

WILSON RICARDO DE GRANDE

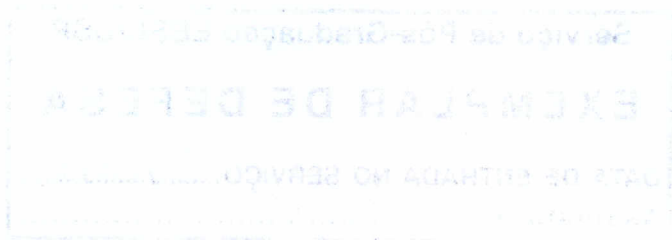
**EFEITOS DA CAL HIDRATADA E DO ÁCIDO POLIFOSFÓRICO
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E SUSCETIBILIDADE À
UMIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes
Orientador: Prof. D. Glauco Túlio Pessa Fabbri

São Carlos, SP

2011



AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

G751e Grande, Wilson Ricardo de
Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas / Wilson Ricardo de Grande ; orientador Glauco Tulio Pessa Fabbri. -- São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Infraestrutura de transportes. 2. Mistura asfáltica - propriedades mecânicas. 3. Ácido polifosfórico. 4. Cal hidratada. 5. Suscetibilidade à umidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **WILSON RICARDO DE GRANDE.**

Dissertação defendida e julgada em 06/06/2011 perante a Comissão Julgadora:



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

Aprovado



Profª. Doutora **ANA PAULA FURLAN**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **MARCELO DE CASTRO TAKEDA**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado



Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Presidente da
Comissão de Pós-Graduação

Dedico esse trabalho à minha família,
José, Bernadete e Eduardo; e a minha noiva Pamela.

“Enquanto houver vontade de lutar haverá esperança de vencer.”
(Santo Agostinho)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, harmonismo e força em todos os momentos.

Aos meus pais, pelo apoio, carinho e amor incondicional em todas as etapas da minha vida. Ao meu irmão, Robson Eduardo De Grande pelo apoio e conselhos durante toda a minha vida.

À minha noiva, Pamela Rosa Tancredi, pela paciência inabalável e pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis, pelo companheirismo e incentivo sempre.

Ao Prof. Glauco Túlio Pessa Fabbri pelo seu apoio, dedicação, compreensão, e principalmente paciência durante a orientação.

Ao Prof. José Leomar Fernandez Júnior pela amizade, apoio e conselhos.

Ao Prof. Adalberto Leandro Faxina pelos ensinamentos, amizade e apoio.

Aos técnicos de laboratório, Paulo Toyama, Antônio Carlos Gigante e João Pereira pela disponibilidade, dedicação, auxílio, companheirismo e ajuda durante toda pesquisa.

Aos professores do Departamento de Transportes da EESC – USP, pelas oportunidades, pela amizade, consideração e apoio constantes.

Aos funcionários do Departamento de Transportes da EESC – USP, pelo auxílio, carinho e solicitude nos trâmites administrativos dessa pesquisa.

Aos amigos do Departamento de Transportes da EESC – USP pelos momentos felizes, apoio e incentivo para cumprimento de mais esta etapa.

Aos amigos de infância, que contribuíram de maneira primordial para estabilidade psicológica, amizade, apoio incondicional em todo e qualquer momento da minha vida.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

À Pedreira São Gerônimo, pelo fornecimento do agregado para realização desta pesquisa.

À REVAP – Petrobrás, pelo fornecimento do CAP 50/70.

À Inopphos, pelo fornecimento do ácido polifosfórico (E200).

RESUMO

Grande, W. R. **Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas**. 2011. 149p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2011.

Esta pesquisa teve por objetivo analisar os efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas. O ligante utilizado foi o CAP 50/70, chamado de controle, modificado com 0,6 e 1,2% de PPA, e como aditivo a cal hidratada em concentrações de 1,5 e 3,0%, perfazendo nove combinações de misturas asfálticas. Foram moldados 108 corpos-de-prova, divididos em 4 e 7% de volume de vazios, sendo que os corpos-de-prova de 7% foram divididos em condicionados e não condicionados. Os ensaios realizados para análise das propriedades mecânicas foram o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração Indireta. Os resultados mostram que o aumento da concentração de ácido polifosfórico melhora a rigidez e a flexibilidade, e melhora a suscetibilidade ao dano por umidade, assim como aumenta a resistência à tração; para a cal hidratada, com o aumento da sua concentração, ocorreu aumento da rigidez e da flexibilidade de maneira mais discreta, se comparado ao ácido polifosfórico, e proporciona a diminuição da resistência à tração: o teor que apresentou melhor suscetibilidade ao dano por umidade foi de 1,5% de cal hidratada.

Palavras-chave: mistura asfáltica, ácido polifosfórico, cal hidratada, propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade.

ABSTRACT

Grande, W. R. **Effects of hydrated lime and polyphosphoric acid in mechanical properties and moisture susceptibility in dense asphalt mixtures.** 2011. 149p. Master Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2011.

This work aims to analyze the effects of hydrated lime and polyphosphoric acid on the mechanical properties and moisture susceptibility of dense asphalt mixtures. In nine combinations of asphalt mixtures, CAP 50/70, named control and modified with 0,6 and 1,2% of PPA, was employed as binder, and hydrated lime in concentrations of 1,5 and 3,0% was used as additive. 108 test specimens have been molded and divided into 4 and 7% of volume void, considering that 7% were separated into conditioned and non-conditioned. The Resilient Modulus and the Tensile Strength were the tests conducted for the analysis of mechanical properties. The results showed that the increase in polyphosphoric acid concentration improved stiffness and flexibility and increased the susceptibility to moisture damage, as well as the tensile strength. Also in the results, with the concentration increase of the hydrated lime, there was a smaller increase of stiffness and flexibility, and it provided a decrease of tensile strength, considering that the percentage of 1,5% of hydrated lime presented the best susceptibility to moisture damage.

Key words: dense asphalt mixtures, polyphosphoric acid, hydrated lime, mechanical properties and moisture susceptibility.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
1.1. OBJETIVO.....	5
1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 PRINCIPAIS DEFEITOS DOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	7
2.3 STRIPPING, ADESÃO E DANO POR UMIDADE	9
2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	11
2.5 PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	12
2.6 PROPRIEDADES DA MISTURA ASFÁLTICA	14
2.7 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS	18
2.7.1 Avaliação da rigidez de misturas asfálticas a partir do ensaio de módulo de resiliência	19
2.7.2 Avaliação da resistência à tração de misturas asfálticas	21
2.8 IMPORTÂNCIA DO USO DE ADITIVOS OU MODIFICADORES	22
2.9 ADIÇÃO DE CAL	24
2.10 MODIFICAÇÃO COM PPA	31
2.10.1 Composição	33
2.10.2 Reações com PPA	33
2.10.3 Propriedades do PPA.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 INTRODUÇÃO	37

3.2 AGREGADOS	37
3.2.1 Tipo e distribuição granulométrica.....	37
3.2.2 Características físicas	38
3.2.3 Procedimento de seleção, manuseio e preparação do agregado	38
3.3 ADITIVOS E MODIFICADORES	39
3.4 LIGANTES ASFÁLTICOS	40
3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	41
3.5.1 Temperaturas de usinagem e compactação	42
3.5.2 Determinação do teor de ligante de projeto	43
3.6 DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO	47
3.7 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO FATORIAL	47
3.8 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	48
3.9 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	50
3.10 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE TÉRMICA DA MISTURA	50
3.11 MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DOS DANOS POR UMIDADE	51
3.12 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1 INTRODUÇÃO	53
4.2 COMPACTAÇÃO SUPERPAVE®	53
4.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	54
4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS	55

4.5 APRESENTAÇÃO E DICUSSÃO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DO EFEITO DO CONDICIONAMENTO PARA O MR, RR E ATRASO	70
4.6 VISUALIZAÇÃO DO TIPO DE DANO PELO REGISTRO FOTOGRÁFICO	77
4.7 ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS FATORES	81
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	91
5.1 CONCLUSÕES	91
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXO I – MASSAS ESPECÍFICAS “REAL” APARENTE E MÁXIMA MEDIDA	107
ANEXO II – PROPRIEDADES OBTIDAS DA MOLDAGEM	111
ANEXO III – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA PARA AS TEMPERATURAS DE 10, 25 E 40°C.	115
ANEXO IV – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DESCARTANDO OS FORA DA MÉDIA ± UM DESVIO PADRÃO.	127
ANEXO V – VALORES OBTIDOS PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Curva deformação versus tempo, para um ciclo de carregamento.	21
Figura 3.1. Características dos ligantes utilizados na pesquisa	43
Figura 3.2. Sequência do procedimento de compactação	45
Figura 4.1. Volume de vazios versus teor de ligante para determinação do teor ideal.	54
Figura 4.2. (a) Relação entre módulos instantâneo e total, (b) RR em função de MR e (c) Atraso em função de MR, para $V_v = 4\%$	58
Figura 4.3. Efeito do PPA no MR e na RR em diferentes temperaturas para 4% de V_v = 4%.....	60
Figura 4.4. Efeito do PPA no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$	60
Figura 4.5. Efeito da cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$	61
Figura 4.6. Efeito da cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v =$ 7%.....	61
Figura 4.7. Efeito da interação entre PPA e a cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$	63
Figura 4.8. Efeito da interação entre PPA e a cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$	64
Figura 4.9. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA no MR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$	65
Figura 4.10. Efeito do aumento da concentração de cal no MR e PPA no MR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$	65
Figura 4.11. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$	65
Figura 4.12. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$	66
Figura 4.13. Efeito do condicionamento no MR e RR para diferentes concentrações de PPA.....	68
Figura 4.14. Efeito do condicionamento no MR e RR para diferentes concentrações de cal.....	68

Figura 4.15. Efeito da interação entre PPA e cal em função do condicionamento para MR e RR	69
Figura 4.16. Efeito da interação entre PPA e cal em função do condicionamento para MR e RR	69
Figura 4.17. Variação do Atraso em função da interação de PPA e cal.....	70
Figura 4.18. Efeito do aumento da concentração de cal na RT e no Atraso	72
Figura 4.19. Efeito do aumento da concentração de PPA no RT e no Atraso.....	72
Figura 4.20. Efeito da interação entre o PPA e a cal na RT e no Atraso para diferentes V_v	73
Figura 4.21. Efeito isodado e da interação entre o PPA e a cal na RR diferentes V_v	74
Figura 4.22. Efeitos do aumento da concentração de cal e PPA na RT.....	75
Figura 4.23. Efeito da interação entre o PPA e a cal na RT para as misturas sem e com condicionamento	76
Figura 4.24. Relação de resistência à tração (RRT) das misturas (efeito do condicionamento).....	77
Figura 4.25. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova sem cal com CAP Puro para 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA para 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA para 4% (e) e 7% (f) de V_v	78
Figura 4.26. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova com 1,5% de cal com CAP Puro para 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA para 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA para 4% (e) e 7% (f) de V_v	79
Figura 4.27. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova com 3,0% de cal com CAP Puro com 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA com 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA com 4% (e) e 7% (f) de V_v	80
Figura 4.28. Efeitos da interação entre fatores no MR total calculado pela NCHRP.	83
Figura 4.29. Efeitos dos fatores e suas interações entre variáveis na RR.	85
Figura 4.30. Efeitos de interação entre variáveis no Atraso Médio.	87
Figura 4.31. Efeitos de interação entre fatores na RT.....	88
Figura 4.32. Efeitos de interação entre fatores no MR instantâneo.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Faixa Granulométrica MIX IV B do <i>Asphalt Institute</i>	37
Tabela 4.1. Valores obtidos para a dosagem <i>SUPERPAVE®</i>	54
Tabela I. 1. Determinação dos valores da massa específica aparente “real”.....	108
Tabela I. 2. Determinação dos valores da massa específica aparente “real”.....	108
Tabela I. 3. Calculo do Gmm para 1,5% de cal e 0,6% de PPA para diferentes teores de ligante.....	109
Tabela I. 4. Cálculo do Gmm para todas as combinacoes de fatores.	109
Tabela II. 1. Resultado das propriedades da moldagem dos corpos-de-prova.	112
Tabela III. 1. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 40°C.	116
Tabela III. 2. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C.	119
Tabela III. 3. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C e condicionamento.	122
Tabela III. 4. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 10°C.	123
Tabela IV. 1. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 40°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.	128
Tabela IV. 2. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.	131
Tabela IV. 3. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 10°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.	134
Tabela V. 1. Resultados para Resistência à Tração para todos os corpos-de-prova.	138

ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
FHWA	Federal Highway Administration
NBR	Norma Brasileira
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
REVAP	Refinaria Henrique Lage
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
TMN	Tamanho máximo nominal
PPA	<i>polyphosphoric acid</i>
C – D	Congelamento - Descongelação
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EVA	<i>ethylene vinyl acetate</i> (polímero)
LVDT	<i>linear variable differential transformer</i>
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
SBR	<i>styrene-butadiene-rubber</i> (polímero)
SBS	<i>styrene-butadiene-styrene</i> (polímero)
PG	<i>Performance grade</i>

CP	Corpo-de-prova
RT	Resistência à tração
σ_R	Tensão de tração
AFM	Microscopia de Forças Atômicas
GPC	Cromatografia de permeação-gel
h	Altura do corpo-de-prova
d	Diâmetro do corpo-de-prova
D	Tamanho máximo do agregado
MR	Módulo de resiliência
MR_t	Módulo de resiliência total
MR_i	Módulo de resiliência instantâneo
N	Tráfego
F	Carga aplicada
Δ	Deslocamento
Δ_{total}	Deslocamento total
Δ_i	Deslocamento instantâneo
μ	Coefficiente de poisson
RR	Recuperação retardada
ϵ_t	Deformação total
ϵ_i	Deformação instantânea
RRT	Relação da resistência à tração

CGS	Compactador Giratório Superpave
P_{li}	teor de ligante inicial
TUC	temperaturas de usinagem e compactação
DMM	Densidade máxima teórica
D_{ap}	Densidade aparente da mistura
Gmm	Densidade máxima teórica
Gsb	Densidade aparente
V_v	Volume de vazios
RBV	Relação betume-vazios
VAM	Vazios do agregado mineral

A pavimentação asfáltica e os materiais nela utilizados são assuntos constantes no meio técnico e científico da engenharia civil, estimulando muitos engenheiros e pesquisadores a desenvolverem trabalhos na área. A grande variedade de materiais de pavimentação e a própria variabilidade a eles inerente, associadas às diversas condições de carregamentos e configurações dos veículos, assim como das diversas condições climáticas que, combinados, geram muitas opções quanto à escolha do melhor material para o pavimento que aperfeiçoe as condições de resistência dos materiais utilizados, com relação às solicitações em questão.

Dois dos principais defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis são o trincamento por fadiga e a deformação permanente nas trilhas de roda, que são provocados pelos mecanismos de flexão alternada e compressão, respectivamente. Embora só seja visível na superfície, a deformação permanente pode ocorrer em qualquer camada do pavimento, causando depressões, corrugações longitudinais e laterais e outros movimentos (TERREL et al., 1971). As trincas por fadiga surgem na base da camada de concreto asfáltico e diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga, e podem estar interconectadas e seladas, dependendo do nível de severidade da trinca (FHWA, 2003). Algumas combinações de solicitações podem agravar a evolução da deterioração do pavimento, como o aumento da frota comercial, da carga transportada por eixo (às vezes sobrecarga) e da pressão de inflação dos pneus, porém, os efeitos da água (dano por umidade) e da temperatura como aceleradores desses defeitos, direciona a atenção de muitos pesquisadores para o melhor entendimento do processo.

O dano por umidade causa a perda de adesão entre o asfalto e o agregado, ou em alguns casos, a perda de coesão do asfalto. As propriedades do asfalto (como viscosidade e consistência) dependem da sua origem e do processo de refinamento utilizado, assim como, o processo pelo qual o agregado é produzido, modifica a sua reação quando em contato com o asfalto e a água (D'angelo, 2003). O mesmo autor afirma ainda que uma mistura asfáltica altamente suscetível ao dano por umidade apresenta grandes variações nas propriedades adesão e coesão, na presença de pequenas variações de umidade.

O revestimento apresenta consistências diferentes em função da temperatura a qual é exposto por se tratar de um material termoplástico, assim, asfaltos altamente suscetíveis à temperatura apresentam grandes variações de consistência, para pequenas variações de temperatura, causando tendência ao surgimento de trincas por fadiga (quando exposto a baixas temperaturas) e tendência à deformação permanente (quando exposto às altas temperaturas) das misturas asfálticas (Anderson *et al.*, 1991).

A procura constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos revestimentos asfálticos levou ao desenvolvimento dos asfaltos modificados com a utilização combinada de materiais que melhorem o seu desempenho. Atualmente, além dos ligantes asfálticos convencionais, há uma gama de asfaltos modificados que proporcionam opções para atender às necessidades exigidas pelas condições climáticas de onde o ligante será utilizado.

O emprego de ligantes asfálticos consistentes em misturas asfálticas proporciona maior rigidez, maior módulo de resiliência, maior resistência à deformação permanente e maior resistência à tração estática, quando comparadas a misturas de mesma faixa granulométrica e asfaltos menos consistentes (Marques, 2004; Furlan *et al.*, 2007).

Os ligantes asfálticos podem ser modificados mediante a adição direta de materiais diversos como asfaltos naturais, polímeros (SBS – Styrene butadiene styrene , SBR – Styrene butadiene rubber e EVA – Ethylene vinyl acetate) e ácidos (por exemplo o ácido polifosfórico) com objetivo de melhorar suas propriedades reológicas e reduzir sua suscetibilidade às ações da temperatura e do tempo de aplicação de carga (Herrington *et al.*, 1999). O ligante asfáltico pode, ainda, apresentar comportamentos diferentes e até melhorados devido à adição de produtos à mistura, como o que ocorre com a adição de certos fileres (ex.: cal e cimento Portland).

Apesar das vantagens obtidas pela modificação direta do ligante ou indireta (a partir da adição de produtos à mistura asfáltica), ela somente é recomendada se não acarretar prejuízo às operações de usinagem, espalhamento e compactação, assim como da coesão da mistura asfáltica.

Os asfaltos modificados por borracha moída de pneu, por exemplo, apresentam maior consistência quando comparados à do ligante original (puro), e isto resulta em melhora das propriedades reológicas do ligante asfáltico, principalmente aquelas relacionadas a parâmetros de deformação permanente (Faxina, 2006). Como conseqüência, as misturas asfálticas com asfalto-borracha, apresentam melhoras em sua flexibilidade, o que “acelera” a dissipação da energia de deformação armazenada devida à sollicitação do carregamento (Bertollo *et al.*, 2002).

Apesar das vantagens do emprego do asfalto-borracha, ainda devem ser solucionados dois problemas: a perda de trabalhabilidade da mistura devida ao aumento de viscosidade do ligante asfáltico e problemas relativos à estabilidade à estocagem do asfalto-borracha. Algumas soluções têm sido testadas a partir da adição de um óleo extensor. Já as misturas com estireno-butadieno-estireno (SBS), apesar de serem mais flexíveis, mais resistentes à deformação permanente e às trincas térmicas, menos suscetíveis à temperatura, ainda esbarram em problemas relacionados ao custo (Faxina, 2006).

Alguns estudos têm mostrado que a combinação de *ácido polifosfórico* com esses polímeros permite reduzir a quantidade de polímero a ser adicionado ao ligante asfáltico, o que reduz a viscosidade do ligante modificado, mas, mesmo assim, proporcionando propriedades reológicas tão adequadas quanto às do ligante asfáltico modificado apenas com o polímero (Martin e Baumgardner, 2006).

Segundo Leite *et al.* (2006), o uso de ácido polifosfórico possibilitou a obtenção de características superiores ao ligante betuminoso original, ou seja, de um produto de melhor suscetibilidade térmica, melhor grau de desempenho *Superpave* e relação “viscosidade – penetração” mais adequada, além do recobrimento dos agregados e resistência à tração da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos com ligantes oriundos de cru naftênico (petróleo venezuelano).

Outro tipo de material que tem sido objeto de estudo em muitas pesquisas é o fíler (ou material de enchimento), que afeta 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 com o asfalto, e essa interação é regida pelas suas características geométricas, propriedades de superfície, absorção e adesão (Furlan *et al.*, 2008).

Segundo Lutif *et al.* (2008) para diminuir os efeitos devido ao danos por umidade em pavimentos, muitas agências de transportes nos Estados Unidos adotam agentes como redutores de dano por umidade (*antistripping agents*) nas misturas asfálticas. Um dos agentes mais utilizados é a cal hidratada. De forma geral, a cal tende a contribuir para o enrijecimento dos mástiques, o que pode também reduzir sua resistência à fadiga. Particularmente, fileres de maior superfície específica pode potencializar a perda de resistência à fadiga do ligante asfáltico, e a cal hidratada é um bom exemplo deste comportamento (Furlan *et al.*, 2009).

A *cal*, em especial, tem vantagem em relação a outros fileres (cimento Portland e o pó de pedra), que se deve à geometria das suas partículas, uma vez que, em geral, cerca de 80% delas têm diâmetros menores ou iguais a 20 μ m e, por isso, maiores quantidades de cal podem se concentrar no ligante asfáltico disponível/efetivo e promover mudanças nas suas características originais (Furlan *et al.*, 2008). Algumas propriedades como rigidez, viscosidade e coesão do asfalto aumentam, por outro lado, a susceptibilidade térmica e a ductilidade diminuem, assim como quando a cal é usada em excesso torna o mástique mais frágil e quebradiço (Jimenez *et al.*, 2008). Bianchetto (1998) afirma que a concentração de filer crítica é alcançada quando o mástique começa a enrijecer, a mistura se torna mais frágil e certas características desejadas, como flexibilidade, coesão e durabilidade são diminuídas, em outras palavras, a concentração crítica é alcançada quando (a) a tensão aplicada é absorvida pela deformação viscosa do material betuminoso e (b) a resistência friccional entre as partículas são mínimas.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos da cal hidratada e/ou do ácido polifosfórico em algumas propriedades mecânicas e na suscetibilidade à umidade e a temperatura de misturas asfálticas densas.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 relata as considerações iniciais desta dissertação de mestrado, apresentando sucintamente o problema objeto de estudo, a alternativa para como solução, além do resumo de algumas propriedades das misturas asfálticas de alto desempenho.

No Capítulo 2, é apresentada uma visão geral dos principais defeitos que ocorrem nos pavimentos asfálticos em todo o mundo, assim como os fenômenos que contribuem para a redução da vida útil do pavimento; as propriedades dos agregados, ligantes asfálticos e da mistura asfáltica, com enfoque no uso de cal hidratada como aditivo, e do ácido polifosfórico como modificador, e como estas propriedades podem ser influenciadas na presença de elementos intempéricos, como a umidade e temperatura, e por fim as propriedades mecânicas das misturas asfálticas que foram analisadas.

O Capítulo 3 tem por objetivo apresentar os materiais utilizados, detalhar o planejamento do experimento, assim como técnicas e procedimentos laboratoriais adotados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, juntamente com as análises realizadas. O Capítulo 5 é reservado as conclusões da pesquisa e às sugestões para trabalhos futuros. Por fim, é apresentado o Capítulo de referências bibliográficas empregadas na dissertação.

Este capítulo apresenta as principais características da mistura asfáltica e de seus elementos (agregado e ligante asfáltico), do uso de aditivos e modificadores, da suscetibilidade térmica e do dano por umidade de misturas asfálticas densas, e de algumas propriedades mecânicas importantes para análise dessas características.

2.1 INTRODUÇÃO

A função do pavimento é proporcionar economia, segurança e conforto ao usuário da via, atrelado ao nível de serviço, que fica comprometido à medida que aparecem defeitos no pavimento, reduzindo o seu desempenho e serventia.

O crescimento constante do tráfego comercial rodoviário no Brasil impõe o desafio de se manter ou aumentar a vida útil dos pavimentos, o que é feito, muitas vezes, empregando-se misturas asfálticas com melhores desempenhos.

A vida útil do pavimento asfáltico fica condicionada pelo surgimento de dois dos principais defeitos em todo mundo, que são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Algumas combinações podem agravar a evolução da deterioração do pavimento asfáltico, como o aumento da frota comercial, da carga transportada por eixo (às vezes sobrecarga) e da pressão de inflação dos pneus, porém, o efeito da água (dano da umidade) e temperatura como acelerador desses defeitos, direciona a atenção de muitos pesquisadores para o melhor entendimento desse procedimento.

2.2 PRINCIPAIS DEFEITOS DOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

O trincamento por fadiga é um dos defeitos mais comuns, que aparece normalmente quando o pavimento asfáltico está envelhecido e, após ser submetido às cargas cíclicas, já não oferece boa resposta às solicitações. A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade que esta mistura apresenta de resistir aos esforços repetitivos de flexão (esforço cíclico) sem se romper; entre os esforços encontram-se as características do tráfego, do pavimento e as condições climáticas (Ildefonso, 2007).

As trincas por fadiga não podem ser observadas em campo em etapas iniciais, já que surgem na base da camada de concreto asfáltico e diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga, e podem estar interconectadas e seladas, dependendo do nível de severidade da trinca (FHWA, 2003). A evolução do processo de trincamento por fadiga pode ser observado quando a trinca alcança a superfície da capa asfáltica formando trincas características.

A deformação permanente é outro defeito que ocorre com frequência e se trata de um mecanismo que também pode influenciar a vida útil do pavimento (Motta e Pinto, 1994). A deformação permanente pode ocorrer por consolidação (ou densificação) e/ou por deformação cisalhante. A consolidação é a compactação que ocorre na capa e nas camadas inferiores, pelo tráfego, após a sua construção, devido ao volume de vazios da mistura asfáltica compactada ser maior que o de projeto e/ou haver deficiência do intertravamento dos agregados e, dessa forma, a ação de um tráfego canalizado faz com que haja uma densificação nas áreas das trilhas de roda, reduzindo o volume de vazios e completando, assim, a compactação (Roberts *et al.*, 1991). O mesmo autor afirma que a baixa resistência das camadas inferiores à capa, e a perda de material de superfície com tráfego são causas desse defeito.

O combate a esses dois defeitos representa produzir misturas asfálticas com características mecânicas antagônicas. Isso se deve ao fato de que, para reduzir a suscetibilidade à fadiga, a mistura asfáltica deve apresentar alta flexibilidade, ou baixa rigidez, enquanto que para o combate à deformação permanente a mistura deve ser mais rígida, ou seja, na maioria das vezes quando se melhora de uma das características, piora-se a outra.

Algumas das causas principais que podem ocasionar ou acelerar o processo de surgimento de trincas por fadiga ou de deformação permanente são oriundos de ações intempéricas, representadas por agentes que podem agredir com maior ou menor intensidade o revestimento asfáltico, dependendo da região, como a amplitude de variação da temperatura e a presença de água.

