatos sobre a condição final dos corpos-de-prova condicionados, abordando a ocorrência de descolamento e de ruptura de agregados.

O registro fotográfico mostrou-se uma ferramenta muito eficiente na detecção dos tipos danos. Como exemplo, na Figura 4.26 são mostrados, num mesmo registro, os corpos-de-prova cilíndricos, rompidos ao longo de um plano diametral, compostos por granito, CAP 20, sem e com cal que foram ensaiados pela ASTM e pela AASHTO. A parte de cima da figura mostra dois corpos-de-prova que foram preparados e avaliados pelo procedimento da AASHTO; logo abaixo aparecem os corpos-de-prova preparados e avaliados pelo procedimento da ASTM. A diferenciação é feita pela comparação entre resistência à tração dos corpos de prova do grupo de controle e condicionados.



**Figura 4.26:** Corpos-de-prova de granito após condicionamento pela AASHTO e ASTM

Observando-se os corpos-de-prova das misturas sem cal, apesar da mistura ASTM ter sido considerada não suscetível aos danos por umidade, nota-se que o seu aspecto é similar ao da mistura AASHTO, principalmente quanto à exposição de agregados, portanto relacionado à ruptura adesiva. Alguma diferenciação pode ser feita quanto à ocorrência de ruptura de agregados, que é um pouco maior que do corpo-de-prova da AASHTO.

Baseado nos dados de resistência à tração e de módulo de resiliência, notou-se que antes do condicionamento as misturas ASTM apresentaram, de forma geral, maiores valores em ambas as propriedades, e após o condicionamento, as perdas apresentadas por esse tipo de mistura foram menores.

Citando o exemplo das misturas com CAP 20 sem cal, ao mudar a forma de preparo de ASTM para Marshall, a mistura passou a exibir perdas de propriedades suficientes para ser considerada suscetível aos danos por umidade. Assim, a “susceptibilidade” apresentada por esses dois tipos de misturas está mais relacionada ao tipo de preparo que ao condicionamento. De alguma forma o procedimento de preparo ASTM propicia alterações que aumentam a resistência e a rigidez das misturas.

Por serem misturas com granito -agregados reconhecidos pela má adesividade que desenvolvem com o asfalto- ficou evidente visualmente que a mistura ASTM sem cal apresentou susceptibilidade à umidade, ainda que não tenha sido detectado a contento pela relação da propriedade. Se fosse considerada a taxa mínima de RRT=80%, a mesma tendência da AASHTO seria confirmada também para as misturas ASTM.

Essas observações também podem ser feitas nas misturas graníticas com cal, além da diferença clara quando comparada às misturas sem cal de ambos os processos de preparo, os ganhos de resistência e rigidez apresentados pela mistura ASTM propiciaram a ruptura de agregados graúdos ao longo do plano de ruptura do corpo-de-prova, o que ocorreu em menor intensidade nas misturas AASHTO; nesse tipo de mistura há exposição de agregados cobertos por uma fina película de ligante que torna a sua coloração rósea mais escura, tendendo para um vermelho escuro, indicando que houve uma fragilidade maior nessas ligações.

Na falta de limites que compatibilizem essas normas, o que tornaria mais ágil os procedimentos experimentais, uma avaliação de propriedade aliada a uma análise visual mais rigorosa pode ser a solução para assegurar os diagnósticos a partir desses ensaios. As observações visuais, ainda que adequadas em alguns casos, podem deturpar o significado de

um resultado de ensaio em função de sua subjetividade. Um sistema digital de observação, baseado em interpretações de fotografias de alta resolução com um refinamento que permitisse, por exemplo, o levantamento da quantidade de área de agregado exposta devido ao descolamento e à ruptura, favoreceria ao entendimento das parcelas de perda de adesão e de coesão de forma mais precisa e objetiva.

## 4.8. COMENTÁRIOS FINAIS

### 4.8.1. Comportamento de misturas asfálticas

Nesse item são expostas, resumidamente, as principais observações levantadas a partir dos resultados dos projetos que integram esta pesquisa, além de conter um apanhado sobre os projetos suplementares e suas conclusões.

Inicialmente, um esquema ilustrado foi feito a fim de resumir os comportamentos das variadas misturas testadas antes e depois do condicionamento. O quadro foi concebido para tornar mais ágil a comparação dos diferentes comportamentos e é apresentado na Figura 4.25.

Ao longo das linhas do quadro, os sinais (+), referentes às duas propriedades avaliadas, indicam qual mistura apresentou maior propriedade original, comparado aos outros agregados. Por exemplo, na linha 1 da tabela encontra-se a mistura CAP 20, sem cal preparadas conforme o método Marshall; na coluna de resistência à tração (RT) encontra-se o sinal (+) para basalto, (++) para granito e (+++) para gabro. Isso significa que, comparativamente, as misturas asfálticas com gabro apresentaram maior resistência, seguidas pelas misturas com granito e basalto, respectivamente. Esse tipo de referência utilizado nas linhas segue sucessivamente para RT e MR das variadas misturas testadas.

As setas encontradas nas colunas de RRT e RMR, assim como na linha de “efeito da cal” indicam o comportamento das misturas devido ao condicionamento e ao efeito da cal sobre as propriedades originais; as setas para baixo indicam perda de propriedade, setas para cima indicam ganho, e os sinais (=) significam que a variação da propriedade foi menor que 5%. Remetendo-se ao exemplo das misturas Marshall com CAP 20 (2ª linha, 1º coluna) observa-se a seta apontando para cima na linha do “efeito da cal”, isso indica que as misturas com agregados basálticos com CAP 20 e com cal exibiram RT maiores que as sem cal.

**Figura 4.25:** Quadro de resumo das propriedades antes e depois do condicionamento

	% CAP	Aditivo	Basalto+ CAP 20				Granito + CAP 20				Gabro + CAP 20			
			RT	MR	RMR	RRT	RT	MR	RMR	RRT	RT	MR	RMR	RRT
Marshall	5,5	sem cal	+	+	↓	↑	++	++	↓	↓	+++	+++	↑	↑
		Efeito da cal	↑	↑			↓	↑			↑	↑		
		com cal	++	+	↓	=	+	++	↓	↓	+++	+++	↓	↑
ASTM	5,0	sem cal							↓	↓				
		Efeito da cal					↓	↑						
ASTM	5,5	sem cal	+	+	↓	=	++	++	↑	↓	+++	+++	↓	↓
		Efeito da cal	↑	↑			↓	↓			↑	↑		
		com cal	++	++	↓	=	+	+	↑	↑	+++	+++	↓	↓
ASTM Vv=7%	5,5	sem cal	++	+	↓	=	+	++	↓	↓				
		Efeito da cal	↑	↑			↑	↑						
		com cal	++	++	↓	=	+	+	↓	↓				
ASTM	6,0	sem cal							↓	↓				
		Efeito da cal					↓	↑						
AASHTO	5,5	sem cal	+	+	↓	↑	++	++	↓	↓	+++	+++	↑	↓
		Efeito da cal	↓	↑			↓	↑			↑	↑		
		com cal	+	+	↓	=	++	++	↓	=	+++	+++	↓	=
ASTM	5,0	sem cal							↓	↓				
		Efeito da cal					↓	=						
ASTM	5,5	sem cal	++	+	↓	↓	+	++	↓	↓				
		Efeito da cal	↑	↑			↓	↑						
		com cal	++	+	=	=	+	++	↓	↓				
ASTM Vv=7%	5,5	sem cal	++	+	↓	↓	+	++	↓	↓				
		Efeito da cal	↓	↑			↓	↑						
		com cal	++	+	↓	=	+	++	↓	↑				
ASTM	6,0	sem cal							↓	↓				
		Efeito da cal					↓	↑						
		com cal						↓	↓					

### *Considerações sobre o tipo de preparo das misturas*

A resistência de uma mistura à ação da água é garantida, *a priori*, pela qualidade das ligações adesivas desenvolvidas entre agregado e asfalto. Cada tipo de agregado tem afinidades particulares com os ligantes e isso se deve à interação de muitos fatores que envolvem afinidades físico-químicas e também mecânicas.

Durante o procedimento de mistura dá-se o recobrimento dos agregados pelo ligante; esse processo é acompanhado necessariamente por altas temperaturas durante um dado período de tempo. Ao considerar três tipos de preparos de misturas asfálticas foi possível mostrar o

quanto a variação da temperatura, ou do tempo, ou de ambos, provocaram alterações nas suas propriedades.

As misturas Marshall, por serem produzidas mais rapidamente, permitem que pequenas taxas de absorção de ligante ocorram, o que pode ser bom, quando, por exemplo, estão envolvidos agregados absorventes, como o gábro, mas também pode ser ruim, porque na prática normalmente esses procedimentos envolvem tempos maiores que os laboratoriais, e assim, alguma absorção indesejada, ou mesmo, não prevista, pode ocorrer. Quando não prevista, a absorção de asfalto pelo agregado pode reduzir a espessura de película de asfalto a tal ponto que a torna mais suscetível à ação deletéria da água.

Acredita-se que ao adicionar maior quantidade de ligante a fim de satisfazer as taxas de absorção previamente determinadas, foram atingidas espessuras de películas ditas “ideais”. Então, uma explicação para as maiores resistências detectadas nas misturas ASTM baseia-se na hipótese de que durante o período de 2 horas antes da compactação em que a mistura fica exposta a altas temperaturas, alguma reação de interação entre os materiais ocorre; ou ainda, alguma oxidação do asfalto.

O tempo e a temperatura também foram responsáveis pela variação de comportamento apresentada pelas misturas AASHTO, já que nesse modo de preparo algumas misturas apresentaram resistência à tração compatível às misturas Marshall, ou mesmo menores.

### *Considerações sobre o comportamento das misturas asfálticas com cal*

No que se refere à presença da cal, notadamente as misturas asfálticas com agregados graníticos apresentaram propriedades menores do que as sem cal; já para as misturas com os outros agregados, essa redução só foi observada na condição específica de moldagem AASHTO.

Interessante ressaltar que as misturas asfálticas com cal apresentaram diminuição de rigidez, o que foi verificado a partir dos resultados de MR, com uma exceção: as misturas com CAP 20 preparadas conforme a ASTM. Os comportamentos das misturas com cal, indicaram que dependendo do tipo de preparo, o enrijecimento se dá em intensidades diferentes. Apesar dos ensaios de propriedades mecânicas possibilitarem a avaliação dessa tendência, seria precitado tentar explicá-la sem enveredar por suposições baseadas nas reações físico-químicas entre agregado, ligante e cal.



### *Observações quanto ao CAP 40 e ao CAP 40 com cal*

Ao se utilizar outro tipo de ligante, CAP 40, as misturas passaram a exibir os valores das propriedades maiores quando comparados ao CAP 20; isto foi explicado pelas diferentes viscosidades que os ligantes apresentam. Quanto à adição de cal, todas as misturas com CAP 40 apresentaram aumento de rigidez, mas, em geral, suas resistências diminuíram, exceto para as misturas com agregados basálticos com  $V_v=4\%$ . Com esse tipo de ligante, as misturas asfálticas com altos volumes de vazios foram as que mais ganharam rigidez em função da adição de cal, chegando a apresentar valores compatíveis ao de uma mistura com  $V_v=4\%$ ; entretanto, adverte-se que esse tipo de comportamento poderia supostamente ser explicado se tivesse havido algum tipo de oxidação do asfalto, por exemplo.

### *Sobre misturas com granito com diferentes teores de ligantes*

O efeito da película de asfalto obtido a partir da variação dos teores de asfalto nas misturas foi controverso para as misturas com CAP 20 e CAP 40. As com CAP 20 apresentaram comportamentos constantes de RT com o aumento do teor de asfalto: praticamente insensível. Já para o módulo de resiliência, houve tendência de redução da propriedade em função do aumento do teor de asfalto na mistura.

Nas misturas com CAP 40 a tendência observada foi de aumento de RT e MR com o aumento do teor de asfalto. Uma explicação para esse comportamento baseou-se na suposição de que se estivesse trabalhando num teor inadequado de asfalto em relação ao que é normalmente definido na dosagem Marshall; isso é possível uma vez que foram assumidos os mesmos teores das misturas com CAP 20 para as com CAP 40, por se tratarem de faixas granulométricas semelhantes e temperaturas de trabalho que levaram a viscosidades semelhantes.

#### **4.8.2. Propriedades das misturas asfálticas após o condicionamento**

Os condicionamentos utilizados nos testes para previsão dos danos por umidade utilizados nesta pesquisa conciliam a saturação a ciclos térmicos que, conjuntamente, produzem efeitos nas misturas asfálticas cujas ligações adesivas são deficientes, ou ainda, promovem algum tipo de variação nas misturas, contudo, a resistência à tração (normalizada pelos métodos)

foi, por vezes, inadequada para prever mudanças quando elas não incidiram na resistência última das misturas asfálticas.

O módulo de resiliência foi uma ferramenta útil para avaliar as variações no comportamento das misturas em consequência do condicionamento (ASTM ou AASHTO, por exemplo). Isto porque as misturas não permaneceram completamente ilesas diante da ação da água, e com esse ensaio foi possível medir as variações apresentadas pelas misturas asfálticas num mesmo corpo-de-prova, e por essa característica, reduzem-se as influências de heterogeneidade de amostras que evoluem desde a moldagem. Além disso, é um ensaio que mede variações nas respostas a ciclos dinâmicos de carregamentos, o que é muito importante, pois, sendo o MR uma propriedade fundamental das misturas asfálticas, qualquer perturbação que implique em variações no seu comportamento, via de regra, pode favorecer o aparecimento de defeitos específicos nos revestimentos asfálticos.

#### *Comportamento resiliente e de resistência à tração após o condicionamento*

Não é usual considerar que algum ganho de rigidez seja ruim para o comportamento das misturas asfálticas, uma vez que essa característica é desejável quando se trata de combater as deformações permanentes. Mas, em contrapartida, o ganho de rigidez pode culminar em propensão ao dano por fadiga.

Com relação ao MR, algumas poucas misturas asfálticas se mostraram inalteradas diante do condicionamento, com destaque para as misturas com cal, pois foram essas que apresentaram menores perdas, ou ainda ganhos de rigidez.

Ao que se observou nesta pesquisa, pode se dizer que somente as misturas com agregados graníticos sem cal apresentaram-se suscetíveis à umidade, exibindo valores de RRT inferiores a 50% para as condições *Marshall-ASTM* e *AASHTO-AASHTO*. Considerando o procedimento da *ASTM-ASTM*, misturas compostas por basaltos e gabros não se mostraram sensíveis ao efeito da água, nem em condições especiais, como quando apresentaram volumes de vazios altos (7%).

Em misturas com granito, CAP 40 e  $V_v=7\%$ , a perda de resistência observada em consequência da ação da água foi compatível com as das misturas com CAP 20, contrariando o que se encontra na literatura que diz que ligantes mais viscosos propiciam maior resistência ao descolamento da película de asfalto.

À luz dos resultados de MR, verificou-se que o condicionamento atuou de forma diferenciada para cada tipo de mistura. Nas misturas sem cal, em geral, ocorreram perdas da propriedade e essas perdas foram menores para as misturas com cal. No caso das misturas com agregados de granito há evidente ganho de MR, sugerindo que a água, ao entrar no sistema agregado-ligante-cal, favorece a reações que levam ao enrijecimento das misturas asfálticas.

Em resumo, para RT, o método da ASTM D 4867, conhecido por medir danos por umidade em curto prazo, não previu suscetibilidade das misturas, mas o MR registrou variações de comportamentos, à exceção de misturas basálticas sem cal.

O método da ASTM, aplicado às misturas asfálticas preparadas conforme o método *Marhsall*, levou a mistura com agregados graníticos e CAP 20 à perda de 40% do módulo inicial, o que a “classificaria” como suscetível ao dano por umidade.

Isso mostrou que o condicionamento foi mais efetivo nas misturas tipo *Marshall* que nas misturas produzidas seguindo o próprio método, indicando que o procedimento de mistura proposto pelo método da ASTM propicia misturas mais resistentes à ação do condicionamento. Quanto ao ensaio da AASHTO T 283, as misturas com granito sem cal apresentaram RRT da ordem de 50% e, portanto, seriam consideradas suscetíveis à umidade.

O estudo da variação do módulo de resiliência para as diferentes misturas mostrou que as com granito e CAP 20 (*ASTM-ASTM*) e as com gábro e CAP 20 (*Marshall-ASTM*) apresentaram ganhos significativos de rigidez. Nas condições *AASHTO-AASHTO* todas as misturas apresentaram perdas de 60% do módulo original, exceto a com gábro sem cal.

Tentando entender o complexo comportamento do módulo de resiliência das misturas asfálticas após o condicionamento, foi realizado um estudo que conciliou o novo método de cálculo da NCHRP, que é mais preciso, e alguns parâmetros de rigidez relacionados à viscoelasticidade das misturas que evoluíram do estudo de suscetibilidade térmica das misturas.

No estudo da suscetibilidade térmica, o uso da avaliação do módulo instantâneo foi decisivo para a visualização da variação da componente elástica diante das variações de temperatura, especialmente, nas próximas às de serviço. Esse estudo complementar permitiu a observação de que na medida em que as misturas apresentaram recuperações retardadas (RR) maiores, elas sofreram menos com a ação do condicionamento.

Ainda considerando os parâmetros de rigidez, notou-se que o condicionamento atuou na RR das misturas tornando suas respostas mais rápidas, e isso nas misturas com cal apresentou tendência mais clara do que nas misturas sem cal. Mais uma vez, esse tipo de comportamento deve ser resultado da interação agregado-ligante-cal e água e, de certa forma, pode ser visualizado através do tipo de ruptura apresentada pelos corpos-de-prova, por exemplo, nas misturas com agregados graníticos e cal que apresentaram rupturas coesivas.

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No desenvolvimento desta pesquisa foi realizada uma investigação dos efeitos de alguns fatores nos fenômenos de adesão e da sua perda à luz do comportamento mecânico de misturas asfálticas densas. Os fatores considerados preponderantes no fenômeno da adesão e da suscetibilidade à umidade foram:

- o tipo de agregado;
- o tipo de ligante;
- o teor de ligante na mistura asfáltica;
- o volume de vazios;
- o tipo de preparo de misturas asfálticas;
- o uso de aditivo.

Estes fatores foram combinados em três programas experimentais parciais, que se complementaram, com a finalidade de buscar respostas aos questionamentos que cada uma das variáveis introduziu no tocante à adesão e perda dela por ação da água. Para isso foram testadas misturas moldadas a partir da combinação dos fatores mencionados que variaram em níveis diferentes dependendo do programa no qual se inseriam. A pesquisa é formada por programas fatoriais menores, porém completos, onde cada condição experimental teve três réplicas.

Os métodos de avaliação dos danos por umidade ASTM D 4867 e AASHTO T 283 foram selecionados por se tratarem de métodos que avaliam mecanicamente os danos por umidade e, indiretamente, o fenômeno da adesão, tornando-se, por essa característica, mais objetivos que os métodos normalizados nacionalmente. A propriedade preconizada para ambos os métodos selecionados é a resistência à tração, que é medida antes e depois de um condicionamento que consiste da saturação dos corpos-de-prova e posterior “ataque” com

ciclo térmico que, no caso da ASTM, consiste da imersão em água quente, e para a AASHTO, consiste de um período de congelamento antes da imersão em água quente. Devido aos procedimentos de preparo das misturas, o método da ASTM ficou conhecido como um método para previsão da sensibilidade de misturas à ação da água em curto prazo, enquanto que o método da AASHTO, em longo prazo.

Os resultados estão relacionados à capacidade de retenção da resistência à tração que as misturas asfálticas apresentam; nesta pesquisa, adicionalmente, para todas as condições experimentais, foram realizados ensaios de módulo de resiliência, a fim de desenvolver um acompanhamento da propriedade e de sua variação buscando um refinamento que só um ensaio não destrutivo poderia proporcionar.

Além disso, esta pesquisa tentou verificar se há relação entre as características de suscetibilidade térmica e de suscetibilidade à umidade. Para isso, para o cálculo do módulo de resiliência, utilizou-se do novo método de cálculo proposto pela NCHRP. Diante das menores dispersões propiciadas por esse método de cálculo, foram determinados dois parâmetros de rigidez obtidos do ensaio de módulo de resiliência que indiretamente se relacionam com a visco-elasticidade do material.

Os resultados dos programas fatoriais foram tratados estatisticamente através de análise de variância (*ANOVA*), que permitiu a criação de modelos de previsão do comportamento de misturas asfálticas quanto ao dano por umidade; vale lembrar que somente foram apresentados modelos simples, sem interações entre as variáveis consideradas e, mesmo em análise simples, como as apresentadas, os coeficientes de regressão obtidos foram satisfatórios.

## **5.1. RESPOSTAS AOS PRIMEIROS QUESTIONAMENTOS**

Ao considerar os fatores mencionados anteriormente buscou-se entender, indiretamente, como suas características intrínsecas influenciariam na adesão e na suscetibilidade ao dano por umidade das misturas asfálticas. A partir dos resultados apresentados pôde-se constatar:

### ***a) Sobre os tipos de agregados***

As misturas com agregados de granito e com agregados de gabro apresentaram propriedades originais (RT e MR) maiores que as das misturas com agregados de basalto, mostrando que a forma cúbica dos agregados propiciou ao esqueleto pétreo maiores resistência e rigidez. É importante destacar que as misturas com agregados de gabro

apresentaram, em todos os casos, valores maiores das propriedades, seguidas pelas misturas com granito e pelas com basalto. Contudo, através dos ensaios empregados, não foi possível constatar que isso seja o efeito de melhores ligações desenvolvidas entre ligante e gabro, devido à afinidade entre seus componentes mineralógicos, ou pela maior absorção de asfalto por esse agregado, que levaria a um melhor intertravamento proporcionado pela película de asfalto.

No que se refere à adesão e à suscetibilidade aos danos por umidade, pôde-se verificar que a composição mineralógica dos agregados é fator preponderante para o desenvolvimento de ligações adesivas “duráveis”, uma vez que somente as misturas convencionais com agregados graníticos foram consideradas suscetíveis à umidade; em contrapartida, as misturas com agregados basálticos e gábricos mostraram-se mais resistentes à ação do condicionamento, fato explicado pela conhecida afinidade entre esses agregados e os CAP.

Chama-se atenção para a influência da absorção de ligante pelo agregado na adesão e à suscetibilidade aos danos por umidade, pois os resultados sugerem que algum nível de absorção pode ser benéfico diante da ação da água, uma vez que os agregados de basalto e de gabro foram os que apresentaram maiores taxas de absorção, permitindo sugerir que esse fenômeno contribui para um melhor intertravamento mecânico da película de asfalto na superfície do agregado.

Assim, na Tabela 5.1 se encontram resumidas as observações com relação ao efeito do tipo de agregado na adesão e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas.

**Tabela 5.1:** Efeito do tipo de agregado na adesão e na suscetibilidade à umidade

Característica do agregado	Propriedade Original	Propriedade após condicionamento
Composição mineralógica	<i>Não importante</i>	<i>Importante</i>
Forma	<i>Importante</i>	<i>Não importante</i>
Absorção	<i>Inconclusivo</i>	<i>Importante</i>

#### ***b) Sobre os tipos de ligantes***

A influência do tipo de ligante é um fator muito importante na propriedade original das misturas asfálticas. As misturas com CAP 40 apresentam, de maneira geral, tanto resistência à tração quanto módulo de resiliência maiores que os das misturas com CAP 20; concluindo-se que a maior consistência do CAP 40 (a 25°C) conferiu às misturas, onde foi empregado, maiores resistência à tração e rigidez.

Quanto à suscetibilidade à umidade, pôde-se notar que as misturas produzidas com CAP 40 e granito têm comportamento particular frente à ação da água, revelando que são suscetíveis

à umidade, contrariando a literatura técnica, onde se espera maior resistência ao descolamento pela água em misturas com ligantes mais viscosos. Entretanto, as misturas com CAP 40 e basalto apresentaram comportamentos similares às misturas com CAP 20, ou seja, não foram consideradas suscetíveis à umidade. Assim sendo, uma conclusão sobre a participação do papel do ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade não foi possível sem que se avalie sua interação com a natureza do agregado.

Assim, na Tabela 5.2 se encontram resumidas as observações com relação ao efeito do tipo de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas.

**Tabela 5.2:** Efeito do tipo de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade

<b>Tipo de ligante</b>	<b>Propriedade Original</b>	<b>Propriedade após condicionamento</b>
<b>Viscosidade</b>	<i>Importante</i>	<i>Inconclusivo</i>

*c) Sobre o teor de ligante (em misturas com agregados graníticos)*

O aumento do teor de ligante numa mistura asfáltica é relacionado com o aumento da espessura da película de asfalto que envolve o agregado. Com relação à propriedade original, as misturas com CAP 20 apresentaram resistência e rigidez estáveis diante do aumento do teor desse ligante. Já as misturas com CAP 40 apresentaram um ganho de resistência e alguma tendência de aumento de rigidez com o aumento do teor desse tipo de ligante. Portanto, os comportamentos são diferentes e não permitem uma conclusão segura acerca da influência do teor de ligante e, conseqüentemente, da espessura da película.

Com relação à suscetibilidade à umidade, pode-se dizer que para as misturas com os dois tipos de ligantes, há tendência clara de melhora da resistência ao descolamento pela ação da água à medida que se aumentou o teor de ligante (espessura da película), mas com alguma vantagem para as misturas com CAP 20, que apresentaram misturas suscetíveis à umidade somente para o teor de 5,0%, portanto menor que o teor de trabalho, enquanto que a mistura com CAP 40 foi considerada suscetível à umidade também na condição do teor de asfalto de 5,5% (teor de trabalho).

Assim, na Tabela 5.3 encontram-se resumidas as observações com relação ao efeito do teor de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas.

**Tabela 5.3:** Efeito do teor de ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade

<b>Aumento do teor de ligante</b>	<b>Propriedade Original</b>	<b>Propriedade após condicionamento</b>
<b>CAP 20</b>	<i>Inconclusivo</i>	<i>Importante</i>
<b>CAP 40</b>	<i>Inconclusivo</i>	<i>Importante</i>



***d) Sobre o volume de vazios das misturas***

O aumento do volume de vazios proporcionou a redução das propriedades originais (MR e RT) das misturas asfálticas com os dois tipos de CAP e para os dois tipos de agregados utilizados (basalto e granito), mas a influência do volume de vazios é particular à sua interação com o tipo de agregado empregado, pois as misturas asfálticas com agregados basálticos apresentaram-se, na maioria dos casos, mais resistentes que as misturas com agregados graníticos, entretanto um pouco menos rígidas.

A resistência à tração das misturas asfálticas com agregados basálticos permaneceu praticamente inalterada após o condicionamento, mesmo para as condições mais críticas, ou seja, com  $V_v=7\%$ . Já as misturas com agregados graníticos exibiram perda significativa da resistência à tração em resposta ao condicionamento, exceto para a mistura no teor de ligante de projeto e com  $V_v=4\%$ .

As misturas asfálticas apresentaram algum amolecimento em consequência da ação da água, exibindo, na maioria das vezes, perdas de MR, de 20% a 40%, sendo que as maiores perdas relacionam-se a misturas com  $V_v=7\%$ ; destaca-se que interações entre os ligantes e agregados podem ser responsáveis pela maior ou menor proporção dessas perdas, devido às suas particularidades.

Assim, na Tabela 5.4 se encontram resumidas as observações com relação ao efeito do volume de vazios na adesão e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas.

**Tabela 5.4:** Efeito do volume de vazios na adesão e na suscetibilidade à umidade

Volume de Vazios	Propriedade Original	Propriedade após condicionamento
4%	<i>Importante</i>	<i>Importante</i>
7%	<i>Importante</i>	<i>Importante</i>

***e) Sobre o tipo de preparo das misturas***

O procedimento de mistura do agregado com o ligante pode produzir misturas mais resistentes, mais rígidas e menos suscetíveis ao dano pela ação da água. Observando-se as propriedades originais, pode-se dizer que o procedimento que reúne exposição da mistura ao tempo e a temperatura alta produziu misturas mais resistentes, inclusive com relação à ação da água.