Autores como Lutif *et al.* (2008) e Gouveia *et al.* (2004) afirmam respectivamente, que o dano por umidade e o *stripping* são alguns dos principais fenômenos causadores dos defeitos do revestimento asfáltico, como a trinca por fadiga e a

deformação permanente, principalmente em regiões onde as condições climáticas são severas, com grandes variações de temperatura e umidade, onde se faz necessária a avaliação dessas condições para consideração como critério de definição do projeto de misturas asfálticas e seleção de materiais.

2.3 STRIPPING, ADESÃO E DANO POR UMIDADE

O *stripping* é um fenômeno que se caracteriza pelo deslocamento da película de ligante do agregado, a partir da parte inferior da camada de rolamento, devido aos esforços de tração resultantes do tráfego, progredindo até a superfície (Gouveia *et al.*, 2004). *Stripping* é um dos principais fatores que influenciam o desempenho de misturas asfálticas. Defeitos devido à perda de adesão asfalto-agregado podem se desenvolver em estágios iniciais da vida útil do pavimento.

Para avaliação do efeito de aditivos *antistripping* tem sido prática o uso de ensaios relacionados ao dano por umidade. Segundo Adorjányi (2008), na prática de campo a causa do *stripping* frequentemente se relaciona ao uso impróprio do pó de pedra, ou da pedra britada que contêm muitos finos. Em casos mais complexos o *stripping* pode ter várias causas que não podem ser quantificadas com uma metodologia de ensaio somente. Assim, o uso de melhoradores da adesão é justificado pela redução do risco de desenvolver falhas prematuras e melhorar o desempenho da mistura durante a vida útil do pavimento.

O deslocamento da película de ligante asfáltico do agregado se deve ao enfraquecimento da adesão que ocorre entre o agregado e o ligante, que garante a coesão da mistura asfáltica. Esse processo ocorre pelo intertravamento mecânico do ligante na superfície do agregado e devido à textura superficial (FHWA, 2003).

Little e Jones IV (2003) afirmaram que o modelo de adesão do programa SHRP conclui que as propriedades dos agregados são mais influentes no processo de ligação do que as características dos ligantes, e que a adesão é conseguida, principalmente pelos compostos polares do CAP que se ligam aos “sítios ativos” do agregado através de forças de atração eletrostática, pontes de hidrogênio e Força de Van der Waals. Os mesmos autores afirmam ainda que os sulfóxidos e os ácidos carboxílicos são os grupos funcionais que possuem maior afinidade pelos

agregados, mas, em contrapartida, são os mais facilmente removidos em presença de água, que os grupos dos fenóis e das bases nitrogenadas são os mais efetivos em garantir uma boa adesão, e ainda que os hidrocarbonetos aromáticos possuem menor afinidade pela superfície do agregado do que os grupos polares.

A umidade pode comprometer a vida útil do pavimento asfáltico, até mesmo em períodos iniciais, se os devidos cuidados para evitá-la ou minimizá-la não forem tomados. Segundo Lutfi *et al.* (2008) a umidade no concreto asfáltico pode causar a perda de coesão (devido à difusão da água no cimento asfáltico de petróleo) que causa a perda de rigidez das películas de CAP, e a perda de adesão entre o CAP e os agregados, em função da água atingir a interface CAP-agregado, culminando na aceleração de defeitos, como a trinca por fadiga e a deformação permanente.

A suscetibilidade ao dano por umidade está relacionada ao volume de vazios, que quando em excesso cria lacunas que permitem a entrada da água e do ar, às vezes, até seu aprisionamento. A permeabilidade ao ar promove a aceleração do processo de endurecimento do ligante asfáltico por oxidação, e a presença de água nesses vazios causa o *stripping*, sob a ação dos carregamentos do tráfego, com variações de temperatura e magnitude de carga, causando nas misturas asfálticas o surgimento de defeitos (Huber, 1999).

Segundo Lutfi *et al.* (2008), o desempenho dos revestimentos asfálticos está relacionado com a coesão e a adesão no sistema CAP-agregado. A perda de coesão do CAP e a perda de adesão entre os agregados e o CAP juntamente com a degradação ou fratura dos agregados foram identificados como os principais mecanismos do dano por umidade nos pavimentos asfálticos. Além dos dois mecanismos primários do dano por umidade, alguns outros fenômenos tais como deslocamento, desprendimento, e acúmulo de poro-pressão são também observados em pavimentos que tiveram dano por umidade.

As propriedades da mistura asfáltica podem ser melhoradas a partir da alteração, modificação e/ou adição de materiais que atuem em um dos elementos da mistura asfáltica, ou em ambos, com intuito de reduzir ou evitar que o desempenho seja prejudicado. Assim, o entendimento de algumas propriedades do agregado, do

ligante asfáltico e da mistura são importantes para melhor compreensão do processo.

2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Tendo em vista a importância do agregado para a produção de misturas asfálticas de elevado desempenho, este item trata da influência das propriedades dos agregados na adesão e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas.

A estrutura mineral influencia a deformação permanente e o desempenho das misturas asfálticas, pois representa cerca de 95% da massa total das misturas. Os agregados minerais podem variar significativamente quanto às características que condicionam a sua adequação como material de pavimentação, tais como: mineralogia, granulometria, resistência, durabilidade, sanidade, absorção, forma, angularidade e textura superficial. Tais variações, associadas à falta de informações precisas sobre a influência dos agregados no desempenho dos pavimentos, indicam a necessidade de estudos detalhados das propriedades essenciais dos agregados, para assegurar que pavimentos de alta qualidade sejam construídos (Gouveia, 2006).

Segundo Gouveia (2006) estudos do SHRP (*Strategic Highway Research Program*) que foram patenteados sob a denominação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) desenvolveu métodos de análise de ligantes asfálticos e de misturas asfálticas para controlar as deformações permanentes, trincas por fadiga e as trincas devido a baixas temperaturas a partir de propriedades fundamentais. As propriedades dos agregados são: granulometria, angularidade do agregado grosso e fino, resistência à abrasão, sanidade, materiais deletérios, finos plásticos e partículas planas e alongadas, volume de vazios, vazios do agregado mineral, vazios preenchidos por asfalto ou relação betume-vazios e teor de filer (*dust to asphalt ratio*).

Os agregados possuem superfície heterogênea com uma grande variedade de “sítios ativos” de diferentes composições químicas e níveis de atividades. Curtis *et al* (1993) relataram que os “sítios ativos”, presentes na superfície do agregado são muitas vezes dotados de carga elétrica, ou contém cargas parciais, que atraem e

orientam os grupos polares do asfalto, e que são adsorvidos de uma maneira muito mais efetiva do que os compostos polares.

Cabe ressaltar que os “sítios ativos” do agregado atraem tanto compostos polares dos ligantes asfálticos quanto a água que é fortemente polar. Após a realização dos estudos, Curtis *et al* (1993) concluíram que os compostos polares com grupos funcionais dos tipos ácido carboxílico e sulfóxidos são os mais facilmente removidos em presença de água, os compostos com menor polaridade apresentaram resistência intermediária, enquanto que os grupos funcionais com bases nitrogenadas e fenóis se apresentaram mais resistentes à umidade, e que essa ordem foi mantida para todos os tipos de agregados testados (granitos, calcário, arenito e cascalho).

Adorjányi *et al.* (2008) concluíram que as misturas possuem “polaridade” por causa das diferentes características de formação dos minérios constituintes dos agregados, e que não pode ser corretamente detectada somente com ensaios mecânicos.

2.5 PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico é o elemento que rege o comportamento da mistura asfáltica após a usinagem, já que se trata de uma estrutura termoplástica, e sofre grandes alterações de suas propriedades com variações de temperatura e de umidade. Cabe ressaltar que aproximadamente 5% da mistura asfáltica é composta de ligante asfáltico, e que grande parcela da resistência da capa asfáltica é devida à estrutura formada pela “malha” constituída pelo ligante-agregado, e não menos importante, o resultado da intensidade dessa interação caracteriza as forças de adesão e coesão, responsáveis por propriedades importantes, como a resistência à compressão e a flexibilidade do pavimento. A intensidade e o comportamento dessas forças podem qualificar o pavimento em um elemento suscetível ao dano por umidade ou temperatura, se para uma pequena variação de umidade ou temperatura, houver uma pequena variação ou manutenção das propriedades do pavimento asfáltico. Assim, o ligante asfáltico e suas variações, podem caracterizar o comportamento do pavimento diante das solicitações e ações de intempéries.

Os ligantes asfálticos largamente utilizados na pavimentação de estradas e rodovias são materiais complexos com uma considerável variedade de compostos orgânicos. São originários do petróleo, sendo obtidos por evaporação natural de depósitos localizados na superfície da terra (asfaltos naturais), ou por destilação em unidades industriais especialmente projetadas (refinarias de petróleo) (Senço, 1997).

Os ligantes asfálticos em temperatura ambiente são um material de cor escura, semi-sólida e altamente viscoso. Composto principalmente de moléculas complexas de hidrocarbonetos, também compostos por outros átomos, como oxigênio, nitrogênio e sulfúrico, ele é classificado como material termoplástico, por que perde suas propriedades, como viscosidade, e amolece, quando aquecido, e endurece quando é resfriado (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

Segundo Masson (2008) para melhorar o desempenho da mistura asfáltica, o ligante é modificado com elastômeros, plastômeros, termofixadores, enxofre, ou um ácido mineral, como o ácido polifosfórico (PPA), que quando combinado com um polímero, melhora de forma significativa a mistura asfáltica do que quando utilizado isoladamente.

Muitos pesquisadores que estudaram a influência do PPA nas propriedades da mistura asfáltica afirmam que o ácido proporciona um aumento da resistência à compressão, portanto melhores condições de reagir às solicitações que podem provocar deformação permanente no pavimento asfáltico.

As propriedades físicas dos ligantes asfálticos podem ser medidas a partir dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, suscetibilidade térmica, viscosidade e ductilidade. O carregamento pode modificar o comportamento físico e mecânico do ligante asfáltico, pois uma variação nos tempos de aplicação de carga ou na magnitude faz com que o ligante apresente características distintas, portanto, nos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos, se leva em consideração os valores específicos de temperatura, tempo e magnitude de aplicação de carregamentos (Pilati, 2008).

Segundo Huber (1999), o ligante asfáltico atua como uma cola, mantendo o esqueleto do agregado interconectado. O ligante asfáltico deve ser capaz de evitar que partículas sejam deslocadas pelo rolamento dos pneus. Se o ligante não pode

manter o arranjo da estrutura mineral, as partículas de agregado se movimentarão e o esqueleto sofrerá colapso.

Lottman (1978) verificou que as características dos asfaltos como ponto de amolecimento e viscosidade cinemática obtidos a partir de testemunhos extraídos de pavimentos submetidos normalmente ao tráfego (com idades variando entre 2 e 12 anos) são diferentes que dos corpos-de-prova produzidos em laboratório. Esse efeito pode ser justificado por algum tipo de envelhecimento a longo prazo, que tornou os asfaltos mais rígidos e viscosos após determinado período de tempo. Se tratando do dano por umidade, essas características são benéficas em função de caracterizar uma maior resistência ao descolamento da película de asfalto pela água.

Agnusdei¹, 1975 *apud* Furlan (2006), afirma que com o aumento de moléculas de asfaltenos, analogamente aumenta a viscosidade do asfalto. Esse processo evolui com a idade do pavimento asfáltico, atribuído ao envelhecimento da mistura asfáltica, que pode ser acelerada em função das condições de solicitação e agressividade das variações de umidade e temperatura.

2.6 PROPRIEDADES DA MISTURA ASFÁLTICA

Quando se tratam das propriedades da mistura asfáltica, o volume de vazios se destaca por, na maioria das vezes, ser o principal fator para o desencadeamento de fenômenos, principalmente o dano por umidade.

O volume de vazios em excesso na mistura asfáltica, cria lacunas que permitem a permeabilidade da água e do ar e o aumento da suscetibilidade ao dano por umidade. Grandes espaços vazios com ar causam a aceleração do processo de endurecimento e deixam a mistura mais frágil (quebradiça). A presença de água nesses vazios causa o *stripping*, especialmente sob a ação de carregamentos de tráfego, com variações de temperatura e magnitude de carga, causando nas

¹ AGNUSDEI, J. ***Envelhecimento do asfalto durante a mistura***. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 586/30, p.37, Rio de Janeiro, RJ, 1975.

misturas asfálticas com projetos deficientes defeitos como panelas e buracos (Huber, 1999).

O dano devido a umidade não aumenta proporcionalmente com o volume de vazios, já que a partir de um certo limite, a água e o ar percolam pela mistura asfáltica, auxiliando na diminuição do dano por umidade.

Segundo Lutif (2008), o desempenho dos pavimentos asfálticos está relacionado com a coesão e a adesão no sistema CAP-agregado. A perda de coesão do CAP e a perda de adesão entre os agregados e o CAP juntamente com a degradação ou fratura dos agregados foram identificados como os principais mecanismos do dano por umidade nos pavimentos asfálticos. Além dos dois mecanismos primários do dano por umidade, alguns outros fenômenos tais como deslocamento, desprendimento, e acúmulo de poro-pressão são também observados em pavimentos que tiveram dano por umidade.

Muitos pesquisadores estudaram o porquê do envelhecimento do ligante tornar o asfalto mais viscoso e rígido após determinado período de tempo. Do ponto de vista do dano por umidade, essas alterações são benéficas, pois se acredita aumentar a resistência ao deslocamento da película de asfalto pela água. Por outro lado, reduz a extensão da superfície de molhagem, e cria-se uma avaliação dupla dessa característica, considerando a influência no desenvolvimento das ligações adesivas como resultado da afinidade, molhagem e cobertura do agregado, e a resistência da ligação adesiva frente à ação da água (Santanna-Greco *et al.*, 2004).

Segundo Santanna-Greco *et al.* (2004) o envelhecimento de misturas asfálticas durante sua vida útil ocorre em duas etapas, a primeira durante a mistura dos materiais em usina e construção do pavimento, quando ocorre uma grande perda de voláteis e oxidação da mistura asfáltica quando ainda está quente, denominado de envelhecimento de curto prazo, a segunda etapa ocorre durante a vida útil do pavimento, devido à exposição às condições climáticas, sofrendo o envelhecimento de longo prazo, quando ocorre oxidação, ação da faixa ultravioleta de radiação e a perda de componentes oleosos do asfalto ocasionado pela absorção pelo agregado poroso.

Sosnovske *et al.* (1993) constataram a importância de se realizar testes de envelhecimento com a mistura asfáltica e não apenas com o ligante, pois acreditam que a suscetibilidade das misturas asfálticas ao envelhecimento depende dos tipos de asfalto e agregado utilizados, bem como da adesão entre ambos, assim, quanto maior a adesão entre o asfalto e o agregado utilizados, maior a resistência ao envelhecimento apresentada pela mistura asfáltica.

O comportamento visco-elástico do ligante rege o comportamento da mistura asfáltica, e a adição de modificadores ao asfalto, pode melhorar as propriedades de resistência e flexibilidade do pavimento, influenciando no surgimento de defeitos do pavimento, proporcionando um pavimento de alto desempenho.

Misturas asfálticas, quando expostas às condições ambientais sofrem modificações em suas propriedades, verificadas pelo enrijecimento e pelo aumento de sua fragilidade. Essas modificações, denominadas envelhecimento, tornam as misturas mais suscetíveis à desagregação e, conseqüentemente, aos efeitos da umidade.

Silva *et al.* (2004) constataram que o envelhecimento é explicado através de quatro mecanismos: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. A oxidação da mistura asfáltica é a causa mais importante e acontece principalmente durante a produção e a aplicação do material que constitui o revestimento asfáltico, que continua envelhecendo durante o seu uso. Além da formação de novos compostos oxigenados, os grupos polares já existentes tendem a se associar, formando micelas e aglomerados de alto peso molecular e maior viscosidade, chamados de asfaltenos. O endurecimento exsudativo é resultante da migração de componentes oleosos do ligante para o agregado mineral. O endurecimento físico é um fenômeno reversível que acontece à temperatura ambiente, atribuído à reordenação de moléculas e à cristalização de parafinas saturadas do ligante asfáltico. A perda de voláteis no ligante asfáltico é baixa e de pouca importância no processo de envelhecimento em longo prazo.

Algumas mudanças nas propriedades do ligante asfáltico ao longo do tempo ocorrem por causa das reações químicas com o oxigênio, que podem ser maximizadas se a espessura da camada de asfalto que recobre o agregado for

muito espessa, podendo representar um excesso de absorção devido ao excesso de porosidade do agregado ou uma elevada temperatura na mistura asfáltica.

A consequência direta do fenômeno da absorção é a diminuição do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, ou seja, diminuição da quantidade de asfalto efetivo da mistura. Essa diminuição torna a mistura mais suscetível às tensões causadas pelo tráfego e às intempéries, ocorrendo o endurecimento e o envelhecimento do asfalto prematuramente, o que leva ao surgimento de vários problemas como desgaste, desagregação, perda de adesividade, trincas, entre outros (Gouveia, 2006).

Uma maneira prática de contornar o problema da absorção é aumentar a quantidade de asfalto na mistura. Isso é eficiente quando a absorção é rápida o bastante para ser completada durante o processo de mistura. Porém, se a absorção for lenta, ocorrendo muito além do período de construção do pavimento, a necessidade de uma maior quantidade de asfalto na mistura pode não ser detectada, resultando em uma mistura, a médio e longo prazo, com pouco asfalto e, conseqüentemente, com problemas de deterioração precoce. Adicionalmente, se uma quantidade extra de asfalto for colocada na mistura que possui agregados com absorção lenta, a mistura terá excesso de asfalto quando compactada, ocasionando uma estabilidade inicial baixa e problemas de exsudação (Lee *et al.*², 1990 *apud* Gouveia, 2006).

O mástique que é formado a partir da combinação do filler com o ligante asfáltico, tem efeito positivo na mistura asfáltica, como por exemplo, o aumento de viscosidade, rigidez e coesão, por outro lado, pode causar a diminuição da suscetibilidade térmica, no entanto, analogamente causa a redução da ductilidade, e em quantidade excessiva pode deixar o mástique mais frágil e quebradiço. Em alguns casos, pode exibir uma característica hidrofílica, que tende a se combinar preferencialmente com a água do que com o ligante asfáltico, pode proporcionar um processo de perda do revestimento dos agregados na presença de água, que resulta na perda de coesão e resistência (Jimenez *et al.*, 2008).

²LEE, D.Y.; GUINN, J.A.; KANDHAL, P.S.; DUNNING, R.L. ***Absorption of asphalt into porous aggregates***. Relatório Técnico UIR-90-009, Strategic Highway Research Program (SHRP), 1990.

Segundo Sebaaly *et al.* (2007) para diminuir os efeitos devido à umidade em pavimentos, muitas agências de transportes nos Estados Unidos têm especificado o uso de agentes redutores de dano por umidade (*anti-stripping agents*) nas misturas asfálticas. Um dos agentes mais usados é a cal hidratada, mas são utilizados também aditivos líquidos (aminas, diaminas e polímeros), cimento Portland, cinzas e escória. Investigações laboratoriais e verificações de campo têm mostrado efeitos positivos da cal em misturas asfálticas, e que eles dependem do tipo de agregado. Segundo o mesmo autor, alguns pesquisadores do Departamento de Transportes do Texas avaliaram o impacto do tratamento com cal no desempenho de misturas no Texas com o simulador de tráfego Hamburg, e concluíram que a adição de 1% de cal hidratada reduz a deformação permanente Hamburg em 50% para todos os tipos de PG's. Os autores concluem ainda que com base nas propriedades mecânicas de misturas com aditivos líquidos e cales em estágios condicionados e não condicionados, que as com cales são mais estáveis, menos suscetíveis à deformação permanente e ao dano por umidade, com resistência à ruptura por fadiga similar quando comparada com misturas com aditivos líquidos.

2.7 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios de avaliação das propriedades mecânicas das misturas procuram simular as condições reais de solicitações no campo. 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 (Furlan, 2006).

O método de ensaio para 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 16h 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 660 mm. de Hg, que proporciona a entrada de 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°C por 16 h, e um descongelamento, que consiste da imersão em água a 60°C por 24h (Furlan, 2006).

Lottman (1978) propôs inicialmente três “níveis” de condicionamento, sendo que cada nível representava um determinado estágio 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 a 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 a vácuo a ciclos de condicionamento térmico, simulava os danos causados pelo tráfego e o meio ambiente.

2.7.1 Avaliação da rigidez de misturas asfálticas a partir do ensaio de módulo de resiliência

O módulo de resiliência é um ensaio não destrutivo que permite determinar a rigidez de uma mistura asfáltica, baseado na deformação recuperável ou elástica da mistura sob a ação de cargas repetidas, onde a energia armazenada no corpo-de-prova pela parcela elástica é devolvida quando se interrompe o pulso de sollicitação. O ensaio de módulo de resiliência segue a norma DNER 133/94, cujo procedimento consiste da aplicação de carregamentos cíclicos de magnitudes fixas, com 1,0s de duração, sendo cada ciclo constituído por um período de carregamento de 0,1 s e um período

de repouso de 0,9 s. O valor do módulo de resiliência é calculado de acordo com a norma do DNER 133/94, conforme mostra a expressão 1:

$$MR = \frac{F}{\Delta h} (0.9976 \mu + 0.2692) \quad (1)$$

Onde:

M_R é o módulo de resiliência em MPa;

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

Δ 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;

μ é o coeficiente de Poisson.

Os índices multiplicativos e somatório ao coeficiente de Poisson podem variar conforme posicionamento de leitura dos LVDT's radialmente no corpo-de-prova. Foi adotado um coeficiente de Poisson de 0,35, que é o mesmo valor utilizado em retroanálise de pavimentos. A norma da AASHTO (1994) para determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas (AASHTO TP31-94) menciona dois tipos de módulo de resiliência, o módulo de resiliência total (M_R total) e o módulo de resiliência instantâneo (M_R inst., calculado a partir da diferença do M_R total do referido ciclo e a deformação na base do trecho de descarregamento da curva de deformação), como se pode verificar na Figura 2.1.

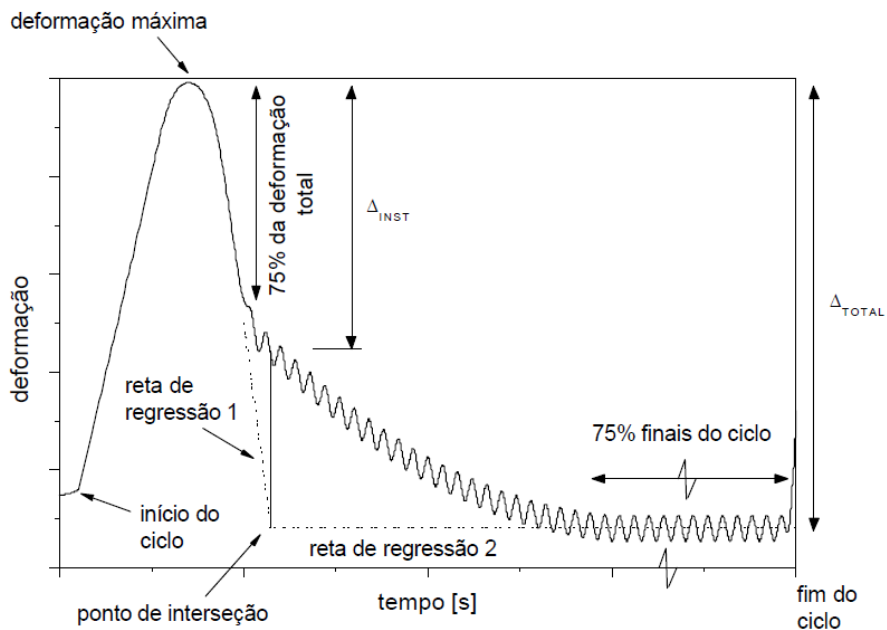


Figura 2.1. Curva deformação versus tempo, para um ciclo de carregamento.

Fonte: AASHTO (1994)

O módulo de resiliência total é calculado a partir da deformação resiliente total (Δ_{total}), que inclui tanto a deformação que é recuperada instantaneamente como a deformação recuperada durante a fase do ciclo em que o corpo de prova permanece sem carregamento ou em descanso.

A magnitude da carga aplicada foi definida a partir da resistência à tração do corpo de prova semelhante ao do ensaio, realizado previamente. A carga vertical é calibrada de maneira que permita a melhor precisão possível do equipamento, portanto, o mínimo de deformação possível para que possa ser captado pelo LVDT com qualidade de leitura, porém limitado pela deformação que não prejudique a resposta elástica e cause fadiga ao corpo-de-prova, prejudicando o resultado dos ensaios (limitado aproximadamente por 0,0025 a 0,0030 milímetros).

2.7.2 Avaliação da resistência à tração de misturas asfálticas

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral permite a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, seu procedimento consiste da aplicação progressiva de dada carga até a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova, num plano diametral vertical. O

ensaio foi realizado de acordo com DNER 138/94 na temperatura de 25°C, e o valor numérico da propriedade foi determinada a partir da expressão:

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

Onde:

σ_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.

2.8 IMPORTÂNCIA DO USO DE ADITIVOS OU MODIFICADORES

O estudo e o desenvolvimento de misturas asfálticas densas que possuam melhor desempenho, principalmente com relação a durabilidade e manutenção de propriedades como a resistência do pavimento asfáltico quando submetido a carregamentos de tráfego a altas temperaturas, ou a da flexibilidade quando submetido a baixas temperaturas, motivam a procura de materiais que possam ser usados como aditivos e modificadores.

Atualmente, além dos ligantes asfálticos convencionais, há uma gama de asfaltos modificados, propiciando a seleção de um material mais ajustado às solicitações e variações climáticas. Os ligantes asfálticos podem ser modificados mediante a adição direta de materiais diversos como asfaltos naturais, polímeros naturais e artificiais com objetivo de melhorar suas propriedades reológicas e reduzir sua suscetibilidade às ações da temperatura e ao tempo de aplicação de carga.

Apesar das vantagens obtidas pela modificação direta do ligante (modificadores) ou a partir da adição de produtos à mistura asfáltica (aditivos), ela somente se recomenda se não acarretar prejuízo das operações de usinagem, espalhamento e compactação, assim como da coesão da mistura asfáltica, já que esse tipo de asfalto normalmente apresenta maior rigidez, módulo de resiliência, resistência à deformação permanente e resistência à tração estática, quando comparadas a misturas de mesma faixa granulométrica e asfaltos menos consistentes (Little, 2001).

O grande desafio de grande parte dos pesquisadores da atualidade é promover o desenvolvimento de materiais ambientalmente corretos, ou o mais próximo disso possível, que promovam os melhoramentos desejáveis ao pavimento asfáltico, de maneira a atender as condições de contorno de projeto, promovendo o desenvolvimento sustentável, que pode ser exemplificado encontrando finalidade para um rejeito industrial, ou com a redução do gasto com energia e da quantidade de materiais utilizados, ou a redução da emissão de gases que poluam o ambiente durante a usinagem da mistura asfáltica, com o menor custo possível.