O procedimento de preparo de mistura que envolve algum resfriamento (AASHTO) e o mais rápido (Marshall) produziram misturas com resistência à tração menores e, as misturas com agregados de granito, foram consideradas suscetíveis ao dano por umidade quando

preparadas com estes dois métodos. Quanto ao módulo de resiliência, o condicionamento térmico provocou uma perda de rigidez das misturas, exceto as com agregados de gábro.

*e) Sobre a adição de cal nas misturas*

A substituição de 1% do filler natural por cal hidratada (tipo CH1) não imprimiu mudanças significativas nas resistências originais das misturas asfálticas, mas é evidente seu efeito como melhorador de adesividade, principalmente nas misturas com agregados graníticos. Com relação ao módulo de resiliência, a cal promoveu a manutenção, ou ainda algum enrijecimento da mistura após o condicionamento.

Assim, na Tabela 5.5 se encontram resumidas as observações com relação ao efeito da adição de cal na adesão e na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas.

**Tabela 5.5:** Efeito da adição de cal na adesão e na suscetibilidade à umidade

	Propriedade Original	Propriedade após condicionamento
Presença da cal	<i>Não importante</i>	<i>Importante</i>

## 5.2. OUTRAS CONSTATAÇÕES

*Quanto à avaliação das misturas asfálticas preparadas pelos métodos Marshall, ASTM e AASHTO, constatou-se que:*

- O método de preparo de misturas asfálticas preconizado pela *ASTM* leva a valores de resistência à tração maiores quando comparado aos outros métodos;
- Nas condições de preparo da mistura Marshall, as misturas com CAP 20 sem cal apresentaram menores valores de resistência à tração.
- Pelas condições de preparo e condicionamento da *ASTM* não foram diagnosticadas misturas asfálticas suscetíveis ao dano por umidade;
- O método de preparo de mistura da *AASHTO* classificou a mistura com CAP 20, granito, sem cal como suscetível à umidade (RRT aproximadamente de 50%);
- Quanto à mistura CAP 20, granito, sem cal preparada segundo o procedimento Marshall e condicionada segundo a *ASTM*, os resultados indicaram suscetibilidade à umidade (RRT aproximadamente de 60%);

- O condicionamento da *ASTM* foi mais efetivo para as condições de preparo de misturas Marshall, “compatibilizando” os diagnósticos de suscetibilidade das misturas preparadas e condicionadas pelo método da *AASHTO*.

*Quanto ao comportamento da resistência à tração das misturas asfálticas preparadas e condicionadas pelo método ASTM, constatou-se que:*

- Misturas com agregados de basalto e CAP 20 apresentam tendência de aumento da resistência à tração quando adicionada cal, independentemente do modo de preparo da mistura;
- Misturas com agregados graníticos e CAP 20 exibem tendência de redução da resistência à tração quando adicionado cal, independentemente do modo de preparo da mistura;
- Misturas com agregados de gábro e CAP 20, comparadas com as outras misturas testadas, apresentam maiores resistências à tração, tanto na condição sem cal quanto na com cal, independentemente do modo de preparo aplicado. Além disso, a cal atua aumentando essa propriedade;
- Variações no volume de vazios de 4% para 7% produziram efeitos de redução na resistência à tração em todas as misturas testadas, e essas reduções foram minimizadas com a adição de cal, principalmente nas misturas com agregados basálticos;
- Misturas com CAP 40 apresentam resistências à tração muito maiores que misturas com CAP 20;
- As resistências à tração das misturas com granito e CAP 20 (sem e com cal) mantiveram-se estáveis diante do aumento do teor de asfalto na mistura. E ainda, para todos os teores, as misturas com CAP 20, granito e cal os valores de RT foram menores que os valores das misturas sem cal;
- As misturas com CAP 40 exibiram aumento da RT em função do aumento do teor de asfalto. Esta constatação é inadequada e contrária os comportamentos relatados na literatura.

***Quanto ao comportamento resiliente das misturas asfálticas preparadas pelos métodos Marshall, ASTM, AASHTO, constatou-se que:***

- As misturas com gábre e CAP 20 exibiram aumento de rigidez quando a cal foi adicionada (à semelhança do que aconteceu com RT). Isso não foi observado para as misturas com os outros agregados;
- Comparadas às misturas *Marshall*, as misturas *ASTM* e *AASHTO* apresentam uma redução das taxas de enrijecimento propiciadas pela adição de cal nas misturas com agregados basálticos e graníticos com CAP 20;
- O ganho de resistência à tração das misturas asfálticas com CAP 20 nem sempre se relaciona com ao aumento do módulo de resiliência da mistura;
- Variações no volume de vazios de 4% para 7% produziram efeitos de redução no módulo de resiliência em todas as misturas com CAP 20, e essas reduções foram minimizadas com a adição de cal;
- Misturas com CAP 40 apresentam módulos de resiliência muito maiores que misturas com CAP 20;
- Misturas com granito, CAP 40 e cal, inclusive aquelas com volumes de vazios de 7%, tiveram aumento significativo da rigidez em relação às sem cal;
- O módulo de resiliência de misturas com granito e CAP 20 (com e sem cal) apresentou tendência à diminuição com o aumento do teor de asfalto. O inverso foi observado para as misturas com CAP 40 sem cal.

***Quanto aos comportamentos de retenção de propriedades das misturas asfálticas à luz dos métodos da ASTM e AASHTO***

- Nenhuma mistura preparada e condicionada conforme o procedimento ASTM foi considerada suscetível aos danos por umidade;
- As misturas sem cal com agregados graníticos são mais suscetíveis aos danos por umidade nas condições *Marshall-ASTM* e *AASHTO-AASHTO*;
- A cal promove a manutenção e/ou o aumento da resistência à tração das misturas asfálticas após o condicionamento;

- As misturas com agregados basálticos sem cal são bastante estáveis, não apresentando perdas ou ganhos significativos de RRT, tanto para o CAP 20 quanto para o CAP 40;
- As misturas com agregados basálticos com CAP 20 e com CAP 40 apresentaram tendência de perda de rigidez em função do condicionamento; com adição de cal houve uma tendência de aumento das suas capacidades de retenção;
- As misturas com granito e CAP 20, preparadas e avaliadas conforme o método da ASTM, apresentaram ganho de rigidez em consequência do condicionamento; quando a cal é adicionada, aumenta sua rigidez;
- Misturas com granito e CAP 40 sem cal com volume de vazios de 4% e 7% foram consideradas suscetíveis aos danos por umidade pelo método da ASTM; com a adição de cal essa tendência não foi observada;
- As misturas asfálticas com granito e CAP 40 foram mais sensíveis ao condicionamento que as misturas com CAP 20, tanto na resistência à tração quanto no módulo de resiliência. Com a adição de cal essas misturas passaram a exibir maiores RRT, mas o módulo indicou perdas compatíveis às misturas sem cal ;
- Misturas com granito e CAP 20 sem cal apresentaram maior retenção de resistência à tração devido ao aumento do teor de asfalto. Indiretamente, foi mostrado que o aumento da espessura da película de asfalto do tipo CAP 20 garantiu maiores retenções da propriedade original. Misturas com CAP 40 também exibiram essa tendência;
- O comportamento da RMR em função do aumento do teor de CAP 20 mostrou ponto de retenção máxima para as misturas no teor de trabalho;
- As misturas com CAP 40 e granito (com cal) apresentaram baixos valores de retenção do módulo de resiliência, mas que aumentam com o aumento do teor de asfalto de 5,0 para 6,0%.

### **5.3. ALGUMAS CONSTATAÇÕES SOBRE O PROJETO COMPLEMENTAR**

*Sobre o método de cálculo de MR*

- Os métodos de cálculo de módulo de resiliência (AASHTO e NCHRP) apresentaram resultados com tendências similares, com valores sistematicamente menores para o  $MR_I$  obtido do procedimento da NCHRP.

*Sobre a suscetibilidade das misturas asfálticas na faixa de temperatura de serviço (25 a 40°C)*

- Misturas compostas com diferentes agregados e asfaltos comportaram-se de forma particular diante da variação de temperatura e exibiram, em consequência disso, reduções de no mínimo duas e no máximo 4 vezes do valor de MR na temperatura de 25°C para 40°C;
- Para todas as misturas com CAP 20, a cal atuou reduzindo a taxa de variação do  $MR_I$ , principalmente nas misturas com agregados basálticos e gábricos;
- As misturas com agregados basálticos e com CAP 40 apresentaram menores variações de seus módulos totais em função da variação de temperatura quando comparadas às com CAP 20;
- A adição de cal nas misturas com granito e CAP 40 melhorou as suas características de suscetibilidade térmica.

*Parâmetros de Rigidez*

- Os parâmetros de rigidez apresentaram relações razoáveis com o módulo de resiliência, e indicaram reduções da recuperação retardada e do atraso para o aumento da rigidez da mistura asfáltica;
- As misturas com agregados basálticos com CAP 20 (sem cal) após o condicionamento apresentaram alguma redução da recuperação viscosa e não apresentaram alteração nos atrasos. Esse tipo de mistura com cal apresenta reduções de RR e do atraso;
- Nas misturas com agregados graníticos só ocorreu alguma redução da recuperação viscosa devido ao condicionamento nas misturas com cal;
- As misturas com gabro, em geral, apresentaram redução de RR, mas nas misturas com gabro e com cal a redução também foi detectada no atraso;

## 5.4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa e seus resultados conduzem às seguintes conjecturas:

O efeito do *tipo de agregado* pôde ser detectado na resistência à tração e no módulo de resiliência nas misturas asfálticas; no que se refere à forma do agregado verificou-se que as misturas com agregados mais cúbicos exibem maiores valores dessas propriedades que as misturas com agregado lamelar. Entretanto, na adesão e na suscetibilidade à umidade este efeito não foi verificado, uma vez que algumas misturas com agregados cúbicos apresentaram-se, segundo os métodos de ensaio utilizados, suscetíveis ao dano por umidade. Já a composição mineralógica e à absorção mostraram influência no desenvolvimento e/ou perda da adesão agregado-asfalto; isso se fez notar principalmente em misturas com agregados graníticos que, a despeito de apresentarem propriedades originais compatíveis com as de misturas com agregados de outra composição mineralógica e de outras taxas de absorção de ligante, em alguns casos, foram classificadas como suscetíveis à umidade, indicando que sua composição mineralógica (alto teor de sílica) e baixa absorção contribuem negativamente para o desenvolvimento e manutenção das ligações adesivas do asfalto em sua superfície.

A utilização de dois *tipos de ligantes* (CAP 20 e CAP 40) proporcionou observar ganhos de RT e MR em até 4 vezes para as misturas com CAP 40. Entretanto, devido a fatores não controlados, o efeito do ligante na adesão e na suscetibilidade à umidade não apresentou resultados conclusivos.

A variação do *teor de ligante* não levou a resultados conclusivos nas propriedades originais (MR e RT) das misturas asfálticas testadas, porém o aumento do teor de ligante e, conseqüentemente, da espessura da película de asfalto propiciou maiores retenções de RT e MR após o condicionamento, mostrando que misturas mais ricas em asfalto são menos sensíveis à ação danosa da água.

O aumento do *volume de vazios* (de 4% para 7%) implicou em sensível redução da resistência à tração e do módulo de resiliência. Acredita-se que a interação dos ligantes com os diferentes tipos de agregados propicia variações de intensidades diferentes nessas propriedades, pois misturas com agregados basálticos, em geral, apresentaram-se mais resistentes que as misturas com agregados graníticos. Com o condicionamento, fica clara a maior suscetibilidade ao dano por umidade das misturas mais abertas (7%), em especial as misturas com agregados graníticos, indicando, uma vez mais, que a interação do ligante com

o agregado pode ser responsável por maiores perdas de propriedade em consequência do condicionamento.

Ao avaliar misturas asfálticas produzidas a partir de *métodos de preparo* diferentes foi possível observar que o tipo de preparo da ASTM D 4867 (similar ao condicionamento de dosagem da AASHTO PP2) produziu misturas mais resistentes, mais rígidas e menos suscetíveis aos danos por umidade. Assim sendo, acredita-se que expor uma mistura a alta temperatura por um dado período de tempo pode promover mudanças nas características e nas propriedades das misturas que não sejam consequência isolada da absorção. Já os procedimentos Marshal e AASHTO T 283, de forma geral, produziram misturas menos resistentes e menos rígidas; inclusive, somente nessas condições de preparo foram diagnosticadas misturas suscetíveis ao dano por umidade, levando a concluir que a forma como a mistura é produzida pode ser preponderante na sua resistência a ação da água.

A *adição de cal* não produziu variações significativas nas propriedades das misturas asfálticas, mas sua ação como melhorador da adesividade fica evidente após a saturação e o condicionamento. Misturas asfálticas consideradas suscetíveis à umidade na condição “*sem cal*”, com a adição de cal passaram a exibir, após o condicionamento, melhora ou manutenção de suas propriedades originais.

As *mudanças nos procedimentos de cálculo de MR* de misturas asfálticas (AASHTO e NCHRP) propiciam variações nos valores de ambos os módulos (total e instantâneo), mas exibem uma mesma tendência de comportamento. Contudo, o método de cálculo da NCHRP apresenta vantagens relacionadas à redução da dispersão dos valores de módulo instantâneo.

Os *parâmetros de rigidez* (RR e atraso) conseguiram aquilatar mudanças nas respostas visco-elásticas principalmente para condições de ensaios em temperaturas diferentes, detectando variações nas relações entre rigidez e resiliência das misturas asfálticas.

A *suscetibilidade térmica* apresenta comportamentos diferentes em função do tipo de mistura asfáltica, mas, de forma geral, as misturas com CAP 40 apresentam reduções menores de MR devidas ao aumento da temperatura (de 25 para 40°C), e que a cal, em alguns casos, atua reduzindo esse tipo de variação de MR. O estudo da *influência da suscetibilidade térmica e sua relação com a suscetibilidade à umidade* das misturas asfálticas ainda que tenha exibido alguns indícios, não levou a dados conclusivos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway Transportation Officials (1999). AASHTO T 283 - *Standard Method of Test Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*, Washington, D.C.
- American Society for Testing and Materials (1988). ASTM D 4867 - *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*, Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials (1992). ASTM D 1560 - *Standard Test Method for Resistance to Deformation and Cohesion of Bituminous Mixtures by Means of Hoem Apparatus*. Philadelphia,
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). ABNT NBR 12891 - *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall.*, Rio de Janeiro.
- AGNUSDEI, J. (1975). Envelhecimento do asfalto durante a mistura. *Instituto de Pesquisas Rodoviárias*, Publicação 586/30, p.37, Rio de Janeiro.
- ASCHENBRENER, T.; MCGENNIS, R.B.; TERREL R.L (1995). Comparison of Several Moisture Susceptibility Tests to Pavements of Known Field Performance. In: *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, v.64, p. 163-194.
- BAYOMI, F.M. (1992). Development of analysis of cement-coated aggregate for asphalt mixtures. *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. Special Technical Publication STP 1147*, American Society of Materials (ASTM), p. 19-34, Meininger, R. C., editor. Philadelphia.
- BIRMAN, S. (1979). Grau de compressão do concreto asfáltico. *Instituto de Pesquisas Rodoviárias*, Publicação 668, 30p., Rio de Janeiro.
- BROWN, E.R. (1990). Density of asphalt concrete - How much is needed? *National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report No. 890-3*, p.21. Alabama.
- BRITO, L.A.T. (2006). *Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 144p. Porto Alegre.

- Centro de Estudos de Carreteras (1986). NLT 325 - *Proposta de Norma de Ensayo CANTABRO: Determinación de la perdida por desgaste de Mesclas el Empleo de La Maquina de Los Angeles*. Madri.
- CERATTI, J. A. P. (2004) Apresentação em Powerpoint, IBP.
- CHADBOURN, B.A.; SKOK, Jr., E.L.; CROW, B.L; SPINDLER, S.; NEWCOMB, D. (2000). The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements. Final Report No. 2000-13. Department of Transportation – Minnesota.
- CURTIS, C. W. (1990). A literature Review of liquid antistripping and test for measuring stripping- Relatório Técnico UIR-90-016, *Strategic Highway Research Program (SHRP)*.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER ME 78 - *Método de Ensaio. Misturas Betuminosas – Adesividade de Agregado Graúdo a Ligante Betuminoso.*, Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER ME 79 - *Método de Ensaio. Misturas Betuminosas – Adesividade de Agregado a Ligante Asfáltico*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER ME 89 - *Método de Ensaio. Avaliação de durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER ME 133 - *Agregados – Determinação do Módulo de Resiliência*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER ME 138 - *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Rio de Janeiro.
- EPPS, J. A.; LITTLE, D.N. (2001). *The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. Prepared for National Lime Association, 48p.
- FURLAN, A. P.; SANTOS, C. R. G.; GIGANTE, A. C.; FABBRI, G. T. P (2004). *Algumas considerações acerca de ensaios para avaliação do dano por umidade em mistura asfáltica densa. 35ª RAPv, Reunião Anual De Pavimentação*, Rio de Janeiro.
- FURLAN, A.P.; GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR, J.L.; FABBRI, G.T.P (2004). *Influência das características dos agregados na susceptibilidade ao dano por umidade de misturas asfálticas. 17º Encontro de Asfalto*, Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro.
- GIGANTE, A.C.; FURLAN, A.P.; IWANAGA, F.I., FABBRI, G.T.P. (2005). *Sobre o efeito da condição ambiental no enrijecimento de mistura asfáltica densa. 36ª RAPv, Reunião Anual De Pavimentação*, Curitiba.
- GOUVEIA, L.T.; FURLAN, A.P.; PARREIRA, A.B.; FERNANDES Jr, J.L.; FABBRI, G.T.P (2004). *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade. XVI ANPET, Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Florianópolis.
- GRUBBS, F. E. (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples.

Technometrics, v. 11, n<sup>o</sup>. 1, p. 1-21.

- HARMELINK, D.; ASCHENBRENER, T. (2002). In place voids monitoring of hot mix asphalt pavement. Report No. CDOT-DTD-R-2002-11, p. 35, Department of transportation - Colorado.
- HICKS, G. H. (1991). Moisture damage in asphalt concrete - NCHRP 175 - *National Cooperative Highway Research*, Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board.
- HUANG, S.C.; ROBERTSON, R.E.; BRANTHAVER, J.F. (2003a). Physico-chemical characterization of asphalt-aggregate interactions under the influence of freeze-thaw cycle. Annual Meeting, *Transportation Research Record*, p. 2-17. Washington, D.C.
- HUANG, S.C.; BRANTHAVER, J.F.; ROBERTSON, R.E. (2003b), J.F. The influence of aggregate on mixture susceptibility in terms of asphalt-aggregate interaction. In: 6<sup>th</sup> RILEM, *Performance Test and Evaluation of Bituminous Material*, p. 177-183. Zurich.
- HUNTER, E.R.; KSAIBATI, K (2002). *Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes*. Department of civil and Architectural Engineering, p. 61. University of Wyoming. Wyoming.
- ISHAI, I.; CRAUS, J. (1996). Effects of some aggregates and filler characteristics on behavior and durability of asphalt paving mixtures. *Transportation Research Record* 1530, p. 75-85, Washington, D.C.
- KANDHAL, P.S. (1994) Field and Laboratory Evaluation of Stripping in Asphalt Pavements: State of the Art Report. *Transportation Research Record* 1454 p. 36-47. Washington, D.C.
- KANDHAL, P.; RICKARDS, I. (2001). Premature failure of asphalt overlays from stripping: Cases histories. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, v. 70, p. 347-406.
- KENNEDY, T. W.; MCGENNIS, R.B.; ROBERTS, F. L. (1983). Investigation of Moisture Damage to Asphalt Concrete and the Effect on Field Performance. *Transportation Research Record* 911 p. 158-165, Washington, D.C.
- KIGGUNDU, B.M.; ROBERTS, F.L. (1988). Stripping in HMA mixtures: State-of-the- art and critical review of test method. *National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report No. 88-2*, 75p. Alabama.
- KIM, Y. R.; KHOSLA, N. P. KIM, N. (1992). Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete. *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. Special Technical Publication STP 1147*, American Society of Materials (ASTM), p. 310-328. Meininger, R. C., editor, Philadelphia.
- LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G. (2002). O efeito do filer nas características do ligante asfáltico. In: *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), p. 183-194. Natal.

- LITTLE, D. N.; EPPS, J.A. (2001). The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt, prepared for National Lime Association – The Versatile Chemical. 48p.
- LIVNEH, M.; GREENSTEIN, J. (1972). Influence of aggregate shape on engineering properties of asphalt paving mixtures. *Highway Research Record* 404, p. 42-56. Washington, D.C.
- LOTTMAN, R. P. (1978). NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete, *Transportation Research Board*, National Research Council, 24p. Washington, D.C.,.
- LOTTMAN, R. P. (1982). NCHRP Report 246: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete – Field Evaluation, *Transportation Research Board*, National Research Council, 15p. Washington, D.C.
- LOTTMAN, R. P. (1983). Procedure for Predicting Laboratory Retained Strength Cut-Off and Additive Benefit-Cost Ratios of Moisture-Damaged Asphalt Concrete. *Transportation Research Record* 911 p. 144-149. Washington, D.C.
- MAJIDZADEH, K. e BROVOLD, F. N. (1968). State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures, *Highway Research Board*, Special Report No. 98, 77p.
- MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.F.M.; CONSTANTINO, R.S. (1996). Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas. *Instituto Brasileiro de Petróleo*. Rio de Janeiro.
- MOURA, E. de (2001). *Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 122p. São Paulo.
- PAN, C.; WHITE, T.D. (1999). *Evaluation of stripping for asphalt concrete mixtures using accelerated testing methods*. *Transportation Research Record* 1630, p. 98-105, Washington, D.C.
- PARKER Jr., F.; GHARAYBEH, F. (1987). A. *Evaluation of Indirect Tensile Tests for Assessing Stripping of Alabama Asphalt Concrete*. *Transportation Research Record* 1115, p. 113-124, Washington, D.C.
- PARKER Jr., F.; GHARAYBEH, F. (1988). A. *Evaluation of Tests To Assess Stripping Potential of Asphalt Concrete Mixture*. *Transportation Research Record* 1171, p. 17-26, Washington, D.C.
- PETERSEN, J.C. (2002). Chemistry of the asphalt-aggregate interaction. In: *Moisture Damage Symposium*. Western Research Institute. Wyoming.
- SANDERS, C.A.; DUKATZ, E.L. (1992). Evaluation of percent fracture of hot mix asphalt gravels in Indiana. *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. *Special Technical Publication STP 1147*, American Society of Materials (ASTM), p. 90-103, Meininger, R. C., editor. Philadelphia.
- SEBAALY, P.E.; McCANN, M.; HITTI, E.; EPPS, J (2001). Performance of lime in hot mix

asphalt pavements. Pavements/Material Program – Department of Civil Engineering – University of Nevada, Technical Report Documentation Page, 101p. Distribution Statement: Unrestricted. Nevada.

SEBAALY, P.E.; TOHME, P.; HITTI, E.; STANSBURRY, K.; EPPS, J (2003). Asphalt concrete anti-stripping techniques. Report No. SD 99-10-F. Department of Transportation – South Dakota.

SOLAIMAINIAN, M; KENNEDY, T.W. (2002). Precision of the moisture susceptibility test method TEX-531-C: Research Report No. 4909-1, 70p. Department of Transportation – Texas.

SOSNOVSKE, D. A.; AbWABAB, Y.; BELL, C. A. (1993). Role of asphalt and aggregate in the aging of bituminous mixtures. *Transportation Research Record* 1386, p. 10-21. Washington, D.C.

SPECHT, L.P.; CERATTI, J.P.; PALUDO, I. (2002). Estudo laboratorial da adesividade e do desgaste das misturas asfálticas com asfalto borracha. In: *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), p. 195-206. Natal.

TANDON, V.; ALAM, M.M.; NAZARIAN, S.; VEMURI, N. (1998). Significance of conditioning parameters affecting distinction of moisture susceptible asphalt concrete mixture in the laboratory. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, v. 67, p. 334-348.

TAYLOR, M.A.; KHOSLA, N.P. (1983). Stripping on asphalt pavement: State of the art, *Transportation Research Record* 911, Washington, D.C.

TERREL, R.L. e Al-SWAILMI (1993). Role of Pessimum Voids concept in understanding Mixture Damage to Asphalt Concrete Mixtures. *Transportation Research Record* 1386, p. 31-37, Washington, D.C.

TUNNICLIFF, D.G.; ROOT, R.E. (1984). NCHRP Report 274: Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures, *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C.

TUNNICLIFF, D.G.; ROOT, R.E. (1995). NCHRP Report 373: Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures – Field Evaluation, *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C.

YOON, H. H.; TARRER, A. R. (1988). Effect of aggregate properties on stripping. *Transportation Research Record* 1171, p. 37-43. Washington, D.C.

## *A*NEXO 1

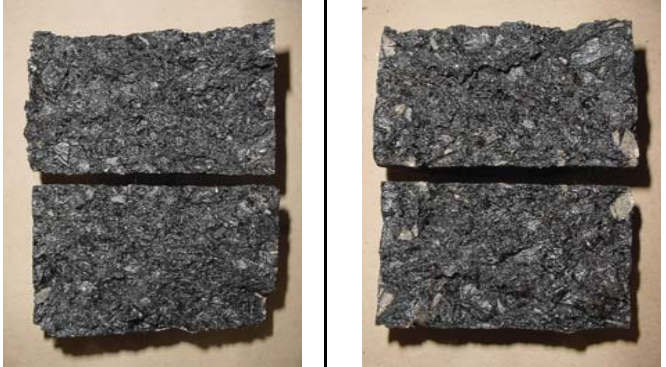

**Planilhas-relatório dos ensaios de avaliação dos danos por  
umidade (AASHTO T 283 e ASTM D 4867)**

### Legenda dos corpos-de-prova

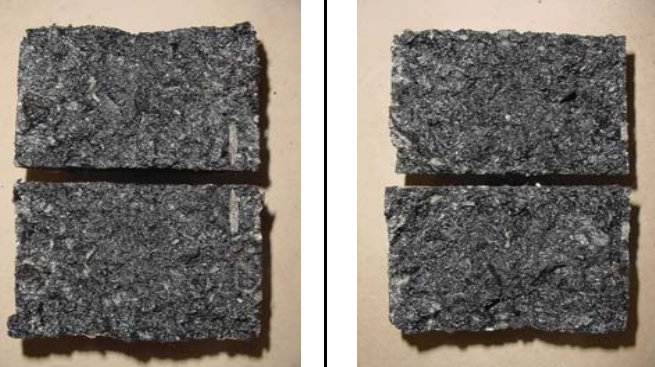

Condições	Códigos		
Método de moldagem	marshall <b>1</b>	astm <b>2</b>	aashto <b>3</b>
Tipo de agregado	basalto <b>b</b>	granito <b>g</b>	gabro <b>d</b>
Tipo de asfalto	CAP 20 <b>2</b>	CAP 40 <b>4</b>	
Teor de asfalto	t ótimo-0,5% <b>x</b>	teor ótimo <b>y</b>	t ótimo+0,5% <b>z</b>
Presença de aditivo	sem cal <b>s</b>	com cal <b>c</b>	
Volume de vazios	4% <b>4</b>	7% <b>7</b>	


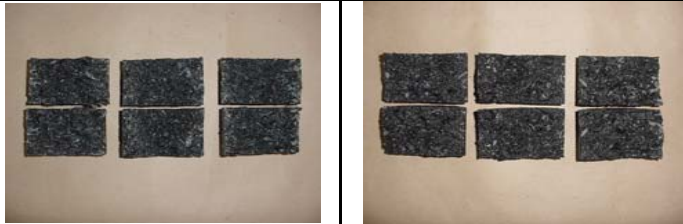
### Exemplos:



<b>2g2xs4</b>	Moldagem astm granito + CAP 20 (teor ótimo-0.5%) sem cal e VV = 4%
<b>2d2yc4</b>	Moldagem astm gabro + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%
<b>2b4zs7</b>	Moldagem astm basalto + CAP 40 (teor ótimo+0.5%) sem cal e VV = 7%
<b>1g2yc4</b>	Moldagem marshall granito + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%
<b>3b2ys4</b>	Moldagem aashto basalto + CAP 20 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%

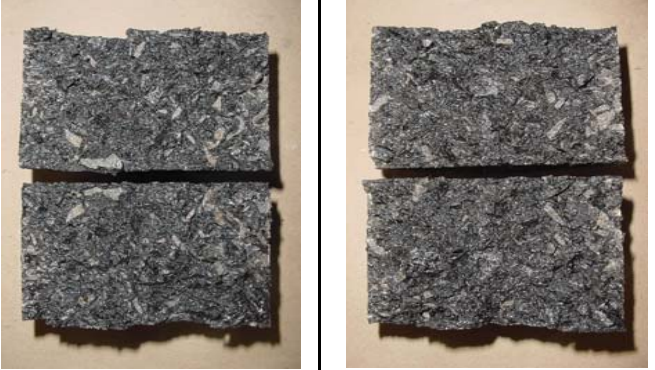
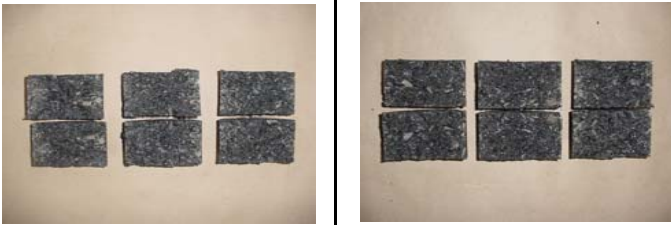
ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	7	8	9	10	11	12	Fotos			
	2b2ys4 G1			2b2ys4 G2			2b2ys4 G1		2b2ys4 G2	
Diametro (mm)	61.0	60.5	61.3	101.6	101.5	101.6				
Altura (mm)	101.6	101.7	101.4	61.6	61.6	61.0				
Massa ao ar (g)	1246.9	1237.6	1245.0	1248.3	1240.7	1242.5				
Massa SS (g)	1247.1	1237.8	1245.4	1248.5	1240.8	1242.7				
Massa imersa (g)	750.0	745.5	749.2	750.7	746.8	747.8				
Volume (cm <sup>3</sup> )	497.1	492.3	496.2	497.8	494.0	494.9				
Densidade aparente	2.508	2.514	2.509	2.508	2.512	2.511				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	3.9	3.7	3.9	4.0	3.8	3.8				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				19.7	18.8	19.0				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1259.1	1251.0	1253.0				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1264.1	1255.8	1257.7				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1259.8	1250.8	1253.1				
Massa imersa (g)				762.0	757.0	758.8				
Volume (cm <sup>3</sup> )				497.8	493.8	494.3				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				11.5	10.1	10.6				
Grau de saturação (%)				58	54	56				
Expansão (%)				0.0	0.0	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
Massa SS (g)				1260.0	1251.6	1253.7	Vv G1 (%)= 3.9 Vv G2 (%)= 3.9 Gs (%)= 56 RMR (%)= 58 RRT (%)= 62			
Massa imersa (g)				762.1	757.3	758.9				
Volume (cm <sup>3</sup> )				497.9	494.3	494.8				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				11.7	10.9	11.2				
Grau de saturação (%)				59	58	59				
Expansão (%)				0.0	0.1	0.0				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados Poucas, concentradas nas graus. extremidades do plano de ruptura.			
G 1	6034	6250	6349	1.7	1.5	1.7				
G 2	3241	3830	3813	1.5	1.6	1.6				
Relação da Propriedade	54%	61%	60%	97%						

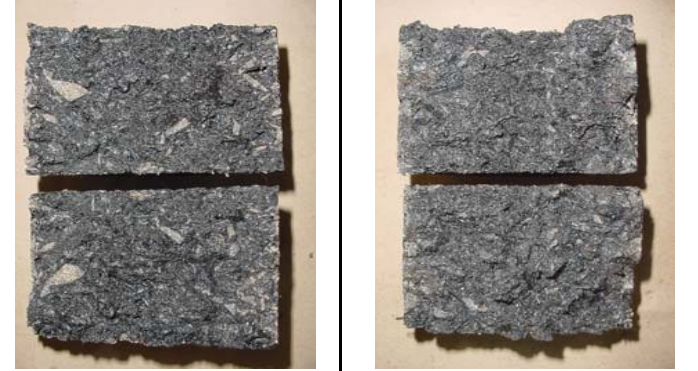
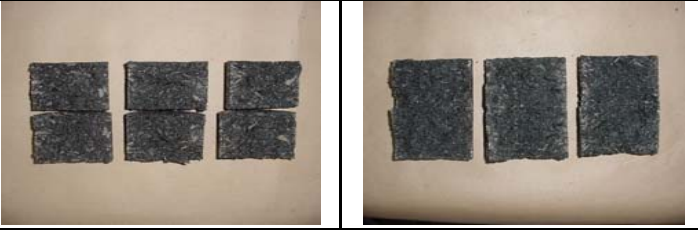



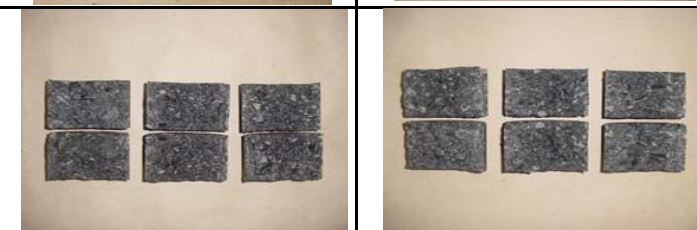
ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	21	22	23	24	25	26	Fotos			
	2b2ys7 G1			2b2ys7 G2			2b2ys7 G1		2b2ys7 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.7	101.7	101.6	101.7	101.6				
Altura (mm)	64.4	62.4	64.3	64.2	62.4	64.0				
Massa ao ar (g)	1253.6	1216.7	1248.4	1259.6	1229.6	1257.9				
Massa SS (g)	1254.5	1217.7	1248.2	1260.7	1230.7	1259.1				
Massa imersa (g)	737.9	715.2	735.4	741.2	722.0	741.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )	516.6	502.5	512.8	519.5	508.7	517.4				
Densidade aparente	2.427	2.421	2.434	2.425	2.417	2.431				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	7.1	7.3	6.8	7.1	7.4	6.9				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				37.1	37.8	35.6				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1280.0	1250.4	1277.5				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1289.3	1259.8	1286.4				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1287.6	1255.4	1279.8				
Massa imersa (g)				768.3	747.3	763.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )				519.3	508.1	516.1				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				28.0	25.8	21.9				
Grau de saturação (%)				76	68	61				
Expansão (%)				0.0	-0.1	-0.3				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
Massa SS (g)				1286.3	1255.8	1279.4	Vv G1 (%)= 7.0 Vv G2 (%)= 7.1 Gs (%)= 68 RMR (%)= 61 RRT (%)= 69			
Massa imersa (g)				766.7	746.8	762.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )				519.6	509	516.7				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				26.7	26.2	21.5				
Grau de saturação (%)				72	69	60				
Expansão (%)				0.0	0.1	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Ocorrência de exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.			
G 1	5191	4761	4828	1.4	1.5	1.5				
G 2	3277	3126	2626	1.4	1.5	1.4				
Relação da Propriedade	63%	66%	54%	98%						



ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	27	28	29	30	31	32	Fotos			
	2b2yc4 G1			2b2yc4 G2			2b2yc4 G1		2b2yc4 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.6	101.8	101.7	101.7	101.6				
Altura (mm)	61.5	60.8	60.7	62.8	60.8	60.4				
Massa ao ar (g)	1233.7	1235.2	1236.0	1233.0	1225.2	1227.3				
Massa SS (g)	1234.1	1235.5	1236.6	1233.4	1225.5	1227.6				
Massa imersa (g)	742.3	742.7	743.1	742.4	736.1	738.5				
Volume (cm <sup>3</sup> )	491.8	492.8	493.5	491.0	489.4	489.1				
Densidade aparente	2.509	2.506	2.505	2.511	2.503	2.509				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	3.9	4.0	4.1	3.8	4.1	3.9				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				18.8	18.8	18.8				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1243.3	1235.5	1237.6				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1248.0	1240.2	1242.3				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1244.0	1235.5	1237.2				
Massa imersa (g)				752.7	746.2	747.4				
Volume (cm <sup>3</sup> )				491.3	489.3	489.8				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				11.0	10.3	9.9				
Grau de saturação (%)				59	55	53				
Expansão (%)				0.1	0.0	0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1244.5	1236.0	1236.4	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.0 Vv G2 (%)= 3.9 Gs (%)= 55 RMR (%)= 78 RRT (%)= 59			
Massa imersa (g)				752.6	746.3	747.3				
Volume (cm <sup>3</sup> )				491.9	489.7	489.1				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				11.5	10.8	9.1				
Grau de saturação (%)				61	58	48				
Expansão (%)				0.2	0.1	0.0				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Descolamento: Baixa ocorrência de exposição de agregados.		Ruptura de agregado: Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.	
G 1	6512	6978	7331	1.8	1.7	1.5				
G 2	5155	5625	5390	1.6	1.7	1.7				
Relação da Propriedade	79%	81%	74%	98%						


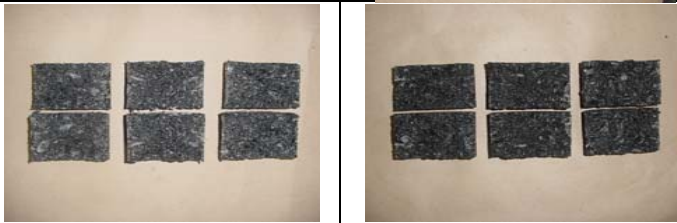
ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	33	34	35	36	37	38	Fotos			
	2b2yc7 G1			2b2yc7 G2			2b2yc7 G1		2b2yc7 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.7	101.6	101.7	101.7	101.6				
Altura (mm)	63.0	62.6	63.0	63.2	63.5	62.8				
Massa ao ar (g)	1237.6	1241.6	1238.2	1235.3	1236.7	1235.6				
Massa SS (g)	1238.4	1242.4	1239.0	1236.1	1237.6	1236.5				
Massa imersa (g)	729.8	731.1	729.5	728.6	729.5	727.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )	508.6	511.3	509.5	507.5	508.1	508.8				
Densidade aparente	2.433	2.428	2.430	2.434	2.434	2.428				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	6.8	7.0	6.9	6.8	6.8	7.0				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				34.4	34.5	35.6				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1254.2	1255.6	1255.2				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1262.8	1264.3	1264.1				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1260.8	1260.8	1262.6				
Massa imersa (g)				754.0	753.4	753.9				
Volume (cm <sup>3</sup> )				506.8	507.4	508.7				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				25.5	24.1	27.0				
Grau de saturação (%)				74	70	76				
Expansão (%)				-0.1	-0.1	0.0				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 6.9 Vv G2 (%)= 6.8 Gs (%) 73 RMR (%) 91 RRT (%) 63			
Massa SS (g)				1261.5	1262	1263.1				
Massa imersa (g)				753.7	753.4	754.0				
Volume (cm <sup>3</sup> )				507.8	508.6	509.1				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				26.2	25.3	27.5				
Grau de saturação (%)				76	73	77				
Expansão (%)				0.1	0.1	0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionam: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de Poucas, concentradas nas agregados graudos. extremidades do plano de ruptura.			
G 1	6517	7690	7138	1.6	1.6	1.5				
G 2	8446	4378	6114	1.5	1.5	1.6				
Relação da Propriedade	130%	57%	86%	97%						

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + basalto			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	51	52	53	54	55	56	Fotos			
	2b4ys4 G1			2b4ys4 G2			2b4ys4 G1		2b4ys4 G2	
Diametro (mm)	101.6	101.6	101.7	101.6	101.7	101.5				
Altura (mm)	60.60	60.80	60.20	60.20	60.20	61.00				
Massa ao ar (g)	1234.7	1234.7	1228.4	1227.6	1230.2	1242.0				
Massa SS (g)	1234.8	1235.0	1228.7	1228.0	1230.7	1242.5				
Massa imersa (g)	742.7	742.1	737.5	738.0	742.2	746.4				
Volume (cm <sup>3</sup> )	492.1	492.9	491.2	490.0	488.5	496.1				
Densidade aparente	2.509	2.505	2.501	2.505	2.518	2.504				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	3.9	4.1	4.2	4.0	3.5	4.1				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				19.8	17.3	20.4				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1238.5	1239.7	1253.2				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1243.5	1244.1	1258.3				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1239.7	1239.7	1254.5				
Massa imersa (g)				750.1	751.4	759.6				
Volume (cm <sup>3</sup> )				489.6	488.3	494.9				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				12.1	9.5	12.5				
Grau de saturação (%)				61	55	61				
Expansão (%)				-0.1	0.0	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1240.1	1239.6	1254.6	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.1 Vv G2 (%)= 3.9 Gs (%)= 59 RMR (%)= 90 RRT (%)= 35			
Massa imersa (g)				749.9	751.6	759.6				
Volume (cm <sup>3</sup> )				490.2	488	495				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				12.5	9.4	12.6				
Grau de saturação (%)				63	54	62				
Expansão (%)				0.0	-0.1	-0.2				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de Agregados graudos. Algumas ocorrência ao longo do plano de ruptura.			
G 1	9974	11461	13705	2.8	2.8	2.9				
G 2	10935	10157	9812	2.6	2.6	2.8				
Relação da Propriedade	110%	89%	72%	94%						

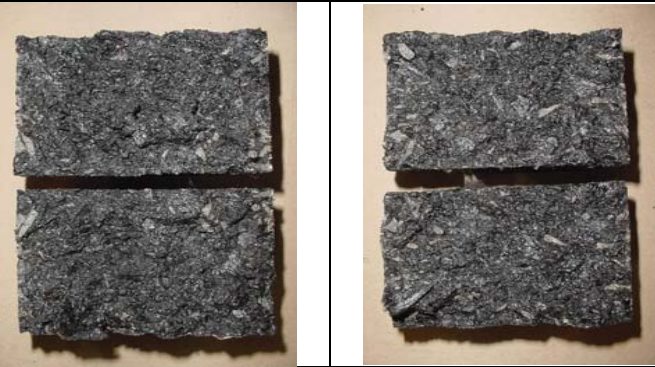
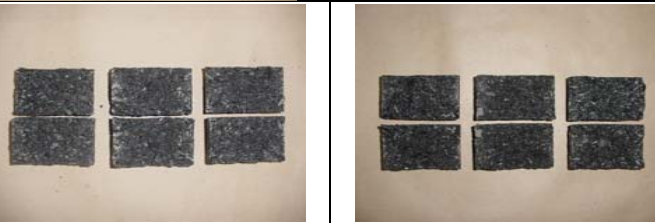
ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Características dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	65	66	67	68	69	70	Fotos			
	2b4ys7 G1			2b4ys7 G2			2b4ys7 G1		2b4ys7 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.8	101.7	101.6	101.7	101.7				
Altura (mm)	63.80	63.80	63.80	64.2	64.60	63.5				
Massa ao ar (g)	1252.4	1242.5	1246.6	1251.2	1265.5	1233.7				
Massa SS (g)	1253.0	1243.6	1247.4	1252.9	1267.5	1235.2				
Massa imersa (g)	735.9	731.5	733.4	737.3	745.5	727.6				
Volume (cm <sup>3</sup> )	517.1	512.1	514.0	515.6	522.0	507.6				
Densidade aparente	2.422	2.426	2.425	2.427	2.424	2.430				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1	6.9				
	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )			36.4	37.3	35.1				
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1271.2	1286.0	1253.0				
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1280.3	1295.4	1261.8				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1271.8	1286.3	1254.8				
	Massa imersa (g)			756.9	764.9	748.2				
	Volume (cm <sup>3</sup> )			514.9	521.4	506.6				
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			20.6	20.8	21.1				
	Grau de saturação (%)			57	56	60				
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
	Massa SS (g)			1272.6	1287.3	1254.5	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 7.1 Vv G2 (%)= 7.0 Gs (%)= 57 RMR (%)= 59 RRT (%)= 42			
	Massa imersa (g)			756.9	764.7	748.3				
	Volume (cm <sup>3</sup> )			515.7	522.6	506.2				
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			21.4	21.8	20.8				
	Grau de saturação (%)			59	58	59				
	Expansão (%)			0.0	0.1	-0.3				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados graudos. Algumas ocorrências ao longo do plano de ruptura.			
G 1	10789	11061	10450	2.5	2.4	2.3				
G 2	4800	5555	8548	2.2	2.3	2.2				
Relação da Propriedade	44%	50%	82%	93%						

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	71	72	73	74	75	76	Fotos			
	2b4yc4 G1			2b4yc4 G2			2b4yc4 G1		2b4yc4 G2	
Diametro (mm)	101.6	101.7	101.7	101.6	101.7	101.7				
Altura (mm)	61.70	60.80	61.40	60.9	60.8	60.7				
Massa ao ar (g)	1239.1	1233.4	1232.2	1236.8	1231.7	1237.1				
Massa SS (g)	1240.2	1232.0	1233.3	1237.4	1232.2	1237.7				
Massa imersa (g)	746.0	741.0	742.0	744.4	740.7	746.8				
Volume (cm <sup>3</sup> )	494.2	492.4	490.2	493.0	491.5	490.9				
Densidade aparente	2.507	2.505	2.514	2.509	2.506	2.520				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	4.0	4.1	3.7	3.9	4.0	3.5				
Volume de vazios (cm3)				19.3	19.8	17.1				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1247.4	1242.6	1246.5				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1252.2	1247.5	1250.8				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1247.7	1243.0	1246.6				
Massa imersa (g)				755.5	751.4	756.3				
Volume (cm3)				492.2	491.6	490.3				
Volume de água absorvida (cm3)				10.9	11.3	9.5				
Grau de saturação (%)				56	57	56				
Expansão (%)				-0.2	0.0	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1247.7	1243.4	1246.8	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.9 Vv G2 (%)= 3.8 Gs (%)= 56 RMR (%)= 99 RRT (%)= 34			
Massa imersa (g)				755.6	750.9	756.4				
Volume (cm3)				492.1	492.5	490.4				
Volume de água absorvida (cm3)				10.9	11.7	9.7				
Grau de saturação (%)				56	59	57				
Expansão (%)				-0.2	0.2	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados graudos. Algumas ocorrências ao longo do plano de ruptura.			
G 1	14472	11717	12934	2.9	excluído	2.9				
G 2	10814	14984	12123	2.8		2.8				
Relação da Propriedade	75%	128%	94%	97%						

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	77	78	79	80	81	82	Fotos			
	2b4yc7 G1			2b4yc7 G2			2b4yc7 G1		2b4yc7 G2	
Diametro (mm)	101.6	101.7	101.7	101.6	101.7	101.8				
Altura (mm)	65.30	64.30	65.10	64.4	63.7	63.8				
Massa ao ar (g)	1229.2	1235.3	1225.7	1241.4	1241.4	1244.7				
Massa SS (g)	1231.2	1236.0	1227.7	1243.2	1242.4	1245.9				
Massa imersa (g)	725.0	727.0	722.0	730.8	733.7	733.3				
Volume (cm <sup>3</sup> )	504.2	508.3	503.7	512.4	508.7	512.6				
Densidade aparente	2.438	2.430	2.433	2.423	2.440	2.428				
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611				
Volume de vazios (%)	6.6	6.9	6.8	7.2	6.5	7.0				
Volume de vazios (cm3)				36.9	33.2	35.9				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1261.7	1259.7	1264.4				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1271.0	1268.0	1273.4				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1263.9	1260.4	1268.2				
Massa imersa (g)				752.4	752.3	757.1				
Volume (cm3)				511.5	508.1	511.1				
Volume de água absorvida (cm3)				22.5	19.0	23.5				
Grau de saturação (%)				61	57	65				
Expansão (%)				-0.2	-0.1	-0.3				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
Massa SS (g)				1264.0	1261.4	1269.0	Vv G1 (%)= 6.8 Vv G2 (%)= 6.9 Gs (%)= 61 RMR (%)= 72 RRT (%)= 43			
Massa imersa (g)				752.4	752.3	757.9				
Volume (cm3)				511.6	509.1	511.1				
Volume de água absorvida (cm3)				22.6	20.0	24.3				
Grau de saturação (%)				61	60	68				
Expansão (%)				-0.2	0.1	-0.3				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados graudos. Poucas ao longo do plano de ruptura.			
G 1	13073	12585	14406	2.3	2.4	2.3				
G 2	9248	9116	10452	2.3	2.5	2.3				
Relação da Propriedade	71%	72%	73%	101%						

ASTM D 4867									
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: -----		Condicionamento de dosagem Marshall				
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%									
Caraterísticas dos corpos-de-prova									
Identificação do cp	89	90	91	92	93	94	Fotos		
	1b2ys4 G1			1b2ys4 G2			1b2ys4 G1		1b2ys4 G2
Diametro (mm)	101.6	101.6	101.6	101.7	101.6	101.6			
Altura (mm)	59.8	59.8	59.8	59.9	60.6	60.7			
Massa ao ar (g)	1213.4	1215.4	1207.9	1219.7	1224.2	1235.0			
Massa SS (g)	1213.7	1215.7	1208.2	1220.0	1224.7	1235.4			
Massa imersa (g)	730.6	731.2	726.8	734.0	738.6	743.8			
Volume (cm <sup>3</sup> )	483.1	484.5	481.4	486.0	486.1	491.6			
Densidade aparente	2.512	2.509	2.509	2.510	2.518	2.512			
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611			
Volume de vazios (%)	3.8	3.9	3.9	3.9	3.5	3.8			
Volume de vazios (cm3)				18.9	17.2	18.6			
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1230.1	1233.7	1245.2			
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1234.8	1238.0	1249.9			
Saturação a vácuo									
Massa SS (g)				1231.2	1233.8	1246.0			
Massa imersa (g)				745.3	747.9	754.7			
Volume (cm3)				485.9	485.9	491.3			
Volume de água absorvida (cm3)				11.5	9.6	11.0			
Grau de saturação (%)				61	56	59			
Expansão (%)				0.0	0.0	-0.1			
Condicionamento 24 h imerso a 60° C									
Massa SS (g)				1231.6	1234.2	1246.3	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.9 Vv G2 (%)= 3.7 Gs (%)= 59 RMR (%)= 71 RRT (%)= 106		
Massa imersa (g)				745.2	748.1	754.7			
Volume (cm3)				486.4	486.1	491.6			
Volume de água absorvida (cm3)				11.9	10.0	11.3			
Grau de saturação (%)				63	58	61			
Expansão (%)				0.1	0.0	0.0			
Propriedades mecânicas									
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Pouca exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.		
G 1	5668	5912	5765	1.4	1.5	1.5			
G 2	3637	4324	4287	1.6	1.5	1.6			
Relação da Propriedade	64%	73%	74%	106%					



ASTM D 4867														
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento de dosagem Marshall									
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%														
Caraterísticas dos corpos-de-prova														
Identificação do cp	103	104	105	106	107	108	Fotos							
	1b2yc4 G1			1b2yc4 G2			1b2yc4 G1		1b2yc4 G2					
Diametro (mm)	101.6	101.7	101.8	101.7	101.7	101.6								
Altura (mm)	61.3	61.9	61.8	61.6	62.0	62.1								
Massa ao ar (g)	1229.6	1234.7	1233.0	1235.5	1232.9	1232.3								
Massa SS (g)	1230.0	1235.0	1233.3	1235.9	1233.3	1232.7								
Massa imersa (g)	740.4	743.3	742.3	744.4	742.7	742.0								
Volume (cm <sup>3</sup> )	489.6	491.4	490.7	491.5	490.6	490.7								
Densidade aparente	2.511	2.513	2.513	2.514	2.513	2.511								
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611								
Volume de vazios (%)	3.8	3.8	3.8	3.7	3.8	3.8								
	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )			18.3	18.4	18.7								
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1245.6	1243.0	1242.6								
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1250.1	1247.6	1247.3								
Saturação a vácuo														
	Massa SS (g)			1245.9	1243.2	1242.8								
	Massa imersa (g)			753.2	753.2	753.1								
	Volume (cm <sup>3</sup> )			492.7	490	489.7								
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			10.4	10.3	10.5								
	Grau de saturação (%)			57	56	56								
	Expansão (%)			0.2	-0.1	-0.2	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.8 Vv G2 (%)= 3.8 Gs (%)= 56 RMR (%)= 63 RRT (%)= 101  Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.							
Condicionamento 24 h imerso a 60° C														
	Massa SS (g)			1245.6	1243.7	1242.4								
	Massa imersa (g)			753.3	752.6	751.1								
	Volume (cm <sup>3</sup> )			492.3	491.1	491.3								
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			10.1	10.8	10.1								
	Grau de saturação (%)			55	59	54								
	Expansão (%)			0.2	0.1	0.1								
Propriedades mecânicas														
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)										
G 1	8543	7701	8171	1.6	1.6	excluído								
G 2	4672	5073	5664	1.7	1.6									
Relação da Propriedade	55%	66%	69%	101%										

**AASHTO T 283**

Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto



Aditivo: -----



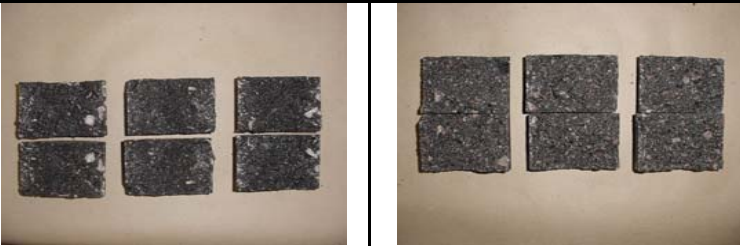
Condicionamento da AASHTO



Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%

**Caraterísticas dos corpos-de-prova**



Identificação do cp	120	121	122	123	124	124	Fotos	
	3b2ys4 G1			3b2ys4 G2			3b2ys4 G1	
							3b2ys4 G2	
Diametro (mm)	6.04	6.03	6.03	101.6	101.5	101.6	Sem registro	
Altura (mm)	10.16	10.15	10.16	60.1	60.0	60.3		
Massa ao ar (g)	1228.1	1224.7	1225.3	1225.7	1221.9	1226.0		
Massa SS (g)	1228.4	1225.9	1225.5	1226.0	1222.3	1226.4		
Massa imersa (g)	738.0	737.0	737.0	738.6	735.9	738.3		
Volume (cm <sup>3</sup> )	490.4	488.9	488.5	487.4	486.4	488.1		
Densidade aparente	2.504	2.505	2.508	2.515	2.512	2.512		
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611		
Volume de vazios (%)	4.1	4.1	3.9	3.7	3.8	3.8		
	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )			18.0	18.4	18.5		
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1235.6	1232.0	1236.2		
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1240.1	1236.6	1240.8		
<b>Saturação a vácuo</b>								
	Massa SS (g)			1235.7	1232.1	1236.4		
	Massa imersa (g)			748.5	744.2	748.0		
	Volume (cm <sup>3</sup> )			487.2	487.9	488.4		
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			10.0	10.2	10.4		
	Grau de saturação (%)			56	55	56		
	Expansão (%)			0.0	0.3	0.1		
<b>Condicionamento 24 h imerso a 60° C</b>							<b>Relatório</b>	
	Massa SS (g)			1235.9	1232.2	1236.3	Vv G1 (%)= 4.0 Vv G2 (%)= 3.8 Gs (%)= 56 RMR (%)= 57 RRT (%)= 107	
	Massa imersa (g)			749.6	744.2	749.0		
	Volume (cm <sup>3</sup> )			486.3	488	487.3		
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			10.2	10.3	10.3		
	Grau de saturação (%)			57	56	56		
	Expansão (%)			-0.2	0.3	-0.2		
<b>Propriedades mecânicas</b>							Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.	
	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>			<b>Resistência à Tração(MPa)</b>				
G 1	5531	5928	5391	1.5	1.6	1.5		
G 2	3053	3402	3216	1.6	1.6	1.6		
Relação da Propriedade	55%	57%	60%	107%				




AASHTO T 283								
Mistura: 5,5% CAP 20 + basalto			Aditivo: Cal		Condicionamento da AASHTO			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	134	135	136	137	138	139	Fotos	
	3b2yc4 G1			3b2yc4 G2			3b2yc4 G1	3b2yc4 G2
Diametro (mm)	62.3	61.2	61.3	101.7	101.6	101.6		Sem registo
Altura (mm)	101.7	101.8	101.8	60.7	60.8	60.5		
Massa ao ar (g)	1224.0	1225.0	1225.0	1223.7	1225.8	1224.5		
Massa SS (g)	1224.3	1225.2	1225.4	1224.3	1226.2	1224.8		
Massa imersa (g)	736.4	737.3	736.5	737.8	738.3	736.5		
Volume (cm <sup>3</sup> )	487.9	487.9	488.9	486.5	487.9	488.3		
Densidade aparente	2.509	2.511	2.506	2.515	2.512	2.508		
Densidade máxima	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611	2.611		
Volume de vazios (%)	3.9	3.8	4.0	3.7	3.8	4.0		
	Volume de vazios (cm3)			17.8	18.4	19.3		
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1233.5	1235.9	1235.1		
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1238.0	1240.5	1240.0		
Saturação a vácuo								
	Massa SS (g)			1233.6	1236.0	1235.6		Sem registo
	Massa imersa (g)			747.3	747.7	747.7		
	Volume (cm3)			486.3	488.3	487.9		
	Volume de água absorvida (cm3)			9.9	10.2	11.1		
	Grau de saturação (%)			56	55	57		
	Expansão (%)			0.0	0.1	-0.1		
Condicionamento 24 h imerso a 60° C								
	Massa SS (g)			1232.9	1235.8	1235.7	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.9 Vv G2 (%)= 3.8 Gs (%)= 56 RMR (%)= 51 RRT (%)= 108	
	Massa imersa (g)			746.3	746.3	747.7		
	Volume (cm3)			486.6	489.5	488		
	Volume de água absorvida (cm3)			9.2	10.0	11.2		
	Grau de saturação (%)			52	54	58		
	Expansão (%)			0.0	0.3	-0.1		
Propriedades mecânicas								
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguns graúdos expostos e alguns graúdos cobertos com asfalto. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.	
G 1	7668	5859	5595	1.5	1.4	1.4		
G 2	3382	2823	3355	1.6	1.5	1.5		
Relação da Propriedade	44%	48%	60%	108%				

ASTM D 4867							Mistura: 5,5% CAP 20 + granito		Aditivo: ----		Condicionamento da ASTM D 4867	
Caraterísticas dos corpos-de-prova												
Identificação do cp	151	152	153	154	155	156	Fotos					
	2g2xs4 G1			2g2xs4 G2			2g2xs4 G1		2g2xs4 G2			
Diametro (mm)	68.4	67.9	67.2	67.7	67	67.8						
Altura (mm)	101.7	101.7	101.9	101.70	101.80	101.70						
Massa ao ar (g)	1230.1	1231.3	1229.2	1225.9	1228.6	1231.0						
Massa SS (g)	1230.6	1231.6	1229.5	1229.8	1229.2	1231.6						
Massa imersa (g)	701.1	700.0	699.7	701.1	699.0	700.9						
Volume (cm <sup>3</sup> )	529.5	531.3	529.5	528.7	530.2	530.7						
Densidade aparente	2.323	2.318	2.321	2.319	2.317	2.320						
Densidade máxima	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420						
Volume de vazios (%)	4.0	4.2	4.1	4.2	4.2	4.1						
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				22.1	22.5	22.0						
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1238.1	1241.0	1243.1						
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1243.6	1246.6	1248.6						
Saturação a vácuo												
Massa SS (g)				1243.3	1244.8	1247.6						
Massa imersa (g)				715.0	715.4	715.8						
Volume (cm <sup>3</sup> )				528.3	529.4	531.8						
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				17.4	16.2	16.6						
Grau de saturação (%)				79	72	75						
Expansão (%)				-0.1	-0.2	0.2						
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório					
Massa SS (g)				1243	1243.8	1245.4						
Massa imersa (g)				715.2	714.4	714.5						
Volume (cm <sup>3</sup> )				527.8	529.4	530.9						
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				17.1	15.2	14.4						
Grau de saturação (%)				77	68	65						
Expansão (%)				-0.2	-0.2	0.0						
Propriedades mecânicas												
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)								
CP	151	152	153	154	155	156						
G 1	7794	10817	6868	1.6	1.7	1.8						
G 2	7084	7607	9310	1.0	1.1	1.1						
Relação da Propriedade	91%	70%	136%	62%								
											Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: ALta ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.	

























ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	157	158	159	160	161	162	Fotos			
	2g2xc4 G1			2g2xc4 G2			2g2xc4 G1		2g2xc4 G2	
Diametro (mm)	67.7	67.7	67.8	67.5	67.8	67.8				
Altura (mm)	101.80	101.80	101.80	101.6	101.80	101.6				
Massa ao ar (g)	1228.5	1229.4	1230.7	1228.2	1225.6	1230.0				
Massa SS (g)	1229.0	1230.0	1231.1	1229.0	1226.7	1231.8				
Massa imersa (g)	700.5	701.9	702.7	700.8	699.6	700.2				
Volume (cm <sup>3</sup> )	528.5	528.1	528.4	528.2	527.1	531.6				
Densidade aparente	2.325	2.328	2.329	2.325	2.325	2.314				
Densidade máxima	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420				
Volume de vazios (%)	3.9	3.8	3.8	3.9	3.9	4.4				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				20.7	20.7	23.3				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1239.6	1237.0	1242.8				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1244.7	1242.1	1248.7				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1242.6	1241.9	1245.6				
Massa imersa (g)				713.9	715.7	714.9				
Volume (cm <sup>3</sup> )				528.7	526.2	530.7				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				14.4	16.3	15.6				
Grau de saturação (%)				70	79	67				
Expansão (%)				0.1	-0.2	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1243.5	1242.4	1246.2	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.9 Vv G2 (%)= 4.1 Gs (%)= 72 RMR (%)= 113 RRT (%)= 103			
Massa imersa (g)				714.4	716.0	715.3				
Volume (cm <sup>3</sup> )				529.1	526.4	530.9				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				15.3	16.8	16.2				
Grau de saturação (%)				74	81	69				
Expansão (%)				0.2	-0.1	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados. Algumas ao longo do plano de ruptura.			
CP	157	158	159	160	161	162				
G 1	11058	10535	8751	1.7	1.6	1.6				
G 2	10159	10636	12773	1.7	1.7	1.7				
Relação da Propriedade	92%	101%	146%	103%						





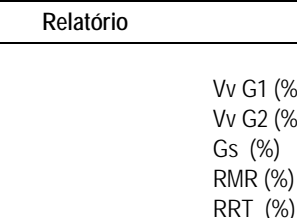
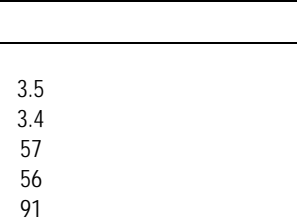
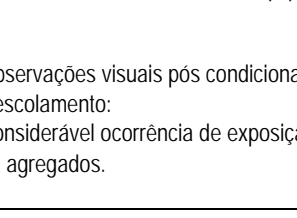
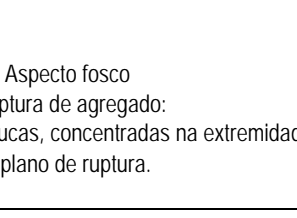






ASTM D 4867								
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: ----		Condicionamento da ASTM D 4867			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	163	164	165	166	167	168	Fotos	
	2g2ys4 G1			2g2ys4 G2			2g2ys4 G1	2g2ys4 G2
Diametro (mm)	67.0	66.4	66.7	67.0	66.9	66.6		
Altura (mm)	101.80	101.80	101.90	101.8	101.8	101.6		
Massa ao ar (g)	1226.6	1221.7	1227.4	1227.3	1234.8	1225.8		
Massa SS (g)	1227.1	1222.3	1227.8	1227.7	1235.1	1226.3		
Massa imersa (g)	693.8	691.5	695.1	694.6	698.3	692.8		
Volume (cm <sup>3</sup> )	533.3	530.8	532.7	533.1	536.8	533.5		
Densidade aparente	2.300	2.302	2.304	2.302	2.300	2.298		
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402		
Volume de vazios (%)	4.2	4.2	4.1	4.2	4.2	4.3		
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				22.2	22.7	23.2		
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1239.5	1247.3	1238.5		
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1245.0	1253.0	1244.3		
Saturação a vácuo								
Massa SS (g)				1244.6	1249.6	1240.7		
Massa imersa (g)				711.5	713.2	707.9		
Volume (cm <sup>3</sup> )				533.1	536.4	532.8		
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				17.3	14.8	14.9		
Grau de saturação (%)				78	65	64		
Expansão (%)				0.0	-0.1	-0.1		
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório	
Massa SS (g)				1244.5	1250.1	1240.4	Vv G1 (%)=	4.2
Massa imersa (g)				711.5	713.5	707.5	Vv G2 (%)=	4.2
Volume (cm <sup>3</sup> )				533	536.6	532.9	Gs (%)	69
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				17.2	15.3	14.6	RMR (%)	120
Grau de saturação (%)				78	67	63	RRT (%)	82
Expansão (%)				0.0	0.0	-0.1		
Propriedades mecânicas								
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Alta ocorrência de exposição de agregados. Algumas, ao longo do plano de ruptura.	
CP	163	164	165	166	167	168		
G 1	7314	7394	excluído	1.6	1.8	1.7		
G 2	7967	9655		1.3	1.4	1.5		
Relação da Propriedade	109%	131%		82%				




ASTM D 4867							Mistura: 5,5% CAP 20 + granito		Aditivo: ----		Condicionamento da ASTM D 4867			
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%							Caraterísticas dos corpos-de-prova							
Identificação do cp	177	178	179	180	181	182	Fotos							
	2g2ys7 G1			2g2ys7 G2			2g2ys7 G1		2g2ys7 G2					
Diametro (mm)	69.1	39.5	69.3	69.5	68.8	69.3								
Altura (mm)	101.70	101.90	101.90	101.7	101.8	101.8								
Massa ao ar (g)	1225.1	1221.7	1224.9	1226.2	1225.5	1222.3								
Massa SS (g)	1227.3	1223.8	1226.0	1228.4	1227.2	1225.3								
Massa imersa (g)	678.0	675.0	677.0	679.2	678.2	677.7								
Volume (cm <sup>3</sup> )	549.3	548.8	549.0	549.2	549.0	547.6								
Densidade aparente	2.230	2.226	2.231	2.233	2.232	2.232								
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402								
Volume de vazios (%)	7.1	7.3	7.1	7.0	7.1	7.1								
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				38.7	38.8	38.7								
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1247.5	1246.8	1243.6								
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1257.2	1256.5	1253.3								
Saturação a vácuo														
Massa SS (g)				1256.5	1256.2	1252.7								
Massa imersa (g)				708.2	707.7	706.8								
Volume (cm <sup>3</sup> )				548.3	548.5	545.9								
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				30.3	30.7	30.4								
Grau de saturação (%)				78	79	78								
Expansão (%)				-0.2	-0.1	-0.3								
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório							
Massa SS (g)				1257.7	1257.0	1252.8								
Massa imersa (g)				707.5	707.9	707.2								
Volume (cm <sup>3</sup> )				550.2	549.1	545.6								
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				31.5	31.5	30.5								
Grau de saturação (%)				81	81	79								
Expansão (%)				0.2	0.0	-0.4								
Propriedades mecânicas							<p>Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco</p> <p>Descolamento: Ruptura de agregado:</p> <p>Alta ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.</p>							
		Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)									
CP	177	178	179	180	181	182								
G 1	4958	5609	5319	1.4	1.3	1.3								
G 2	4818	4001	4426	0.8	0.8	0.8								
Relação da Propriedade	97%	71%	83%	58%										



ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	183	184	185	186	187	188	Fotos			
	2g2yc4 G1			2g2yc4 G2			2g2yc4 G1	2g2yc4 G2		
Diametro (mm)	66.7	66.9	66.7	66.6	66.3	66.7	Sem registro			
Altura (mm)	101.5	101.8	101.7	101.70	101.80	101.70				
Massa ao ar (g)	1227.5	1228.8	1232.0	1231.5	1228.6	1225.8				
Massa SS (g)	1227.9	1229.2	1232.3	1232.0	1229.0	1226.2				
Massa imersa (g)	694.5	695.4	697.3	696.5	695.5	692.5				
Volume (cm <sup>3</sup> )	533.4	533.8	535.0	535.5	533.5	533.7				
Densidade aparente	2.301	2.302	2.303	2.300	2.303	2.297				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	4.2	4.2	4.1	4.3	4.1	4.4				
Volume de vazios (cm3)				22.8	22.0	23.4				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1244.0	1240.7	1238.7				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1249.7	1246.2	1244.5				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)			1245.4	1241.3	1239.2					
Massa imersa (g)			708.1	708.8	706.0					
Volume (cm3)			537.3	532.5	533.2					
Volume de água absorvida (cm3)			13.9	12.7	13.4					
Grau de saturação (%)			61	58	57					
Expansão (%)			0.3	-0.2	-0.1					
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
Massa SS (g)			1243.4	1240.0	1238.0	Vv G1 (%)= 4.2 Vv G2 (%)= 4.3 Gs (%)= 59 RMR (%)= 153 RRT (%)= 114				
Massa imersa (g)			707.6	707.3	705.1					
Volume (cm3)			535.8	532.7	532.9					
Volume de água absorvida (cm3)			11.9	11.4	12.2					
Grau de saturação (%)			52	52	52					
Expansão (%)			0.1	-0.1	-0.1					
Propriedades mecânicas							Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.			
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
CP	183	184	185	186	187	188				
G 1	6780	6717	6442	excluído	1.6	1.6				
G 2	9645	10257	10549		1.8	1.8				
Relação da Propriedade	142%	153%	164%	114%						






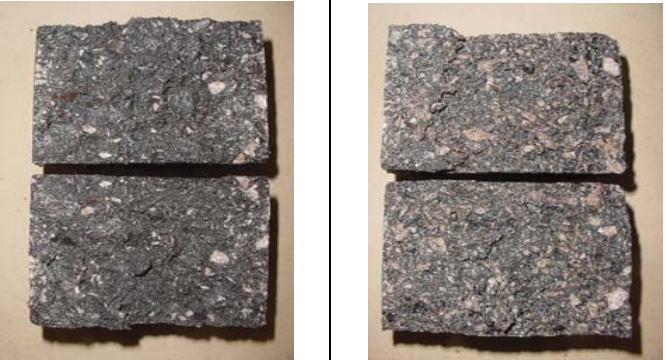

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	197	198	199	200	201	202	Fotos			
	2g2yc7 G1			2g2yc7 G2			2g2yc7 G1		2g2yc7 G2	
Diametro (mm)	101.8	101.6	101.5	102	101.6	101.8				
Altura (mm)	68.30	68.50	68.40	68.40	68.90	68.50				
Massa ao ar (g)	1229.9	1230.1	1230.4	1229.2	1228.8	1229.4				
Massa SS (g)	1230.4	1231.3	1231.7	1231.1	1229.9	1230.9				
Massa imersa (g)	681.8	682.0	681.0	682.9	678.6	681.0				
Volume (cm³)	548.6	549.3	550.7	548.2	551.3	549.9				
Densidade aparente	2.242	2.239	2.234	2.242	2.229	2.236				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	6.7	6.8	7.0	6.7	7.2	6.9				
	Volume de vazios (cm3)			36.5	39.7	38.1				
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1249.3	1250.6	1250.3				
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1258.4	1260.6	1259.9				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1252.9	1256.2	1255.5				
	Massa imersa (g)			705.9	705.4	706.4				
	Volume (cm3)			547	550.8	549.1				
	Volume de água absorvida (cm3)			23.7	27.4	26.1				
	Grau de saturação (%)			65	69	69				
	Expansão (%)			-0.2	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
	Massa SS (g)			1253.6	1258.8	1256.2				
	Massa imersa (g)			706.4	708.6	707.2				
	Volume (cm3)			547.2	550.2	549.0				
	Volume de água absorvida (cm3)			24.4	30.0	26.8				
	Grau de saturação (%)			67	76	70				
	Expansão (%)			-0.2	-0.2	-0.2				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	6716	6109	6874	1.6	1.4	1.5				
G 2	5011	4519	5786	1.7	1.6	1.5				
Relação da Propriedade	75%	74%	84%							
							Relatório			
									Vv G1 (%)=	6.8
									Vv G2 (%)=	6.9
									Gs (%)	68
									RMR (%)	78
									RRT (%)	108
							Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco			
							Descolamento:		Ruptura de agregado:	
							Baixa ocorrência de exposição de agregados.		Poucas, ao longo do plano de ruptura.	


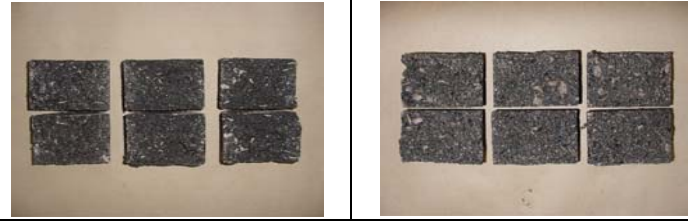

ASTM D 4867										
Mistura: 6,0% CAP 20 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	203	204	205	206	207	208	Fotos			
	2g2zs4 G1			2g2zs4 G2			2g2zs4 G1		2g2zs4 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.7	101.4	101.5	101.7	101.7				
Altura (mm)	66.00	65.70	65.80	66.0	65.70	65.8				
Massa ao ar (g)	1225.8	1220.0	1220.7	1221.7	1222.2	1222.0				
Massa SS (g)	1226.1	1220.3	1221.0	1222.0	1222.5	1222.5				
Massa imersa (g)	691.2	689.2	692.2	692.5	691.4	692.6				
Volume (cm³)	534.6	530.8	528.5	529.5	531.1	529.9				
Densidade aparente	2.293	2.298	2.310	2.307	2.301	2.306				
Densidade máxima	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385				
Volume de vazios (%)	3.9	3.6	3.2	3.3	3.5	3.3				
	Volume de vazios (cm3)			17.3	18.6	17.5				
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1231.2	1232.5	1231.6				
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1235.5	1237.1	1236.0				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1231.7	1232.8	1231.9				
	Massa imersa (g)			702.5	702.2	702.5				
	Volume (cm3)			529.2	530.6	529.4				
	Volume de água absorvida (cm3)			10.0	10.6	9.9				
	Grau de saturação (%)			58	57	56				
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
	Massa SS (g)			1231.7	1232.7	1232.0	Vv G1 (%)= 3.5		Vv G2 (%)= 3.4	
	Massa imersa (g)			702.5	702.2	702.5				
	Volume (cm3)			529.2	530.5	529.5	Gs (%)= 57		RMR (%)= 56	
	Volume de água absorvida (cm3)			10.0	10.5	10.0				
	Grau de saturação (%)			58	56	57	RRT (%)= 91			
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco		Ruptura de agregado:	
G 1	8145	8181	excluído	1.7	1.7	1.7	Considerável ocorrência de exposição de agregados.		Poucas, concentradas na extremidade do plano de ruptura.	
G 2	4867	4225		1.5	1.6	1.6				
Relação da Propriedade	60%	52%								



ASTM D 4867								
Mistura: 6,0% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	209	210	211	212	213	214	Fotos	
	2g2zc4 G1			2g2zc4 G2			2g2zc4 G1	2g2zc4 G2
Diametro (mm)	101.6	101.9	101.7	101.8	101.7	101.6	Sem registro	
Altura (mm)	66.10	65.70	65.80	65.8	66.00	65.8		
Massa ao ar (g)	1226.8	1222.0	1217.0	1219.5	1220.0	1223.0		
Massa SS (g)	1227.0	1222.2	1217.2	1219.8	1220.7	1223.3		
Massa imersa (g)	695.4	693.2	690.0	690.5	690.7	691.3		
Volume (cm³)	531.6	529.0	527.2	529.3	530.0	532.0		
Densidade aparente	2.308	2.310	2.308	2.304	2.302	2.299		
Densidade máxima	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385		
Volume de vazios (%)	3.2	3.1	3.2	3.4	3.5	3.6		
	Volume de vazios (cm3)			18.0	18.5	19.2		
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1229.4	1230.2	1233.6		
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1233.9	1234.8	1238.4		
Saturação a vácuo								
	Massa SS (g)			1229.6	1230.8	1233.6		
	Massa imersa (g)			701.4	701.4	702.0		
	Volume (cm3)			528.2	529.4	531.6		
	Volume de água absorvida (cm3)			10.1	10.8	10.6		
	Grau de saturação (%)			56	58	55		
	Expansão (%)			-0.2	-0.1	-0.1		
Condicionamento 24 h imerso a 60° C								
	Massa SS (g)			1229.8	1230.7	1233.8	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 3.2 Vv G2 (%)= 3.5 Gs (%)= 57 RMR (%)= 78 RRT (%)= 108	
	Massa imersa (g)			700.8	701.4	702.1		
	Volume (cm3)			529.0	529.3	531.7		
	Volume de água absorvida (cm3)			10.3	10.7	10.8		
	Grau de saturação (%)			57	58	56		
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	-0.1		
Propriedades mecânicas								
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.	
G 1	7364	7871	7433	1.7	1.6	1.6		
G 2	6475	5541	5655	1.7	1.8	1.8		
Relação da Propriedade	88%	70%	76%					

ASTM D 4867										
Mistura: 5,0% CAP 20 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	215	216	217	218	219	220	Fotos			
	2g4xs4 G1			2g4xs4 G2			2g4xs4 G1		2g4xs4 G2	
Altura (mm)	68.7	68.6	68.2	68.2	68.5	67.8				
Diâmetro (mm)	101.80	101.60	101.80	101.50	101.80	101.70				
Massa ao ar (g)	1224.3	1223.7	1227.7	1224.3	1236.2	1227.2				
Massa SS (g)	1224.8	1224.1	1228.2	1224.9	1236.7	1228.2				
Massa imersa (g)	689.9	687.4	689.1	689.9	694.7	690.9				
Volume (cm <sup>3</sup> )	534.4	536.3	538.6	535.0	542.0	537.3				
Densidade aparente	2.291	2.282	2.279	2.288	2.281	2.284				
Densidade máxima	2.419	2.419	2.419	2.419	2.419	2.419				
Volume de vazios (%)	5.3	5.7	5.8	5.4	5.7	5.6				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				28.9	31.0	30.0				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1240.2	1253.2	1243.7				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1247.4	1261.0	1251.2				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1244.2	1259.8	1250.6				
Massa imersa (g)				710.5	717.7	714.0				
Volume (cm <sup>3</sup> )				533.7	542.1	536.6				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				19.9	23.6	23.4				
Grau de saturação (%)				69	76	78				
Expansão (%)				-0.2	0.0	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1245.7	1259.8	1251.3	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 5.6 Vv G2 (%)= 5.6 Gs (%)= 74 RMR (%)= 63 RRT (%)= 58			
Massa imersa (g)				711.0	718.2	714.3				
Volume (cm <sup>3</sup> )				534.7	541.6	537.0				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				21.4	23.6	24.1				
Grau de saturação (%)				74	76	80				
Expansão (%)				-0.1	-0.1	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Considerável ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.			
G 1	15731	13640	16661	2.2	2.3	2.4				
G 2	9187	9609	10159	1.3	1.3	1.4				
Relação da Propriedade	58%	70%	61%							



ASTM D 4867										
Mistura: 5,0% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	221	222	223	224	225	226	Fotos			
	2g4xc4 G1			2g4xc4 G2			2g4xc4 G1		2g4xc4 G2	
Diametro (mm)	101.8	101.7	101.7	101.7	101.9	101.5	Sem registro			
Altura (mm)	67.70	67.70	67.50	67.5	67.60	68.2				
Massa ao ar (g)	1221.0	1225.5	1225.9	1224.7	1228.9	1223.9				
Massa SS (g)	1221.7	1226.0	1226.3	1225.4	1230.9	1225.0				
Massa imersa (g)	686.6	692.5	690.5	690.4	691.9	692.7				
Volume (cm³)	535.1	533.5	535.8	535.0	539.0	532.3				
Densidade aparente	2.282	2.297	2.288	2.289	2.280	2.299				
Densidade máxima	2.419	2.419	2.419	2.419	2.419	2.419				
Volume de vazios (%)	5.7	5.0	5.4	5.4	5.7	4.9				
Volume de vazios (cm3)				28.7	31.0	26.3				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1240.5	1245.9	1238.4				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1247.7	1253.7	1245.0				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1245.5	1252.5	1242.7				
Massa imersa (g)				711.1	715.3	711.2				
Volume (cm3)				534.4	537.2	531.5				
Volume de água absorvida (cm3)				20.8	23.6	18.8				
Grau de saturação (%)				72	76	71				
Expansão (%)				-0.1	-0.3	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C									Relatório	
Massa SS (g)				1245.7	1253.1	1242.3	Vv G1 (%)= 5.4 Vv G2 (%)= 5.4 Gs (%)= 73 RMR (%)= 95 RRT (%)= 105		Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.	
Massa imersa (g)				711.1	713.6	711.5				
Volume (cm3)				534.6	539.5	530.8				
Volume de água absorvida (cm3)				21.0	24.2	18.4				
Grau de saturação (%)				73	78	70				
Expansão (%)				-0.1	0.1	-0.3				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	14283	16784	15142	2.5	2.4	2.3				
G 2	15847	15041	12602	2.6	2.5	2.3				
Relação da Propriedade	111%	90%	83%							



ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	227	228	229	230	231	232	Fotos			
	2g4ys4 G1			2g4ys4 G2			2g4ys4 G1		2g4ys4 G2	
Diametro (mm)	101.6	101.5	101.7	101.9	101.9	101.6				
Altura (mm)	68.10	67.80	67.20	67.20	67.30	67.90				
Massa ao ar (g)	1227.7	1228.6	1227.6	1229.6	1225.3	1230.6				
Massa SS (g)	1228.2	1229.1	1228.0	1230.4	1225.8	1231.2				
Massa imersa (g)	694.0	695.3	694.6	694.6	694.6	695.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )	534.2	533.8	533.4	535.8	531.2	535.5				
Densidade aparente	2.298	2.302	2.301	2.295	2.307	2.298				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	4.3	4.2	4.2	4.5	4.0	4.3				
	Volume de vazios (cm3)			23.9	21.1	23.2				
	Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)			1242.7	1236.9	1243.3				
	Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)			1248.7	1242.2	1249.1				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1247.2	1240.2	1247.9				
	Massa imersa (g)			712.1	709.3	712.4				
	Volume (cm3)			535.1	530.9	535.5				
	Volume de água absorvida (cm3)			17.6	14.9	17.3				
	Grau de saturação (%)			74	71	75				
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	0.0				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
	Massa SS (g)			1247.3	1240.6	1248.4				
	Massa imersa (g)			712.1	710.3	712.2			Vv G1 (%)=	4.2
	Volume (cm3)			535.2	530.3	536.2			Vv G2 (%)=	4.3
	Volume de água absorvida (cm3)			17.7	15.3	17.8			Gs (%)	73
	Grau de saturação (%)			74	73	77			RMR (%)	69
	Expansão (%)			-0.1	-0.2	0.1			RRT (%)	55
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)					Observações visuais pós condicionamento	
G 1	13385	15363	12643	2.4	2.5	2.6			Descolamento: Ruptura de agregado:	
G 2	7710	10440	10370	1.2	1.4	1.6			Alta ocorrência de exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.	
Relação da Propriedade	58%	68%	82%	55%						