Os asfaltos modificados por borracha de pneu moída, por exemplo, apresentam ganho de consistência quando comparados a do ligante original (puro), e isto resulta em melhora das propriedades reológicas do ligante asfáltico, principalmente aquelas relacionadas a parâmetros de deformação permanente, e estudos indicam que com o envelhecimento do asfalto ocorre um ganho da resistência à fadiga (Faxina, 2006). Como consequência, as misturas com asfalto-borracha apresentam melhoras em sua flexibilidade, que “acelera” a dissipação da energia de deformação armazenada devida à solicitação do carregamento (Bernucci *et al.*, 2002).

Apesar das vantagens do emprego do asfalto-borracha, ainda devem ser solucionados dois problemas: a perda de trabalhabilidade da mistura devido ao aumento de viscosidade do ligante asfáltico e problemas relativos à estabilidade à estocagem do asfalto-borracha. Algumas soluções têm sido testadas a partir da adição de um óleo extensor (Faxina, 2006).

Já as misturas com polímeros tipo estireno-butadieno-estireno (SBS), em contrapartida à obtenção de misturas mais flexíveis, mais resistentes à deformação permanente e às trincas térmicas, menos suscetíveis à temperatura, ainda se esbarra em problemas relacionados ao custo do produto. Alguns estudos têm mostrado que a combinação de ácido polifosfórico com esses polímeros permite reduzir a proporção de polímero a ser adicionada ao ligante asfáltico, o que reduz a viscosidade do ligante modificado, mas proporcionando propriedades reológicas tão adequadas quanto às do ligante asfáltico modificado apenas com o polímero (Martin e Baumgardner, 2006).

Outro tipo de material que vem sendo objeto de estudo em muitas pesquisas é o filer (ou material de enchimento), que pode atuar como (a) material inerte, promovendo o

fechamento da mistura e aumentando sua estabilidade (pó-de-pedra) ou como (b) material ativo, alterando a trabalhabilidade da mistura, enrijecendo o mástique e contribuindo para o aumento das resistências à deformação permanente, ao envelhecimento e ao dano por umidade (Gouveia, 2006).

A cal, em especial, tem vantagem em relação a outros fíleres (cimento Portland e o pó de pedra), que se deve ao tamanho das suas partículas, uma vez que, em geral, cerca de 80% delas têm diâmetros menores ou iguais a 20µm e, por isso, maiores quantidades de cal podem se concentrar no ligante asfáltico disponível/efetivo e promover mudanças nas suas características originais (Bernucci, 2007).

Os mecanismos pelos quais as cales atuam ainda não são completamente entendidos e as pesquisas destinadas à compreensão do seu efeito nas misturas asfálticas indicam comportamentos diversos e, por vezes, antagônicos, apontando ora benefícios, como os aumentos da estabilidade e das resistências ao envelhecimento e ao dano por umidade, ora malefícios, como o enrijecimento do mástique redundando na redução da resistência à fadiga do ligante e das misturas asfálticas e tendência de enrijecimento prematuro do ligante (Majidzadeh e Brovold, 1968; Hicks, 1991, Epps e Little, 2001; Sebaaly *et al.* 2001; Leite e Motta, 2002).

2.9 ADIÇÃO DE CAL

Um grande número de aditivos é usado para redução da sensibilidade ao dano por umidade da mistura asfáltica e *stripping* em todo o mundo. O mais utilizado é a cal hidratada. Outros aditivos muito utilizados são as aminas, polímeros, cimento portland, cinzas e escória de alto-forno. Muitos construtores preferem aditivos líquidos devido à facilidade de uso.

A cal hidratada cria benefícios múltiplos para a mistura asfáltica. A literatura apresenta uma grande quantidade de informação a respeito do uso da cal hidratada para melhorar a sensibilidade ao dano por umidade. No entanto, estudos recentes demonstram que a cal também gera outros efeitos na mistura asfáltica, especialmente quando a cal atua como um fíler ativo, antioxidante, e como um aditivo que reage com argilas finas. Esses mecanismos criam múltiplos benefícios para os pavimentos (Little, 2001):

- a) Cal hidratada atuando como um filler mineral, endurecendo o ligante asfáltico e a mistura;
- b) Melhora da resistência à fratura nas baixas temperaturas;
- c) Altera favoravelmente a oxidação e interage com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios;
- d) Altera propriedades plásticas dos finos com a melhora da estabilidade e da durabilidade da mistura asfáltica.

Desse modo, a cal hidratada é um aditivo que pode aumentar a vida útil do pavimento e melhorar o seu desempenho através de diversos mecanismos.

Segundo Little (2001), o efeito da cal como filler no asfalto reduz o potencial de deformação em altas temperaturas, especialmente durante o início da vida útil do pavimento, quando é mais suscetível à deformação permanente. O filler da cal hidratada geralmente endurece e reforça o filme de asfalto. Além disso, a cal deixa a mistura asfáltica menos sensível aos efeitos da umidade, melhorando a ligação agregado-asfalto, que sinergicamente melhora a resistência à deformação permanente. Como a mistura envelhece devido à oxidação, a cal hidratada reduz não somente a taxa de oxidação, mas também o dano resultante do produto da oxidação. Esse efeito mantém o asfalto com boa resistência e o torna altamente suscetível à ruptura por fadiga e térmica. Sinergicamente, o filler afetado pela cal hidratada dispersa no asfalto melhora a resistência à fratura e às trincas.

Somando a esses efeitos, a adição da cal hidratada aos agregados que têm finos plásticos podem melhorar os mecanismos de troca catiônica, floculação/aglomeração e reações pozolânicas. Esse processo torna o agregado fino muito menos suscetível à umidade pela redução de sua capacidade de atrair e “reter” água (Little, 2001).

Diversos ensaios com ligantes e misturas asfálticas permitiram concluir melhora no desempenho do pavimento com o uso de cal hidratada em altas temperaturas

(resistência à deformação permanente), resistência à ruptura por fadiga, e ruptura térmica. Lesueur, Little, and Epps³, 1998 *apud* Little, 2001 concluem que:

- a) Cal hidratada não é simplesmente um fíler inerte, já que reage com asfalto, as partículas de cal geralmente absorvem componentes polares do ligante, essa absorção inter-camada faz da cal hidratada um aditivo muito efetivo. O nível de reação asfalto-cal é chamado de dependência do asfalto;
- b) O fíler “ativo” responde sensivelmente às variações de temperatura conforme se intensifica esse efeito. Em altas temperaturas o efeito do fíler é mais pronunciado; e em temperaturas baixas, as variações de suas características são moderadas;
- c) Uma interação físico-química entre a cal hidratada e o asfalto pode ser observada através de (a) modelos reológicos, (b) ressonância magnética nuclear, e (c) microscopia eletrônica de varredura;
- d) A interação físico-química é o mecanismo fundamental que fornece uma base para explicar o efeito multifuncional da cal no asfalto. Esses efeitos incluem: (a) redução do endurecimento oxidativo, (b) melhora da resistência à deformação permanente, (c) melhora da ruptura nas baixas temperaturas, e (d) melhora da resistência à ruptura por fadiga.

A cal hidratada é um agente que melhora o desempenho de misturas asfálticas de várias maneiras. Nuñez *et al.* (2007) afirmam que a cal hidratada melhora a adesividade ligante-agregado, reduz a formação de afundamentos de trilhas de roda, bem como reduz o trincamento e o envelhecimento (oxidação) da camada asfáltica, contribuindo para a formação de pavimentos que apresentarão elevado desempenho por muitos anos. O grande conjunto de benefícios resultantes da adição de cal hidratada a misturas asfálticas tem como resultado a geração de um produto de elevado desempenho. Embora benefícios tenham sido descritos separadamente,

³ LESUEUR, D., LITTLE, D.N. and EPPS, J.A. ***Effect of Hydrated Lime on the Rheology, Fracture and Aging of Bitumen and Asphalt.*** Paper Presented at Lhoist HMA Symposium, Dusseldorf, Germany, June 1998.

todos trabalham complementando-se, contribuindo de várias maneiras na melhoria do produto final.

Johannson (1998) pesquisou uma extensa revisão na literatura sobre o uso da cal no pavimento asfáltico e conduziu uma pesquisa adicional na reação de cal com a mistura asfáltica. Algumas das principais conclusões foram:

- a) Adição de dois por cento do peso da mistura asfáltica de cal produz um significativo aumento lento da rigidez, mas não endurece o asfalto. Além disso, o asfalto modificado com cal demonstra um grande potencial para dissipar energia através da deformação (em baixas temperaturas) em relação ao asfalto não modificado. Esse é um efeito positivo em baixas temperaturas para evitar as trincas por fadiga;
- b) Além do aumento do efeito do fíler na rigidez em baixas temperaturas, a energia que aumenta bruscamente no momento da ruptura, passa a ser contida por mais tempo, reduzindo a fragilidade da mistura asfáltica, essa energia é chamada de tenacidade à ruptura;
- c) O uso da cal hidratada reduz mais o envelhecimento em altas temperaturas do que em baixas temperaturas.

Bianchetto *et al.* (2007) afirmam que apesar das vantagens, a adição de fíler deve ser racionalmente controlada por causa do tipo e conteúdo do fíler, que deve ser determinado de acordo com as propriedades físicas e volumétricas desejadas. Porém, o uso descontrolado e sem projeto do fíler pode causar um efeito contrário ao esperado para a mistura asfáltica. Por isso, a concentração de fíler crítica é atingida quando o mástique começa a apresentar características de endurecimento exacerbado, gerando uma mistura asfáltica mais frágil, prejudicando características que se esperava melhorar, como flexibilidade, coesão e durabilidade. Os autores concluíram que apesar das limitações, o efeito protetor do fíler na mistura asfáltica convencional com relação ao envelhecimento é compensatório, mesmo com o pequeno ganho que se obtém na viscosidade do pavimento.

Jimenez *et al.* (2008) observaram que não existe problema no uso de fíler de agregados calcários contanto que ocorra um controle rigoroso de sua

homogeneidade e qualidade, especialmente se tratando dos finos e atividade química de seus componentes, permitindo estimar sua característica físicas e mecânicas.

Existem diversas maneiras de incorporação da cal na mistura asfáltica, duas das mais usuais na indústria do asfalto são a incorporação tida como “a seco”, quando a cal é misturada ao agregado e posteriormente o ligante asfáltico é misturado ao agregado, e quando a incorporação da cal é feita diretamente ao ligante, e depois o agregado é inserido para formar a mistura asfáltica. Sebaaly *et al.* (2007) concluíram que com base nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas aditivadas com cal misturada “a seco”, ou diretamente ao ligante asfáltico, com relação ao dano a umidade, submetendo o corpo-de-prova ao condicionamento (AASHTO T 283), que a mistura “a seco” é mais estável, menos suscetível à deformação permanente, e menos suscetível ao dano por umidade, porém essa comparação apresenta um resultado de resistência à ruptura praticamente idêntica para ambos os modos de mistura da cal.

Neves Filho *et al.* (2007), à luz de resultados dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração, utilizaram 3% em peso de cal hidratada e concluíram, comparativamente a quatro dopes (A, B, C e D; não identificados pelos autores), aplicados como 0,5% em peso do ligante, que o dope B e a cal hidratada apresentaram maior eficiência na melhoria da adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado.

Lutif *et al.* (2008) concluíram que a adição de cal seca em agregados pré-umedecidos parece ser o método mais eficiente de aplicação de cal hidratada. A mistura tratada com cal seca foi a mais resistente ao dano devido à umidade. A mistura tratada com lama de cal pode apresentar bom comportamento mecânico se for utilizada com um teor correto da relação cal/água. A perda de adesão das misturas foi reduzida quando a cal hidratada foi adicionada, o que indica que o tratamento com cal hidratada aumenta o poder ligante na interface CAP-agregado, reduzindo assim o dano devido à umidade. A adição de filler mineral reduziu o dano à umidade em misturas asfálticas após serem submetidas a um ciclo de congelamento e descongelamento (C-D). No entanto, após múltiplos ciclos de C-D, o

efeito da adição de filer mineral não se mostrou eficaz no combate ao dano devido à umidade.

Segundo Nuñez *et al.* (2007), a adição de cal hidratada dá origem a misturas asfálticas a quente com maior módulo de resiliência (mais resistentes a deformações permanentes) e maior resistência à tração. As melhorias nessas propriedades mecânicas dependem significativamente da qualidade da cal. Cales com baixos teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ não produzirão tais efeitos benéficos, um teor da ordem de 90% parece suficiente para otimizar a mistura asfáltica em termos de módulo de resiliência, resistência à tração e adesividade. Pequenos teores de cal são necessários para produzir misturas asfálticas de elevado desempenho. O teor de 1% mostrou-se suficiente para promover aumentos da ordem de 70% no módulo de resiliência e de 30% na resistência à tração. Mas esses resultados correspondem a cales com teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da ordem de 90%. A adoção de um tempo de espera de 48 horas entre a mistura dos materiais e a compactação dos corpos-de-prova (“marinados”) não trouxe benefícios adicionais em termos de módulo e resistência, exceto para a cal C (a de mais baixo teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Essa espera produziu, sim, melhora adicional na adesividade agregado-ligante.

A cal pode ser adicionada à mistura asfáltica durante o processo de produção por diversos métodos. Técnicas usuais de adição de cal na mistura asfáltica consistem na adição de cal seca no misturador no momento da adição do ligante asfáltico, porém a cal pode ser adicionada ao agregado pelo processo de “marinação” (adição da cal ao agregado e deixar descansar por 48 horas, recomenda-se o uso dentro de 45 dias), e só depois o ligante asfáltico se junta ao agregado para formar a mistura asfáltica. A cal não deve ser adicionada à mistura asfáltica antes de ser completada sua hidratação. Se acontecer, reagiria com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ quando em contato com água durante a vida de serviço do pavimento. Essa reação (CaO para $\text{Ca}(\text{OH})_2$) é expansiva e poderia criar uma variação do volume da mistura asfáltica e perda na resistência e desempenho (Little, 2001).

Ainda segundo esse autor, a cal pode ser adicionada à mistura asfáltica com o uso de misturadores de tambor ou recipiente apropriado. A cal seca pode ser adicionada ao agregado seco ou ao agregado úmido. Para a mistura da cal ao agregado com superfície úmida, a porcentagem em massa que utilizado pode aumentar de dois a

três por cento acima da mistura da cal ao agregado com superfície seca. A umidade ioniza o agregado e ajuda a distribuí-lo na superfície do agregado. Agregado tratado com cal pode ser estocado por “marinação” ou pode ser misturado ao ligante asfáltico para produção da mistura asfáltica. O uso de lama de cal tem várias vantagens: melhorar a resistência da mistura asfáltica ao *stripping*, redução da poeira associada com a adição de cal seca ao agregado, e melhorar a distribuição da cal no agregado.

No entanto, o uso de lama de cal adiciona mais água do que é convencionalmente usado nas aplicações com cal convencionais e pode aumentar consideravelmente a quantidade de água do agregado, quando adicionado o ligante asfáltico para produção da mistura asfáltica, portanto é relevante e deve ser levada em consideração. Outro impecilho desse tipo de adição é de que o preparo da lama requer a aquisição ou aluguel de equipamento especializado para preparar a lama de cal no campo.

“Marinação” ou estoque de agregado tratado com cal facilita a utilização deste material. As vantagens da “marinação” são: a redução da umidade do agregado enquanto o agregado é estocado, a cal pode ser misturada ao agregado separada da produção da mistura asfáltica, reduzindo o tempo de produção da mistura asfáltica, o que pode proporcionar alguma vantagem econômica, e pode resultar no aumento da resistência à umidade (particularmente quando agregados têm argilas presentes na parte fina) (Litte, 2001).

Desvantagens da “marinação”: manipulação adicional do agregado, local para estocagem de agregado tratado e não tratado, e a cal pode ser lavada do agregado durante a “marinação”. Carbonatação da cal marinada ao agregado em estoque pode ser um grande problema, já que pode ocorrer na superfície da estocagem (Little, 2001).

Sumarizando os métodos de adição da cal hidratada ao asfalto, podem ser: com cal hidratada no agregado seco, com cal hidratada no agregado úmido e com lama de cal no agregado (devendo descontar a água contida no agregado, quando da adição da lama), os dois últimos com opção de “marinação”.

2.10 MODIFICAÇÃO COM PPA

A procura constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e a utilização combinada de materiais que melhorem o desempenho dos asfaltos modificados que visam aumentar a utilização de ligantes asfálticos. Atualmente, além dos ligantes asfálticos convencionais, há uma gama de asfaltos modificados, que proporcionam opções para atender às necessidades oneradas pelas condições do clima, onde vai ser utilizado o asfalto.

Um material muito utilizado é o polímero, e para ser eficaz, deve ser misturado com o asfalto e melhorar a resistência em altas temperaturas, sem fazer com que o asfalto fique muito viscoso nas temperaturas de mistura ou muito quebradiço em baixas temperaturas. Se usado em asfalto de rodovias, deve ser capaz de ser processado por equipamentos convencionais, e não deve apresentar características de expansividade, e tanto fisicamente como quimicamente, o polímero contido no asfalto deve ser estável durante a estocagem, preservando suas propriedades no momento de sua aplicação em campo, e certamente esse polímero tem que ser solúvel no asfalto (Giavarini *et al.*, 1996).

Outro material, apresentado como a panacéia da pavimentação asfáltica pelo próprio fabricante da patente (*Innophos*®) é o ácido polifosfórico (PPA), tido como a solução para toda condição de contorno almejada para qualquer projeto de pavimento asfáltico, em qualquer situação de agressividade, salvo variações de concentração de uso do próprio material.

Muitas vezes o custo do polímero inviabiliza o seu uso, em função da quantidade utilizada para obtenção das propriedades desejadas para atender as características de projeto, por isso a combinação com outros materiais como o PPA tem sido estudado para reduzir a quantidade de polímero na mistura asfáltica.

A modificação de ligantes asfálticos por ácido polifosfórico não é uma prática recente (Baumgardner *et al.*, 2005). Desde a década de 1970, ligantes asfálticos têm sido modificados com ácido polifosfórico, na tentativa de aumentar a viscosidade sem reduzir substancialmente a penetração, na tentativa de obter ligantes asfálticos com

maior resistência à deformação permanente, sem prejudicar a resistência à formação de trincas de origem térmica.

Baumgardner *et al.* (2005) afirmam que mais recentemente, o ácido polifosfórico tem sido empregado para ampliar a faixa de temperatura de trabalho dos ligantes asfálticos, isto é, o grau de desempenho segundo a especificação *Superpave*. Segundo estes autores, a adição de ácido polifosfórico pode proporcionar melhoria das propriedades reológicas do ligante asfáltico nas temperaturas altas, sem afetar o “*Performance Grade*” (PG) do material nas temperaturas baixas.

Esses autores afirmam ainda que a classificação por desempenho, o PG é o mais indicado para grandes carregamentos, ou tráfegos lentos em altas temperaturas. Por exemplo, uma classificação padrão PG 64-22 para tráfego normal, poderia ser deslocada para PG 70-22 para tráfego lento e PG 76-22 para pesado lento ou condições interestaduais. Sobre essas modificações, as classificações de desempenho podem chegar a um PG 86-22, PG 92-22 e PG 98-22. Tipicamente, classificações de desempenho que extrapolam 90°C requerem modificação do asfalto. Enquanto que a modificação com o polímero é mais comum, o ácido polifosfórico também pode ser utilizado para melhorar as propriedades reológicas em altas temperaturas sem afetar a classificação em baixas temperaturas.

O PPA pode ser empregado como catalisador, aumentando o ponto de amolecimento sem alterar de forma expressiva a rigidez do asfalto, como aditivo direto, para melhorar o grau de desempenho em altas temperaturas, devido a relação entre os asfaltenos e o ácido polifosfórico, e como acelerador da reação entre o polímero e o ligante asfáltico, reduzindo a quantidade de polímero utilizada (Kodrat *et al.*, 2007).

Em misturas com agregados do tipo granítico, o ácido polifosfórico resulta em aumento da adesão e resistência à umidade; em agregados calcários, um bom desempenho à umidade é obtida com baixas porcentagens em peso de ácido polifosfórico (tipicamente menores que 1%) (Maldonado *et al.*, 2008).

2.10.1 Composição

Os compostos básicos para a produção de PPA são o pentóxido de fósforo (P_2O_5) e ácido fosfórico (H_3PO_4). O fósforo é oxidado primeiro para pentóxido de fósforo, que cristaliza como P_4O_{10} . Uma vez que ele reage com água, o ácido fosfórico é produzido. Esse caminho para o H_3PO_4 é conhecido como processo seco, que é usado para fornecer o material de alta pureza. O processo úmido fornece o H_3PO_4 da reação de ácido sulfúrico com o solo formado da rocha apatita, de formulação $Ca_3(PO_4)_2CaF_2$ (Masson, 2008).

O PPA é um oligômero (conjunto de cadeias) de H_3PO_4 . O material puro é produzido da desidratação do H_3PO_4 em altas temperaturas ou pelo aquecimento de P_2O_5 disperso em H_3PO_4 . O método da desidratação produz cadeias curtas, assim como o método da dispersão usualmente produz cadeias com repetição de 10 unidades apenas (Masson, 2008).

O PPA é avaliado pela porcentagem de pentóxido de sódio em relação à de ácido presente no produto em questão, a nomenclatura é confusa por se tratar de uma porcentagem que pode exceder 100%. Esse 100% do ácido fosfórico representa 72,4% (essa porcentagem é adotada como referência) de P_2O_5 em relação à porção ácida calculado pela relação de P_2O_5/H_3PO_4 , similarmente, o ácido pirofosfórico ($H_4P_2O_7$) contém 79,8% de P_2O_5 calculado da relação $P_2O_5/H_4P_2O_7$, que representa a partir da relação $79,8\%/72,4\% = 110\%$, portanto esse ácido é classificado como 110%.

2.10.2 Reações com PPA

Todos os ácidos fosfóricos são gerados na natureza sem a necessidade de oxidação, em contraste aos ácidos minerais, assim como o ácido nítrico, por exemplo. Na presença de água, a dissociação do ácido fosfórico e o rearranjo dos prótons seguem para o equilíbrio das cargas dos elementos envolvidos. Com o aumento do comprimento da cadeia, ocorre similarmente o aumento da sua acidez. O ácido polifosfórico dimérico, possui dois hidrogênios ácidos (elemento carregado positivamente, capaz de liberar um próton), o trimérico, três hidrogênios ácidos, assim, tão longa quanto pode ser a cadeia do ácido polifosfórico, mais ácido ele

pode ser, em função da repetição de cada unidade que libera um próton e estabiliza a carga pela ressonância (Masson, 2008).

O PPA é misturado e reage com o asfalto. Com os muitos grupos funcionais do asfalto, no entanto, a reação exata entre o PPA e o asfalto pode somente ser inferida, já que o asfalto possui características químicas variáveis, em função de sua origem, processo de destilação, nível de pureza, e elementos misturados à cadeia carbônica do asfalto (Masson, 2008).

2.10.3 Propriedades do PPA

Filipis (1995) concluiu que o efeito da adição de H_3PO_4 e $(HPO_3)_n$ melhora a resistência ao envelhecimento de asfaltos naftênicos, com pequenas quantidades de componentes fosfóricos. Mesmo com a boa melhora na resistência ao envelhecimento, as maiores vantagens do uso do ácido polifosfórico na mistura asfáltica são a economia oriunda com o ganho na resistência e a melhora nas propriedades físicas, como a elasticidade, de baixas temperaturas.

Giavarini *et al.* (1996) concluíram que um asfalto modificado com um polímero heterofásico pode ser obtido por um pré-tratamento com uma pequena porção de ácido polifosfórico. De fato, o ácido melhora a homogeneização do polímero, produzindo boas características quanto à estabilidade e propriedades. A adição de 2 – 3% de polímero em asfalto tratado com ácido é obtido um asfalto com mesma estabilidade e características de um asfalto sem tratamento com ácido, e com 5 – 6% de polímero. Portanto o custo do tratamento é mais que contrabalanceado pela economia de polímero quando do uso de PPA, além disso, o produto obtido é estável durante a estocagem em altas temperaturas por longos períodos.

Baumgardner *et al.* (2005) estudaram dois asfaltos modificados com PPA e alteração na microestrutura e composição investigadas com Microscopia de Forças Atômicas (AFM), Cromatografia de permeação-gel (GPC) e Análise Química. O grau de desempenho de ambos os asfaltos foi aumentado pelo PPA, que foi observado no AFM como um endurecimento de umas das duas fases principais no asfalto, em um asfalto o PPA afetou a fase dispersa, em outra, afetou a matriz. O efeito do endurecimento do PPA é, portanto dependente do tipo de asfalto.

Vários mecanismos foram estudados na tentativa de explicar o efeito da modificação com PPA no endurecimento de ligantes asfálticos: formação de canalículos de PPA, formação de cadeias aromáticas, cruzamento de ligação da vizinhança de segmentos do asfalto e a formação de conjunto de íons. Uma análise detalhada físico-química do asfalto modificado com PPA requer a determinação de qual mecanismo prevalece (Baumgardner *et al.*, 2005).

Kodrat *et al.* (2007) concluíram que o efeito do PPA é significativo nas propriedades da classificação *Superpave*, aumentando as propriedades de alta temperatura, dependendo da fonte do asfalto, e permanecendo inalteradas, para muitos ligantes asfálticos, as propriedades de baixa temperatura. Afirmam ainda que para a ruptura à fadiga a longo prazo na temperatura ambiente, houve um impacto negativo em suas propriedades, por isso, essa característica demanda todo cuidado quando o PPA é utilizado em áreas onde a ruptura por fadiga é o defeito dominante; em relação ao processo de envelhecimento e quanto à ruptura frágil, a modificação foi insignificante.

Maldonado *et al.* (2008) concluíram que a adição de pequenas concentrações fornece vários benefícios como aumento da classificação do grau de desempenho para as altas temperaturas, sem perdas nas propriedades nas baixas temperaturas, aumento na aderência do ligante asfáltico ao agregado, melhorando a sensibilidade à umidade da mistura asfáltica, resultando em benefícios *anti-stripping* similares aos obtidos da amina e da cal hidratada. Os mesmos autores afirmam também que não há efeitos prejudiciais da utilização do PPA quando usado junto com a cal hidratada e dos líquidos *anti-stripping*, e que houve significativa melhora da resistência à deformação permanente.

A classificação *Superpave* do grau de desempenho melhorou do PG 64-22 para o PG 64-28 e do PG 64-28 para PG 70-28 como resultado da modificação com 0,5% de ácido polifosfórico (105%) em peso e 0,45% de ácido polifosfórico (115%) em peso, respectivamente. Estudos em relação à sensibilidade à umidade demonstraram que o ácido melhora as propriedades quando adicionados a cal hidratada ou líquidos *anti-strip*. Os melhores resultados da sensibilidade à umidade resultaram da combinação entre ácido polifosfórico e cal hidratada (Maldonado *et al.*, 2008).