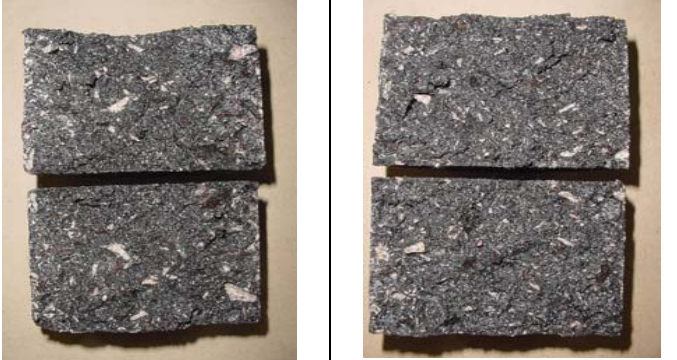
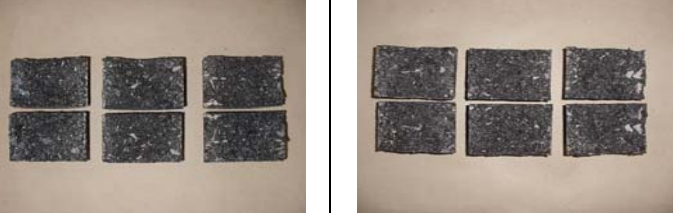
ASTM D 4867														
Mistura: 5,5% CAP 40 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867									
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%														
Caraterísticas dos corpos-de-prova														
Identificação do cp	241	242	243	244	245	246	Fotos							
	2g4ys7 G1			2g4ys7 G2			2g4ys7 G1		2g4ys7 G2					
Diametro (mm)	101.8	101.7	101.7	101.7	101.9	101.8	Sem registro							
Altura (mm)	69.70	70.50	69.70	70.2	69.50	69.9								
Massa ao ar (g)	1227.1	1230.9	1227.4	1226.5	1232.3	1232.6								
Massa SS (g)	1230.0	1233.3	1230.0	1228.8	1234.2	1236.9								
Massa imersa (g)	680.2	680.1	679.3	679.5	680.1	683.3								
Volume (cm <sup>3</sup> )	549.8	553.2	550.7	549.3	554.1	553.6								
Densidade aparente	2.232	2.225	2.229	2.233	2.224	2.227								
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402								
Volume de vazios (%)	7.1	7.4	7.2	7.0	7.4	7.3								
Volume de vazios (cm3)				38.7	41.1	40.4								
Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)				1247.8	1254.9	1254.8								
Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)				1257.4	1265.2	1265.0								
Saturação a vácuo														
Massa SS (g)			1253.2	1263.4	1262.9									
Massa imersa (g)			705.2	710.2	711.8									
Volume (cm3)			548	553.2	551.1									
Volume de água absorvida (cm3)			26.7	31.1	30.3									
Grau de saturação (%)			69	76	75									
Expansão (%)			-0.2	-0.2	-0.5									
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório							
Massa SS (g)			1253.8	1261.5	1262.7									
Massa imersa (g)			704.6	707.1	708.5			Vv G1 (%)= 7.2						
Volume (cm3)			549.2	554.4	554.2			Vv G2 (%)= 7.3						
Volume de água absorvida (cm3)			27.3	29.2	30.1			Gs (%)= 73						
Grau de saturação (%)			71	71	74			RMR (%)= 55						
Expansão (%)			0.0	0.1	0.1			RRT (%)= 54						
Propriedades mecânicas														
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento							
G 1	12644	11713	10204	2.2	2.1	2.2	Descolamento:		Ruptura de agregado:					
G 2	5778	8536	4843	1.1	1.3	1.1	Alta taxa de ocorrência de exposição de agregados.		Poucas, ao longo do plano de ruptura.					
Relação da Propriedade	46%	73%	47%	54%										



ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	247	248	249	250	251	252	Fotos			
	2g4yc4 G1			2g4yc4 G2			2g4yc4 G1		2g4yc4 G2	
Diametro (mm)	101.9	101.9	101.7	101.7	101.9	101.7				
Altura (mm)	66.70	67.30	67.10	67.8	66.8	67.0				
Massa ao ar (g)	1227.6	1230.7	1227.2	1229.0	1226.5	1229.4				
Massa SS (g)	1228.0	1231.0	1227.6	1229.3	1226.8	1229.8				
Massa imersa (g)	694.2	696.2	694.2	694.0	693.4	696.0				
Volume (cm <sup>3</sup> )	533.8	534.8	533.4	535.3	533.4	533.8				
Densidade aparente	2.300	2.301	2.301	2.296	2.299	2.303				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	4.3	4.2	4.2	4.4	4.3	4.1				
	Volume de vazios (cm3)			23.6	22.8	22.0				
	Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)			1242.0	1239.0	1241.5				
	Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)			1247.9	1244.7	1247.0				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1245.2	1243.9	1245.6				
	Massa imersa (g)			709.9	711.0	712.4				
	Volume (cm3)			535.3	532.9	533.2				
	Volume de água absorvida (cm3)			16.2	17.4	16.2				
	Grau de saturação (%)			69	76	74				
	Expansão (%)			0.0	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
	Massa SS (g)			1246.7	1243.6	1246.2				
	Massa imersa (g)			711.9	710.2	712.0				
	Volume (cm3)			534.8	533.4	534.2			Vv G1 (%)=	4.2
	Volume de água absorvida (cm3)			17.7	17.1	16.8			Vv G2 (%)=	4.3
	Grau de saturação (%)			75	75	76			Gs (%)	73
	Expansão (%)			-0.1	0.0	0.1			RMR (%)	70
									RRT (%)	95
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento			
G 1	17457	14460	15697	2.3	2.3	2.4	Descolamento:		Ruptura de agregado:	
G 2	9594	12332	11156	2.2	2.3	2.3	Baixa ocorrência de exposição de agregados.		Poucas, concentradas nas extremidades dos plano de ruptura.	
Relação da Propriedade	55%	85%	71%	95%						





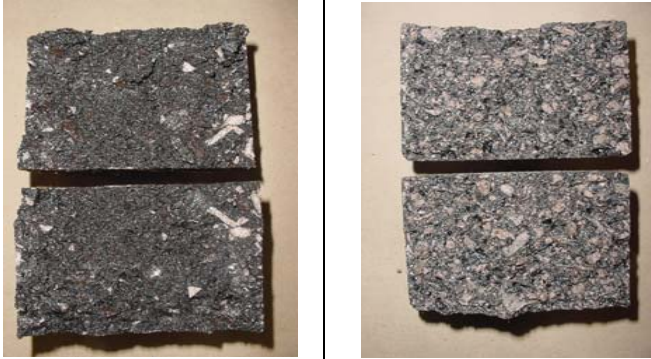
ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 40 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 27 golpes para cps com Vv de aproximadamente 7%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	253	254	255	256	257	258	Fotos			
	2g4yc7 G1			2g4yc7 G1			2g4yc7 G1			
Diametro (mm)	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.6				
Altura (mm)	69.80	69.50	69.40	70.10	69.70	69.50				
Massa ao ar (g)	1230.6	1225.3	1224.3	1231.0	1232.3	1232.5				
Massa SS (g)	1232.8	1227.0	1227.1	1233.0	1235.2	1235.9				
Massa imersa (g)	681.4	678.0	677.7	681.1	681.6	683.4				
Volume (cm <sup>3</sup> )	551.4	549.0	549.4	551.9	553.6	552.5				
Densidade aparente	2.232	2.232	2.228	2.230	2.226	2.231				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	7.1	7.1	7.2	7.1	7.3	7.1				
Volume de vazios (cm3)				39.4	40.6	39.4				
Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)				1252.7	1254.6	1254.2				
Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)				1262.5	1264.8	1264.0				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1261.8	1261.7	1262				
Massa imersa (g)				711.1	710.6	710.8				
Volume (cm3)				550.7	551.1	551.2				
Volume de água absorvida (cm3)				30.8	29.4	29.5				
Grau de saturação (%)				78	72	75				
Expansão (%)				-0.2	-0.5	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 7.1 Vv G2 (%)= 7.2 Gs (%)= 75 RMR (%)= 61 RRT (%)= 92  Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Baixa ocorrência de exposição de agregados. Ocorrência ao longo do planos de ruptura.			
Massa SS (g)				1262.0	1261.9	1262.4				
Massa imersa (g)				711.2	710.2	710.0				
Volume (cm3)				550.8	551.7	552.4				
Volume de água absorvida (cm3)				31.0	29.6	29.9				
Grau de saturação (%)				79	73	76				
Expansão (%)				-0.2	-0.3	0.0				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	18777	16867	12944	2.0	2.0	2.0				
G 2	9895	9045	9735	1.9	1.8	1.8				
Relação da Propriedade	53%	54%	75%	92%						

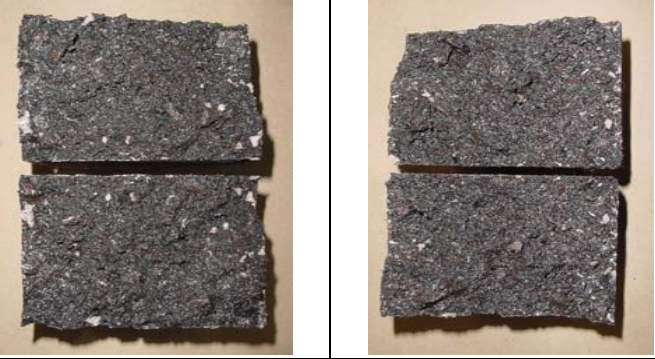
ASTM D 4867										
Mistura: 6,0% CAP 40 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	259	260	261	262	263	264	Fotos			
	2g4zs4 G1			2g4zs4 G2			2g4zs4 G1		2g4zs4 G2	
Diametro (mm)	101.8	101.8	101.7	101.8	101.6	101.7				
Altura (mm)	67.10	67.10	66.90	67.0	67.10	67.4				
Massa ao ar (g)	1227.8	1228.2	1231.4	1225.7	1228.2	1226.6				
Massa SS (g)	1227.3	1228.4	1231.7	1226.5	1228.7	1227.1				
Massa imersa (g)	691.2	691.8	693.8	690.0	692.0	691.4				
Volume (cm <sup>3</sup> )	536.1	536.6	537.9	536.5	536.7	535.7				
Densidade aparente	2.290	2.289	2.289	2.285	2.288	2.290				
Densidade máxima	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385				
Volume de vazios (%)	4.0	4.0	4.0	4.2	4.0	4.0				
	Volume de vazios (cm3)			22.6	21.7	21.4				
	Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)			1238.1	1240.2	1238.4				
	Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)			1243.8	1245.6	1243.7				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1241.9	1244.7	1242.7				
	Massa imersa (g)			705.9	708.5	707.8				
	Volume (cm3)			536	536.2	534.9				
	Volume de água absorvida (cm3)			16.2	16.5	16.1				
	Grau de saturação (%)			72	76	75				
	Expansão (%)			-0.1	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
	Massa SS (g)			1241.4	1244.7	1242.8				
	Massa imersa (g)			705.9	708.7	707.6				
	Volume (cm3)			535.5	536	535.2				
	Volume de água absorvida (cm3)			15.7	16.5	16.2				
	Grau de saturação (%)			70	76	76				
	Expansão (%)			-0.2	-0.1	-0.1				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	19249	17816	16343	2.7	2.8	2.8				
G 2	26193	14190	10865	2.3	2.3	2.0				
Relação da Propriedade	136%	80%	66%	79%						
							Relatório			
									Vv G1 (%)= 4.0 Vv G2 (%)= 4.1 Gs (%)= 74 RMR (%)= 94 RRT (%)= 79	
							Observações visuais pós condicionamento			
							Descolamento:		Ruptura de agregado:	
							Alta taxa de ocorrência de exposição de agregados.		Ocorrência ao longo do plano de ruptura.	



ASTM D 4867										
Mistura: 6,0% CAP 40 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	265	266	267	268	269	270	Fotos			
	2g4zc4 G1			2g4zc4 G2			2g4zc4 G1		2g4zc4 G2	
Diametro (mm)	101.7	101.9	101.9	101.8	101.6	101.8				
Altura (mm)	66.70	66.40	66.90	66.9	68.50	67.4				
Massa ao ar (g)	1225.2	1225.4	1225.0	1226.2	1228.4	1230.1				
Massa SS (g)	1225.6	1226.0	1225.8	1226.8	1229.4	1230.9				
Massa imersa (g)	689.5	691.0	690.4	690.8	691.0	692.3				
Volume (cm <sup>3</sup> )	536.1	535.0	535.4	536.0	538.4	538.6				
Densidade aparente	2.285	2.290	2.288	2.288	2.282	2.284				
Densidade máxima	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385	2.385				
Volume de vazios (%)	4.2	4.0	4.1	4.1	4.3	4.2				
	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )			21.9	23.3	22.8				
	Massa mínima do cp pós saturação mínima (g)			1238.2	1241.2	1242.7				
	Massa máxima do cp pós saturação mínima (g)			1243.7	1247.1	1248.4				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1240.6	1245.4	1246.1				
	Massa imersa (g)			704.8	707.8	708				
	Volume (cm <sup>3</sup> )			535.8	537.6	538.1				
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			14.4	17.0	16.0				
	Grau de saturação (%)			66	73	70				
	Expansão (%)			0.0	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C							Relatório			
	Massa SS (g)			1240.5	1246.3	1246.5				
	Massa imersa (g)			704.4	707.4	708.2				
	Volume (cm <sup>3</sup> )			536.1	538.9	538.3			Vv G1 (%)=	4.1
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			14.3	17.9	16.4			Vv G2 (%)=	4.2
	Grau de saturação (%)			65	77	72			Gs (%)	70
	Expansão (%)			0.0	0.1	-0.1			RMR (%)	72
									RRT (%)	88
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	12661	13082	13804	2.6	2.6	2.5			Observações visuais pós condicionamento	
G 2	8639	10101	9863	2.3	2.2	2.3			Descolamento: Ruptura de agregado	
Relação da Propriedade	68%	77%	71%	88%					Considerável ocorrência de exposição de agregados. Ocorrência ao longo do planos de ruptura.	

ASTM D 4867								
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento de dosagem Marshall			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	271	272	273	274	275	276	Fotos	
	1g2ys4 G1			1g2ys4 G2			1g2ys4 G1	1g2ys4 G2
Diametro (mm)	101.8	101.8	101.8	101.8	101.8	101.7		Sem registro
Altura (mm)	66.60	66.50	66.70	66.60	66.70	67.30		
Massa ao ar (g)	1224.8	1226.3	1225.5	1230.8	1228.0	1231.9		
Massa SS (g)	1225.0	1226.6	1225.8	1231.2	1228.5	1232.3		
Massa imersa (g)	691.9	692.0	691.5	694.7	692.4	696.0		
Volume (cm <sup>3</sup> )	533.1	534.6	534.3	536.5	536.1	536.3		
Densidade aparente	2.298	2.294	2.294	2.294	2.291	2.297		
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402		
Volume de vazios (%)	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6	4.4		
	Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )			24.1	24.9	23.4		
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1244.1	1241.7	1244.8		
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1250.1	1247.9	1250.6		
Saturação a vácuo								
	Massa SS (g)			1244.0	1245.1	1250.9		Sem registro
	Massa imersa (g)			707.5	708.0	713.0		
	Volume (cm <sup>3</sup> )			536.5	537.1	537.9		
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			13.2	17.1	19.0		
	Grau de saturação (%)			55	69	81		
	Expansão (%)			0.0	0.2	0.3		
Condicionamento 24 h imerso a 60° C								
	Massa SS (g)			1245.7	1245.4	1251.0	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.5 Vv G2 (%)= 4.5 Gs (%)= 68 RMR (%)= 63 RRT (%)= 61	
	Massa imersa (g)			707.3	708.8	714.4		
	Volume (cm <sup>3</sup> )			538.4	536.6	536.6		
	Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )			14.9	17.4	19.1		
	Grau de saturação (%)			62	70	81		
	Expansão (%)			0.4	0.1	0.1		
Propriedades mecânicas								
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: muita de exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.	
G 1	5299	7381	7994	1.6	1.6	1.7		
G 2	4984	3414	3915	1.1	1.0	0.9		
Relação da Propriedade	94%	46%	49%	61%				



ASTM D 4867								
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento de dosagem Marshall			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	285	286	287	288	289	290	Fotos	
	1g2yc4 G1			1g2yc4 G2			1g2yc4 G1	1g2yc4 G2
Diametro (mm)	101.9	101.7	101.8	101.8	101.8	101.8		Sem registro
Altura (mm)	67.30	67.10	66.80	66.8	67.40	66.6		
Massa ao ar (g)	1235.20	1229.40	1229.30	1224.80	1220.10	1223.50		
Massa SS (g)	1235.60	1229.70	1229.70	1225.40	1220.50	1223.70		
Massa imersa (g)	698.50	697.90	696.20	692.90	691.30	692.20		
Volume (cm <sup>3</sup> )	537.10	531.80	533.50	532.50	529.20	531.50		
Densidade aparente	2.300	2.312	2.304	2.300	2.306	2.302		
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402		
Volume de vazios (%)	4.3	3.8	4.1	4.2	4.0	4.2		
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				22.6	21.2	22.1		
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1237.2	1231.8	1235.7		
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1242.9	1237.1	1241.2		
Saturação a vácuo								
Massa SS (g)				1239.0	1233.1	1239.5		Sem registro
Massa imersa (g)				706.8	703.4	707.8		
Volume (cm <sup>3</sup> )				532.2	529.7	531.7		
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				14.2	13.0	16.0		
Grau de saturação (%)				63	61	72		
Expansão (%)				-0.1	0.1	0.0		
Condicionamento 24 h imerso a 60° C								
Massa SS (g)				1239.2	1233.1	1239.6	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.0 Vv G2 (%)= 4.1 Gs (%)= 65 RMR (%)= 69 RRT (%)= 92	
Massa imersa (g)				706.8	704.9	708.0		
Volume (cm <sup>3</sup> )				532.4	528.2	531.6		
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				14.4	13.0	16.1		
Grau de saturação (%)				64	61	73		
Expansão (%)				0.0	-0.2	0.0		
Propriedades mecânicas								
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento	
G 1	9561	7741	9215	1.6	excluído	1.6	Descolamento: Ruptura de agregado:	
G 2	6628	5572	5947	1.5		1.5	Alguma exposição de agregados. Poucas, ao longo do plano de ruptura.	
Relação da Propriedade	69%	72%	65%	92%				

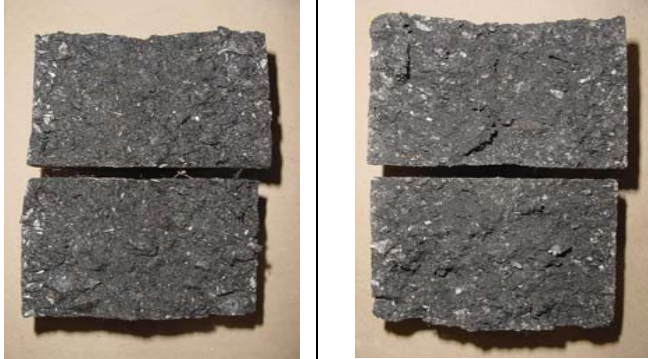
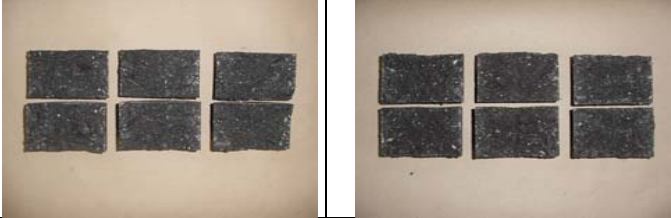
AASHTO T 283														
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: -----		Condicionamento da AASHTO									
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%														
Caraterísticas dos corpos-de-prova														
Identificação do cp	310	311	312	313	314	315	Fotos							
	3g2ys4 G1			3g2ys4 G2			3g2ys4 G1		3g2ys4 G2					
Diametro (mm)	66.7	66.8	66.9	101.7	101.6	101.9								
Altura (mm)	101.8	101.6	101.7	66.4	66.6	66.8								
Massa ao ar (g)	1230.8	1229.8	1231.6	1228.6	1229.4	1231.2								
Massa SS (g)	1231.1	1230.0	1232.0	1229.1	1229.9	1231.7								
Massa imersa (g)	696.0	696.0	695.0	694.4	696.7	698.1								
Volume (cm <sup>3</sup> )	535.1	534.0	537.0	534.7	534.7	534.7								
Densidade aparente	2.300	2.303	2.293	2.298	2.299	2.303								
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402								
Volume de vazios (%)	4.2	4.1	4.5	4.3	4.3	4.1								
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				23.2	22.9	22.1					<p>Sem registo</p> <p>Sem registo</p>			
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1241.4	1242.0	1243.4								
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1247.2	1247.7	1248.9								
Saturação a vácuo							<p>Sem registo</p> <p>Sem registo</p>							
Massa SS (g)				1245.7	1246.1	1247.2								
Massa imersa (g)				711.2	712.1	713.8								
Volume (cm <sup>3</sup> )				534.5	534	533.4								
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				17.1	16.7	16.0								
Grau de saturação (%)				74	73	72								
Expansão (%)				0.0	-0.1	-0.2	<p>Relatório</p> <p>Vv G1 (%)= 4.3</p> <p>Vv G2 (%)= 4.3</p> <p>Gs (%)= 73</p> <p>RMR (%)= 31</p> <p>RRT (%)= 43</p>							
Condicionamento 24 h imerso a 60° C														
Massa SS (g)				1245.0	1245.5	1246.3								
Massa imersa (g)				710.4	711.3	712.8								
Volume (cm <sup>3</sup> )				534.6	534.2	533.5								
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				16.4	16.1	15.1								
Grau de saturação (%)				71	70	68								
Expansão (%)				0.0	-0.1	-0.2								
Propriedades mecânicas											<p>Observações visuais pós condicionamento</p> <p>Descolamento: Ruptura de agregado:</p> <p>Alta ocorrência de exposição de agregados em geral. Pouca, nas extremidade do plano de ruptura.</p>			
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)										
G 1	5705	6250	7431	1.6	1.7	1.7								
G 2	2243	2077	1540	0.7	0.7	0.8								
Relação da Propriedade	39%	33%	21%	43%										


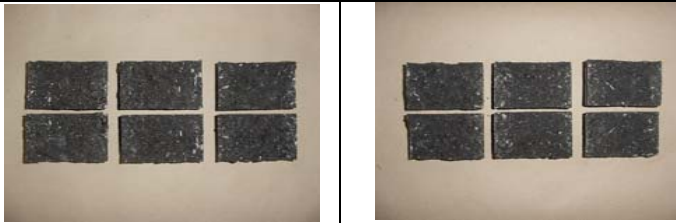
AASHTO T 283										
Mistura: 5,5% CAP 20 + granito			Aditivo: Cal		Condicionamento da AASHTO					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	324	325	326	327	328	329	Fotos			
	3g2yc4 G1			3g2yc4 G2			3g2yc4 G1		3g2yc4 G2	
Diametro (mm)	67.4	66.7	66.9	101.7	101.7	101.6				
Altura (mm)	101.7	101.7	101.6	66.1	66.5	66.6				
Massa ao ar (g)	1227.0	1226.3	1228.3	1225.0	1226.5	1228.1				
Massa SS (g)	1227.3	1226.6	1228.5	1225.6	1226.9	1228.7				
Massa imersa (g)	693.1	691.8	695.2	693.6	692.4	694.6				
Volume (cm <sup>3</sup> )	534.2	534.8	533.3	532.0	534.5	534.1				
Densidade aparente	2.297	2.293	2.303	2.303	2.295	2.299				
Densidade máxima	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402				
Volume de vazios (%)	4.4	4.5	4.1	4.1	4.5	4.3				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				22.0	23.9	22.8				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1237.1	1239.6	1240.6				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1242.6	1245.6	1246.4				
Saturação a vácuo							<p>Sem registo</p> <p>Sem registo</p>			
Massa SS (g)				1240.6	1243.1	1242.5				
Massa imersa (g)				707.5	708.7	708.0				
Volume (cm <sup>3</sup> )				533.1	534.4	534.5				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				15.6	16.6	14.4				
Grau de saturação (%)				71	70	63				
Expansão (%)				0.2	0.0	0.1	<p>Relatório</p> <p>Vv G1 (%)= 4.3</p> <p>Vv G2 (%)= 4.3</p> <p>Gs (%) 68</p> <p>RMR (%) 54</p> <p>RRT (%) 103</p>			
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1239.3	1243.5	1242.3				
Massa imersa (g)				707.5	708.4	708.0				
Volume (cm <sup>3</sup> )				531.8	535.1	534.3				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				14.3	17.0	14.2				
Grau de saturação (%)				65	71	62				
Expansão (%)				0.0	0.1	0.0				
Propriedades mecânicas							<p>Observações visuais pós condicionamento</p> <p>Descolamento: Ruptura de agregado:</p> <p>Baixa ocorrência de exposição de agregados em geral. Pouca, nas extremidade do plano de ruptura.</p>			
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)						
G 1	8819	7873	8353	1.6	1.6	1.6				
G 2	5059	3842	4620	1.7	1.6	1.7				
Relação da Propriedade	57%	49%	55%	103%						


ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: -----		Condicionamento da ASTM D 4867					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	355	356	357	358	359	360	Fotos			
	2d2ys4 G1			2d2ys4 G2			2d2ys4 G1	2d2ys4 G2		
Diametro (mm)	101.7	101.9	101.6	101.7	101.8	101.9	Sem registro			
Altura (mm)	63.10	63.10	63.40	62.80	63.10	62.90				
Massa ao ar (g)	1233.7	1231.4	1231.4	1236.0	1236.6	1233.9				
Massa SS (g)	1233.9	1231.6	1231.7	1236.1	1237.1	1234.2				
Massa imersa (g)	733.9	733.0	733.0	734.5	735.6	735.5				
Volume (cm <sup>3</sup> )	500.0	498.6	498.7	501.6	501.5	498.7				
Densidade aparente	2.467	2.470	2.469	2.464	2.466	2.474				
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580				
Volume de vazios (%)	4.4	4.3	4.3	4.5	4.4	4.1				
Volume de vazios (cm3)				22.5	22.2	20.4				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1248.4	1248.8	1245.1				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1254.0	1254.4	1250.3				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1249.0	1249.9	1245.4			Sem registro	
Massa imersa (g)				747.6	748.4	747.7				
Volume (cm3)				501.4	501.5	497.7				
Volume de água absorvida (cm3)				13.0	13.3	11.5				
Grau de saturação (%)				58	60	56				
Expansão (%)				0.0	0.0	-0.2				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
Massa SS (g)				1249.2	1250.1	1245.7	Relatório	Vv G1 (%)= 4.3 Vv G2 (%)= 4.3 Gs (%)= 58 RMR (%)= 95 RRT (%)= 83		
Massa imersa (g)				747.1	748.2	747.0				
Volume (cm3)				502.1	501.9	498.7				
Volume de água absorvida (cm3)				13.2	13.5	11.8				
Grau de saturação (%)				59	61	58				
Expansão (%)				0.1	0.1	0.0				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado Baixa ocorrência de exposição de agregados. Poucas, concentradas nas extremidade do plano de ruptura.			
G 1	9136	7727	7332	1.9	1.9	1.9				
G 2	8661	7069	7239	1.7	1.5	1.6				
Relação da Propriedade	95%	91%	99%	83%						




ASTM D 4867									
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: Cal		Condicionamento da ASTM D 4867				
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%									
Caraterísticas dos corpos-de-prova									
Identificação do cp	361	362	363	364	365	366	Fotos		
	2d2yc4 G1			2d2yc4 G2			2d2ys4 G1		2d2ys4 G2
Diametro (mm)	101.7	101.7	101.8	101.7	101.8	101.7	Sem registro		
Altura (mm)	63.60	63.50	63.10	62.9	62.90	63.2			
Massa ao ar (g)	1229.8	1232.1	1231.3	1233.3	1230.6	1233.2			
Massa SS (g)	1231.3	1232.7	1231.8	1233.7	1230.9	1233.9			
Massa imersa (g)	734.8	734.4	733.5	734.3	734.2	734.3			
Volume (cm <sup>3</sup> )	496.5	498.3	498.3	499.4	496.7	499.6			
Densidade aparente	2.477	2.473	2.471	2.470	2.478	2.468			
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580			
Volume de vazios (%)	4.0	4.2	4.2	4.3	4.0	4.3			
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				21.4	19.7	21.6			
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1245.1	1241.4	1245.1			
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1250.4	1246.4	1250.5			
Saturação a vácuo									
Massa SS (g)				1245.6	1242.0	1245.6	Sem registro		
Massa imersa (g)				746.7	745.4	746.8			
Volume (cm <sup>3</sup> )				498.9	496.6	498.8			
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				12.3	11.4	12.4			
Grau de saturação (%)				58	58	57			
Expansão (%)				-0.1	0.0	-0.2			
Condicionamento 24 h imerso a 60° C									
Massa SS (g)				1245.5	1241.8	1245.1	Relatório		
Massa imersa (g)				746.7	745.2	746.2			
Volume (cm <sup>3</sup> )				498.8	496.6	498.9			
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				12.2	11.2	11.9			
Grau de saturação (%)				57	57	55			
Expansão (%)				-0.1	0.0	-0.1			
Propriedades mecânicas									
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento: Aspecto fosco Descolamento: Ruptura de agregado Baixa ocorrência de exposição de agregados. Poucas, concentradas nas extremidade do plano de ruptura.		
G 1	12191	excluído	12181	2.1	2.1	2.1			
G 2	9989		10978	1.9	1.7	1.7			
Relação da Propriedade	82%		90%	83%					