Leite *et al.* (2004) concluiu que a mistura asfáltica preparada com modificação por ácido teve fechamento dos agregados pela película de ligante asfáltico e resultaram em valor de resistência à tração da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos com ligantes oriundos de cru naftênico (petróleo venezuelano) tipo CAP 85/100. Fernandes *et al.* (2008) concluíram que analisando as propriedades da mistura asfáltica em altas temperaturas o ligante modificado com ácido polifosfórico possui comportamento térmico semelhante ao do ligante modificado.

Formulações de misturas asfálticas típicas usadas na França com ligantes modificados com PPA com ou sem polímeros apresentaram desempenhos aceitáveis, e aumentou a rigidez do ligante sem afetar as propriedades de baixa temperatura, assim como a classificação *Superpave* do grau de desempenho aumentou a temperatura para altas e baixas temperaturas, aumentando a faixa de temperatura que podem ser submetido o pavimento sem prejudicar as propriedades da mistura asfáltica quando solicitado pelas cargas do tráfego, proporcionando o benefício do uso de PPA para aumentar a vida útil do pavimento (Christian, 2008).

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o programa de experimentos desta pesquisa, que avaliou as propriedades mecânicas, volumétricas, e de durabilidade de misturas asfálticas densas compostas por diferentes tipos e concentrações de ligantes asfálticos, modificadores e aditivos.

Apresentam-se assim, as características dos agregados, ligantes asfálticos, aditivos e modificadores utilizados, as misturas asfálticas testadas são, basicamente, resultantes da combinação fatorial de dois fatores: o *aditivo*, cal hidratada, variando em três teores e o *modificador*, ácido polifosfórico, variando em três teores.

3.2 AGREGADOS

3.2.1 Tipo e distribuição granulométrica

Os agregados utilizados são de origem granítica, oriundos da Usina Paulista de Britagem Pedreira São Jerônimo Ltda, localizada na cidade de Valinhos, SP. Os agregados foram manipulados e enquadrados no centro faixa MIX IV-B do *Asphalt Institute*. O Tamanho Máximo Nominal (TMN) da granulometria utilizada é a 12,7mm.

A Faixa granulométrica MIX IV-B do *Asphalt Institute* é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1: Faixa Granulométrica MIX IV B do *Asphalt Institute*

Peneira (mm)	Faixa Mix IV B		Centro da faixa
	Limite inferior	Limite superior	
25,4	100	100	100,0
19,1	100	100	100,0
12,7	85	100	92,5
9,52	70	90	80,0
4,76	50	70	60,0
2,38	35	50	42,5
0,59	18	29	23,5
0,297	13	23	18,0
0,149	8	16	12,0
0,074	4	10	7,0

3.2.2 Características físicas

Os agregados pétreos foram submetidos ao ensaio de “Abrasão Los Angeles - A_n ” (DNER – ME 35/98) na graduação B, sendo ensaiadas três amostras com essas condições. Os resultados obtidos foram de 24,3%, de onde se conclui que o agregado atende à especificação do DNER, que estabelece desgaste igual ou inferior a 40%.

Além dos ensaios de peneiramento e “Abrasão Los Angeles”, os agregados foram submetidos aos ensaios de densidade aparente do agregado grosso (ASTM 127 - 01) e a densidade aparente do agregado miúdo (ASTM 128 - 01); assim, os ensaios foram realizados para as frações pó de pedra, pedrisco e pedra 1. Os resultados obtidos para a massa específica aparente, real e da absorção são apresentados nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 para o pó de pedra, pedrisco e pedra 1, respectivamente.

Tabela 3.2. Massas específicas e absorção do pó de pedra.

Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm ³)
2,487	2,63	2,661

Tabela 3.3. Resultado do ensaio de Massa específica do pedrisco.

Amostra	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm ³)
1	2,574	0,69	2,620
2	2,561	0,94	2,624
3	2,567	0,81	2,621
Média	2,567	0,815	2,622

Tabela 3.4. Resultado do ensaio de Massa específica da Pedra 1.

Amostra	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm ³)
1	2,613	0,46	2,644
2	2,592	0,55	2,629
3	2,597	0,49	2,631
Média	2,601	0,496	2,635

3.2.3 Procedimento de seleção, manuseio e preparação do agregado

Os agregados coletados na pedreira foram previamente secos em estufa por no mínimo 12 h, posteriormente separados no peneirador mecânico, tomando os devidos cuidados com as peneiras de graduação menores ou iguais a 0,42 mm, para

proporcionar uma boa distribuição das frações em cada peneira, sendo o peneiramento feito manualmente.

Após a separação das quantidades de material de cada peneira que compõem a faixa MIX IV B do *Asphalt Institute*, os agregados foram colocados em sacos plásticos, nas quantidades suficientes para confecção de um corpo-de-prova (1200g), de maneira a se enquadrarem no centro da faixa MIX IV B, conforme proporções apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.5. Porcentagens e massa de cada fração do agregado para enquadramento no centro da faixa MIX IV B do *Asphalt Institute*.

FAIXA MIX IV B			
Abertura (mm)		% do material	Massa do material (Kg)
Passado	Retido		
25,4	19,1	0	0
19,1	12,7	7,5	0,09
12,7	9,52	12,5	0,15
9,52	4,76	20	0,24
4,76	2,38	17,5	0,21
2,38	0,59	19	0,228
0,59	0,297	5,5	0,066
0,297	0,149	6	0,072
0,149	0,074	5	0,06
0,074	fundo	7	0,084
Total		100	1,2

3.3 ADITIVOS E MODIFICADORES

Nas misturas utilizou-se como aditivo a cal hidratada calcítica tipo CH1 em substituição de parte do material passante na peneira n° 200 (abertura de 0,075mm), nas porcentagens de 1,5 e 3,0% em peso de filer substituído. A Tabela 3.7 mostra algumas características dessa cal.

Tabela 3.6. Composição química e características granulométricas da cal utilizada

Parâmetros	Porcentagens (%)	Norma Técnica
PPC	24,71	
MgO	0,48	
Al ₂ O ₃	0,34	NBR 6473/2000
SiO ₂	0,86	
CaO TOTAL	72,69	
Fe ₂ O ₃	0,21	
CaO DISPONÍVEL	68,10	NBR 9554/93
CO ₂	1,13	PO-0073*
CaCO ₃	4,59	NBR 13293
Ca(OH) ₂	90,06	NBR 13294
S (ENXOFRE)	0,18	PO-0073*
H ₂ O	1,15	NBR 6472/93
* Procedimento interno - Combustão Direta		
Granulometria		
Malha	Retido acumulado	Norma Técnica
30#	0,00	
0,30mm	0,00	
0,149mm	0,13	NBR 9552/86
0,074mm	0,84	

O modificador utilizado nesta pesquisa é um ácido polifosfórico - 105% (Innovalt[®] E200) fornecido pela Innophos, localizada em Nashville, Tennessee, EUA e, segundo a empresa, o produto é especificado para atuar combinado a asfaltos modificados com polímeros e borracha de pneu, melhorando seu desempenho.

3.4 LIGANTES ASFÁLTICOS

Neste trabalho utilizou-se um ligante asfáltico tipo CAP 50/70 proveniente da Refinaria Henrique Lage (REVAP), localizada em São José dos Campos – SP. A partir deste ligante asfáltico foram produzidos dois outros ligantes, um com 0,6% e outro com 1,2% de ácido polifosfórico (PPA), em peso.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos asfaltos são apresentados nas Tabelas 3.8 a 3.10, sendo que o detalhamento para determinação da viscosidade Brookfield é apresentado na Figura 3.2 e na Tabela 3.11 (ASTM D 2493).

Tabela 3.7. Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto puro

CAP 50/70 puro			
Característica	Resultado		
Penetração, 25° C, 5s, 100g	5,8	mm	
Ponto de amolecimento	49,31	°C	
Índice de Susceptibilidade Térmica	-1,025		
	135 °C	350	cP
Viscosidade Brookfield	150 °C	176	cP
	177 °C	65	cP

Tabela 3.8. Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado com 0,6% de PPA.

CAP 50/70 com 0,6% de PPA			
Característica	Resultado		
Penetração, 25° C, 5s, 100g	4,6	mm	
Ponto de amolecimento	53,27	°C	
Índice de Susceptibilidade Térmica	-0,602		
	135 °C	476	cP
Viscosidade Brookfield	150 °C	230	cP
	177 °C	80	cP

Tabela 3.9. Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto modificado com 1,2% de PPA.

CAP 50/70 com 1,2% de PPA			
Característica	Resultado		
Penetração, 25° C, 5s, 100g	3,7	mm	
Ponto de amolecimento	56,8	°C	
Índice de Susceptibilidade Térmica	-0,343		
	135 °C	720	cP
Viscosidade Brookfield	150 °C	328	cP
	177 °C	110	cP

Observa-se nos dados apresentados nas Tabelas 3.8 a 3.10 que a adição de PPA causa diminuição da penetração e aumento no ponto de amolecimento, isto é, a susceptibilidade térmica do ligante asfáltico diminui, assim como há aumento crescente das temperaturas de mistura e compactação das misturas à medida que se aumenta o teor de PPA.

3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

A maioria das misturas asfálticas a quente produzidas no Estados Unidos entre os anos 1940 e 1990 foram dosadas utilizando as metodologias Marshall ou Hveem (Roberts *et al.*, 1996). Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transportes norte-americanos vêm utilizando a metodologia *SUPERPAVE*[®], ainda

em fase de testes no Brasil. Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis.

A maior diferença entre este novo procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem *SUPERPAVE*[®] é realizada por amassamento (giros). Outra diferença que pode ser citada entre os dois processos é a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados (Bernucci *et al.*, 2007).

O projeto de mistura é todo feito utilizando o Compactador Giratório *SUPERPAVE*[®] (CGS). Trata-se de um equipamento prático e com boa reprodutibilidade, que têm as seguintes características:

- Ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$;
- Taxa de 30 rotações por minuto;
- Tensão de compressão vertical durante a rotação de 600kPa;
- Capacidade de produzir corpos-de-prova com diâmetros de 150 e 100mm.

3.5.1 Temperaturas de usinagem e compactação

A temperatura do cimento asfáltico empregado na mistura deve ser determinada para cada tipo de ligante, em função da relação temperatura-viscosidade. As curvas da viscosidade *versus* temperatura dos ligantes utilizados nessa pesquisa são apresentadas na Figura 3.2. Nela se pode observar que a adição do ácido polifosfórico (PPA) alterou a viscosidade do ligante asfáltico original (CAP 50/70), sendo seu efeito mais intenso com o aumento de sua concentração no ligante. Entretanto, a temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C.

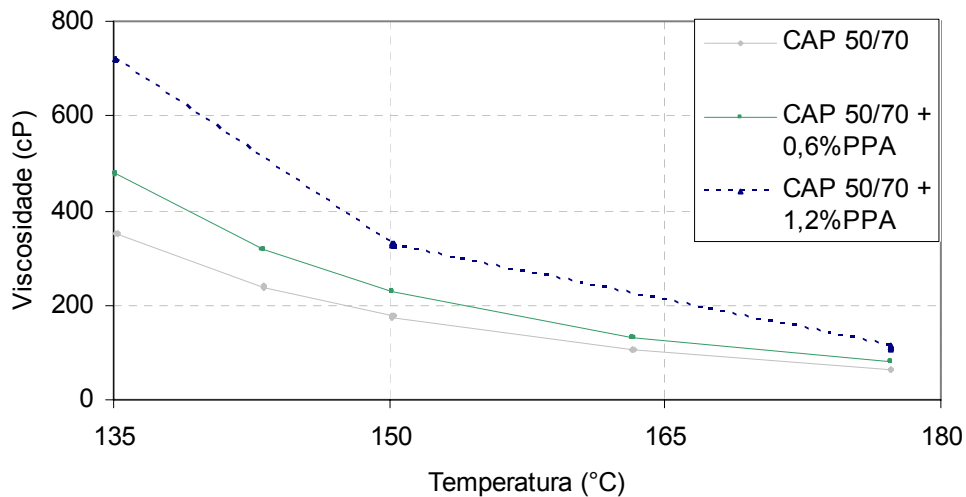


Figura 3.1. Viscosidades Brookfield dos ligantes utilizados na pesquisa

As temperaturas de usinagem e compactação (TUC) foram determinadas de acordo com a ASTM D 2493. A adoção da temperatura de usinagem observou a faixa de viscosidade de 150 a 190 cP e, para a compactação, 250 a 310 cP (ASTM D 4402), para garantir a trabalhabilidade, e não ocorra entupimento durante o bombeamento da mistura, respectivamente.

Tabela 3.10. Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes

Operação	Faixa de Viscosidade (cP)	Temperatura (°C)		
		CAP 50/70 (CAP Puro)	CAP 50/70 + 0,6 PPA	CAP 50/70 + 1,2 PPA
Usinagem	150	149	156	167
	190	155	161	172
Compactação	250	142	144	152
	310	138	148	160

A partir das TUC pode-se observar o impacto importante da adição do PPA, de modo que, em relação ao ligante asfáltico original, as temperaturas de usinagem e de compactação aumentaram em, aproximadamente, 6°C com adição de 0,6% de PPA de 16°C para a adição de 1,2% de PPA, exibindo um aumento da ordem de 1,1 a 1,3°C para cada 0,1% de PPA adicionado ao ligante asfáltico original.

3.5.2 Determinação do teor de ligante de projeto

Segundo Bernucci *et al.* (2007) o primeiro passo do procedimento SUPERPAVE® consiste na escolha de três composições granulométricas com os materiais à

disposição; e o passo seguinte é a compactação de corpos-de-prova (CGS) com um teor de tentativa para cada mistura (dois corpos-de-prova por mistura).

Esse passo não foi realizado, já que a metodologia SUPERPAVE® não foi aplicada integralmente, principalmente na primeira etapa, quando da escolha da composição granulométrica que melhor atendesse ao projeto devido premissa inicial, que era reproduzir uma distribuição granulométrica que tivesse uso frequente na região. Assim, foi adotado um teor de ligante inicial de 5%, e um único tipo de distribuição granulométrica de agregado mineral, nesse caso, o agregado granítico.

As propriedades estimadas são comparadas aos critérios de projeto: $V_v = 4\%$ (para $N_{projeto} = 100$), $VAM > 13\%$ para TMN 12,7 mm, RBV entre 65 e 75%, para fluxo de veículos entre 10 e 30×10^7 , $\%G_{mm@N_{inicial}} < 89\%$, $\%G_{mm@N_{máximo}} < 98\%$; além da proporção pó/asfalto (que corresponde à razão do teor de material passante na peneira N° 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve pertence ao intervalo de 0,6 a 1,8 (Motta *et al.*, 1996).

Para a determinação do teor de ligante de projeto, realiza-se a compactação de três CP's no teor de ligante inicial (P_{ii}), além de três outros teores ($\pm 0,5$ e $+1,0\%$ em relação ao P_{ii}).

Para a realização da mistura, o agregado mineral foi aquecido em uma misturadora de massa adaptada para esta finalidade até a temperatura de usinagem para cada ligante estudado, que foi adicionado para homogeneização do material. Em seguida, foram separadas porções de 1.200,00 g e armazenados em tigelas metálicas, que foram acondicionadas em estufa pelo período de duas horas na temperatura de compactação, antes da compactação, a fim de simular o efeito do envelhecimento de curto prazo durante a usinagem (AASHTO TP 31). A sequência do procedimento de compactação é apresentada na Figura 3.3.



(a) Simulação do envelhecimento de curto prazo em estufa



(b) Retirado do molde da estufa



(c) Colocação do papel filtro no fundo do molde



(d) Colocação da mistura no molde e papel filtro



(e) Ajuste do cilindro no CG para compactação



(f) Compactação do corpo-de-prova no CG



(g) Extração do corpo-de-prova após compactação e retirada do papel filtro



(h) Detalhe do cilindro e dos corpos-de-prova de 10cm de diâmetro

Figura 3.2. Sequência do procedimento de compactação

Após a compactação de um corpo-de-prova, é feita a pesagem (a seco, submersa e superfície saturada seca, depois do seu resfriamento) (ASTM D 3203-94) para determinação do V_v da mistura compactada para o $N_{projeto}$, (no qual o V_v deve ser igual a 4%). O $N_{inicial}$ (representa a condição de compactação no início da sua vida útil) e o $N_{máximo}$ (representa a condição de compactação da mistura ao fim da sua vida de serviço, e garante que a mistura não vai compactar sob o tráfego previsto e ter um comportamento plástico levando a deformações permanentes), usados para avaliar a compactabilidade da mistura, que são função do tráfego (N) (Bernucci *et al.*, 2007), e variam conforme indicado na Tabela 3.12.

Tabela 3.11. Número de giros especificados pela norma de dosagem SUPERPAVE® (Bernucci *et al.*, 2007)

Parâmetros de compactação			Tráfego
$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$	
	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio (rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	205	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesado)

O número de giros adotado nesta pesquisa foi o de tráfego médio a alto, valor importante para determinação do critério de parada da moldagem dos corpos-de-prova (vias principais, rodovias rurais). A avaliação da compactabilidade da mistura, trabalhabilidade e seu potencial de densificação, que depende do esqueleto mineral (agregados) são verificados lançando-se em gráfico a massa específica como percentual da G_{mm} *versus* o número de giros (ou *versus* o logaritmo do número de giros).

O CGS calcula o G_{mb} a cada giro a partir da estimativa do volume do corpo-de-prova, admitindo que o mesmo seja um cilindro de superfícies sem rugosidades ou imperfeições, o que não representa à realidade, agregando erros as informações obtidas do CGS. O G_{mb} é corrigido em cada giro a partir do G_{mb} no $N_{máximo}$. A correção é feita pela seguinte fórmula:

$$C = \frac{G_{mb(\text{medida})}}{G_{mb(\text{estimada})}}$$

Onde:

C = fator de correção;

$G_{mb (medida)}$ = massa específica aparente medida a $N_{máximo}$;

$G_{mb (estimada)}$ = massa específica aparente estimada a $N_{máximo}$.

3.6 DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

O programa de experimentos desta pesquisa foi desenvolvido com a finalidade de abranger alguns dos principais fatores influentes na durabilidade e em algumas propriedades mecânicas e relacionadas à suscetibilidade térmica e à sensibilidade à umidade de misturas asfálticas densas.

3.7 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO FATORIAL

As misturas asfálticas testadas nesta pesquisa são, basicamente, resultantes da combinação fatorial de dois fatores: o *aditivo*, cal hidratada, variando em três níveis e o *modificador*, ácido polifosfórico, variando em três níveis. Nesta configuração (3x3x2), o programa experimental resultou em dezoito condições experimentais com três réplicas para cada condição (com volume de vazios de 4 e 7%), ou seja, 6 corpos-de-prova que foram ensaiados em três temperaturas, resultando em 324 resultados de módulos de resiliência (MR).

- Fator 1: *Aditivo* – cal hidratada cálcica em três níveis (0; 1,5 e 3,0% em peso);
- Fator 2: *Modificador* – ácido polifosfórico em três níveis (Puro – CAP 50/70; CAP 50/70 + 0,6% de ácido polifosfórico; CAP 50/70 + 1,2% de ácido polifosfórico).

O procedimento experimental envolveu as seguintes etapas:

- Caracterização e preparação dos ligantes asfálticos modificados, considerando duas concentrações de ácido polifosfórico (0,6 e 1,2%);
- Preparação da distribuição granulométrica dos agregados, com eventual substituição de pó-de-pedra por cal, em dois teores (1,5 ou 3,0%);
- Definição do teor de projeto das misturas asfálticas, conforme a metodologia SUPERPAVE®, AASHTO T 283, para tráfego de médio a pesado (100 giros e V_v de 4%);

- Moldagem das réplicas para ensaio de determinação de módulo de resiliência (AASHTO TP 31) em três diferentes temperaturas (10, 25 e 40°C).

3.8 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Uma forma de avaliar os efeitos dos condicionamentos térmicos num mesmo corpo-de-prova é o ensaio de módulo de resiliência, uma vez que esse ensaio não é destrutivo. O método de ensaio consiste da execução a 25°C, a aplicação de 100 ciclos de carregamento de grandeza constante, com duração de 1,0s, sendo que o mesmo tem um período de solitação de 0,1s e um período de repouso de 0,9s.

Com o objetivo de limitar os defeitos do aparato de realização do ensaio de módulo de resiliência, a carga inicial para cada combinação de corpos-de-prova é calibrada no início de cada ensaio a fim de produzir deslocamentos da ordem de 0,0025 a 0,0030 milímetros. Esse detalhe de execução do ensaio tem sua importância em suma para preservar a integridade do material, sem ocasionar sinais de qualquer tipo de ruptura que venha alterar o arranjo da mistura, e modificar suas propriedades físicas.

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

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

Onde:

MR é o módulo de resiliência em MPa;

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

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

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

μ é o coeficiente de Poisson.

Outros parâmetros obtidos a partir de módulo de resiliência foram avaliados, a saber: recuperação retardada e atraso. A *recuperação retardada* (RR) representa a recuperação no período de repouso e está indiretamente relacionada a visco-elasticidade do material; com ela se podem verificar alterações de comportamento das misturas asfálticas quanto à forma de resposta resiliente e, inclusive, por exemplo, observar um aumento de valor de MR implica em misturas asfálticas mais elásticas ou mais viscosas (Furlan, 2006; Furlan *et al.*, 2006; Furlan, 2008b). O parâmetro é obtido a partir das expressões abaixo:

$$RR = \frac{(MR_I - MR_T)}{MR_I} \times 100$$

$$RR = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon_I} - \frac{\sigma}{\varepsilon_T}}{\frac{\sigma}{\varepsilon_I}} = \frac{\frac{\varepsilon_T - \varepsilon_I}{\varepsilon_I \varepsilon_T}}{\frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_I}} = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_I}{\varepsilon_T} \times 100$$

Onde:

RR é a recuperação retardada, em %;

MR_I é o valor do módulo instantâneo, em MPa;

MR_T é o valor do módulo total, em MPa;

σ é a tensão aplicada;

ε_I é a deformação total;

ε_T é a deformação elástica instantânea.

Outro parâmetro de rigidez 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 picos dos pulsos de carga e de deslocamento. Foi calculado com base na diferença de tempo entre ocorrências do ponto de carga máxima e o ponto de máximo de deslocamento. Esse parâmetro também tem relação com a visco-elasticidade do material, mas nesse caso a resposta é avaliada no período de carregamento, e o coeficiente de Poisson foi adotado como 0,35, valor esse utilizado em retroanálises. Para a obtenção dos parâmetros de rigidez foram desenvolvidas rotinas especiais de cálculo pelo Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri da Escola de

Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes, em linguagem *Labview* 7.1[®] e incorporadas ao programa de determinação do módulo de resiliência (Furlan *et al.*, 2008).

3.9 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

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

A resistência à tração é determinada a partir da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi.d.h}$$

Onde:

σ_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.

3.10 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE TÉRMICA DA MISTURA

A temperatura e a ação da água são dois fatores que alteram significativamente a durabilidade das misturas asfálticas.

Os corpos-de-prova foram ensaiados em três temperaturas 10, 25 e 40°C com a finalidade de observar se existe alguma particularidade de comportamento das misturas na faixa de temperaturas de serviço devido à presença de cal e/ou do ácido polifosfórico.

Para garantir que os ensaios de módulo de resiliência fossem realizados nas temperaturas desejadas, os corpos-de-prova foram anteriormente colocados numa câmara climatizada com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$, por no mínimo 12 h.

Para a temperatura de 10°C , como a mistura asfáltica fica muito rígida, para atingir os níveis de deslocamento com que foram ensaiados a 25°C , implica no uso de cargas muito altas, correndo o risco de alterar as propriedades do material, por isso, nesse caso optou-se por aceitar um nível menor de deslocamentos, cerca de 0,0020mm, que é o suficiente para uma leitura de qualidade. No caso de 40°C , os deslocamentos de 0,0020mm também foram aceitos, devido à sensibilidade dos corpos-de-prova nessas condições; cargas altas podem causar alterações nas suas características físicas, assim, um deslocamento mínimo que já garanta a qualidade da leitura se torna aceitável.

3.11 MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DOS DANOS POR UMIDADE

A última etapa do projeto *SUPERPAVE*[®] Nível 1 é avaliar a sensibilidade à umidade do projeto da mistura final escolhida, o que foi feito por meio do teste AASHTO T 283, usado também na avaliação da adesividade. O método consiste na avaliação da variação de uma propriedade mecânica causada por danos por umidade. Corpos-de-prova são compactados até aproximadamente 7% de volume de vazios. Um subgrupo de três corpos-de-prova é considerado de controle e outro subgrupo de três corpos-de-prova é condicionado, sendo submetido a uma saturação a vácuo, seguida de um ciclo opcional de congelamento, seguida ainda de um ciclo de degelo de 24 horas a 60°C . Todos os corpos-de-prova são testados para determinação da resistência à tração estática indireta (DNER-ME 138/94). A sensibilidade à água é avaliada pela relação da resistência média do subgrupo condicionado e do subgrupo de controle, sendo a relação mínima admissível (RRT) de 70% a 80% dependendo do órgão viário (Bernucci *et al.*, 2007).

Foram executados ensaios de módulos de resiliência (de acordo com DNER-ME 133/94) seguindo os mesmos critérios de aceitação. Este procedimento foi adotado por ser um ensaio rápido, não destrutivo e, particularmente, com baixa dispersão, como dito anteriormente. Além disso, podem-se avaliar variações no módulo de resiliência dos corpos-de-prova decorrentes do condicionamento, o que não é

possível com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (que destrói os corpos-de-prova), e avalia a variação das propriedades em termos médios dos grupos, e, portanto acumula dispersões de outras fontes, como por exemplo, procedimento de moldagem e variação de temperatura.

3.12 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração foram analisados com o uso do software Minitab® com a finalidade de compreender quais fatores são estatisticamente significativos nas propriedades observadas.

A ferramenta usada no software Minitab® foi a ANOVA, que usa o teste F de Snedecor para análise dos efeitos significativos para os ensaios avaliados.

O teste F de Snedecor fornece a soma dos quadrados dos fatores e suas interações, que por sua vez estão relacionadas com as variações dos níveis de cada fator e suas respectivas interações. As tabelas do teste F pode ser usada para comparar a estimativa de cada parâmetro dentro de cada significância ou probabilidade. Assim, para um nível de significância de 5%, o valor da resposta do modelo tem 5% de chance de ter sido ao acaso (Gomes, 1973).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da dosagem para os três tipos de asfaltos (asfalto convencional – CAP 50/70, asfalto com adição de 0,6% de PPA, asfalto com adição de 1,2% de PPA) e para as três combinações de aditivos (agregado puro, agregado com 1,5% de cal calcítica e agregado com 3,0% de cal calcítica).

Do método de dosagem SUPERPAVE obteve-se os valores de massas específicas estimadas da mistura asfáltica (G_{mb}), expressas como percentuais da massa específica máxima (G_{mm}), volume de vazios (V_v), vazios de agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV).

Do ensaio de módulo de resiliência obtiveram-se os valores de módulo de resiliência instantâneo e total calculados segundo o método do NCHRP, a recuperação retardada (RR) e o atraso em segundos.

Do ensaio de resistência à tração por compressão diametral obteve-se os valores de resistência à tração, em termos médios, dos grupos de controle e condicionados, para uma posterior avaliação da sua relação, cuja finalidade é avaliar a suscetibilidade à umidade das misturas testadas.

4.2 COMPACTAÇÃO SUPERPAVE®

Neste trabalho, o compactador *SUPERPAVE*® foi utilizado para determinar os teores de asfalto ótimos para a moldagem dos corpos-de-prova em cada uma das combinações estudadas. Realizou-se uma dosagem única, para a condição de CAP 50/70 com 0,6% de PPA e 1,5% de cal calcítica, em função de ser a condição intermediária que mais se aproximava das demais combinações. Moldaram-se réplicas dos corpos-de-prova para cada um dos quatro teores de asfalto utilizados na dosagem, para número de giros igual a 100.

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo dos valores dos volumes de vazios obtidos na dosagem em função do teor de ligante utilizado, para o número de giros do compactador igual a 100. Os volumes de vazios foram calculados a partir das massas específicas aparentes “corrigidas” (G_{sb}) dos corpos-de-prova, cujos valores encontram-se no ANEXO I.

Tabela 4. 1. Valores obtidos para a dosagem *SUPERPAVE*®.

Teor de Ligante (%)	V_v (%) ($N_{proj} = 100$)
4,5	4,47
5,0	2,64
5,5	1,67
6,0	1,53

A Figura 10 apresenta a relação entre o volume de vazios e o teor de ligante para número de giros igual a 100. Observando-se essa figura, nota-se que o teor de ligante de projeto, para volume de vazios igual a 4,0%, é igual a 4,63%.

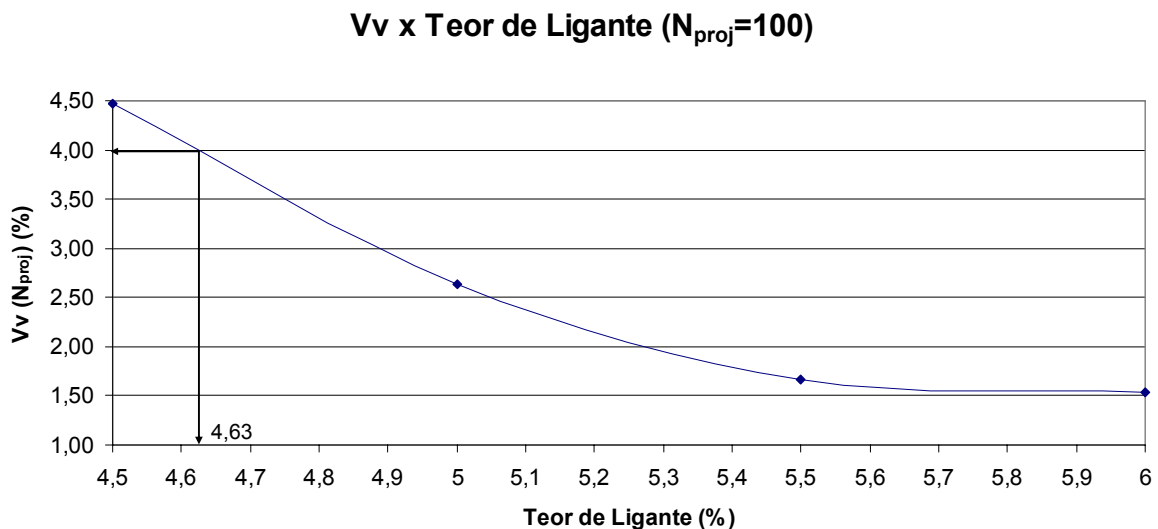


Figura 4.1. Volume de vazios versus teor de ligante para determinação do teor ideal.

4.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Os corpos-de-prova foram moldados e as médias das principais propriedades volumétricas são apresentadas na Tabela 4.2. O $V_{v,méd.}$ de 4% foi obtido adotando como critério de parada o número de giros de projeto ($N_{proj} = 100$), e o $V_{v,méd.}$ de 7% foi obtido adotando como critério de parada a massa específica aparente respectiva

para cada condição *aditivo-modificador*, registrada durante a dosagem no compactador giratório. No ANEXO II são apresentadas as propriedades obtidas dos 108 corpos-de-prova que foram confeccionados.

Tabela 4.2. Resumo dos resultados médio das propriedades da moldagem dos corpos-de-prova para todas as combinações (média de 12 CP's por condição).

Aditivo	Modificador	$G_{mb} \text{ (est)}$ (g/cm ³)	$G_{mb} \text{ (corr)}$ (g/cm ³)	$\%G_{mm@Nprojeto}$ (100)	$V_{v,méd}$ (%)	G_{mm} (g/cm ³)	VAM (%)	RBV
0% cal	0% PPA	2,327	2,373	96,031	3,969	2,471	11,36	0,651
		2,226	2,296	92,916	7,084	2,471	14,24	0,503
	0,6% PPA	2,324	2,375	95,993	4,007	2,474	11,28	0,645
		2,217	2,286	92,391	7,609	2,474	14,61	0,479
	1,2% PPA	2,328	2,378	95,912	4,088	2,479	11,18	0,634
		2,233	2,325	93,765	6,235	2,479	13,17	0,530
1,5% cal	0% PPA	2,329	2,373	96,002	3,998	2,472	11,35	0,648
		2,215	2,296	93,214	6,786	2,472	13,92	0,513
	0,6% PPA	2,317	2,373	95,927	4,073	2,473	11,38	0,642
		2,208	2,296	92,797	7,203	2,473	14,27	0,495
	1,2% PPA	2,309	2,366	95,733	4,267	2,471	11,62	0,633
		2,216	2,291	92,756	7,244	2,471	14,37	0,496
3,0% cal	0% PPA	2,308	2,363	95,993	4,007	2,461	11,74	0,659
		2,208	2,283	92,773	7,227	2,461	14,70	0,509
	0,6% PPA	2,308	2,358	95,801	4,199	2,461	11,92	0,648
		2,208	2,282	92,719	7,281	2,461	14,75	0,507
	1,2% PPA	2,298	2,352	95,610	4,390	2,460	12,13	0,638
		2,208	2,281	92,726	7,274	2,460	14,78	0,508

4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS

O ANEXO III apresenta as informações do Módulo de Resiliência total e Instantânea – NCHRP, Atraso e Defasagem para cada corpo-de-prova nas temperaturas de 10, 25 e 40°C. Para análise gráfica apresentada a seguir, foi realizada uma seleção dos valores de Módulo de Resiliência (MR) para cada combinação de fatores, a partir do descarte dos valores que extrapolaram o intervalo do valor médio \pm um desvio padrão, assim os valores usados são apresentados no ANEXO IV. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os valores de MR, RR e atraso, em termos médios, para 4% e 7% de volume de vazios, respectivamente, para as condições experimentais testadas.

Tabela 4.3. Módulos de resiliência total das misturas testadas a diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$

Temperatura (°C)	10			25			40		
	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)
CAP Puro	16246	13,13	4,03	5313	26,90	4,60	1011	26,12	4,90
CAP + 0,6% PPA	16741	12,76	4,02	5351	22,26	4,39	2000	22,78	4,65
CAP + 1,2% PPA	16876	11,66	4,01	8360	18,23	4,34	2707	20,29	4,43
CAP + 1,5% de cal	15777	13,41	3,98	5183	23,72	4,46	1353	28,05	4,86
CAP + 1,5% de cal + 0,6% de PPA	15088	14,00	4,02	5995	23,98	4,46	1340	25,62	4,80
CAP + 1,5% de cal + 1,2% de PPA	15865	12,62	4,05	6530	22,92	4,37	1894	23,11	4,62
CAP + 3,0% de cal	14220	13,62	4,05	5737	25,58	4,57	1303	24,68	4,91
CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA	14107	13,84	4,11	5513	23,10	4,44	1388	25,82	4,76
CAP + 3,0% de cal + 1,2% de PPA	18121	12,00	3,96	5668	20,37	4,29	2437	24,08	4,61

Tabela 4.4. Módulos de resiliência total das misturas testadas a diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

Temperatura (°C)	10			25			40		
	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)
CAP Puro	12280	15,30	4,04	3352	27,13	4,68	896	20,49	4,84
CAP + 0,6% PPA	13126	13,46	4,04	5517	22,26	4,65	1481	21,34	4,77
CAP + 1,2% PPA	17318	10,64	4,00	7649	20,37	4,42	1860	21,31	4,65
CAP + 1,5% de cal	14121	13,26	4,07	4489	25,87	4,58	1274	25,47	4,85
CAP + 1,5% de cal + 0,6% de PPA	12863	15,38	4,09	5037	24,24	4,53	1467	24,31	4,79
CAP + 1,5% de cal + 1,2% de PPA	14378	13,91	4,10	6068	22,11	4,36	1731	24,37	4,73
CAP + 3,0% de cal	12088	15,79	4,11	4095	26,65	4,60	1051	23,15	4,76
CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA	13662	15,65	4,15	4571	24,22	4,47	1461	26,28	4,77
CAP + 3,0% de cal + 1,2% de PPA	14129	13,11	4,04	5044	22,50	4,40	1584	26,50	4,82

Observando-se os valores das Tabelas 4.3 e 4.4, nota-se que a temperatura é o principal fator responsável pela variação das propriedades avaliadas, seguida pelo *aditivo* e pelo *modificador*. Considerado a média de todas as condições experimentais, observa-se que na faixa de temperaturas de 10 a 25°C, a perda de rigidez foi menos severa que na faixa de 25 a 40°C, da ordem de 63 e 71%, respectivamente, para $V_v = 4\%$ (Tabela 4.3), e de 63 e 72%, respectivamente, para $V_v = 7\%$ (Tabela 4.4). Quanto aos parâmetros de rigidez, pode-se dizer que o aumento da temperatura causou o aumento tanto de RR quanto ao Atraso, isto é, as misturas asfálticas, de forma geral, tendem a apresentar respostas mais lentas frente ao carregamento e ao descarregamento. Em termos médios, os valores de

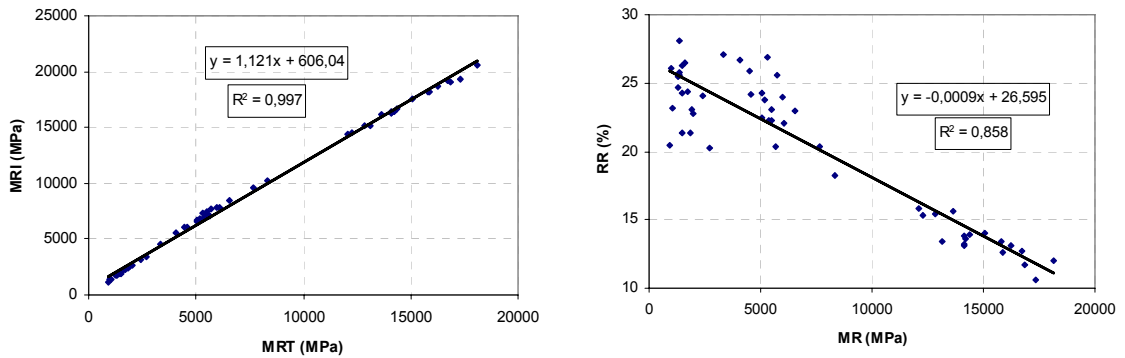
RR foram 13, 23 e 24,5% e do Atraso, 4,0; 4,4 e $4,7 \times 10^{-2}$ para $V_v = 4\%$, e RR de 14, 24 e 23,7 para $V_v = 7\%$, para as temperaturas de 10, 25 e 40°C, respectivamente.

A mistura de referência (CAP Puro) não apresentou as maiores perdas de rigidez em função do aumento da temperatura, mas, em contrapartida, apresentou os maiores ganhos nos parâmetros RR e Atraso, tanto para $V_v = 4\%$, quanto para $V_v = 7\%$.

Com relação ao volume de vazios, a variação de 4 para 7% causa uma redução média na rigidez de 13, 15 e 17%, para as temperaturas de 10, 25 e 40°C, respectivamente. Em relação à RR e ao Atraso, houve um aumento de 8 e 1%, 4 e 2%, para as temperaturas de 10 e 25°C, respectivamente, e redução de 3% para o RR e aumento de 1% para o Atraso para a temperatura de 40°C. Nota-se que a tendência das misturas asfálticas, de forma geral, é apresentar respostas mais lentas frente ao carregamento e ao descarregamento, com o aumento da temperatura e o aumento do V_v de 4 para 7%, produz a mesma tendência se quanto à temperatura, com exceção de 40°C, que mostrou respostas mais rápidas quanto às solicitações impostas.

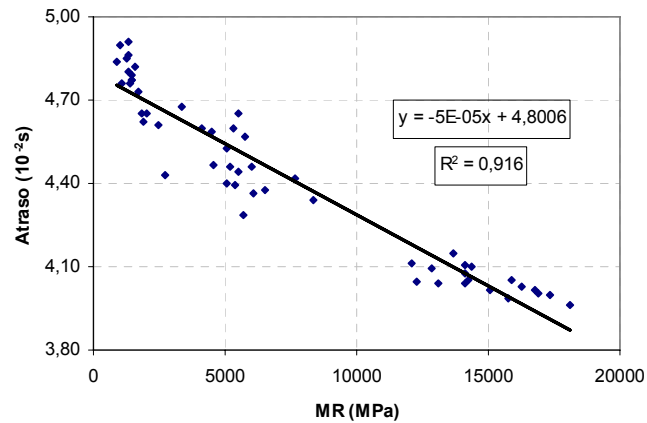
Os valores de MR indicaram que a adição de PPA propicia aumento da rigidez e esse efeito é mais intenso com o incremento de sua concentração nas misturas asfálticas. A partir dos valores de RR e Atraso, nota-se que as misturas com PPA exibiram comportamento mais elástico, ou seja, houve redução desses parâmetros em função do aumento de MR resultante da redução da temperatura.

Para visualização do comportamento das propriedades e dos parâmetros apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, a Figura 4.2 apresenta os gráficos com os resultados de todos os corpos-de-prova ensaiados nas três temperaturas, para os V_v de 4% e 7%. O gráfico da Figura 4.2a apresenta os valores do módulo total versus o instantâneo e tem a finalidade de evidenciar a alta qualidade da relação entre eles, o que é propiciado pelo método de cálculo (*Protocolo da NCHRP 1-28*). O gráfico da Figura 4.2b e 4.2c apresentam as tendências de comportamento da RR e do Atraso em função de MR, lembrando que a variação de seus valores absolutos é decorrente principalmente da variação da temperatura.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.2. (a) Relação entre módulos instantâneo e total, (b) RR em função de MR e (c) Atraso em função de MR, para $V_v = 4\%$

A avaliação de resultados em termos médios confunde como cada mistura asfáltica reage sofre o efeito da temperatura, assim como vantagens e desvantagens da adição e concentração de dado produto. Assim, é feita uma análise considerando o efeito de cada fator e sua interação. Esta análise contempla as curvas de MR e RR em diferentes temperaturas, ou seja, somente a resposta da mistura na fase de descarregamento. Para o entendimento do efeito da adição de cal na suscetibilidade térmica das misturas asfálticas, as Figuras 4.3 e 4.4 apresentam curvas de MR e RR das misturas com CAP Puro, CAP + 0,6% PPA e CAP + 1,2% PPA.

Nota-se que a rigidez das misturas aumenta com o aumento da concentração de PPA (0,6 para 1,2%), e esse aumento de rigidez é acompanhado por uma mudança na inclinação das curvas há um quase alinhamento dos tramos da mistura com CAP + 1,2% PPA, indicando que a influência da temperatura nessas misturas tem efeito praticamente constante no intervalo de 10 a 40°C, diferentemente do que ocorre na mistura com CAP + 0,6% PPA, que apresentou ganho de rigidez, mas manteve certo paralelismo com a curva de referência.

O comportamento das curvas de RR mostradas na Figuras 4.3 e 4.4 para V_v igual a 4 e 7%, respectivamente, concordam com o que se observou em termos de rigidez, uma vez que as misturas mais rígidas foram as que se apresentaram mais elásticas (redução de RR). Para ambas as concentrações de PPA adotadas, há redução do parâmetro RR, com exceção do CAP Puro, na temperatura de 40°C com $V_v = 7\%$, que inverte essa tendência, e se torna menos elástica. As misturas com PPA apresentaram os menores valores de RR dentre as testadas, atingindo valores próximos de 20% na temperatura de 40°C e uma variação de inclinação mais constante em todo intervalo de temperatura, para 4 e 7% de V_v , sendo assim, pode-se dizer que o PPA, nestas concentrações, contribuiu para a redução da suscetibilidade térmica das misturas asfálticas.

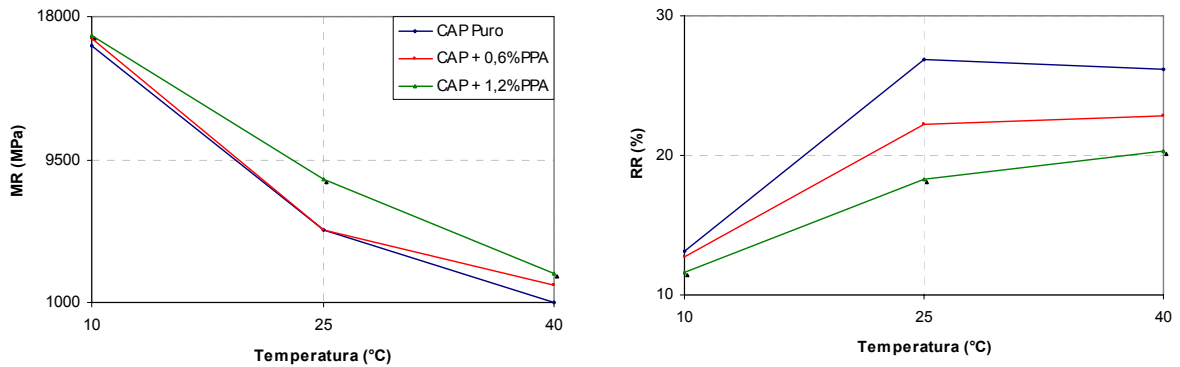


Figura 4.3. Efeito do PPA no MR e na RR em diferentes temperaturas para 4% de $V_v = 4\%$

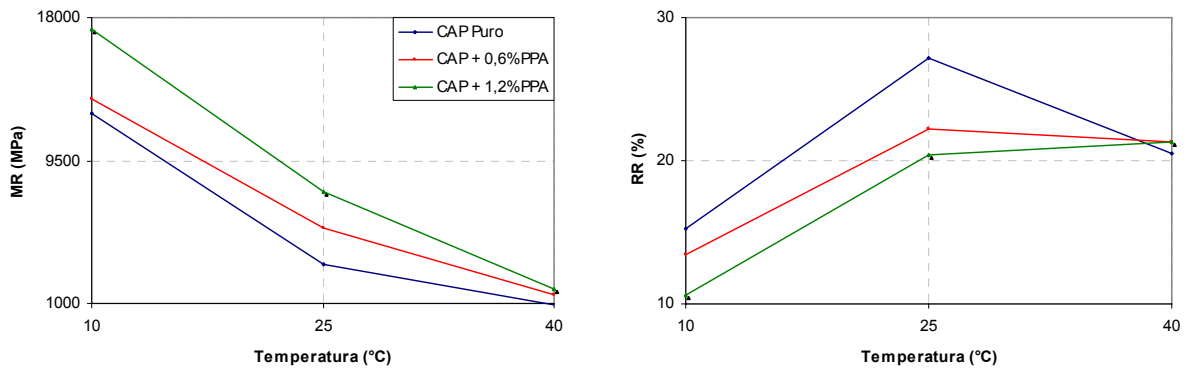


Figura 4.4. Efeito do PPA no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam as curvas MR e RR *versus* temperatura com cal e a mistura de referência, para V_v igual a 4 e 7%. Nota-se que o efeito da adição de cal é particularmente dependente da temperatura e é menos intenso do que se observou nas misturas com adição de PPA. Contudo, em termos de rigidez, vale destacar que a mistura com CAP + 3,0% cal exibiu valores menores de MR que as outras misturas na temperatura de 10°C, e que ambas as misturas com cal apresentam valores de MR que convergem para o da mistura de referência na temperatura de 40°C, fato observado para os V_v igual a 4 e 7%.

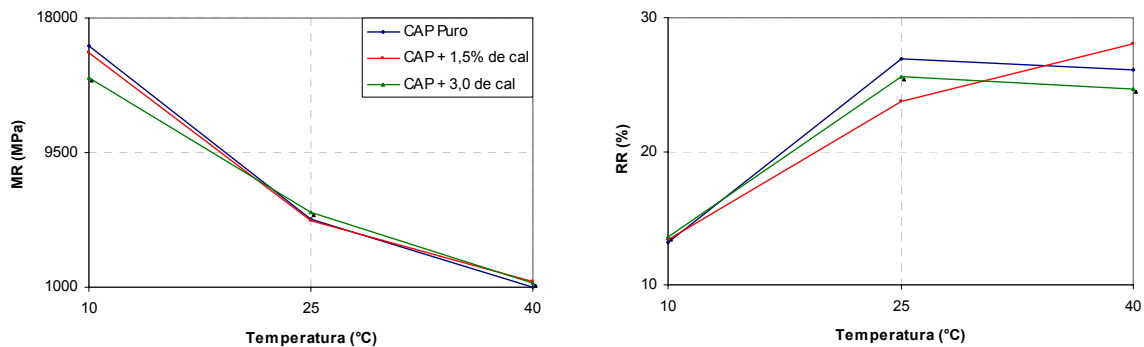


Figura 4.5. Efeito da cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$

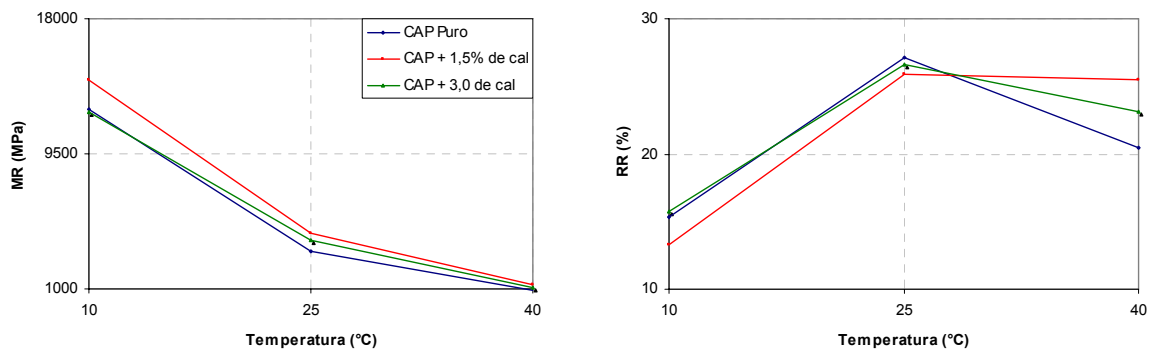


Figura 4.6. Efeito da cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

Quanto à RR, percebe-se pela Figura 4.5, que há uma discreta tendência de redução desse parâmetro para a mistura com CAP + 1,5% cal e uma redução de sensibilidade desse parâmetro ao efeito da temperatura (dada pela mudança da inclinação da curva). Já a mistura com CAP + 3,0% de cal exibiu uma manutenção dos valores desse parâmetro em relação à mistura de referência, para $V_v = 4\%$. Nota-se pela Figura 4.6, quanto à RR, que a 10°C, a mistura com CAP + 1,5% de cal tem o menor valor do parâmetro, porém existe uma tendência de inversão com o aumento da temperatura, característica essa que pode também ser observada com menor sensibilidade para o CAP + 3,0% de cal, para $V_v = 7\%$.

As tendências das curvas de MR e RR da mistura com cal sugerem três observações interessantes:

- A cal não propicia variação importante na rigidez da mistura asfáltica, tanto para $V_v = 4\%$ quanto para 7% ;
- A mudança da inclinação das curvas de MR e RR da mistura CAP + 1,2% cal pode ser interpretada como uma redução da suscetibilidade térmica do material, principalmente nas temperaturas 10 a 25°C ;
- A diferença entre tendências de comportamento apresentadas pelas misturas com 1,5 e 3,0% de cal parece sinalizar uma concentração mais indicada (ponto ótimo) para faixas específicas de temperaturas.

Para visualizar o efeito combinado das misturas contendo PPA e cal, a Figura 4.7 apresenta os gráficos de MR e RR das misturas com CAP + 0,6% PPA e CAP + 1,2% PPA e as duas concentrações de cal (1,5 e 3,0%) em relação à mistura de referência, para $V_v = 4\%$. Com relação às misturas com CAP + 0,6% PPA, observa-se a predominância do efeito (mais intenso) da presença e do aumento da concentração de PPA expressa pelo aumento da rigidez e pela redução da RR e esse efeito é mais evidente na mistura com 3,0% de cal, já nas misturas com CAP + 1,2% PPA, o predomínio dos efeitos do PPA na rigidez e na RR foi mais discreto.