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: -----		Condicionamento de dosagem Marshall					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	391	392	393	394	395	396	Fotos			
	1d2ys4 G1			1d2ys4 G2			1d2ys4 G1		1d2ys4 G2	
Diametro (mm)	101.5	101.8	101.7	101.8	101.8	101.7				
Altura (mm)	62.80	62.60	62.70	62.90	62.70	62.70				
Massa ao ar (g)	1231.7	1231.7	1231.1	1230.8	1234.4	1234.1				
Massa SS (g)	1231.9	1232.0	1231.6	1231.2	1234.7	1234.8				
Massa imersa (g)	733.2	733.3	734.5	733.8	735.4	734.9				
Volume (cm <sup>3</sup> )	498.7	498.7	497.1	497.4	499.3	499.9				
Densidade aparente	2.470	2.470	2.477	2.474	2.472	2.469				
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580				
Volume de vazios (%)	4.3	4.3	4.0	4.1	4.2	4.3				
	Volume de vazios (cm3)			20.3	20.9	21.6				
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1242.0	1245.9	1246.0				
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1247.1	1251.1	1251.4				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1242.3	1246.4	1250.5				
	Massa imersa (g)			744.8	747.4	750.9				
	Volume (cm3)			497.5	499	499.6				
	Volume de água absorvida (cm3)			11.5	12.0	16.4				
	Grau de saturação (%)			57	58	76				
	Expansão (%)			0.0	-0.1	-0.1				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
	Massa SS (g)			1241.3	1246.6	1250.9	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.2 Vv G2 (%)= 4.2 Gs (%)= 63 RMR (%)= 118 RRT (%)= 96			
	Massa imersa (g)			743.3	748.3	747.8				
	Volume (cm3)			498	498.3	503.1				
	Volume de água absorvida (cm3)			10.5	12.2	16.8				
	Grau de saturação (%)			52	59	78				
	Expansão (%)			0.1	-0.2	0.6				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.			
G 1	7443	excluído	7479	1.6	1.8	1.8				
G 2	8410		9229	1.8	1.7	1.5				
Relação da Propriedade	113%		123%	96%						

ASTM D 4867										
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: Cal		Condicionamento de dosagem Marshall					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	397	398	399	400	401	402	Fotos			
	1d2yc4 G1			1d2yc4 G2			1d2yc4 G1		1d2yc4 G2	
Diametro (mm)	101.4	101.6	101.6	101.7	101.7	101.3				
Altura (mm)	63.0	62.9	62.9	62.6	62.70	66.3				
Massa ao ar (g)	1228.1	1227.0	1229.2	1231.1	1233.2	1235.8				
Massa SS (g)	1228.6	1227.4	1229.8	1231.4	1233.7	1236.3				
Massa imersa (g)	732.2	730.9	732.7	733.1	734.7	736.6				
Volume (cm <sup>3</sup> )	496.4	496.5	497.1	498.3	499.0	499.7				
Densidade aparente	2.474	2.471	2.473	2.471	2.471	2.473				
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580				
Volume de vazios (%)	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1				
	Volume de vazios (cm3)			21.1	21.0	20.7				
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1242.7	1244.8	1247.2				
	Massa máxima do cp pós saturação (g)			1248.0	1250.0	1252.4				
Saturação a vácuo										
	Massa SS (g)			1242.9	1245.7	1248.5				
	Massa imersa (g)			745.2	746.0	748.6				
	Volume (cm3)			497.7	499.7	499.9				
	Volume de água absorvida (cm3)			11.8	12.5	12.7				
	Grau de saturação (%)			56	59	61				
	Expansão (%)			-0.1	0.1	0.0				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C										
	Massa SS (g)			1242.7	1245.6	1248.6	<b>Relatório</b>  Vv G1 (%)= 4.2 Vv G2 (%)= 4.2 Gs (%)= 59 RMR (%)= 143 RRT (%)= 110			
	Massa imersa (g)			744.2	746.5	747.2				
	Volume (cm3)			498.5	499.1	501.4				
	Volume de água absorvida (cm3)			11.6	12.4	12.8				
	Grau de saturação (%)			55	59	62				
	Expansão (%)			0.0	0.0	0.3				
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Baixíssima exposição de agregados. Poucas, nas extremidade do plano de ruptura.			
G 1	9464	8411	9709	1.7	1.7	1.9				
G 2	11969	12300	15165	2.1	2.0	1.8				
Relação da Propriedade	126%	146%	156%	110%						

AASHTO T 283										
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: -----		Condicionamento da AASHTO					
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%										
Caraterísticas dos corpos-de-prova										
Identificação do cp	403	404	405	406	407	408	Fotos			
	3d2ys4 G1			3d2ys4 G2			3d2ys4 G1		3d2ys4 G2	
Diametro (mm)	62.8	62.9	62.9	101.8	101.6	101.6	Sem registro			
Altura (mm)	101.9	101.7	101.6	62.3	62.7	62.2				
Massa ao ar (g)	1231.4	1230.4	1231.0	1231.3	1233.1	1228.8				
Massa SS (g)	1231.5	1230.8	1231.3	1231.0	1233.5	1229.0				
Massa imersa (g)	733.7	731.8	734.0	731.9	733.0	731.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )	497.8	499.0	497.3	499.1	500.5	497.3				
Densidade aparente	2.474	2.466	2.475	2.467	2.464	2.471				
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580				
Volume de vazios (%)	4.1	4.4	4.1	4.4	4.5	4.2				
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )				21.9	22.6	21.0				
Massa mínima do cp pós saturação (g)				1243.3	1245.5	1240.4				
Massa máxima do cp pós saturação (g)				1248.8	1251.1	1245.6				
Saturação a vácuo										
Massa SS (g)				1245.2	1247.0	1241.7	Sem registro		Sem registro	
Massa imersa (g)				745.4	746.3	744.4				
Volume (cm <sup>3</sup> )				499.8	500.7	497.3				
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				13.9	13.9	12.9				
Grau de saturação (%)				64	62	61				
Expansão (%)				0.1	0.0	0.0				
Condicionamento 24 h imerso a 60° C									Relatório	
Massa SS (g)				1245.1	1246.7	1242.2				
Massa imersa (g)				745.9	746.3	744.7				
Volume (cm <sup>3</sup> )				499.2	500.4	497.5			Vv G1 (%)= 4.2	
Volume de água absorvida (cm <sup>3</sup> )				13.8	13.6	13.4			Vv G2 (%)= 4.4	
Grau de saturação (%)				63	60	64			Gs (%)= 62	
Expansão (%)				0.0	0.0	0.0			RMR (%)= 106	
									RRT (%)= 85	
Propriedades mecânicas										
	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração(MPa)			Observações visuais pós condicionamento		Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados Poucas, nas extremidade do plano de graúdos. Ruptura.	
G 1	6536	8340	9503	1.8	1.9	1.9				
G 2	6575	7257	12265	1.6	1.6	1.6				
Relação da Propriedade	101%	87%	129%	85%						

AASHTO T 283								
Mistura: 5,5% CAP 20 + gabro			Aditivo: Cal		Condicionamento da AASHTO			
Mét. de compactação: 75 golpes para cps com Vv de aproximadamente 4%								
Caraterísticas dos corpos-de-prova								
Identificação do cp	409	410	411	412	413	414	Fotos	
	3d2yc4 G1			3d2yc4 G2			3d2yc4 G1	3d2yc4 G2
Diametro (mm)	63.1	63.0	63.1	101.9	101.8	101.8	Sem registro	
Altura (mm)	101.7	101.7	101.7	63.0	62.9	62.6		
Massa ao ar (g)	1227.3	1230.0	1227.7	1228.8	1231.1	1230.8		
Massa SS (g)	1227.7	1230.3	1228.0	1227.0	1230.2	1231.2		
Massa imersa (g)	731.1	732.2	731.5	730.4	731.8	730.9		
Volume (cm³)	496.6	498.1	496.5	496.6	498.4	500.3		
Densidade aparente	2.471	2.469	2.473	2.474	2.470	2.460		
Densidade máxima	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580		
Volume de vazios (%)	4.2	4.3	4.2	4.1	4.3	4.6		
	Volume de vazios (cm3)			20.3	21.2	23.2		
	Massa mínima do cp pós saturação (g)			1240.0	1242.8	1243.6		
	f p/ vc ver?			1245.1	1248.1	1249.4		
<b>Saturação a vácuo</b>							Sem registro	Sem registro
	Massa SS (g)			1240.1	1243.4	1243.8		
	Massa imersa (g)			741.8	744.1	743.3		
	Volume (cm3)			498.3	499.3	500.5		
	Volume de água absorvida (cm3)			11.3	12.3	13.0		
	Grau de saturação (%)			56	58	56		
	Expansão (%)			0.3	0.2	0.0		
<b>Condicionamento 24 h imerso a 60° C</b>							<b>Relatório</b>	
	Massa SS (g)			1240.1	1243.7	1244.3	Vv G1 (%)= 4.2 Vv G2 (%)= 4.3 Gs (%)= 56 RMR (%)= 50 RRT (%)= 99	
	Massa imersa (g)			743.0	744.3	743.4		
	Volume (cm3)			497.1	499.4	500.9		
	Volume de água absorvida (cm3)			11.3	12.6	13.5		
	Grau de saturação (%)			56	59	58		
	Expansão (%)			0.1	0.2	0.1		
<b>Propriedades mecânicas</b>							Observações visuais pós condicionamento Descolamento: Ruptura de agregado: Alguma exposição de agregados Poucas, nas extremidade do plano de graúdos. ruptura.	
	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>			<b>Resistência à Tração(MPa)</b>				
G 1	9210	8831	9404	1.9	1.8	1.9		
G 2	4935	4531	4210	1.7	1.9	2.0		
Relação da Propriedade	54%	51%	45%	99%				

## *A*NEXO 2

**Resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência**

Característica do CP	Legenda	N° CP		RT (MPa)		RRTm	MR <sub>ASTM</sub> (MPa)			RMRm
		G1	G2	G1	G2		G1	G2	RMR	
Moldagem ASTM		7	10	1.7	1.5		6034	3241	54%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	2b2ys4	8	11	1.5	1.6	97%	6250	3830	61%	58%
sem cal e VV = 4%		9	12	1.7	1.6		6349	3813	60%	
Moldagem ASTM		21	24	1.4	1.4		5191	3277	63%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	2b2ys7	22	25	1.5	1.5	98%	4761	3126	66%	61%
sem cal e VV = 7%		23	26	1.5	1.4		4828	2626	54%	
Moldagem ASTM		27	30	1.8	1.6		6512	5155	79%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	2b2yc4	28	31	1.7	1.7	98%	6978	5625	81%	78%
com cal e VV = 4%		29	32	1.5	1.7		7331	5390	74%	
Moldagem ASTM		33	36	1.6	1.5		6517	8446	130%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	2b2yc7	34	37	1.6	1.5	97%	7690	4378	57%	91%
com cal e VV = 7%		35	38	1.5	1.6		7138	6114	86%	
Moldagem ASTM		51	54	2.8	2.6		9974	10935	110%	
basalto + CAP 40 (teor ótimo)	2b4ys4	52	55	2.8	2.6	94%	11461	10157	89%	90%
sem cal e VV = 4%		53	56	2.9	2.8		13705	9812	72%	
Moldagem ASTM		65	68	2.5	2.2		10789	4800	44%	
basalto + CAP 40 (teor ótimo)	2b4ys7	66	69	2.4	2.3	93%	11061	5555	50%	59%
sem cal e VV = 7%		67	70	2.3	2.2		10450	8548	82%	
Moldagem ASTM		71	74	2.9	2.8		14472	10814	75%	
basalto + CAP 40 (teor ótimo)	2b4yc4	72	75	G1 excluído		97%	11717	14984	128%	99%
com cal e VV = 4%		73	76	2.9	2.8		12934	12123	94%	
Moldagem ASTM		77	80	2.3	2.3		13073	9248	71%	
basalto + CAP 40 (teor ótimo)	2b4yc7	78	81	2.4	2.5	101%	12585	9116	72%	72%
com cal e VV = 7%		79	82	2.3	2.3		14406	10452	73%	
Moldagem MARSHALL		89	92	1.4	1.6		5668	3637	64%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	1b2ys4	90	93	1.5	1.5	106%	5912	4324	73%	71%
sem cal e VV = 4%		91	94	1.5	1.6		5765	4287	74%	
Moldagem MARSHALL		103	106	1.6	1.7		8543	4672	55%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	1b2yc4	104	107	1.6	1.6	101%	7701	5073	66%	63%
com cal e VV = 4%		105	108	G1 excluído			8171	5664	69%	
Moldagem AASHTO		120	123	1.5	1.6		5531	3053	55%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	3b2ys4	121	124	1.6	1.6	107%	5928	3402	57%	57%
sem cal e VV = 4%		122	125	1.5	1.6		5391	3216	60%	
Moldagem AASHTO		133	137	1.5	1.6		7668	3382	44%	
basalto + CAP 20 (teor ótimo)	3b2yc4	134	138	1.4	1.5	108%	5859	2823	48%	51%
com cal e VV = 4%		135	139	1.4	1.5		5595	3355	60%	
Moldagem ASTM		151	154	1.6	1.0		7794	7084	91%	
granito + CAP 20 (teor ótimo-0.5%)	2g2xs4	152	155	1.7	1.1	62%	10817	7607	70%	99%
sem cal e VV = 4%		153	156	1.8	1.1		6868	9310	136%	
Moldagem ASTM		157	160	1.7	1.7		11058	10159	92%	
granito + CAP 20 (teor ótimo-0.5%)	2g2xc4	158	161	1.6	1.7	103%	10535	10636	101%	113%
com cal e VV = 4%		159	162	1.6	1.7		8751	12773	146%	
Moldagem ASTM		163	166	1.6	1.3		7314	7967	109%	
granito + CAP 20 (teor ótimo)	2g2ys4	164	167	1.8	1.4	82%	7394	9655	131%	120%
sem cal e VV = 4%		165	168	1.7	1.5		G1 excluído			
Moldagem ASTM		177	180	1.4	0.8		4958	4818	97%	
granito + CAP 20 (teor ótimo)	2g2ys7	178	181	1.3	0.8	58%	5609	4001	71%	84%
sem cal e VV = 7%		179	182	1.3	0.8		5319	4426	83%	
Moldagem ASTM		183	186	1.6	1.8		6780	9645	142%	
granito + CAP 20 (teor ótimo)	2g2yc4	184	187	1.6	1.8	114%	6717	10257	153%	153%
com cal e VV = 4%		185	188	G1 excluído			6442	10549	164%	
Moldagem ASTM		197	200	1.6	1.7		6716	5011	75%	
granito + CAP 20 (teor ótimo)	2g2yc7	198	201	1.4	1.6	108%	6109	4519	74%	78%
com cal e VV = 7%		199	202	1.5	1.5		6874	5786	84%	

Característica do CP	Legenda	N° CP		RT (MPa)		RRTm	MR <sub>ASTM</sub> (MPa)			RMRm
		G1	G2	G1	G2		G1	G2	RMR	
Moldagem ASTM		203	206	1.7	1.5		8145	4867	60%	
granito + CAP 20 (teor ótimo+0.5% sem cal e VV = 4%)	2g2zs4	204	207	1.7	1.6	91%	8181	4225	52%	56%
		205	208	1.7	1.6		G1 excluído			
Moldagem ASTM		209	212	1.7	1.7		7364	6475	88%	
granito + CAP 20 (teor ótimo+0.5% com cal e VV = 4%)	2g2zc4	210	213	1.6	1.8	108%	7871	5541	70%	78%
		211	214	1.6	1.8		7433	5655	76%	
Moldagem ASTM		215	218	2.2	1.3		15731	9187	58%	
granito + CAP 40 (teor ótimo-0.5% sem cal e VV = 4%)	2g4xs4	216	219	2.3	1.3	58%	13640	9609	70%	63%
		217	220	2.4	1.4		16661	10159	61%	
Moldagem ASTM		221	224	2.5	2.6		14283	15847	111%	
granito + CAP 40 (teor ótimo-0.5% com cal e VV = 4%)	2g4xc4	222	225	2.4	2.5	105%	16784	15041	90%	95%
		223	226	2.3	2.3		15142	12602	83%	
Moldagem ASTM		227	230	2.4	1.2		13385	7710	58%	
granito + CAP 40 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%	2g4ys4	228	231	2.5	1.4	55%	15363	10440	68%	69%
		229	232	2.6	1.6		12643	10370	82%	
Moldagem ASTM		241	244	2.2	1.1		12644	5778	46%	
granito + CAP 40 (teor ótimo) sem cal e VV = 7%	2g4ys7	242	245	2.1	1.3	54%	11713	8536	73%	55%
		243	246	2.2	1.1		10204	4843	47%	
Moldagem ASTM		247	250	2.3	2.2		17457	9594	55%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%	2g4yc4	248	251	2.3	2.3	95%	14460	12332	85%	70%
		249	252	2.4	2.3		15697	11156	71%	
Moldagem ASTM		253	256	2.0	1.9		18777	9895	53%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 7%	2g4yc7	254	257	2.0	1.8	92%	16867	9045	54%	61%
		255	258	2.0	1.8		12944	9735	75%	
Moldagem ASTM		259	262	2.7	2.3		19249	26193	136%	
granito + CAP 20 (teor ótimo+0.5% sem cal e VV = 4%)	2g4zs4	260	263	2.8	2.3	79%	17816	14190	80%	94%
		261	264	2.8	2.0		16343	10865	66%	
Moldagem ASTM		265	268	2.6	2.3		12661	8639	68%	
granito + CAP 20 (teor ótimo+0.5% com cal e VV = 4%)	2g4zc4	266	269	2.6	2.2	88%	13082	10101	77%	72%
		267	270	2.5	2.3		13804	9863	71%	
Moldagem MARSHALL		271	274	1.6	1.1		5299	4984	94%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%	1g2ys4	272	275	1.6	1.0	61%	7381	3414	46%	63%
		273	276	1.7	0.9		7994	3915	49%	
Moldagem MARSHALL		285	288	1.6	1.5		9561	6628	69%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%	1g2yc4	286	289	G1 excluído		92%	7741	5572	72%	69%
		287	290	1.6	1.5		9215	5947	65%	
Moldagem AASHTO		310	313	1.6	0.7		5705	2243	39%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%	3g2ys4	311	314	1.7	0.7	43%	6250	2077	33%	31%
		312	315	1.7	0.8		7431	1540	21%	
Moldagem AASHTO		324	327	1.6	1.7		8819	5059	57%	
granito + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%	3g2yc4	325	328	1.6	1.6	103%	7873	3842	49%	54%
		326	329	1.6	1.7		8353	4620	55%	
Moldagem ASTM		355	358	1.9	1.7		9136	8661	95%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%	2d2ys4	356	359	1.9	1.5	83%	7727	7069	91%	95%
		357	360	1.9	1.6		7332	7239	99%	
Moldagem ASTM		361	364	2.1	1.9		12191	9989	82%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%	2d2yc4	362	365	2.1	1.7	83%	G1 excluído			86%
		363	366	2.1	1.7		12181	10978	90%	
Moldagem MARSHALL		391	394	1.6	1.8		7443	8410	113%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo) sem cal e VV = 4%	1d2ys4	392	395	1.8	1.7	96%	G1 excluído			118%
		393	396	1.8	1.5		7479	9229	123%	
Moldagem MARSHALL		397	400	1.7	2.1		9464	11969	126%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo) com cal e VV = 4%	1d2yc4	398	401	1.7	2.0	110%	8411	12300	146%	143%
		399	402	1.9	1.8		9709	15165	156%	



Característica do CP	Legenda	N ° CP		RT (MPa)		RRTm	MR <sub>ASTM</sub> (MPa)			RMRm
		G1	G2	G1	G2		G1	G2	RMR	
Moldagem AASHTO		403	406	1.8	1.6		6536	6575	101%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo)	3d2ys4	404	407	1.9	1.6	85%	8340	7257	87%	106%
sem cal e VV = 4%		405	408	1.9	1.6		9503	12265	129%	
Moldagem AASHTO		409	412	1.9	1.7		9210	4935	54%	
gabro + CAP 20 (teor ótimo)	3d2yc4	410	413	1.8	1.9	99%	8831	4531	51%	50%
com cal e VV = 4%		411	414	1.9	2.0		9404	4210	45%	

	CP	Ciclo				Procedimento de cálculo segundo ASTM												RR	MR <sub>T</sub>	σ MR <sub>T</sub>	Taxa σ <sub>MR T</sub>	MR <sub>I</sub>	σ MR <sub>I</sub>	Taxa σ <sub>MR I</sub>	RR	Atraso (s)	σ Atraso (s)
		Q média (N)	σ Q (N)	inicio	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)										
2b2ys4	10 G1	2133	6.8	30	80	6034	139.8	2%	11612	341.1	3%	48%	6400	279.1	4%	8790	307.5	3%	27%	0.060	0.004						
	10 G2	1285	6.6	36	101	3241	53.2	2%	6594.8	179.9	3%	51%	3600	163.1	5%	4874	137.6	3%	26%	0.070	0.006						
	11 G1	1612	7.6	65	102	6250	146.2	2%	15172	462.9	3%	59%	6284	323.9	5%	9075	427.4	5%	31%	0.068	0.005						
	11 G2 a	1291	5.5	30	73	3830	80.6	2%	7674.6	285.6	4%	50%	4178	210.1	5%	5704	179.3	3%	27%	0.067	0.006						
	12 G1	2136	10.7	50	101	6349	378.5	6%	11990	1147.2	10%	47%	6574	410.0	6%	9076	561.3	6%	28%	0.056	0.005						
	12 G2	1296	5.1	40	90	3813	49.4	1%	7544.8	203.9	3%	49%	4229	158.2	4%	5732	168.9	3%	26%	0.069	0.005						
2b2ys7	24 G1	1605	13.1	30	102	5191	168.1	3%	9069	481.0	5%	43%	5332	279.9	5%	7367	334.9	5%	28%	0.052	0.008						
	24 G2	673	5.0	80	100	3277	155.8	5%	6581	404.1	6%	50%	3446	243.6	7%	4800	280.3	6%	28%	0.064	0.004						
	25 G1	1606	16.2	45	101	4761	147.8	3%	8412	408.1	5%	43%	4839	208.0	4%	6734	299.2	4%	28%	0.052	0.008						
	25 G2	846	5.5	70	94	3126	77.6	2%	6406	710.6	11%	51%	3343	133.2	4%	4685	183.0	4%	29%	0.068	0.006						
	26 G1	1237	8.8	50	90	4828	75.5	2%	8271	256.2	3%	42%	5013	266.3	5%	6899	278.4	4%	27%	0.051	0.006						
	26 G2	845	7.0	40	102	2626	43.7	2%	5269	155.4	3%	50%	2848	96.7	3%	3911	119.9	3%	27%	0.065	0.003						
2b2yc4	30 G1	1668	22.0	30	80	6512	242.4	4%	11271	580.6	5%	42%	6662	398.1	6%	9249	478.2	5%	28%	0.049	0.007						
	30 G2	1288	6.1	60	70	5155	98.4	2%	9557.1	249.8	3%	46%	5582	263.3	5%	7582	235.6	3%	26%	0.066	0.010						
	31 G1	2168	4.7	57	70.5	6978	125.4	2%	12245	349.2	3%	43%	7154	372.4	5%	9902	434.6	4%	28%	0.058	0.004						
	31 G2	1305	5.6	30	60	5625	97.0	2%	9938.1	245.2	2%	43%	6103	527.6	9%	8142	449.3	6%	25%	0.062	0.009						
	32 G1	2201	9.0	65	85	7331	72.5	1%	13936	242.4	2%	47%	7605	266.5	4%	10658	275.8	3%	29%	0.056	0.005						
	32 G2	1296	11.8	15	82	5390	332.4	6%	9748	269.4	3%	45%	5842	368.5	6%	7862	396.3	5%	26%	0.064	0.005						
2b2yc7	36 G1	1519	9.4	41	80	6517	138.6	2%	11854	374.9	3%	45%	6552	332.2	5%	9187	368.3	4%	29%	0.053	0.007						
	36 G2 2	1636	5.4	50	84	8446	266.9	3%	14381	802.1	6%	41%	9139	774.0	8%	12465	851.4	7%	27%	0.059	0.002						
	37 G1	1499	7.3	85	102	7690	275.6	4%	13670	606.3	4%	44%	7732	324.8	4%	11100	548.0	5%	30%	0.050	0.003						
	37 G2	1377	5.1	50	90	4378	103.2	2%	7918	354.6	4%	45%	4722	281.4	6%	6468	333.7	5%	27%	0.059	0.005						
	38 G1	2276	10.6	60	69	7138	135.1	2%	15154	711.4	5%	53%	7088	288.4	4%	10100	309.8	3%	30%	0.059	0.007						
	38 G2	1398	5.4	30	62	6114	130.4	2%	11541	461.4	4%	47%	6749	247.4	4%	9292	347.8	4%	27%	0.067	0.007						
2b4ys4	54 G1	2694	9.1	70	101	9974	122.2	0.0	16024.3	336.5	0.0	38%	10381	331.4	0.0	14233	352.8	0.0	27%	0.056	0.006						
	54 G2	2335	2.4	25	100	10935	139.7	1%	20223	236.7	1%	46%	12187	404.4	3%	16544	137.6	1%	26%	0.069	0.006						
	55 G1	2729	11.0	30	70	11461	259.5	0.0	19975.5	732.7	0.0	43%	11821	453.4	0.0	16473	659.0	0.0	28%	0.056	0.005						
	55 G2	2303	6.4	10	40	10157	226.4	2%	18164.1	550.6	3%	44%	11385	494.8	4%	15399	586.2	4%	26%	0.067	0.003						
	56 G1	2708	9.4	60	101	13705	418.3	0.0	22561.8	1123.4	0.0	39%	14058	889.7	0.1	19482	1097.3	0.1	28%	0.052	0.007						
	56 G2	2364	4.5	45	67	9812	197.7	2%	16143.7	447.8	3%	39%	10527	522.5	5%	14126	543.1	4%	25%	0.058	0.007						
2b4ys7	68 G1	3180	10.3	60	77	10789	209.6	2%	17905	497.3	3%	40%	11603	546.3	5%	15737	525.3	3%	26%	0.061	0.006						
	68 G2	1349	6.2	20	70	4800	120.0	3%	10400	958.5	9%	54%	5255	298.7	6%	7291	370.4	5%	28%	0.071	0.005						
	69 G1 d	2852	11.3	50	101	11061	451.2	4%	18195	1065.4	6%	39%	11817	974.5	8%	16038	1072.0	7%	26%	0.057	0.010						
	69 G2	1351	3.2	50	90	5555	165.0	3%	13042	417.3	3%	57%	5914	124.5	2%	8553	147.9	2%	31%	0.075	0.002						
	70 G1	2711	10.5	30	80	10450	337.0	3%	17402	788.3	5%	40%	10791	530.5	5%	14908	730.9	5%	28%	0.054	0.006						
	70 G2	1334	5.8	80	100	8548	324.3	4%	19309	1426.7	7%	56%	9329	669.8	7%	13174	675.9	5%	29%	0.073	0.007						
2b4yc4	74 G1	3662	8.1	68.5	82.5	14472	288.3	2%	23648	819.5	3%	39%	14917	870.2	6%	20618	984.6	5%	28%	0.059	0.004						
	74 G2	2368	8.4	60	90	10814	202.8	2%	18637.1	558.0	3%	42%	12298	1000.8	8%	16299	717.9	4%	25%	0.067	0.004						
	75 G1	3682	8.0	52	101	11717	187.8	2%	18944	527.4	3%	38%	12476	435.3	3%	16851	538.8	3%	26%	0.057	0.005						
	75 G2	2354	8.1	25	100	14984	191.9	1%	27809	1922.6	7%	46%	16348	578.6	4%	22787	250.6	1%	28%	0.066	0.004						
	76 G1	3084	10.5	62	77	12934	132.3	1%	21532	369.0	2%	40%	13728	1024.0	7%	18688	960.5	5%	27%	0.060	0.006						
	76 G2	2333	6.2	70	100	12123	319.1	3%	20665.5	824.3	4%	41%	13568	837.1	6%	17938	915.0	5%	24%	0.064	0.007						