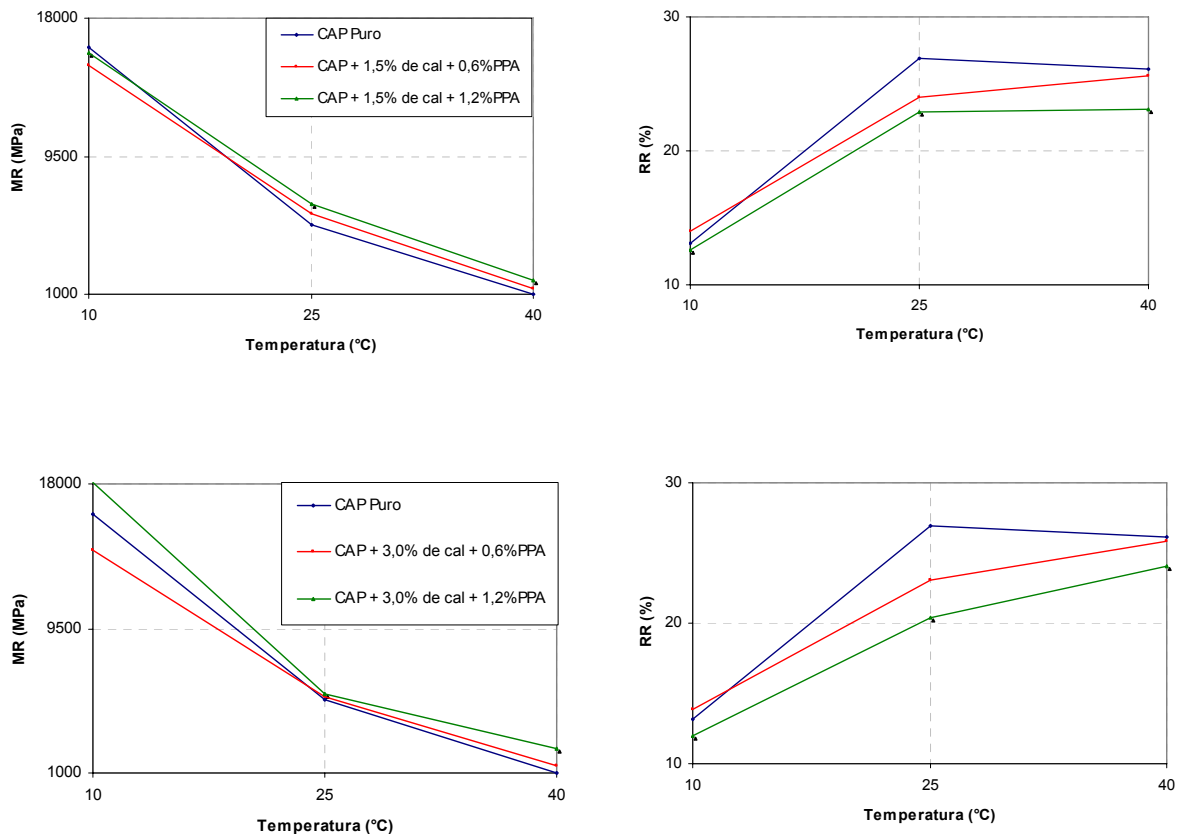


Figura 4.7. Efeito da interação entre PPA e a cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$

Para visualizar o efeito combinado das misturas contendo PPA e cal para $V_v = 7\%$, a Figura 4.8 apresenta os gráficos de MR e RR das misturas com CAP + 0,6% PPA e CAP + 1,2% PPA e as duas concentrações de cal (1,5 e 3,0%) em relação à mistura de referência. Com relação às misturas com CAP + 0,6% PPA, observa-se a predominância do efeito (mais intenso) da presença e do aumento da concentração de PPA expressa pelo aumento da rigidez e pela redução da RR nas temperaturas de 10 e 25°C, nota-se a inversão dessa característica em relação ao CAP Puro para a temperatura de 40°C, e esse efeito é confirmado na mistura com 3,0% de cal, já nas misturas com CAP + 1,2% PPA, o predomínio dos efeitos do PPA na rigidez e na RR teve a mesma ordem de grandeza.

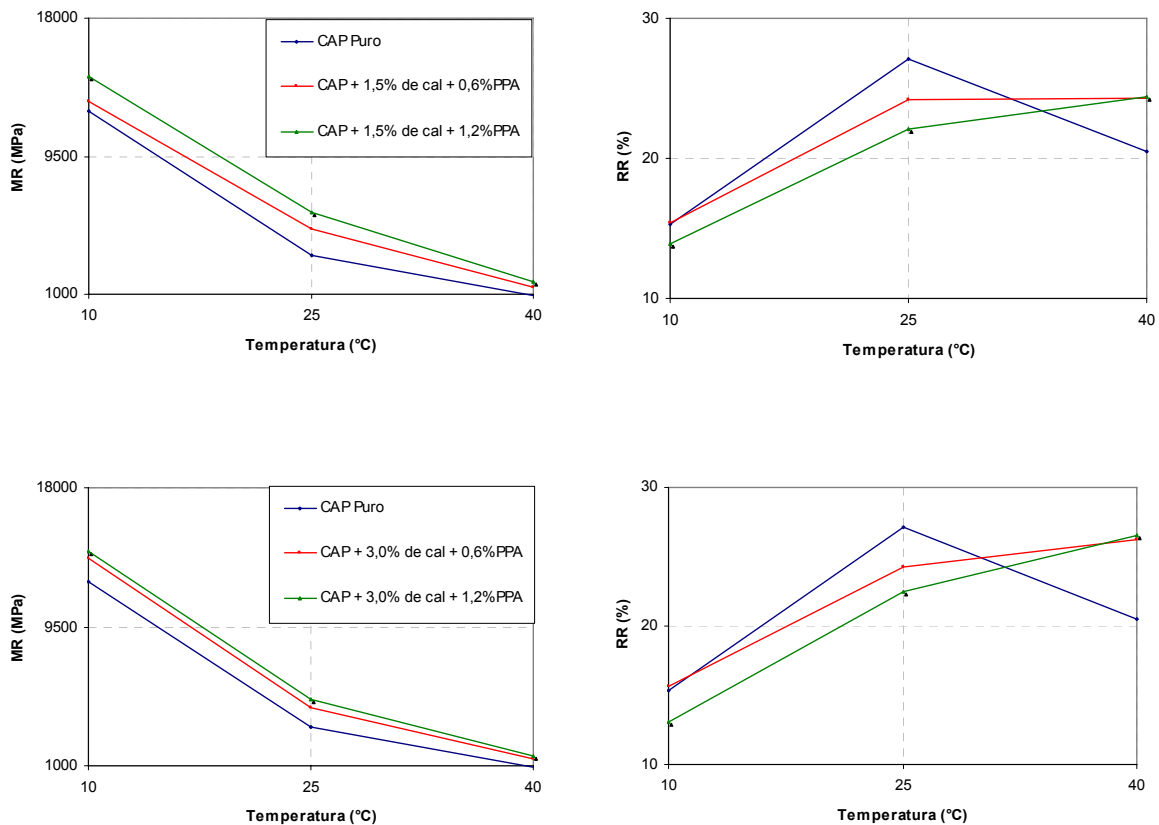


Figura 4.8. Efeito da interação entre PPA e a cal no MR e na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

A fim de se compreender melhor a influência da concentração dos modificadores no MR e na RR, as Figuras 4.9 e 4.10 apresentam, respectivamente, as curvas de variação de MR e RR em função do aumento da concentração de cal e de PPA nas diferentes temperaturas. Este tipo de gráfico mostra a forma como cada modificador atua na rigidez e na recuperação da mistura asfáltica. Das Figuras 4.9 e 4.10 é possível dizer que o PPA propicia um incremento de rigidez nas misturas para todas as temperaturas testadas, tanto para $V_v = 4\%$ quanto para 7% . Já a cal tende a imprimir um efeito mais discreto e, no caso da temperatura de 10°C , esse efeito é contrário, ou seja, o aumento da concentração de cal causa redução de MR para $V_v = 4\%$, e esse efeito mais expressivo para $V_v = 7\%$. O distanciamento entre as curvas evidencia, mais uma vez, que a suscetibilidade térmica, em termos absolutos, é maior na faixa de temperaturas mais amenas (de 10 a 25°C).

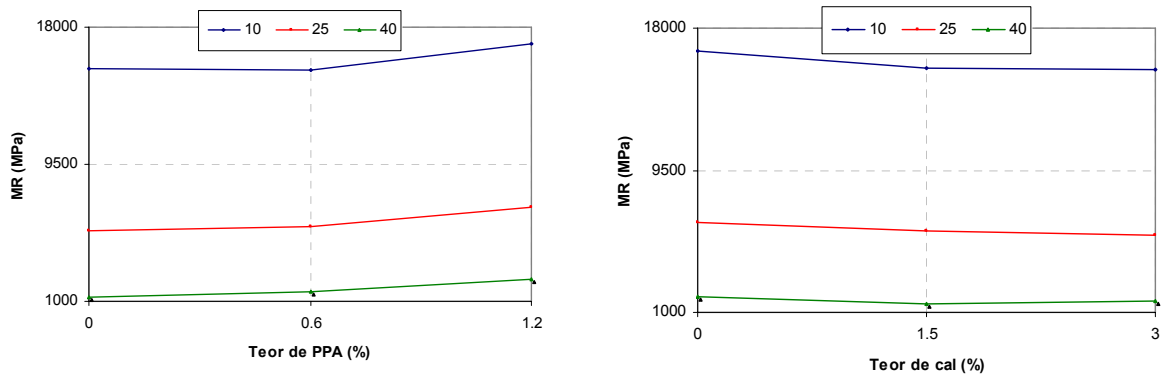


Figura 4.9. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA no MR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$

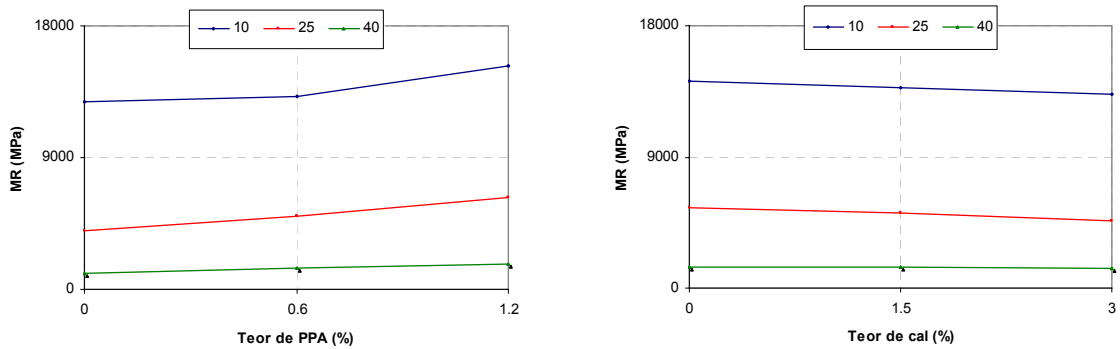


Figura 4.10. Efeito do aumento da concentração de cal no MR e PPA no MR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

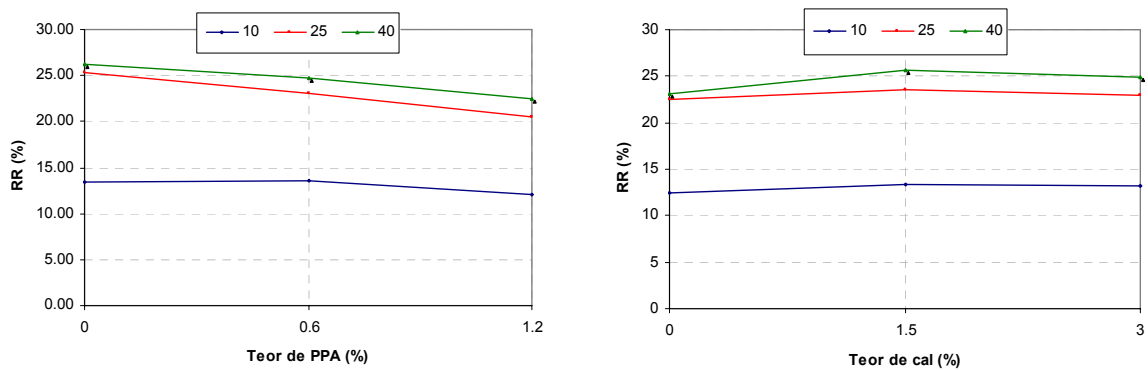


Figura 4.11. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 4\%$

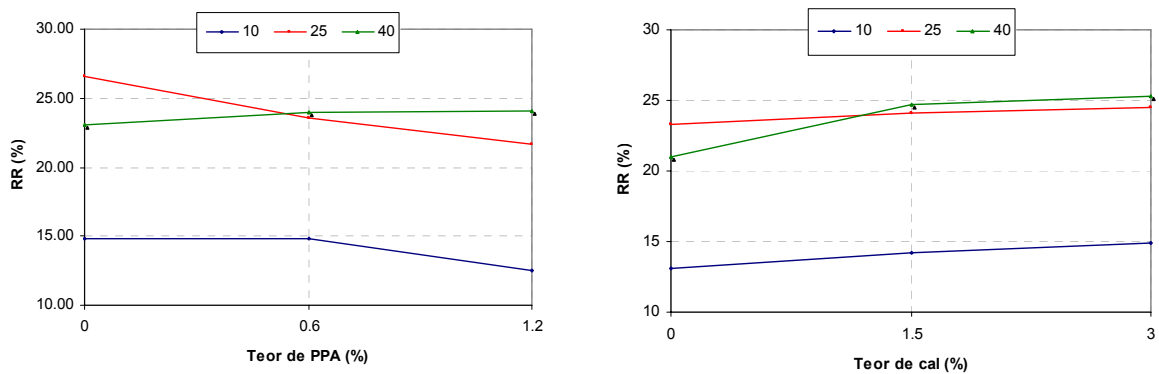


Figura 4.12. Efeito do aumento da concentração de cal e PPA na RR em diferentes temperaturas para $V_v = 7\%$

Das Figuras 4.11 e 4.12, observa-se que a flexibilidade das misturas asfálticas não pode ser melhorada com a adição de PPA, mas essa tendência se inverte para a temperatura de 40°C, para o volume de vazio igual a 7%. No caso das misturas com cal, o aumento da sua concentração e a ocorrência do ganho de flexibilidade é mais dependente da temperatura, de tal forma que na faixa de temperatura de 10 a 25°C, independentemente do teor de cal adicionado, há um correspondente aumento de flexibilidade, enquanto que na faixa de 25 a 40°C, o efeito da adição de cal só se dá para teores de até 1,5%, sugerindo um teor máximo de cal a ser utilizado em misturas asfálticas, tanto para 4% quanto para 7% de V_v .

Na Tabela 4.5, apresentam-se as propriedades das misturas asfálticas submetidas ao procedimento de umidade induzida, ou seja, com condicionamento e sem condicionamento (dito grupo de controle), para corpos-de-prova com 7% de volume de vazios. Verifica-se o efeito do condicionamento para as diferentes concentrações de *aditivos* e *modificadores* utilizados.

Tabela 4.5. Módulos de resiliência das misturas submetidas ao procedimento de umidade induzida ($V_v = 7\%$).

Temperatura (°C)	25 (Sem condicionamento)			25 (Com condicionamento)		
	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	MR (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)
CAP Puro	3352	26,77	4,67	3810	27,20	4,54
CAP + 0,6% PPA	5517	25,28	4,65	5145	23,61	4,49
CAP + 1,2% PPA	7649	20,37	4,42	6899	19,27	4,34
CAP + 1,5% de cal	4489	25,80	4,59	6003	24,12	4,43
CAP + 1,5% de cal + 0,6% de PPA	5037	24,16	4,52	7903	18,87	4,27
CAP + 1,5% de cal + 1,2% de PPA	6068	22,49	4,40	6822	18,88	4,26
CAP + 3,0% de cal	4095	26,95	4,61	5473	24,51	4,44
CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA	4571	24,21	4,48	4777	24,53	4,44
CAP + 3,0% de cal + 1,2% de PPA	5044	21,76	4,36	8511	17,66	4,27

Nas Figuras 4.13 e 4.14, apresentam-se os efeitos do condicionamento para diferentes concentrações de cal e PPA, respectivamente. Nota-se que a adição de cal melhora significativamente a rigidez com o condicionamento, em relação ao grupo de puro, chamado de “Sem cal”, que para concentrações menores de cal (1,5% de cal), os valores médios absolutos obtidos foram melhores quando comparados com maiores concentrações de cal (3,0% de cal), mesmo que mantido o paralelismo entre estas duas retas. Em relação à RR, nota-se que a mistura tende a se tornar mais elástica para misturas com 1,5% de cal, com diminuição do “ganho” de elasticidade para misturas com 3,0% de cal, quando condicionado (Figura 4.13). Com relação à modificação com PPA (Figura 4.14), nota-se que para maiores concentrações de PPA, a mistura se torna mais rígida, ficando evidente que, além de mantido o paralelismo entre as curvas das concentrações de 0,6 e 1,2% de PPA, existe uma melhora da suscetibilidade ao dano por umidade, devido à distância entre elas. Quanto ao parâmetro RR, a mistura, quando condicionada, tende a se tornar mais elástica com o aumento da concentração de PPA.

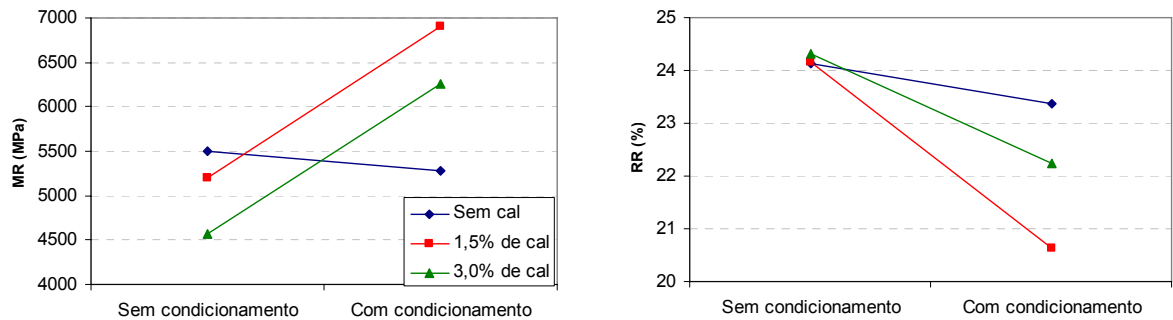


Figura 4.13. Efeito do condicionamento no MR e RR para diferentes concentrações de PPA

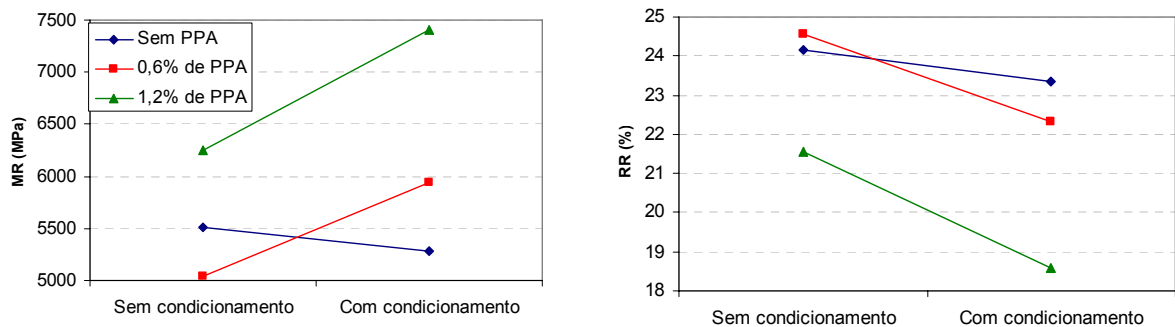


Figura 4.14. Efeito do condicionamento no MR e RR para diferentes concentrações de cal

A interação entre a adição da cal e a modificação com PPA pode ser observada nas Figuras 4.15 e 4.16. Nelas nota-se o efeito predominante do aumento da concentração de PPA no aumento da rigidez e, para a RR, a mistura se torna mais elástica com o aumento da concentração de PPA, considerando-se o condicionamento da mistura estudada, com exceção do CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA que manteve as características de rigidez e de elasticidade evidenciada pela aproximação da curva à horizontal.

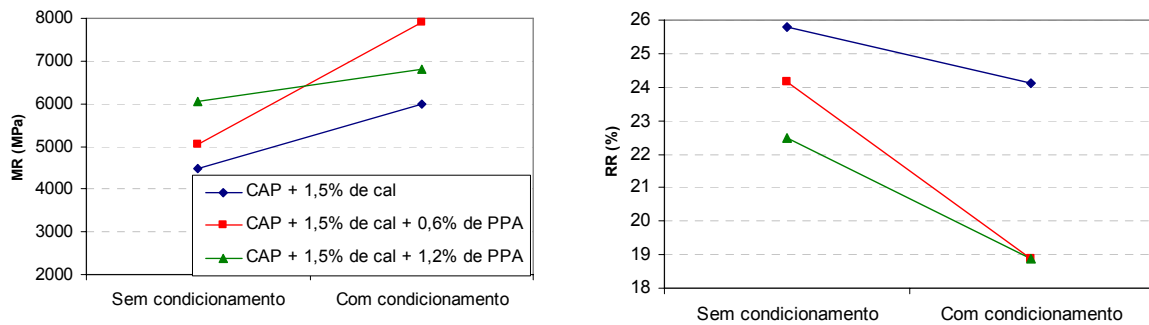


Figura 4.15. Efeito da interação entre PPA e cal em função do condicionamento para MR e RR

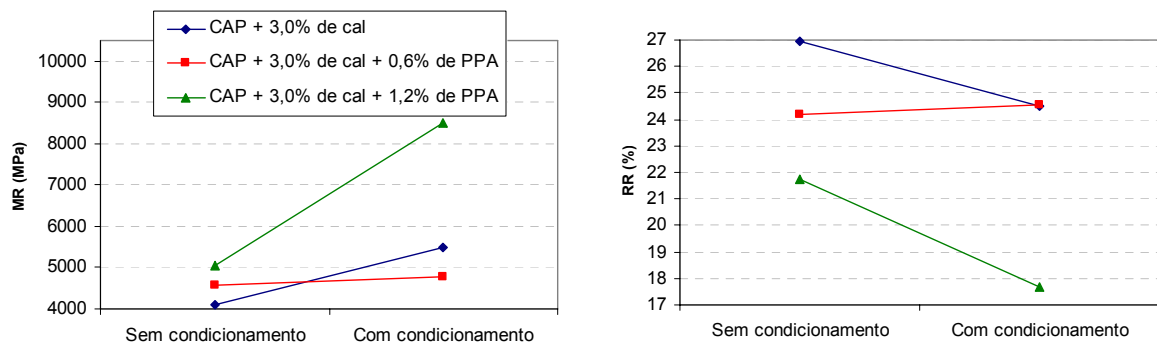


Figura 4.16. Efeito da interação entre PPA e cal em função do condicionamento para MR e RR

Na Figura 4.17 são apresentadas as curvas do parâmetro Atraso em função do condicionamento. O Atraso pode ser interpretado como o tempo decorrido entre o pico de carregamento do corpo-de-prova e a leitura do máximo deslocamento pelo LVDT, caracterizando de maneira qualitativa a tendência mais viscosa da mistura, em função do aumento tempo. Nota-se que a cal “sugere” a concentração a ser utilizada na mistura o valor de 1,5%, e que a modificação com PPA tende a proporcionar uma maior elasticidade conforme se aumenta a concentração de PPA; já o efeito da interação entre o PPA e a cal, proporciona misturas mais elásticas, com exceção do CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA, que mantém sua característica elástica com o condicionamento. Em resumo, a análise da interação entre a cal e o PPA sugere concentrações máximas de 1,5%, e 0,6% de PPA.

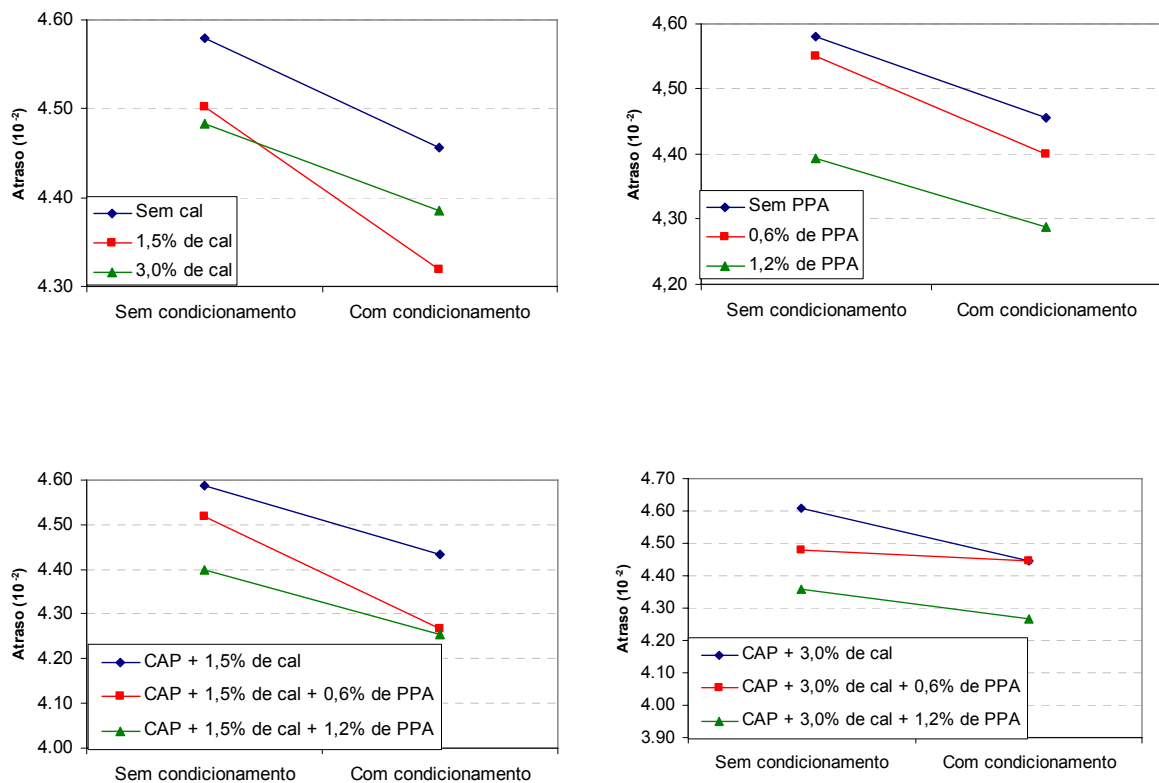


Figura 4.17. Variação do Atraso em função da interação de PPA e cal

4.5 APRESENTAÇÃO E DICUSSÃO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DO EFEITO DO CONDICIONAMENTO PARA O MR, RR E ATRASO

Na Tabela 4.6 são apresentadas as propriedades originais das misturas asfálticas produzidas para a análise da influência do volume de vazios e do condicionamento no dano por umidade na resistência à tração. Os valores das propriedades são apresentados em termos médios para grupos de 3 corpos-de-prova. As séries de informações chamadas de “Sem cal” e “Sem PPA” representam a média destas séries. De maneira geral, pode-se observar que os valores das propriedades das misturas com 4% de V_v são maiores que os de 7%, e que as propriedades quanto ao condicionamento esteve sempre associada ao aumento ou manutenção das propriedades testadas. Vale lembrar que essas misturas foram moldadas e foram submetidas ao condicionamento conforme recomendações da AASHTO T 283.

Tabela 4.6. Propriedades das misturas asfálticas com diferentes V_v

Propriedades	4			7						RRT (Cond.)
	Sem condicionamento			Sem condicionamento			Com condicionamento			
	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	RT (%)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	RT (MPa)	RR (%)	Atraso (10^{-2} s)	RT (MPa)	
CAP Puro	26,90	4,6	1,67	26,77	4,7	1,19	27,20	4,5	1,11	0,93
CAP + 0,6% PPA	22,26	4,4	1,73	25,28	4,7	1,26	23,61	4,5	1,28	1,01
CAP + 1,2% PPA	18,23	4,3	1,94	20,37	4,4	1,58	19,27	4,3	1,53	0,97
CAP + 1,5% de cal	23,72	4,5	1,46	25,80	4,6	1,13	24,12	4,4	1,22	1,08
CAP + 1,5% de cal + 0,6% de PPA	23,98	4,5	1,56	24,16	4,5	1,12	18,87	4,3	1,20	1,07
CAP + 1,5% de cal + 1,2% de PPA	22,92	4,4	1,88	22,49	4,4	1,19	18,88	4,3	1,49	1,25
CAP + 3,0% de cal	25,58	4,6	1,42	26,95	4,6	1,10	24,51	4,4	1,14	1,04
CAP + 3,0% de cal + 0,6% de PPA	23,10	4,4	1,69	24,21	4,5	1,20	24,53	4,4	1,22	1,01
CAP + 3,0% de cal + 1,2% de PPA	20,37	4,3	1,74	21,76	4,4	1,25	17,66	4,3	1,26	1,01

Para visualizar o comportamento mecânico das misturas, na Figura 4.18 são apresentadas as curvas de RT e Atraso em função da variação de V_v . Nela nota-se que a resistência à ruptura por tração das misturas apresenta reduções importantes devido ao aumento do volume de vazios, com certo paralelismo entre a curva do grupo de referência e as duas concentrações de cal, que perderam aproximadamente 25% da resistência de ruptura à tração com a variação do V_v de 4 para 7%, sendo que as misturas com cal apresentam valores de RT muito próximos e com reduções também parecidas em função do aumento de V_v . Analisando-se o Atraso nota-se que com a variação do V_v , houve um aumento desse parâmetro, e que aumento da concentração de cal o reduz, indicando tendência de manutenção das propriedades elásticas da mistura com o uso da cal.

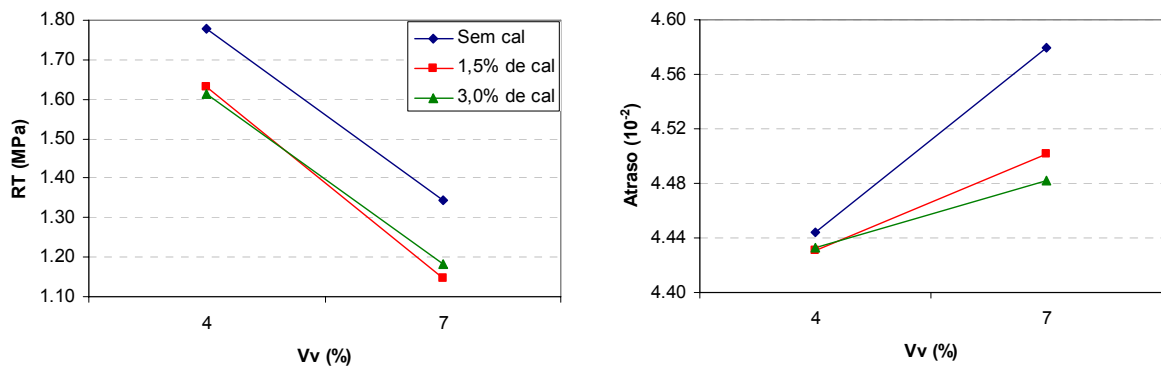


Figura 4.18. Efeito do aumento da concentração de cal na RT e no Atraso

Para visualização do efeito do aumento da concentração de PPA, na Figura 4.19 apresentam-se as curvas do grupo de controle e com duas concentrações de PPA. Nela nota-se que para $V_v = 4\%$, a *modificação* com 0,6 e 1,2% de PPA ocasionou aumento no valor da RT de 10 e 23%, respectivamente. Já para $V_v = 7\%$ comparado a 4%, houve reduções da ordem de 23, 28 e 28%, para os grupos de controle, 0,6% de PPA e 1,2% de PPA, respectivamente; com os grupos com PPA apresentando reduções maiores da RT. Em relação ao Atraso, para $V_v = 4\%$ comparando-se ao grupo de controle, houve diminuição de 3 e 5%, para 0,6 e 1,2% de PPA, respectivamente; já variando-se o V_v de 4 para 7%, houve aumentos no Atraso de 1,7; 4,5 e 2,3%, para os grupos de controle, 0,6 e 1,2% de PPA, respectivamente.

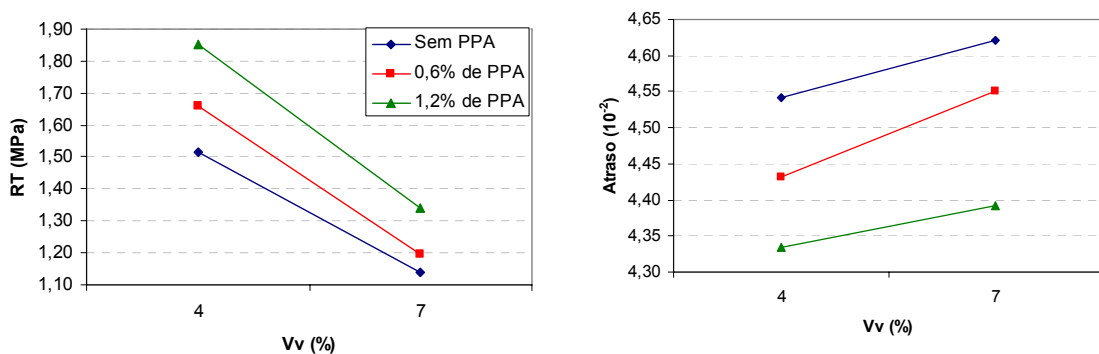


Figura 4.19. Efeito do aumento da concentração de PPA no RT e no Atraso

A Figura 4.20 mostra o efeito da interação entre a cal e o PPA. Nela se nota para $V_v = 4\%$ e 1,5% de cal, aumento da RT de 6,8 e 28,8% para as concentrações de 0,6 e

1,2% de PPA, em relação ao grupo sem PPA; já para 3,0% de cal, houve aumento da RT de 19 e 22,5% para as concentrações de 0,6 e 1,2% de PPA, em relação ao grupo sem PPA. Para $V_v = 7\%$ e 1,5% de cal houve aumento na RT de 0,9 e 5,3% para as concentrações de 0,6 e 1,2% de PPA, em relação ao grupo sem PPA, e para 3,0% de cal ocorreram aumentos de 9 e 13,6% para as concentrações de 0,6 e 1,2% de PPA. No caso do Atraso, de uma maneira geral, a presença do PPA produz uma resposta mais rápida (mais elástico) independente dos teores de cal ou PPA utilizados e do volume de vazios, a exceção da mistura com 4% de vazios, 1,5% de cal e 0,6% de PPA.

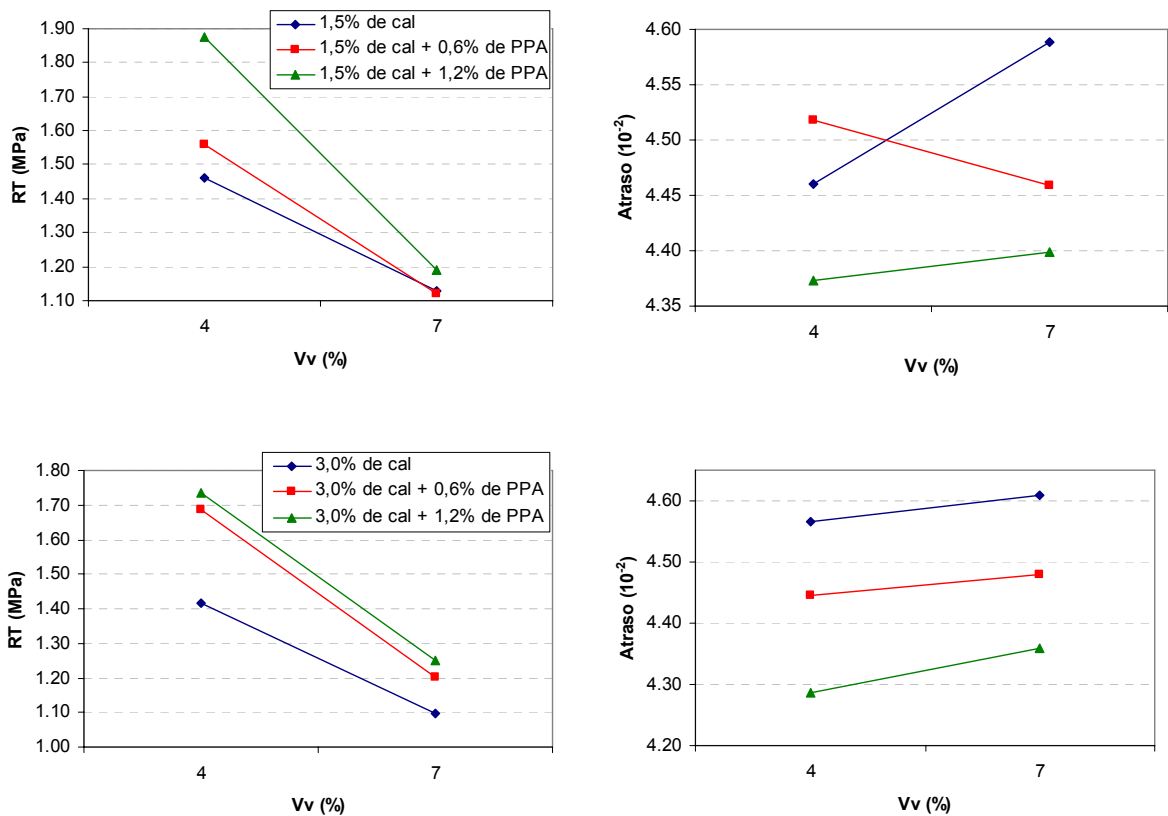


Figura 4.20. Efeito da interação entre o PPA e a cal na RT e no Atraso para diferentes V_v

A Figura 4.21 apresenta os efeitos dos aumentos das concentrações de cal e PPA na Recuperação Retardada. Nota-se que o Gráfico que analisa a cal isoladamente, que 1,5% de cal é a concentração com melhor desempenho se comparado com o grupo de controle e 3,0% de cal. Já para o gráfico com o PPA, as misturas asfálticas com melhores flexibilidades foram as de 0,6% de PPA. O efeito combinado, analisando a

concentração de 1,5% de cal, nota-se que a melhor flexibilidade é conseguida com 0,6% de PPA, já para 3,0% de cal, o aumento da concentração de PPA indica diminuição da flexibilidade da mistura asfáltica.

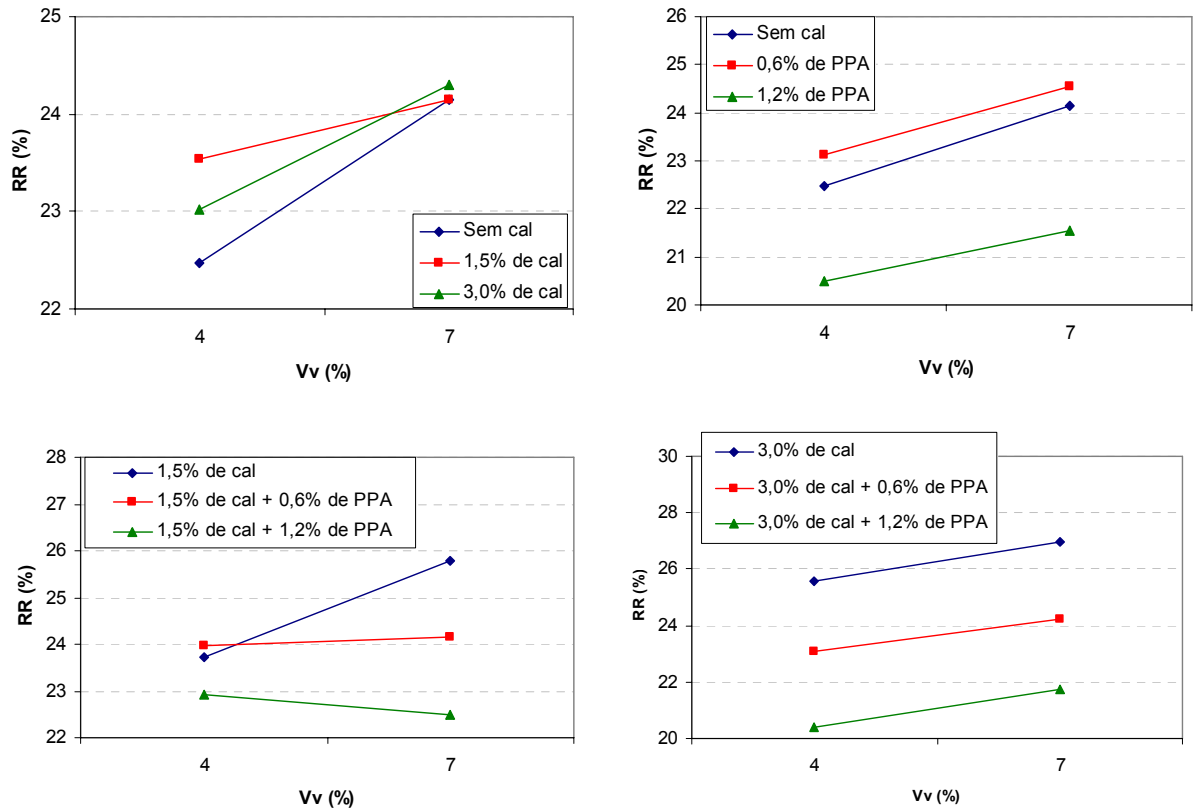


Figura 4.21. Efeito isodado e da interação entre o PPA e a cal na RR diferentes V_v

A Figura 4.22 apresenta os efeitos dos aumentos das concentrações de cal e PPA na resistência à tração sem e com condicionamento. Com relação ao efeito da adição de cal nos valores da RT, para as misturas na condição sem condicionamento, quando comparados ao grupo sem cal, eles apresentaram diminuição do valor médio em 15 e 18% para 1,5 e 3,0% de cal, respectivamente. Já após o condicionamento, ainda em relação ao efeito da cal, houve diminuição significativa da RT somente para a mistura com 3% de cal, com redução da ordem de 8%, em relação à de controle. Com relação ao efeito do PPA, nota-se que sem condicionamento, a modificação com 0,6 e 1,2% de PPA alterou significativamente a RT da mistura, com aumento da RT da ordem de 5 e 18%; respectivamente; já para

as misturas condicionadas, comparadas à não condicionada, houve um aumento da RT da ordem de 6% para a com 0,6% de PPA e 23% para a com 1,2% de PPA.

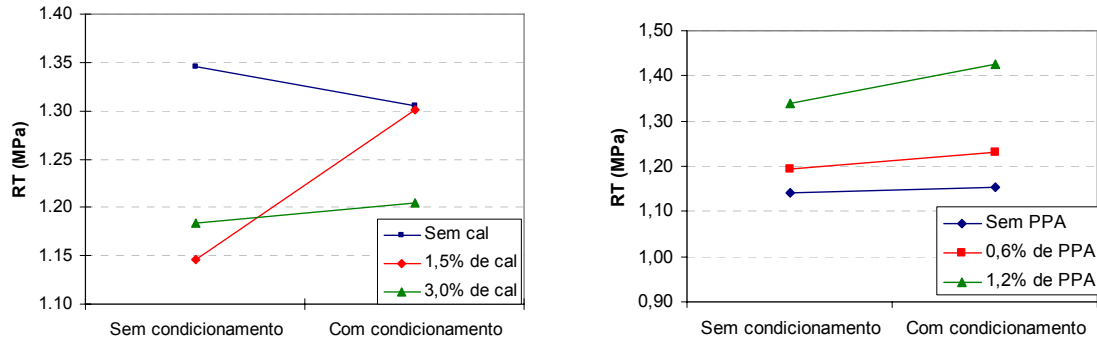


Figura 4.22. Efeitos do aumento da concentração de cal e PPA na RT

Na Figura 4.23 apresenta-se o efeito da interação entre a modificação com PPA e a adição de cal na RT das misturas asfálticas. Para as misturas com 1,5% de cal a utilização de 0,6% de PPA causou a redução da RT em, aproximadamente, 1% para a mistura não condicionada e em torno de 2% para a condicionada; já o uso de 1,2% de PPA com 1,5% de cal levou ao aumento da RT em 6% e 22% para as misturas não condicionada e condicionada, respectivamente. No caso das misturas com 3% de cal houve aumento da RT tanto 0,6 (aproximadamente 9%) como para 1,2% de PPA (aproximadamente 15%), sem ou com condicionamento.

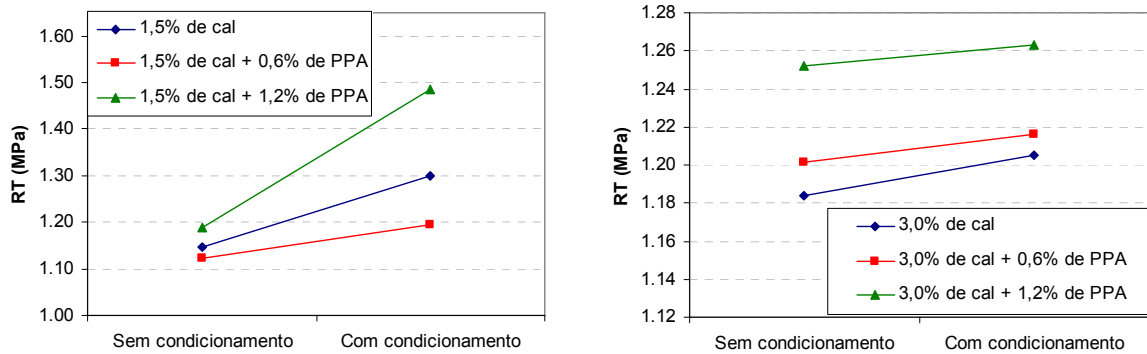


Figura 4.23. Efeito da interação entre o PPA e a cal na RT para as misturas sem e com condicionamento

Na Figura 4.24 mostra a relação de resistência à tração (RRT) de misturas asfálticas. Considerando-se que misturas asfálticas que apresentarem valores de RRT maiores ou iguais a 70 % (ou 80%) poderiam ser consideradas não suscetíveis à ação da umidade, todas as composições aqui testadas apresentaram desempenho satisfatório. Observando-se essa figura, notam-se também as seguintes tendências: apenas a modificação do asfalto com PPA mantém os valores da RT; apenas a adição da cal à mistura eleva ligeiramente a resistência à tração após o condicionamento; a combinação da cal com o PPA mantém ou eleva da RT após o condicionamento, notadamente para 1,5% de cal.

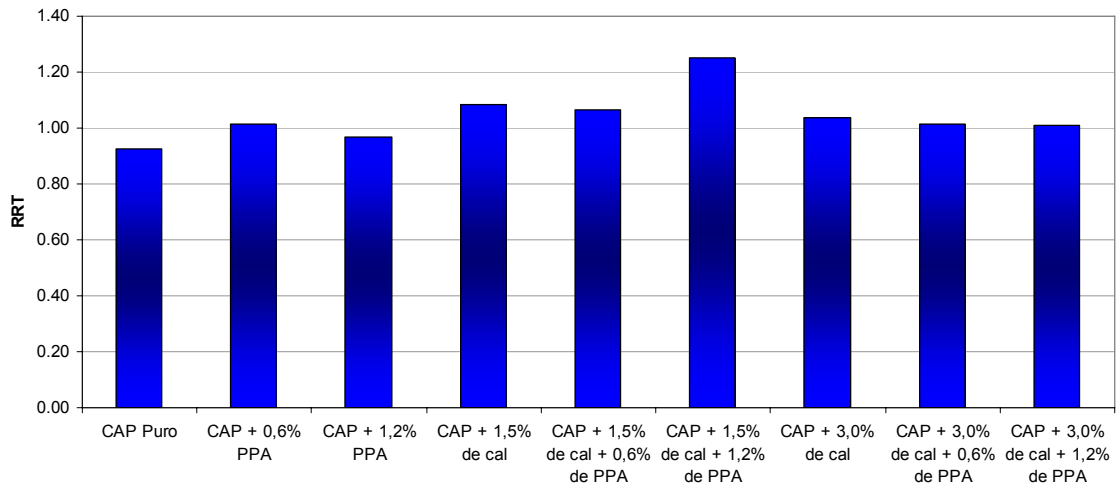


Figura 4.24. Relação de resistência à tração (RRT) das misturas (efeito do condicionamento)

4.6 VISUALIZAÇÃO DO TIPO DE DANO PELO REGISTRO FOTOGRÁFICO

O registro fotográfico dos corpos-de-prova após a ruptura por compressão diametral (determinação da RT) mostrou-se uma ferramenta muito interessante para a visualização do efeito do volume de vazios e do uso dos aditivos. Observando-se as Figuras 4.25 a 4.27, nota-se que a porcentagem de exposição de agregados em relação à sua área total é, em geral maior nos corpos-de-prova com 7% de V_v , e o tipo de ruptura que ocorre é a ruptura adesiva (ligação entre agregado/asfalto).

Analisando-se a Figura 4.26, nota-se que o aumento da concentração de ácido polifosfórico, ocasionou o aumento da concentração da ruptura de agregados nas extremidades do corpo-de-prova, indicando ruptura por cisalhamento causado pelas “facas” do equipamento durante o ensaio de RT.



(a) 4% Vv CAP Puro



(b) 7% Vv CAP Puro



(c) 4% Vv 0,6% PPA



(d) 7% Vv 0,6% PPA



(e) 4% Vv 1,2% PPA



(f) 7% Vv 1,2% PPA

Figura 4.25. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova sem cal com CAP Puro para 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA para 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA para 4% (e) e 7% (f) de V_v



Figura 4.26. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova com 1,5% de cal com CAP Puro para 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA para 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA para 4% (e) e 7% (f) de V_v

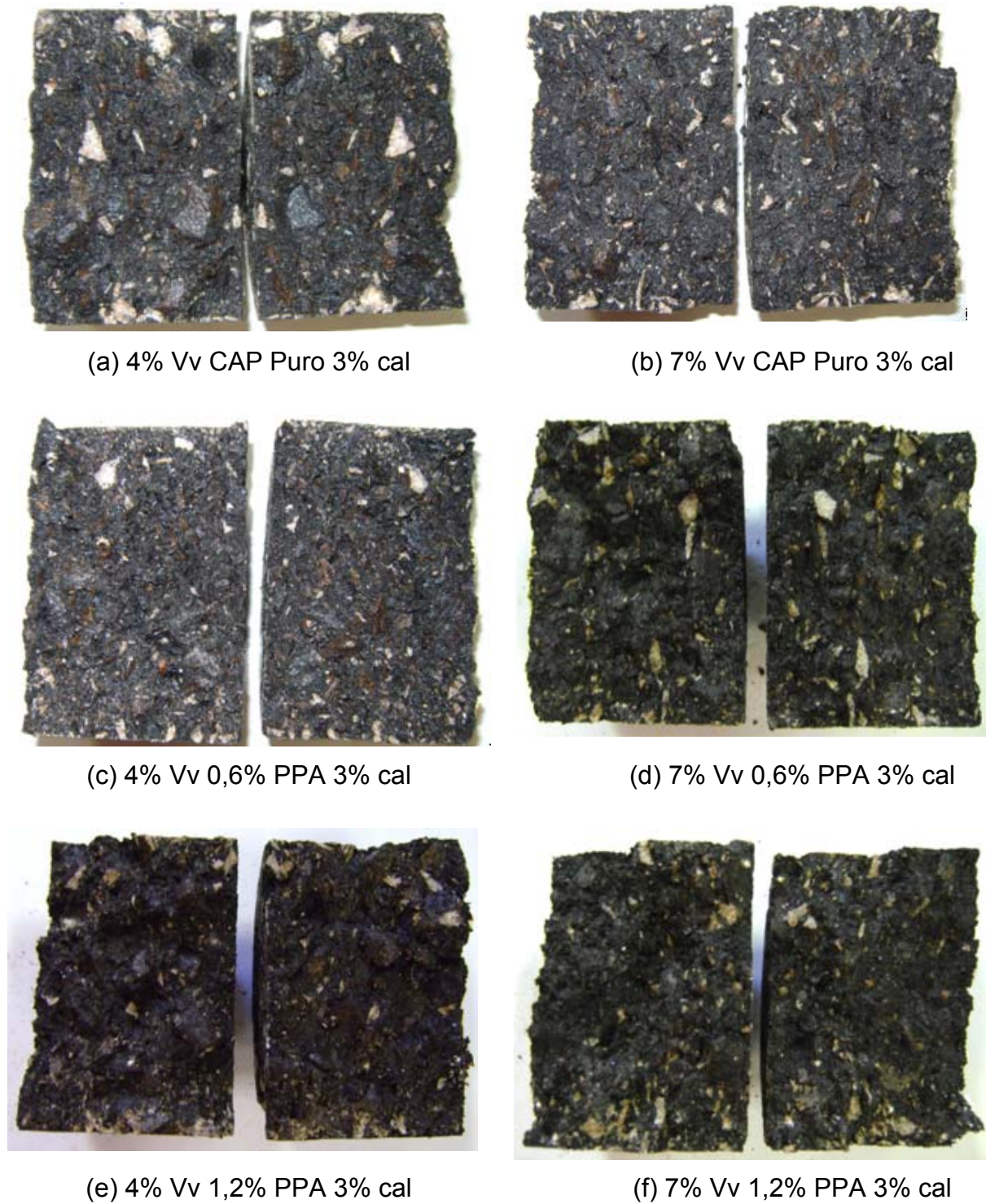


Figura 4.27. Superfícies de ruptura de corpos-de-prova com 3,0% de cal com CAP Puro com 4% (a) e 7% (b) de V_v , 0,6% de PPA com 4% (c) e 7% (d) de V_v e com 1,2% de PPA com 4% (e) e 7% (f) de V_v

Na Figura 4.26, a adição de 1,5% de cal, proporcionou uma diminuição da quantidade de agregados expostos, situação que acusa melhora de adesividade da mistura, se comparada à Figura 4.25 (a) e (b), sem cal. Com o aumento da concentração de PPA, ainda observando-se a Figura 4.26, nota-se que também houve aumento de agregados rompidos próximo das bordas dos corpos-de-prova, como o já observado na Figura 4.25.

Já na Figura 4.27, nota-se que há pequena ou quase nenhuma exposição de superfície dos agregados nas faces de ruptura analisadas, indicando aumento da adesão entre o ligante e o agregado, o que reduziu a ruptura do tipo adesiva, com aumento da do tipo coesiva.

4.7 ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS FATORES

Com os resultados obtidos dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração foram feitos gráficos e análises estatísticas com o software Minitab® com a finalidade de compreender quais fatores são estatisticamente significativos nas propriedades observadas.

Apresenta-se, a seguir, os resultados das análises ANOVA feitas para o MR_{total} (MRT), a RR, o Atraso, a RT e o $MR_{instantâneo}$ (MRI).