	CP	Ciclo			Procedimento de cálculo segundo ASTM																
		Q média (N)	$\sigma$ Q (N)	início	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)	Atraso (s)	$\sigma$ Atraso (s)
2b2yc7	80 G1	3850	14.0	65	99	13073	189.9	1%	20893	540.7	3%	37%	14282	796.7	6%	18816	742.5	4%	24%	0.060	0.005
	80 G2	1716	6.4	50	70	9248	157.7	2%	18452	716.6	4%	50%	9990	749.8	8%	14145	885.1	6%	29%	0.067	0.005
	81 G1 a	3551	10.9	70	101	12585	187.1	1%	22513	817.8	4%	44%	13285	610.8	5%	18082	631.3	3%	27%	0.061	0.007
	81 G2	1894	6.7	70	100	9116	171.3	2%	16489	486.0	3%	45%	10172	591.5	6%	13777	764.3	6%	26%	0.067	0.005
	82 G1	3852	12.8	30	100	14406	580.9	4%	22119	1483.9	7%	35%	15382	1470.7	10%	20332	1208.0	6%	24%	0.056	0.010
	82 G2	1910	7.3	30	70	10452	323.2	3%	20784	1012.7	5%	50%	11540	1101.4	10%	15861	1024.6	6%	27%	0.066	0.005
1b2ys4	92 G1 e	1502	16.1	30	102	5668	180.6	3%	11648	480.4	4%	51%	5756	271.5	5%	8135	380.1	5%	29%	0.060	0.006
	92 G2	1065	8.0	15	70	3637	86.1	2%	7175.7	197.2	3%	49%	3994	221.8	6%	5438	209.2	4%	27%	0.066	0.005
	93 G1	1709	8.9	61	97	5912	113.8	2%	11176	321.7	3%	47%	6045	235.2	4%	8487	283.9	3%	29%	0.060	0.005
	93 G2	1059	5.6	20	40	4324	102.0	2%	8771.5	536.5	6%	51%	4514	331.3	7%	6343	347.3	5%	29%	0.069	0.009
	94 G1	1697	9.7	25	35	5765	98.4	2%	10800	111.5	1%	47%	5855	382.0	7%	8284	270.0	3%	29%	0.058	0.003
	94 G2	1081	7.3	30	60	4287	69.6	2%	8206.8	311.5	4%	48%	4575	175.7	4%	6273	187.6	3%	27%	0.062	0.005
1b2yc4	106 G1 d	2397	10.0	50	101	8543	269.2	3%	17678.8	520.4	3%	52%	9031	537.6	6%	12750	630.1	5%	29%	0.066	0.004
	106 G2	1075	6.0	41	102	4672	106.3	2%	8706.8	284.0	3%	46%	5112	395.3	8%	6936	325.5	5%	26%	0.066	0.006
	107 G1	1762	7.9	30	101	7701	116.5	2%	14465.2	447.3	3%	47%	7908	322.0	4%	10994	446.5	4%	28%	0.060	0.006
	107 G2	1046	5.4	40	101	5073	174.0	3%	9580.9	666.4	7%	47%	5336	280.8	5%	7433	392.7	5%	28%	0.064	0.004
	108 G1	2318	10.8	0	60	8171	211.0	3%	14579.6	1586.6	11%	44%	8631	591.5	7%	11874	555.4	5%	27%	0.062	0.007
	108a G2	1052	9.5	60	80	5664	133.7	2%	10291.4	327.0	3%	45%	6120	327.3	5%	8364	490.6	6%	27%	0.065	0.003
3b2ys4	123 g1	1549	12.0	41	101	5531	86.2	2%	9756	234.9	2%	43%	5667	142.7	3%	7843	241.5	3%	28%	0.054	0.004
	123 G2	1128	7.1	30	60	3053	56.1	2%	6232	190.5	3%	51%	3323	153.4	5%	4534	167.7	4%	27%	0.066	0.006
	124 g1	1931	9.0	50	79	5928	111.3	2%	10747	364.5	3%	45%	6077	175.6	3%	8457	255.4	3%	28%	0.054	0.006
	124 G2	1080	7.5	30	102	3402	72.6	2%	6674	633.5	9%	49%	3652	177.9	5%	4998	171.5	3%	27%	0.066	0.008
	1G1 g1	1437	16.5	20	80	5391	149.4	3%	9359	343.9	4%	42%	5459	276.3	5%	7616	355.1	5%	28%	0.055	0.006
	1G1 G2	1129	9.2	30	89	3216	65.1	2%	6237	90.7	1%	48%	3443	64.9	2%	4741	69.7	1%	27%	0.072	0.000
3b2yc4	137 G1	1494	10.8	20	50	7668	158.9	3%	14922	560.1	3%	49%	7901	493.7	3%	11210	658.1	3%	30%	0.056	0.005
	137 G2	1109	6.2	30	68	3382	58.5	2%	7419	267.2	4%	54%	3725	159.1	4%	5124	153.9	3%	27%	0.070	0.005
	138 g1	1490	13.8	15	101	5859	160.1	3%	10660	354.7	3%	45%	6027	333.1	6%	8394	384.3	5%	28%	0.054	0.006
	138 G2	1125	6.4	30	70	2823	37.8	1%	5834	156.1	3%	52%	3051	116.8	4%	4220	97.6	2%	28%	0.064	0.005
	139 g1	1487	18.5	30	102	5595	115.1	2%	10287	325.3	3%	46%	5682	268.9	5%	8004	303.5	4%	29%	0.056	0.005
	139 G2	1253	5.8	80	100	3355	42.1	1%	6839	128.8	2%	51%	3794	185.5	5%	5082	127.9	3%	25%	0.069	0.003

Teste de Grubbs para os valores de MR de G1

CPS	Corpo de prova			Média	Desvio padrão	G maior	G menor	G crítico 95%	Y min	Média adotada
	1	2	3							
2b2ys4	6034	6250	6349	6211	161.20	0.856	1.099	1.15	6026	6211
2b2ys7	4761	4828	5191	4927	231.23	1.143	0.716	1.15	4661	4927
2b2yc4	6512	6978	7331	6940	411.07	0.951	1.043	1.15	6468	6940
2b2yc7	6517	7138	7690	7115	587.15	0.980	1.019	1.15	6440	7115
2b4ys4	9974	11461	13705	11713	1878.37	1.060	0.926	1.15	9553	11713
2b4ys7	10450	10789	11061	10767	306.14	0.962	1.034	1.15	10415	10767
2b4yc4	11717	12934	14472	13041	1380.67	1.036	0.959	1.15	11453	13041
2b2yc7	12585	13073	14406	13354	942.44	1.115	0.817	1.15	12271	13354
1b2ys4	5668	5765	5912	5782	122.54	1.062	0.923	1.15	5641	5782
1b2yc4	7701	8171	8543	8138	422.01	0.959	1.037	1.15	7653	8138

	CP	Q média (N)	$\sigma$ Q (N)	Ciclo		Procedimento de cálculo segundo ASTM							Procedimento de cálculo segundo NCHRP							Atraso (s)	$\sigma$ Atraso (s)	
				inicio	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	$\sigma$ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa $\sigma$ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)			
2g2xs4	154 25	2536	11.0	20	50	7794	110.4	1%	14406	314.3	2%	46%	8301	282.2	3%	11364	316.6	3%	27%	0.060	0.005	
	154 g2	1338	6.9	65	100	7084	93.4	1%	11740	43.1	0%	40%	7803	61.7	1%	10441	169.0	2%	25%	0.063	0.001	
	155 25 d	2274	10.9	5	25	10817	283.5	3%	18025	1097.6	6%	40%	11963	781.8	7%	15914	722.3	5%	25%	0.066	0.007	
	155 g2	1352	5.5	40	67	7607	410	5%	12970	1000.9	8%	41%	8208	927.4	11%	11353	1074.1	9%	28%	0.063	0.007	
	156 25	2485	13.2	50	102	6868	123.4	2%	11169	566.7	5%	39%	7204	389.4	5%	9705	328.5	3%	26%	0.053	0.007	
	156 g2	1353	5.0	75	89	9310	350	4%	16635	969.3	6%	44%	9906	878.6	9%	14022	735.2	5%	29%	0.065	0.010	
2g2xc4	160 25 a	3051	11.8	65	95	11058	354.0	3%	24842	914.3	4%	0.5549	11782	1110.9	9%	16387	977.8	6%	28%	0.068	0.005	
	160 g2	1680	5.4	60	101	10159	487	5%	16399	1390.9	8%	38%	10784	1314.5	12%	14781	1331.9	9%	0.2704	0.057	0.012	
	161 25	3138	7.2	45	75	10535	214.2	2%	21916	1155.0	5%	52%	11039	530.3	5%	15516	660.8	4%	29%	0.066	0.005	
	161 g2	1677	6.0	20	50	10636	499	5%	17157	1443.7	8%	38%	11459	1067.9	9%	15582	1260.0	8%	26%	0.061	0.010	
	162 25	2527	11.4	30	102	8751	213.8	2%	15747	724.5	5%	44%	9042	493.9	5%	12596	550.4	4%	28%	0.058	0.007	
	162 g2	1825	6.2	50	73	12773	269.2	2%	20861	724.2	3%	39%	13996	285.4	2%	18258	465.9	3%	23%	0.062	0.001	
2g2ys4	166 25 d	2407	4.7	60	80	7314	136.5	2%	12561	462.7	4%	42%	7691	383.1	5%	10410	386.2	4%	26%	0.060	0.007	
	166 g2	1807	6.6	20	75	7967	166.1	2%	13440	660.9	5%	41%	8743	224.6	3%	11738	507.3	4%	25%	0.062	0.003	
	167 25	2152	11.1	25	80	7394	128.2	2%	12253	345.3	3%	40%	7746	439.5	6%	10533	442.3	4%	26%	0.057	0.006	
	167 g2	1823	6.0	70	102	9655	253	3%	16788	894.8	5%	42%	10606	610.3	6%	14442	902.7	6%	27%	0.066	0.007	
	168 25	excluído pelo M. Grubbs																				
	168 g2	1815	7.0	45	100	9263	11.5	0%	15617	161.1	1%	41%	10223	21.8	0%	13988	48.9	0%	27%	0.063	0.003	
2g2ys7	180 25	1793	6.6	70	102	4958	173.4	3%	8295	551.7	7%	40%	5101	310.0	6%	7016	345.4	5%	27%	0.053	0.008	
	180 g2	1791	5.6	10	95	4818	127.0	3%	8475	298.5	4%	43%	5477	219.2	4%	7229	234.0	3%	24%	0.066	0.001	
	181 25	1812	8.8	40	70	5609	74.7	1%	10152	213.1	2%	45%	5857	141.0	2%	8093	172.8	2%	28%	0.059	0.004	
	181 g2	1806	6.4	20	60	4001	139	3%	8254	406.6	5%	52%	4446	269.8	6%	6071	288.8	5%	27%	0.068	0.005	
	182 25	1800	6.8	70	101	5319	72.5	1%	9231	158.6	2%	42%	5545	185.1	3%	7537	183.2	2%	26%	0.060	0.005	
	182 g2	1476	8.1	20	40	4426	82	2%	8347	250.4	3%	47%	4860	209.0	4%	6559	217.3	3%	26%	0.068	0.005	
2g2yc4	186 25	2235	8.2	60	102	6780	101.3	1%	11589	305.5	3%	42%	7124	270.8	4%	9763	294.8	3%	27%	0.061	0.005	
	186 g2	2168	8.9	30	85	9645	56.0	1%	15954	119.3	1%	40%	10943	203.1	2%	14231	115.0	1%	23%	0.066	0.002	
	187 25	2522	9.9	40	101	6717	144.4	2%	11625	533.6	5%	42%	7093	418.9	6%	9687	345.9	4%	27%	0.059	0.007	
	187 g2	2145	7.6	20	50	10257	212	2%	18076	766	4%	43%	11492	1173	10%	15343	815.7	5%	25%	0.063	0.007	
	188 25	2503	9.8	50	85	6442	66.6	1%	11052	224.6	2%	42%	6890	320.5	5%	9276	292.8	3%	26%	0.061	0.005	
	188 g2	2211	8.2	41	65	10549	172	2%	20012	617.5	3%	47%	11550	338.4	3%	15787	742.3	5%	27%	0.068	0.006	
2g2yc7	200 25	2358	8.7	30	80	6716	103.7	2%	11923	306.5	3%	44%	7027	403.0	6%	9583	425.8	4%	27%	0.059	0.006	
	200 g2	1056	6.9	30	101	5011	242.7	5%	8342	654.5	8%	40%	5187	468.5	9%	7112	542.8	8%	27%	0.058	0.011	
	201 25 e	2201	10.4	50	102	6109	181.2	3%	11262	459.2	4%	46%	6417	267.6	4%	8854	350.2	4%	28%	0.062	0.006	
	201 g2	1085	6.4	60	100	4519	98.6	2%	8263	656.0	8%	45%	4894	203.5	4%	6699	277.3	4%	27%	0.063	0.006	
	202 25	1947	11.3	30	95	6874	103.8	3%	12118	360.3	3%	43%	6973	281.6	4%	9772	357.7	4%	29%	0.055	0.006	
	202 g2	1100	6.4	70	100	5786	215.1	4%	11035	634.7	6%	48%	6050	471.2	8%	8589	707.4	8%	30%	0.063	0.009	
2g2zs4	206 25	2019	9.1	50	95	8145	260.5	3%	13700	888.2	6%	41%	8332	544.0	7%	11668	616.3	5%	29%	0.058	0.009	
	206 g2	1071	6.8	27	87	4867	128.4	3%	9014	251.7	3%	46%	5203	170.1	3%	7194	60.8	1%	28%	0.065	0.006	
	207 25	2008	10.0	45	85	8181	191.0	2%	13957	438.8	3%	41%	8184	503.6	6%	11458	566.2	5%	29%	0.058	0.005	
	207 g2	1083	6.6	30	60	4225	82.4	2%	8419	271.5	3%	50%	4441	278.5	6%	6256	319.4	5%	29%	0.064	0.004	
	208 25	excluído pelo M. Grubbs																				
	208 g2	1050	7.7	30	89	4963	114.8	2%	8752	647.9	7%	43%	5517	423.8	8%	7465	468.7	6%	26%	0.063	0.007	

	CP	Q média (N)	σ Q (N)	Ciclo		Procedimento de cálculo segundo ASTM								Procedimento de cálculo segundo NCHRP							
				inicio	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)	RR (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)	RR (%)	Atraso (s)	σ Atraso (s)
2g2zc4	212 25	1933	10.8	40	102	7364	167.6	2%	12730	415.1	3%	42%	7527	379.2	5%	10402	413.1	4%	28%	0.057	0.006
	212 g2	1096	7.9	55	80	6475	139.3	2%	11884	403.2	3%	46%	6987	663.2	9%	9578	638.6	7%	27%	0.063	0.004
	213 25	1936	9.0	50	102	7871	160.2	2%	13479	437.0	3%	42%	8131	606.6	7%	11297	634.0	6%	28%	0.061	0.006
	213 g2	1091	5.6	57	95	5541	233.2	4%	9948	614.3	6%	0.44	5960	235.5	4%	8188	184.9	2%	27%	0.064	0.010
	214 25 aa	2411	8.1	50	80	7433	122.8	2%	12964	511.3	4%	0.4266	7816	516.1	7%	10733	527.9	5%	27%	0.059	0.006
	214 g2	1312	5.7	70	100	5655	119.4	2%	10327	334.0	3%	45%	6202	317.3	5%	8338	370.3	4%	26%	0.068	0.005
2g4xs4	218 25	4447	15.8	50	70	15731	243.5	2%	24068	1317.6	5%	35%	16954	1198.6	7%	22578	854.3	4%	25%	0.060	0.008
	218 g2	1779	5.6	60	80	9187	257.3	3%	17586	912.3	5%	48%	9920	628.1	6%	13475	681.9	5%	26%	0.070	0.005
	219 25	4401	13.3	60	102	13640	164.5	1%	21346	419.8	2%	36%	14535	415.4	3%	19188	491.4	3%	24%	0.058	0.005
	219 g2	1797	8.3	70	90	9609	332.4	3%	14853	719.2	5%	35%	10768	705.4	7%	14243	948.5	7%	24%	0.062	0.008
	220 25	4417	14.4	40	70	16661	513.2	3%	26243	1447.6	6%	37%	16687	703.8	4%	22886	1021.2	4%	27%	0.053	0.008
	220 g2	2110	9.8	70	100	10159	359.6	4%	15831	765.3	5%	36%	11550	1088.5	9%	14917	1081.1	7%	23%	0.062	0.009
2g4xc4	224 25	3880	10.6	35	70	14283	292.0	2%	22285	690.8	3%	36%	15312	1151.9	8%	20553	1008.6	5%	26%	0.056	0.006
	224 g2	2123	6.6	70	102	15847	487.6	3%	26553	1382.7	5%	40%	17034	2318.4	14%	23257	2210.7	10%	27%	0.061	0.006
	225 25	4105	11.1	30	95	16784	368.7	2%	24888	807.5	3%	33%	17958	1320.1	7%	23648	1121.6	5%	24%	0.057	0.008
	225 g2	2420	9.0	30	70	15041	544.7	4%	25471	1283.2	5%	41%	16504	1425.6	9%	22087	1446.6	7%	25%	0.067	0.009
	226 25	4550	16.9	55	72	15142	436.7	3%	23142	1379.6	6%	35%	16008	1173.4	7%	21454	1233.8	6%	25%	0.053	0.009
	226a g2	2167	4.7	55	75	12602	513.3	4%	19596	981.5	5%	36%	14067	1285.1	9%	18316	1291.7	7%	23%	0.059	0.009
2g4ys4	230 25	4056	9.9	30	60	13385	281.1	2%	22479	1294.8	6%	40%	14205	684.0	5%	19272	1034.8	5%	26%	0.062	0.006
	230 g2	1540	3.1	25	100	7710	43.4	1%	14208	38.5	0%	46%	8599	400.6	5%	11734	479.1	4%	27%	0.067	0.002
	231 25	4073	13.0	60	70	15363	294.0	2%	24449	613.6	3%	37%	16002	396.2	2%	21927	892.7	4%	27%	0.058	0.004
	231 g2	1549	5.0	30	50	10440	318.3	3%	19490	991.6	5%	46%	11502	884.1	8%	15980	1053.9	7%	28%	0.066	0.008
	232 25	4082	9.8	60	90	12643	207.6	3%	19324	618.9	3%	35%	13320	672.1	5%	17716	622.0	4%	25%	0.056	0.006
	232 g2	1797	8.2	70	90	10370	255.5	2%	18067	926.3	5%	43%	11364	493.0	4%	15342	725.9	5%	26%	0.062	0.008
2g4ys7	244 25	3199	4.9	61	81	12644	196.4	2%	22518	427.5	2%	44%	13374	411.8	3%	18356	750.5	4%	27%	0.060	0.005
	244 g2	1756	7.1	70	102	5778	102.9	2%	10586	293.7	3%	45%	6378.9	286	4%	8598	251.0	3%	26%	0.065	0.005
	245 25	3131	11.3	20	50	11713	145.6	1%	18943	352.7	2%	38%	12388	268.8	2%	16828	376.2	2%	26%	0.058	0.003
	245 g2	1780	6.3	25	100	8536	144.5	2%	14672	327.3	2%	42%	9511	106	1%	12797	86.5	1%	26%	0.063	0.001
	246 25	3165	11.6	50	70	10204	113.2	1%	16024	241.4	2%	36%	10685	270.3	3%	14476	294.5	2%	26%	0.057	0.005
	246 g2	1776	6.6	30	85	4843	69.7	1%	9771	214.6	2%	50%	5358	240.1	4%	7371	217.2	3%	27%	0.070	0.004
2g4yc4	250 25	3385	10.9	40	70	17457	368.7	2%	27326	1395.8	5%	36%	19078	1326.2	7%	25191	1181.7	5%	24%	0.060	0.009
	250 g2	1756	7.0	60	80	9594	630.2	7%	15185	1188.5	8%	37%	10700	1445.0	14%	14259	1451.8	10%	25%	0.060	0.013
	251 25	3792	11.0	40	60	14460	175.9	1%	24746	412.9	2%	42%	15507	359.5	2%	21010	670.1	3%	26%	0.063	0.003
	251 g2	2071	7.0	55	73	12332	176.0	1%	20909	1541.8	7%	41%	14275	1139.2	8%	18089	937.9	5%	21%	0.068	0.006
	252 25	3797	7.0	10	60	15697	340.0	2%	27410	484.4	2%	43%	17046	358.4	2%	23221	399.3	2%	27%	0.067	0.001
	252 g2	2074	5.0	30	75	11156	286.4	3%	20196	887.0	4%	45%	12385	713.3	6%	16905	1005.9	6%	27%	0.067	0.006
2g4yc7	256 25	3873	8.9	20	50	18777	354.1	2%	37285	1436.6	4%	50%	19472	884.5	5%	27651	1217.8	4%	30%	0.070	0.006
	256 g2	2070	5.3	35	65	9895	394.8	4%	19574	1214.2	6%	49%	11007	335.8	3%	15295	525.1	3%	28%	0.074	0.000
	257 25	3869	9.5	10	74	16867	1500.9	9%	32369	3615.2	11%	48%	18256	1897.2	10%	25412	2110.1	8%	28%	0.070	0.000
	257 g2	2058	7.3	56	90	9045	159.5	2%	16371	670.0	4%	45%	10246	264.8	3%	13803	97.4	1%	26%	0.067	0.002
	258 25	3847	11.7	60	90	12944	180.5	1%	22654	1118.2	5%	43%	13517	786.5	6%	18680	757.0	4%	28%	0.062	0.007
	258 g2	2076	9.6	53	61	9735	199.0	2%	18327	502.2	3%	47%	11031	983.5	9%	15044	859.9	6%	27%	0.067	0.008

	CP	Q média (N)	σ Q (N)	Ciclo		Procedimento de cálculo segundo ASTM							Procedimento de cálculo segundo NCHRP							Atraso (s)	σ Atraso (s)
				inicio	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ MR <sub>T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ MR <sub>I</sub> (%)	RR (%)		
2g4zs4	262 25	4184	13.5	50	70	19249	830.3	4%	30480	1805.9	6%	37%	20207	1236.3	6%	27419	1601.5	6%	26%	0.057	0.008
	262 g2	2487	9.1	50	102	26193	1524.3	6%	53503	5288.4	10%	51%	29624	5523.9	19%	41768	6503.2	16%	29%	0.067	0.005
	263 25	4885	11.3	70	102	17816	599.6	3%	28943	1961.7	7%	38%	19179	1734.8	9%	25717	1749.0	7%	25%	0.059	0.009
	263 g2	2424	7.3	30	85	14190	493.3	3%	23401	860.8	4%	39%	15638	327.4	2%	20686	608.0	3%	24%	0.061	0.001
	264 25	4876	11.2	30	80	16343	336.0	2%	26249	798.6	3%	38%	17704	267.1	2%	23428	130.7	1%	24%	0.059	0.003
	264 g2	2467	39.3	50	70	10865	399.3	4%	18531	1092.1	6%	41%	12105	840.2	7%	16238	1071.0	7%	25%	0.062	0.008
2g4zc4	268 25	3486	9.0	20	55	12661	249.7	2%	21242	665.9	3%	40%	13496	937.8	7%	18384	1017.2	6%	27%	0.060	0.004
	268 g2	2594	9.4	45	85	8639	145.2	2%	14561	407.1	3%	41%	9909	518.0	5%	12925	511.4	4%	23%	0.065	0.005
	269 25	3651	9.6	40	60	13082	252.0	2%	21944	531.2	2%	40%	14196	888.4	6%	19012	827.3	4%	25%	0.065	0.008
	269 g2	2607	9.9	0	40	10101	271.9	3%	17184	852.0	5%	41%	11473	786.5	7%	15096	818.0	5%	24%	0.061	0.008
	270 25 d	3290	11.9	20	40	13804	451.6	3%	21823	1383.7	6%	37%	14711	1115.9	8%	19758	1045.3	5%	26%	0.058	0.011
	270 g2	2592	7.5	30	65	9863	183.7	2%	16869	575.8	3%	42%	10985	787.5	7%	14552	519.4	4%	25%	0.061	0.007
1g2ys4	274 25	3006	8.9	55	100	5299	56.8	1%	9661	113.9	1%	45%	5693	28.6	1%	7704	23.5	0%	26%	0.067	0.001
	274 g2	1148	5.9	30	102	4984	184.4	4%	8808	658.8	7%	43%	5296	455.3	9%	7207	471.3	7%	0.2651	0.060	0.010
	275 25	2148	8.0	35	70	7381	161.7	2%	14555	631.3	4%	49%	7484	239.2	3%	10567	337.9	3%	29%	0.064	0.005
	275 g2	1133	6.8	50	80	3414	79.3	2%	7452	301.1	4%	54%	3643	204.7	6%	5182	213.3	4%	0.2971	0.070	0.005
	276 25	1722	10.7	50	90	7994	199.5	2%	16226	691.9	4%	51%	8406	572.3	7%	12038	809.8	7%	30%	0.059	0.007
	276 g2	1145	5.9	20	60	3915	59.6	2%	7591	183.7	2%	48%	4158	212.7	5%	5734	200.7	4%	0.2748	0.066	0.004
1g2yc4	288 25 a	2353	6.6	20	40	9561	355.6	4%	19025	553.4	3%	0.4975	10369	942.3	9%	14547	1233.1	8%	29%	0.067	0.005
	288 g2	1729	7.4	30	102	6628	180.3	3%	11340	887.5	8%	42%	7236	592.8	8%	9672	569.1	6%	25%	0.063	0.009
	289 25	2023	8.3	70	101	7741	197.8	3%	15868	932.9	6%	0.5121	8006	406.7	5%	11273	570.0	5%	29%	0.061	0.006
	289 g2	1169	8.0	30	45	5572	78.6	1%	10449	202.7	2%	47%	6175	248.4	4%	8432	332.6	4%	27%	0.068	0.004
	290 25a	2460	10.3	50	80	9215	196.0	2%	18052	526.4	3%	0.4895	9486	672.5	7%	13379	680.7	5%	29%	0.064	0.006
	290 g2	1738	6.7	30	95	5947	131.4	2%	12744	490.7	4%	53%	6493	377.0	6%	8986	358.4	4%	28%	0.069	0.006

Teste de Grubbs para os valores de MR de G1

CPS	Corpo de prova			Média	Desvio padrão	G maior	G menor	G crítico 95%	Y máx	Y min	Média adotada	Média adotada
	1	2	3									
2g2xs4	6868	7794	10817	8493	2065.21	1.125	0.787	1.15	10868	6118	8493	
2g2xc4	8751	10535	11058	10114	1209.50	0.780	1.127	1.15	11505	8723	10114	
2g2ys4	7314	7394	8143	7617	457.13	1.150	0.663	1.15	8142	7091		7354
2g2ys7	4958	5319	5609	5296	326.34	0.962	1.034	1.15	5671	4920	5296	
2g2yc4	6442	6717	6780	6646	179.85	0.744	1.137	1.15	6853	6439	6646	
2g2yc7	6109	6716	6874	6566	403.84	0.762	1.132	1.15	7031	6102	6566	
2g2zs4		8145	8181	7750	716.43	0.602	1.154	1.15	8574	6926		8163
2g2zc4	7364	7433	7871	7556	274.79	1.145	0.700	1.15	7872	7240	7556	
2g4xs4	13640	15731	16661	15344	1547.35	0.851	1.101	1.15	17123	13564	15344	
2g4xc4	14283	15142	16784	15403	1271.21	1.087	0.881	1.15	16865	13941	15403	
2g4ys4	12643	13385	15363	13797	1406.03	1.114	0.821	1.15	15414	12180	13797	
2g4ys7	10204	11713	12644	11521	1231.53	0.912	1.069	1.15	12937	10104	11521	
2g4yc4	14460	15697	17457	15871	1506.06	1.053	0.937	1.15	17603	14139	15871	
2g4yc7	12944	16867	18777	16196	2974.00	0.868	1.094	1.15	19616	12776	16196	
2g4zs4	16343	17816	19249	17803	1453.09	0.996	1.004	1.15	19474	16132	17803	
2g4zc4	12661	13082	13804	13182	577.75	1.075	0.902	1.15	13847	12518	13182	
1g2ys4												
1g2yc4	7741	9215	9561	8839	966.20	0.747	1.136	1.15	9950	7728	8839	

	CP	Q média (N)	σ Q (N)	Ciclo		Procedimento de cálculo segundo ASTM						Procedimento de cálculo segundo NCHRP						Atraso (s)	σ Atraso (s)			
				início	final	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)	RR (%)	MR <sub>T</sub> (MPa)	σ MR <sub>T</sub> (MPa)	Taxa σ <sub>MR T</sub> (%)	MR <sub>I</sub> (MPa)	σ MR <sub>I</sub> (MPa)			Taxa σ <sub>MR I</sub> (%)	RR (%)	
2d2ys4	358 25 e	3179	14.0	40	101	9136	139.0	2%	16251	431.6	3%	44%	9722	390.3	4%	13153	432.2	3%	26%	0.059	0.006	
	358 g2	2120	5.6	30	55	8661	194.3	2%	13692	500.5	4%	37%	9860	460.4	5%	12783	527.5	4%	23%	0.065	0.005	
	359 25	2247	8.7	70	100	7727	142.4	2%	12397	449.5	4%	38%	7953	338.8	4%	10779	343.7	3%	26%	0.052	0.008	
	359 g2	2145	7.2	70	93	7069	118.9	2%	11501	300.5	3%	39%	8132	430.7	5%	10557	370.1	4%	23%	0.064	0.006	
	360 25	2254	10.4	30	101	7332	150.1	2%	11732	470.4	4%	38%	7518	376.3	5%	10258	380.6	4%	27%	0.054	0.006	
	360 g2	2131	7.2	30	101	7239	224.1	3%	11978	758.4	6%	40%	8027	655.8	8%	10668	614.0	6%	25%	0.063	0.010	
2d2yc4	364 25 a	3629	9.1	25	55	12191	136.7	1%	21120	556.2	3%	42%	12953	329.6	3%	17611	343.0	2%	26%	0.066	0.005	
	364 g2	2275	15.2	30	102	9989	425.3	4%	16382	1098.9	7%	39%	10912	1022.4	9%	14496	1104.9	8%	25%	0.058	0.009	
	365 25 d	excluído pelo M. Grubbs																				
	365 g2	2281	7.9	30	101	10915	538.3	5%	17302	1323.2	8%	37%	11858	1134.8	10%	15728	1202.3	8%	25%	0.056	0.009	
	366 25 a	3575	15.0	65	101	12181	234.1	2%	21657	1580.2	7%	44%	12810	594.1	5%	17438	600.3	3%	27%	0.060	0.007	
	366 g2	2281	6.5	70	101	10978	329.0	3%	17718	907.7	5%	38%	11884	867.1	7%	15900	1070.9	7%	25%	0.057	0.008	
1d2ys4	394 25	2097	9.4	30	60	7443	178.2	2%	11916	411.1	3%	38%	7752	299.5	4%	10642	456.7	4%	27%	0.058	0.006	
	394 g2	2679	10.8	80	100	8410	363.3	4%	13680	962.7	7%	39%	9487	1046.2	11%	12437	940.3	8%	24%	0.058	0.011	
	395 25 e	excluído pelo M. Grubbs																				
	395 g2	2647	10.4	30	50	8226	88.0	1%	13841	200.8	1%	41%	9167	285.0	3%	12027	254.3	2%	24%	0.058	0.004	
	396 25	2299	10.2	20	70	7479	76.0	1%	12635	193.0	2%	41%	7864	221.5	3%	10733	267.8	2%	27%	0.061	0.005	
	396 g2	2569	10.5	45	75	9229	146.7	2%	16106	482.8	3%	43%	10294	500.4	5%	13687	444.7	3%	25%	0.061	0.007	
1d2yc4	400 25	2701	11.3	60	102	9464	163.3	2%	16245	551.4	3%	42%	10044	330.7	3%	13459	370.6	3%	25%	0.064	0.004	
	400 g2	2551	9.9	35	55	11969	661.1	6%	18989	1363.5	7%	37%	13106	1508.3	12%	17125	1402.4	8%	23%	0.055	0.009	
	401 25	2556	7.0	60	95	8411	99.7	1%	13898	286.4	2%	39%	8905	500.2	6%	12076	464.2	4%	26%	0.061	0.005	
	401 g2	2470	14.3	30	80	12300	250.2	2%	19819	595.9	3%	38%	13600	533.7	4%	17755	720.7	4%	23%	0.058	0.005	
	402 25	2069	9.9	50	101	9709	330.9	3%	16716	1231.7	7%	42%	10097	903.4	9%	13883	875.4	6%	27%	0.054	0.009	
	402 g2	2451	10.2	20	50	15165	450.8	3%	24717	961.7	4%	39%	16293	915.5	6%	21634	1125.1	5%	25%	0.058	0.007	

Teste de Grubbs para os valores de MR de G1

CPS	Corpo de prova			Média	Desvio padrão	G maior	G menor	G crítico 95%	Y máx	Y mín	Média adotada	Média adotada
	1	2	3									
2d2ys4	7332	7727	9136	8065	948.08	1.129	0.773	1.15	9155	6975	8065	
2d2yc4	10693	12181	12191	11688	862.03	0.583	1.155	1.15	12680	10697		12186
1d2ys4	7443	7479	8979	7967	876.68	1.154	0.597	1.15	8975	6959		7461
1d2yc4	8411	9464	9709	9195	689.44	0.746	1.136	1.15	9987	8402	9195	

## *A*NEXO 3

**Módulo de resiliência e parâmetros de rigidez do projeto  
complementar sobre suscetibilidade térmica**

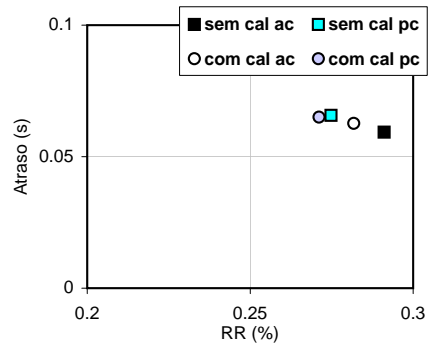


	CP	Temperatura 10° C			Temperatura 25° C			Temperatura 40° C			Atraso		
		MR T (MPa)	MR I (MPa)	RR (%)	MR T (MPa)	MR I (MPa)	RR (%)	MR T (MPa)	MR I (MPa)	RR (%)	10o C (s)	25o C (s)	40o C (s)
CAP 20 + Basalto	s/cal	22344	27501	19%	6558	9283	29%	1783	2536	30%	0.04	0.07	0.05
	c/cal	28884	36052	19%	7023	9874	29%	2498	3904	36%	0.04	0.06	0.05
CAP 40 + Basalto	s/cal	30573	37513	18%	11376	15602	27%	4467	8973	50%	0.04	0.06	0.06
	c/cal	28696	35081	18%	14392	19802	27%	5190	9750	46%	0.05	0.06	0.07
CAP 20 + Granito	s/cal	16483	20722	20%	7427	10161	27%	2837	4518	37%	0.05	0.06	0.06
	c/cal	21480	27401	21%	7483	10327	28%	3556	5771	38%	0.05	0.06	0.06
CAP 40 + Granito	s/cal	29289	36820	20%	12847	17294	26%	6533	8326	25%	0.05	0.06	0.07
	c/cal	30375	37945	20%	11439	15361	26%	6194	10667	42%	0.05	0.06	0.07
CAP 20 + Gabro	s/cal	28764	36301	21%	9798	13353	27%	2876	4770	40%	0.05	0.06	0.06
	c/cal	23801	29115	18%	8540	11500	26%	4499	7469	39%	0.04	0.06	0.06
CAP 40 + Gabro	s/cal	24927	30449	18%	13500	18049	25%	6687	10523	35%	0.04	0.06	0.07
	c/cal	28528	33575	15%	13398	17938	25%	6884	10783	36%	0.04	0.06	0.07

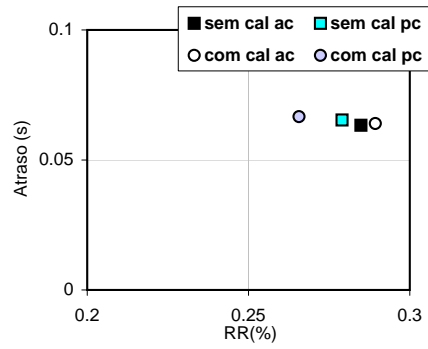
## *A*NEXO 4

**Gráficos do atraso e da recuperação retardada das misturas  
antes e depois do condicionamento**

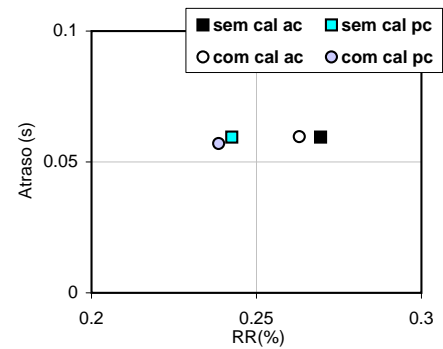
1b2ys4 e 1b2yc4



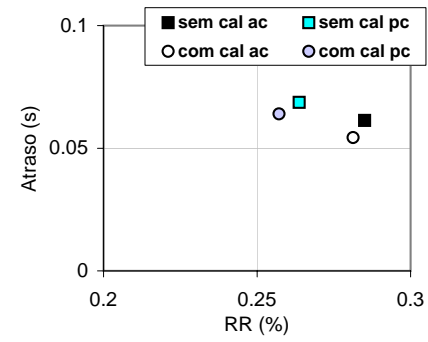
1g2ys4 e 1g2yc4



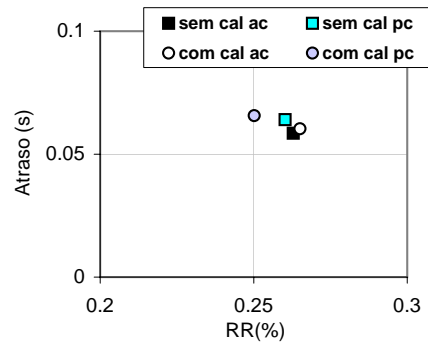
1d2ys4 e 1d2yc4



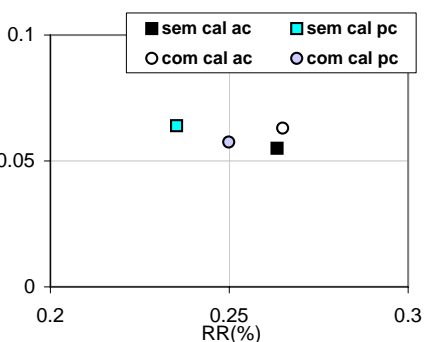
2b2ys4 e 2b2yc4



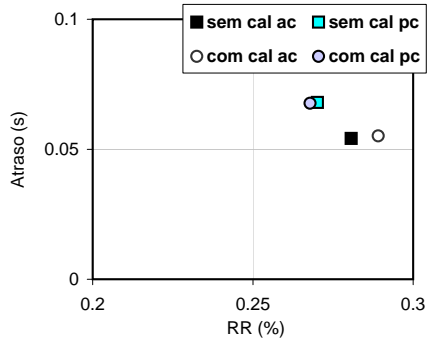
2g2ys4 e 2g2yc4



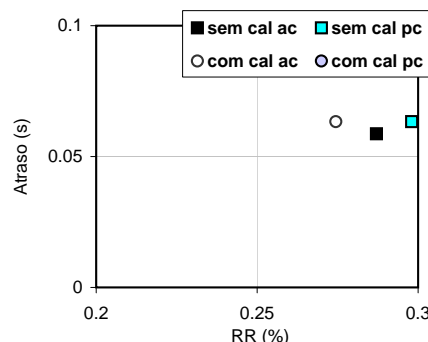
2d2ys4 e 2d2yc4



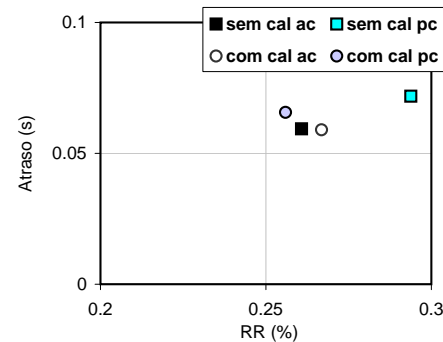
3b2ys4 e 3b2yc4



3g2ys4 e 3g2yc4



3d2ys4 e 3d2yc4



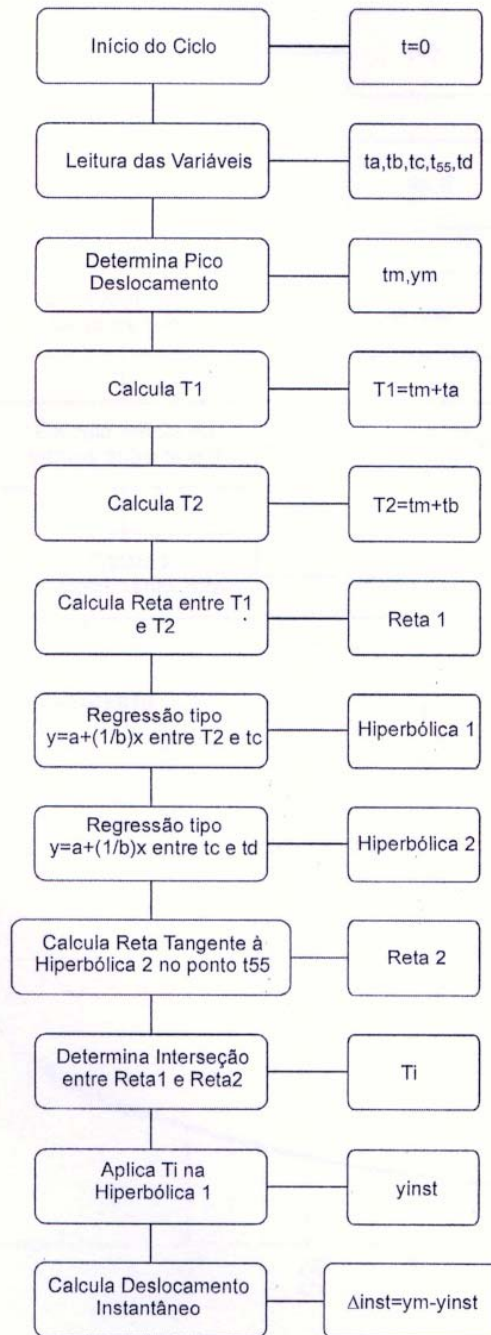
*APÊNDICE A*  
**Esquema do programa experimental**



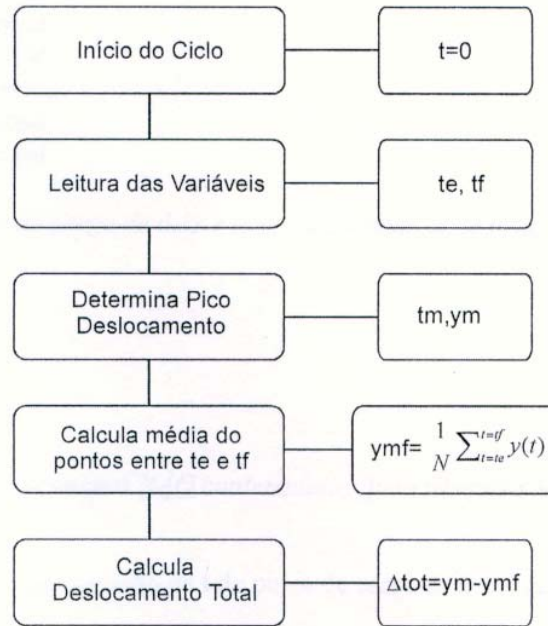
## *APÊNDICE B*

**Esquemas para a determinação dos deslocamentos resilientes  
total e instantâneo pelo método da NCHRP elaborado por  
BRITO (2006)**

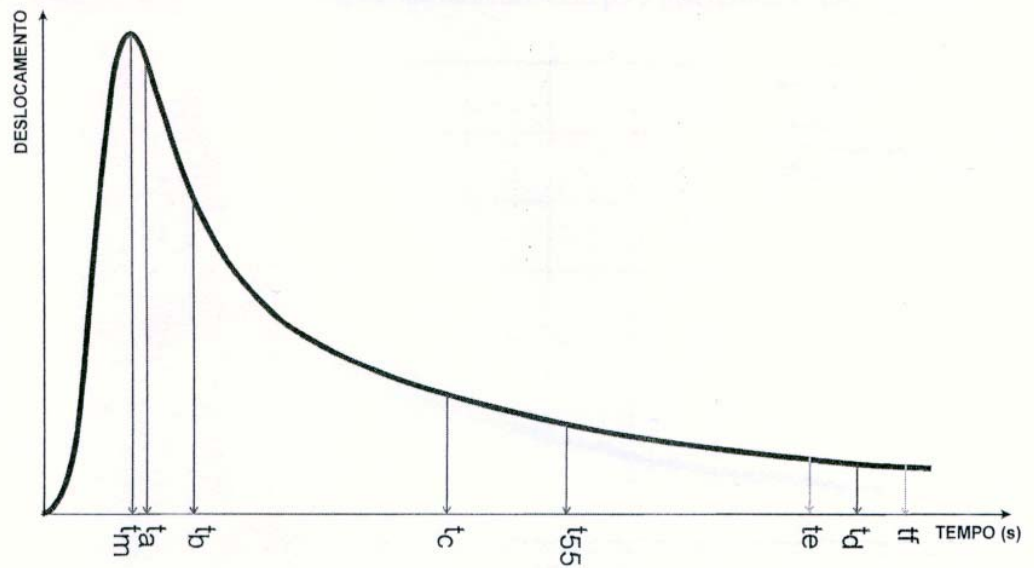
**1. Esquema do algoritmo para determinação do deslocamento resiliente instantâneo segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A**



## 2. Esquema do algoritmo para determinação do deslocamento resiliente total segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A



## 3. Referências no pulso de deslocamento





#### 4. Recomendações dos tempos para determinação dos deslocamentos resilientes segundo a pesquisa NCHRP 1-28/1-28A

- $t_c = 40\%$  rest period
- $t_d = 90\%$  rest period
- $t_{55} = 55\%$  rest period
- $t_e = 85\%$  rest period
- $t_f = 95\%$  rest period

→ Considerando pulso de carga de 0,1s e tempo de descanso de 0,9s, vem:

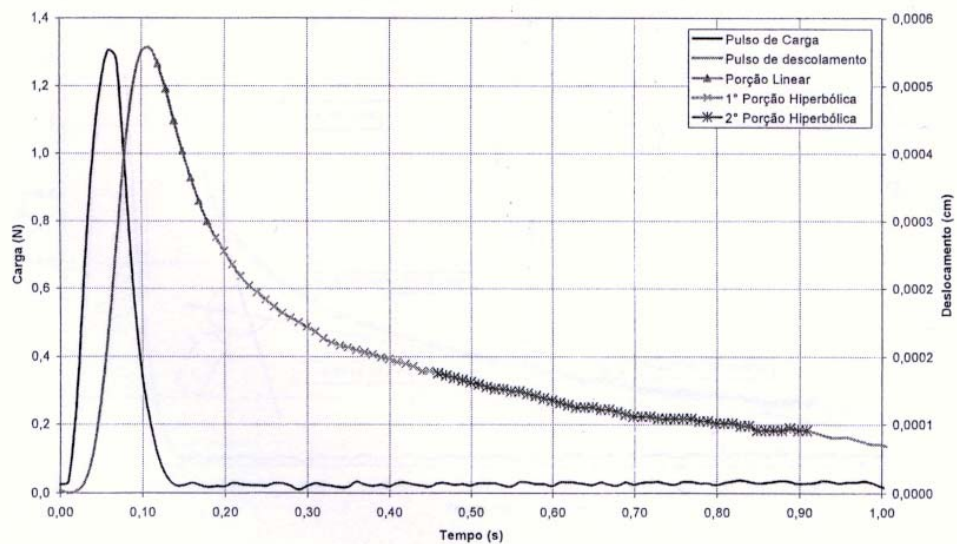
- $t_c = 0,46$
- $t_d = 0,91s$
- $t_{55} = 0,595s$
- $t_e = 0,865s$
- $t_f = 0,955s$

→ Recomendação para os tempos NÃO contemplados pela pesquisa NCHRP 1-28/1-28A

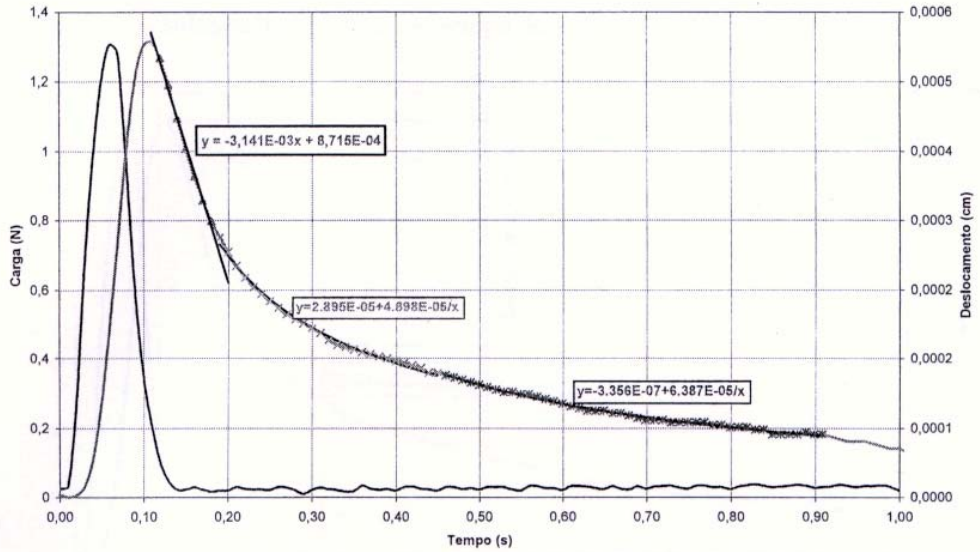
- $t_a = 0,005 + t_m$
- $t_b = t_m + \frac{1}{2}t_{\text{pulso de carga}}$  (no caso de  $t$  do pulso de carga de 0,1s, vem:  $t_b = t_m + 0,05$ )

#### 5. Exemplo de cálculo

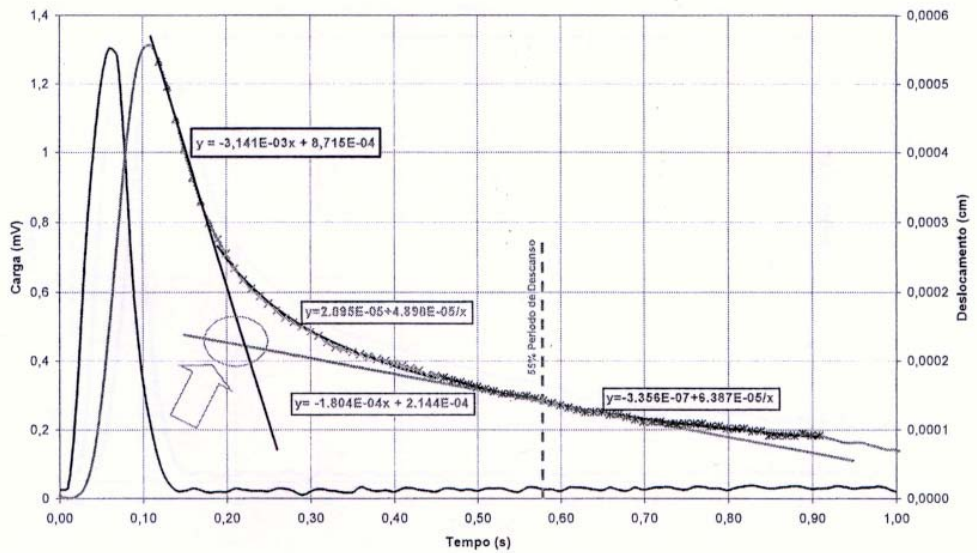
i. Separação das porções do pulso de deslocamento para determinação das regressões.



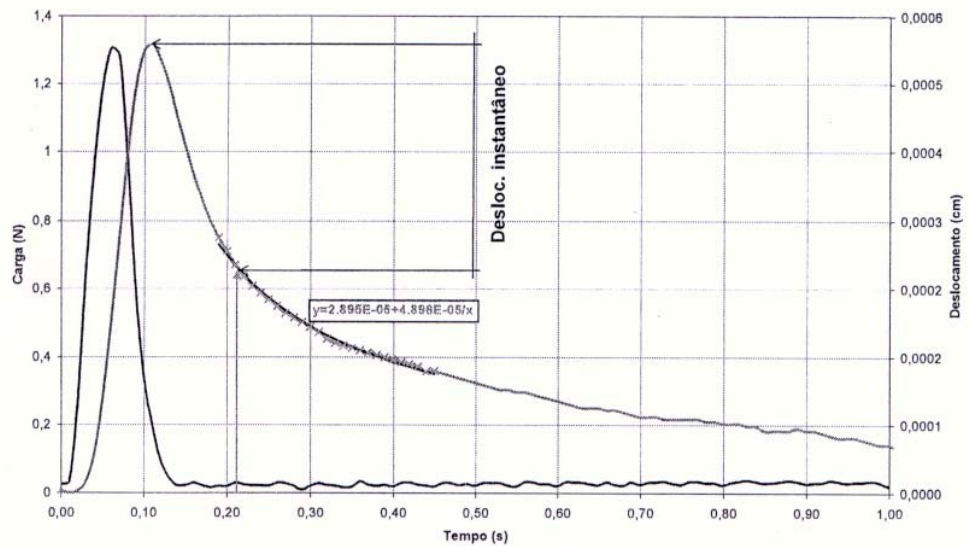
ii. Determinação das retas de regressões (1 regressão linear e 2 regressões hiperbólicas).



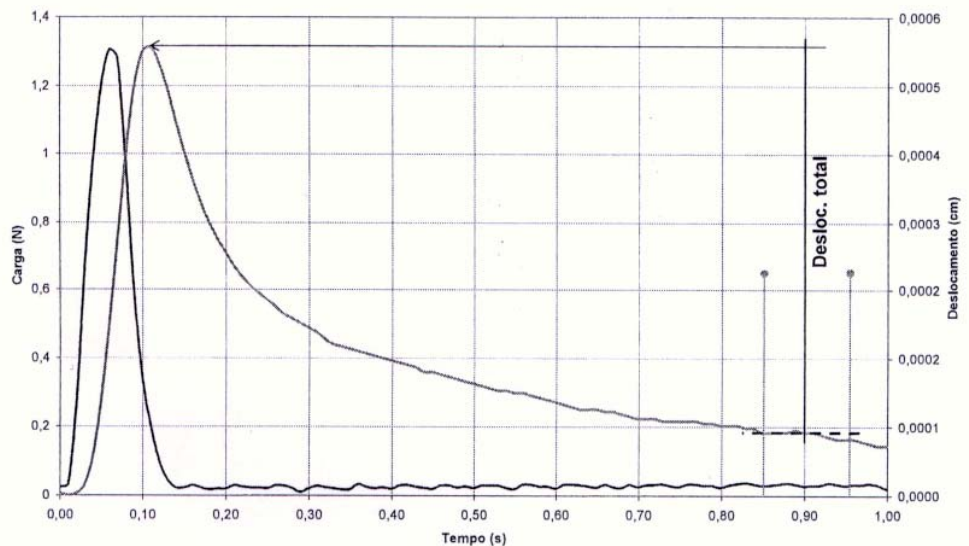
iii. Determinação da reta tangente à regressão hiperbólica 2 no ponto correspondente a 55% período de descanso, e determinação do tempo correspondente à interseção desta com a regressão linear (interseção\*).



- iv. Determinação do deslocamento instantâneo – diferença entre o ponto de máximo deslocamento pela ordenada resultante da aplicação do tempo de interseção\* na regressão hiperbólica 1.



- v. Determinação do deslocamento total através da diferença entre o ponto de máximo deslocamento e a ordenada média resultante da porção relativa à 85% - 95% do período de descanso.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)