Na Tabela 4.7 e na Figura 4.28 são apresentados os resultados das análises estatísticas para o MR total. Nessa tabela pode-se notar que os fatores significativos na variação do valor do MR total são o volume de vazios, o teor de PPA e a temperatura, além da combinação de alguns desses fatores, onde os valores da estatística p é inferior 0,005. Já na Figura 4.28 podem ser vistas as influências dos fatores e suas interações nos valores do MR total.

Tabela 4.7: Análise da significância dos fatores e suas interações no MR total calculado segundo a NCHRP.

<i>Variáveis</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Significância</i>
Volume de vazios	67721653	67721653	67721653	41.57	0.000	Sim
Teor de cal	11846104	11846104	5923052	3.64	0.028	Não
Teor de PPA	99049430	99049430	49524715	30.40	0.000	Sim
Temperatura	9,53E+09	9,53E+09	4,76E+09	2923.82	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal	524009	524009	262005	0.16	0.852	Não
Volume de vazios*Teor de PPA	7465762	7465762	3732881	2.29	0.103	Não
Volume de vazios*Temperatura	27847874	27847874	13923937	8.55	0.000	Sim
Teor de cal*Teor de PPA	27260782	27260782	6815196	4.18	0.003	Sim
Teor de cal*Temperatura	2431604	2431604	607901	0.37	0.828	Não
Teor de PPA*Temperatura	18520837	18520837	4630209	2.84	0.025	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA	8265869	8265869	2066467	1.27	0.283	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Temperatura	784594	784594	196148	0.12	0.975	Não
Volume de vazios*Teor de PPA*Temperatura	5737088	5737088	1434272	0.88	0.476	Não
Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	24610467	24610467	3076308	1.89	0.062	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	25304694	25304694	3163087	1.94	0.054	Não

Legenda: Seq SS (sequential sums of squares) = soma dos quadrados em sequência; Adj SS (adjusted sums of squares) = soma dos quadrados ajustado; Adj MS (ajusted mean squares) = quadrado médio ajustado; F = estatística de teste.

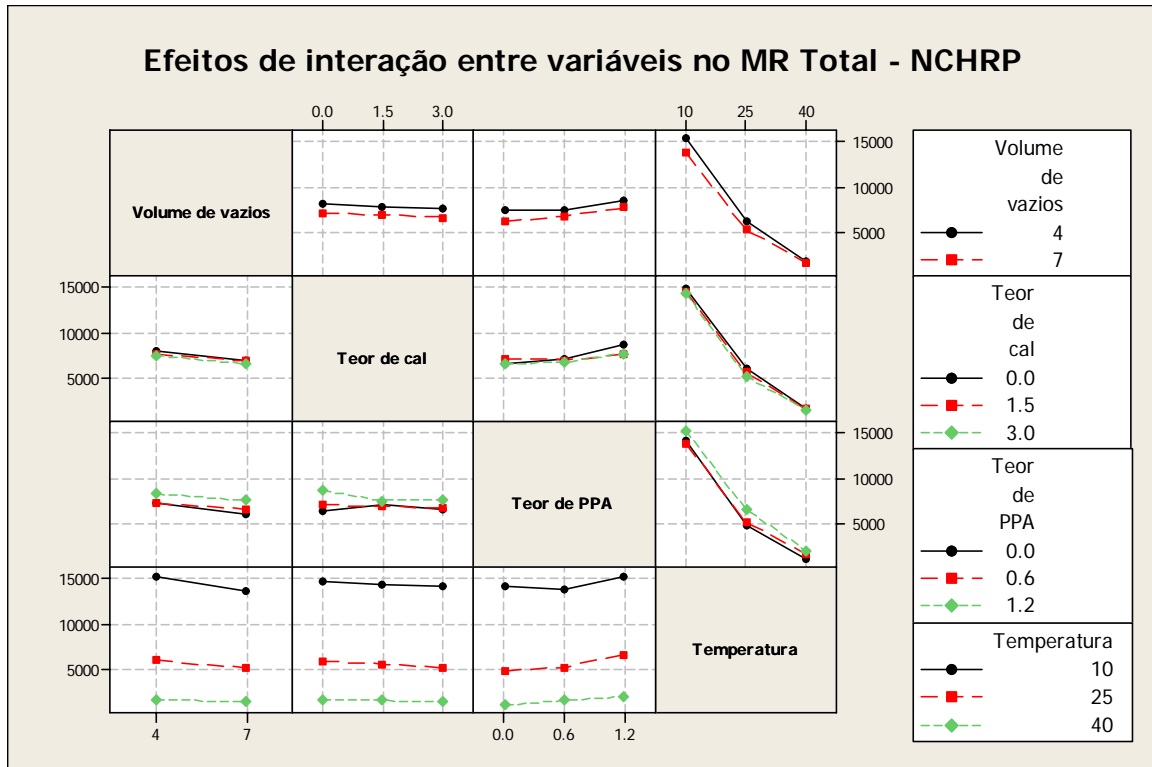


Figura 4.28. Efeitos da interação entre fatores no MR total calculado pela NCHRP.

Na Tabela 4.8 e na Figura 4.29 são apresentados os resultados das análises estatísticas para a Recuperação Retardada (RR). Na Tabela 4.8 nota-se que os fatores significativos na variação do valor da RR são o teor de cal, teor de PPA e a temperatura, além da combinação de alguns desses fatores, onde os valores da estatística p é inferior a 0,005. Já a Figura 4.29 permite observar as influências dos fatores e suas interações nos valores da RR.

Tabela 4.8: Análise da significância dos fatores e suas interações na RR.

<i>Variáveis</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Significância</i>
Volume de vazios	0.000838	0.000838	0.000838	2.33	0.128	Não
Teor de cal	0.021086	0.021086	0.010543	29.31	0.000	Sim
Teor de PPA	0.041997	0.041997	0.020999	58.38	0.000	Sim
Temperatura	0.764091	0.764091	0.382045	1062.13	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal	0.001371	0.001371	0.000686	1.91	0.151	Não
Volume de vazios*Teor de PPA	0.002582	0.002582	0.001291	3.59	0.029	Não
Volume de vazios*Temperatura	0.010326	0.010326	0.005163	14.35	0.000	Sim
Teor de cal*Teor de PPA	0.004551	0.004551	0.001138	3.16	0.015	Não
Teor de cal*Temperatura	0.015008	0.015008	0.003752	10.43	0.000	Sim
Teor de PPA*Temperatura	0.016440	0.016440	0.004110	11.43	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA	0.001691	0.001691	0.000423	1.18	0.322	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Temperatura	0.003175	0.003175	0.000794	2.21	0.069	Não
Volume de vazios*Teor de PPA*Temperatura	0.008277	0.008277	0.002069	5.75	0.000	Sim
Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	0.014374	0.014374	0.001797	5.00	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	0.005003	0.005003	0.000625	1.74	0.090	Não

Legenda: Seq SS (sequential sums of squares) = soma dos quadrados em sequência; Adj SS (adjusted sums of squares) = soma dos quadrados ajustado; Adj MS (adjusted mean squares) = quadrado médio ajustado; F = estatística de teste.

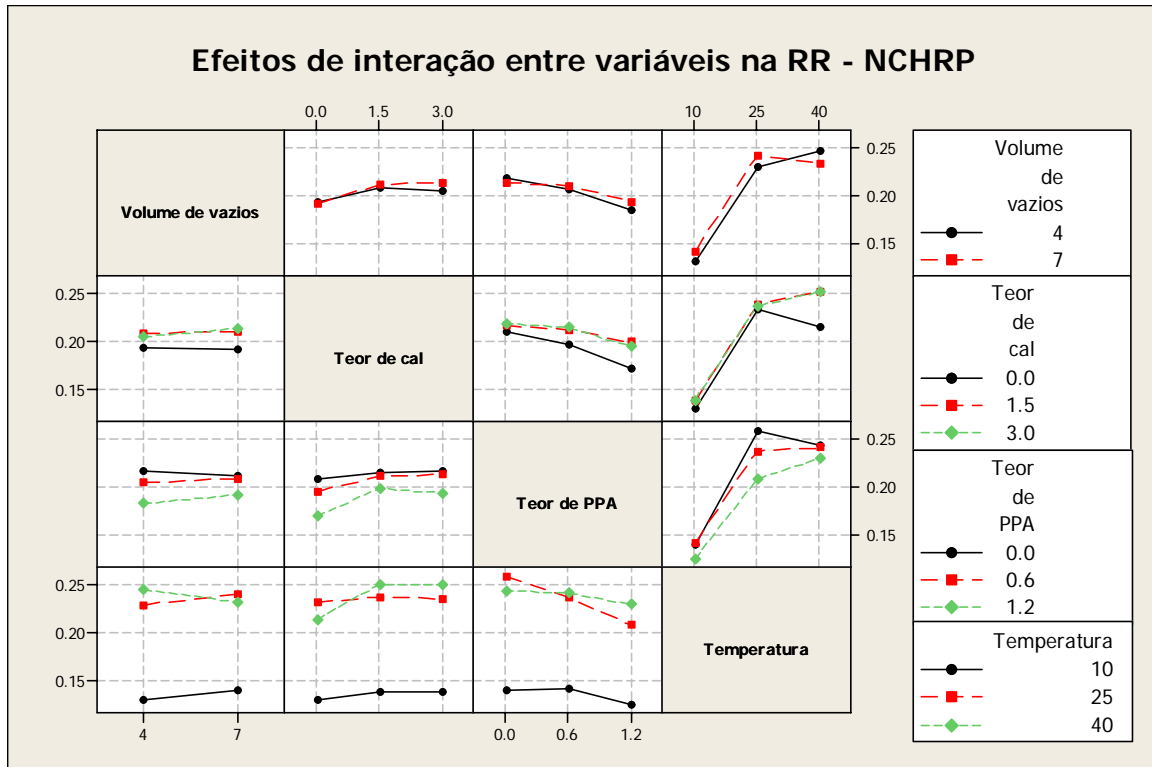


Figura 4.29. Efeitos dos fatores e suas interações entre variáveis na RR.

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.30 são apresentados os resultados das análises estatísticas para o Atraso médio. Nessa tabela pode-se notar que os fatores significativos na variação do Atraso médio são o volume de vazios, o teor de PPA e a temperatura, além da combinação de alguns desses fatores, onde os valores da estatística p é inferior a 0,005. Já a Figura 4.30 permite observar as influências dos fatores e suas interações nos valores do Atraso médio.

Tabela 4.9: Análise da significância dos fatores e suas interações no Atraso Médio.

<i>Variáveis</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Significância</i>
Volume de vazios	0.0000218	0.0000218	0.0000218	23.65	0.000	Sim
Teor de cal	0.0000044	0.0000044	0.0000022	2.38	0.095	Não
Teor de PPA	0.0001317	0.0001317	0.0000659	71.52	0.000	Sim
Temperatura	0.0028677	0.0028677	0.0014339	1556.88	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal	0.0000012	0.0000012	0.0000006	0.67	0.511	Não
Volume de vazios*Teor de PPA	0.0000041	0.0000041	0.0000021	2.24	0.108	Não
Volume de vazios*Temperatura	0.0000036	0.0000036	0.0000018	1.93	0.147	Não
Teor de cal*Teor de PPA	0.0000110	0.0000110	0.0000027	2.98	0.020	Não
Teor de cal*Temperatura	0.0000159	0.0000159	0.0000040	4.32	0.002	Sim
Teor de PPA*Temperatura	0.0000442	0.0000442	0.0000110	12.00	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA	0.0000088	0.0000088	0.0000022	2.39	0.051	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Temperatura	0.0000076	0.0000076	0.0000019	2.06	0.086	Não
Volume de vazios*Teor de PPA*Temperatura	0.0000170	0.0000170	0.0000043	4.62	0.001	Sim
Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	0.0000177	0.0000177	0.0000022	2.40	0.016	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	0.0000052	0.0000052	0.0000007	0.71	0.686	Não

Legenda: Seq SS (sequential sums of squares) = soma dos quadrados em sequência; Adj SS (adjusted sums of squares) = soma dos quadrados ajustado; Adj MS (adjusted mean squares) = quadrado médio ajustado; F = estatística de teste.

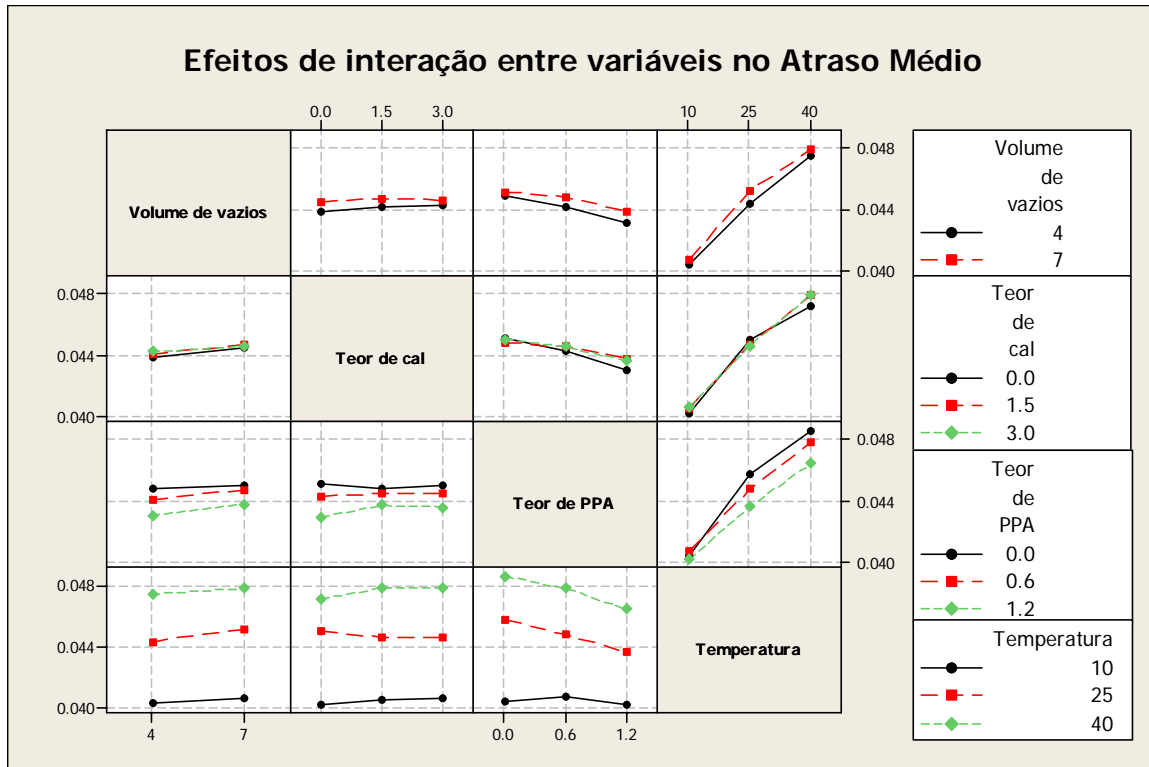


Figura 4.30. Efeitos de interação entre variáveis no Atraso Médio.

Na Tabela 4.10 e na Figura 4.31 são apresentados os resultados das análises estatísticas para a Resistência à Tração (RT). A Tabela 4.10 mostra que os fatores significativos na variação do valor da RT são o teor de cal, teor de PPA e o volume de vazios, além de evidenciar que o condicionamento, para os ensaios que foram executados, não foi significativo estatisticamente. Na Figura 4.31 podem ser vistas as influências dos fatores e suas interações nos valores da RT.

Tabela 4.10: Análise da significância dos fatores na RT.

<i>Variáveis</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Significância</i>
Volume de vazios	49.224	36.387	36.387	280.63	0.000	Sim
Teor de cal	0.4616	0.4616	0.2308	17.80	0.000	Sim
Teor de PPA	15.200	15.200	0.7600	58.61	0.000	Sim
Condicionamento	0.0277	0.0277	0.0277	2.13	0.147	Não

Legenda: Seq SS (sequential sums of squares) = soma dos quadrados em sequência; Adj SS (adjusted sums of squares) = soma dos quadrados ajustado; Adj MS (ajusted mean squares) = quadrado médio ajustado; F = estatística de teste.

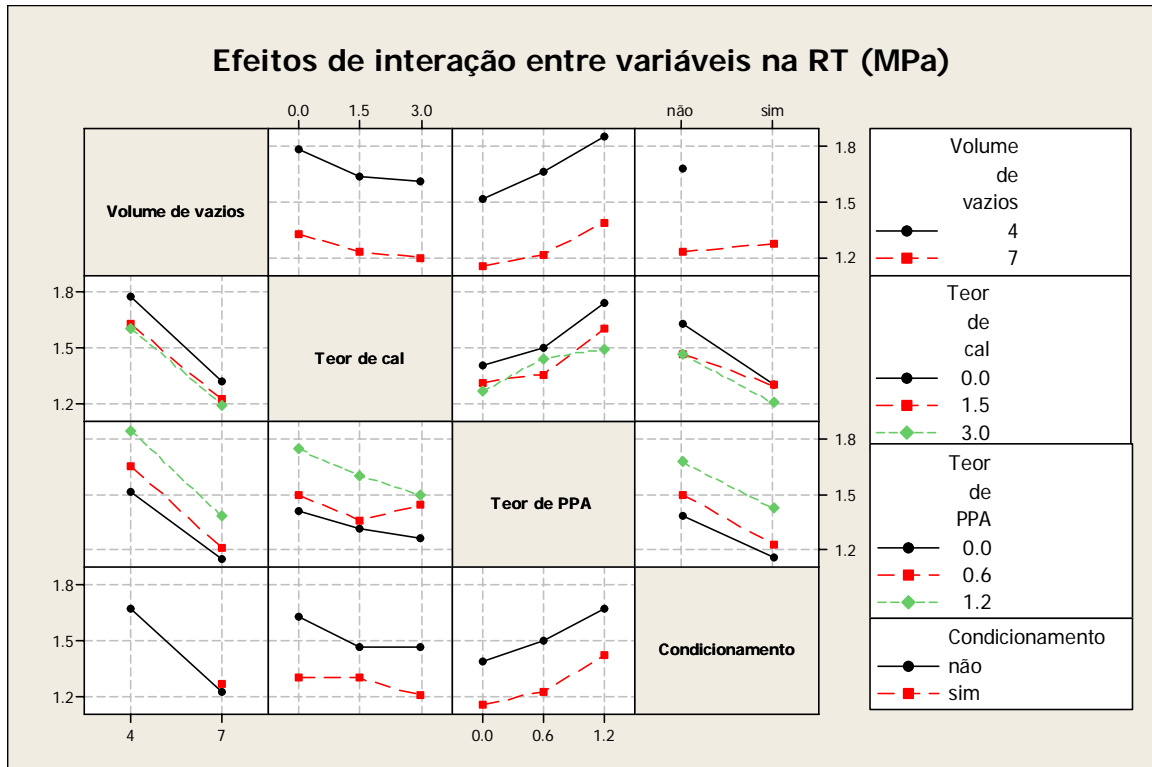


Figura 4.31. Efeitos de interação entre fatores na RT.

Na Tabela 4.11 e na Figura 4.32 são apresentados os resultados das análises estatísticas para o MR instantâneo. Nessa tabela pode-se notar que os fatores significativos na variação do valor do MR instantâneo são o volume de vazios, o teor de PPA e a temperatura, à semelhança do encontrado para o MR total, além da combinação de alguns desses fatores, onde os valores da estatística p é inferior a 0,005. Já na Figura 4.32 podem ser vistas as influências dos fatores e suas interações nos valores do MR instantâneo.

Tabela 4.11: Análise da significância dos fatores e suas interações no MR instatâneo calculado segundo a NCHRP.

<i>Variáveis</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Significância</i>
Volume de vazios	85565994	85565994	85565994	39.00	0.000	Sim
Teor de cal	11836748	11836748	5918374	2.70	0.069	Não
Teor de PPA	1,05E+08	1,05E+08	52401765	23.89	0.000	Sim
Temperatura	1,20E+10	1,20E+10	6,02E+09	2743.99	0.000	Sim
Volume de vazios*Teor de cal	886718	886718	443359	0.20	0.817	Não
Volume de vazios*Teor de PPA	11362776	11362776	5681388	2.59	0.077	Não
Volume de vazios*Temperatura	26789072	26789072	13394536	6.11	0.003	Sim
Teor de cal*Teor de PPA	27224344	27224344	6806086	3.10	0.016	Não
Teor de cal*Temperatura	4713012	4713012	1178253	0.54	0.709	Não
Teor de PPA*Temperatura	17976733	17976733	4494183	2.05	0.088	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA	11061318	11061318	2765329	1.26	0.286	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Temperatura	1679425	1679425	419856	0.19	0.943	Não
Volume de vazios*Teor de PPA*Temperatura	6810477	6810477	1702619	0.78	0.542	Não
Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	30873020	30873020	3859127	1.76	0.085	Não
Volume de vazios*Teor de cal*Teor de PPA*Temperatura	34481049	34481049	4310131	1.96	0.051	Não

Legenda: Seq SS (sequential sums of squares) = soma dos quadrados em sequência; Adj SS (adjusted sums of squares) = soma dos quadrados ajustado; Adj MS (ajusted mean squares) = quadrado médio ajustado; F = estatística de teste.

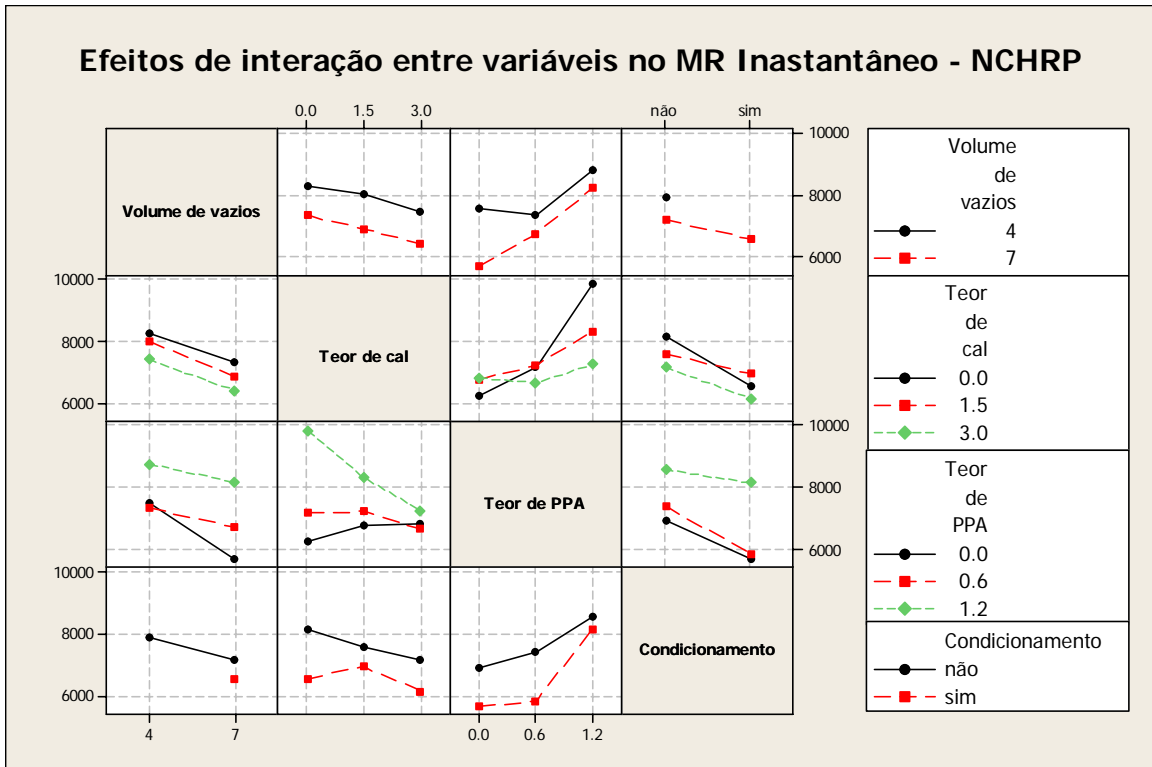


Figura 4.32. Efeitos de interação entre fatores no MR instantâneo.

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliadas as influências da adição de cal à mistura asfáltica e da modificação do ligante asfáltico com ácido polifosfórico e suas interações na suscetibilidade térmica de misturas asfálticas densas. Foram monitorados os módulos de resiliência, calculados através protocolo do NCHRP, e a recuperação retardada, de nove misturas asfálticas, empregando ligantes asfálticos modificados com 0,6 e 1,2% de PPA e misturas asfálticas com 1,5 e 3,0% de cal.

De acordo com os dados analisados, podem-se fazer as seguintes considerações:

Quanto à rigidez das misturas asfálticas:

- independente do tipo de mistura, a variação da temperatura foi o fator mais importante na redução da rigidez;
- misturas com ligantes modificados com PPA apresentam rigidezes maiores que a com ligante convencional, sendo que a influência desse modificador na redução da rigidez é mais intensa com o aumento de sua concentração no ligante asfáltico;
- misturas com cal apresentam variações pequenas ou manutenção da rigidez da mistura com ligante convencional, exceto na temperatura de 10° C;
- a mistura com ligantes contendo concentrações, tanto de PPA quanto de cal, apresentam tendência de aumento de rigidez, com predomínio de efeito do PPA, ou seja, há aumento de rigidez das misturas asfálticas quando comparadas com a que contem ligante convencional;
- a adição de 1,5% de cal melhorou tanto a suscetibilidade ao dano por umidade mistura asfáltica, quanto os valores médios absolutos obtidos;
- o aumento da concentração de PPA melhora a rigidez e a suscetibilidade ao dano por umidade;
- o efeito combinado do *aditivo* e do *modificador*, a critério de comparação, as que apresentaram melhores condições de suscetibilidade ao dano por umidade foram 1,5% de cal + 0,6% de PPA e 3,0% de cal + 1,2% de PPA.

Quanto à recuperação retardada das misturas asfálticas:

- o aumento da temperatura propicia o aumento da parcela visco-elástica na recuperação das misturas asfálticas;
- a adição de PPA torna a mistura mais flexível e esse efeito também se mostra dependente da concentração de modificador, uma vez que apresentam menores valores de recuperação retardada com o aumento de 0,6 para 1,2% de PPA;
- a adição de cal tem efeito discreto sobre a flexibilidade das misturas, mas esse efeito pode ser potencializado com o uso de teores mais adequados (1,5%);
- as adições de cal e PPA reduziram os valores da recuperação retardada, sendo que a intensidade do efeito do PPA predomina sobre a da cal.

Quanto à resistência a ruptura por tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas:

- de maneira geral, em termos médios, os valores de RT para 4% de V_v é maior que para 7%;
- o uso da cal diminui a resistência à tração (RT) e mantêm as propriedades elásticas da mistura asfáltica;
- as misturas com maior suscetibilidade ao dano por umidade foram obtidas para a concentração de 1,5% de cal;
- o efeito combinado dos materiais que obtiveram resultados mais expressivos para suscetibilidade ao dano por umidade foi de 1,5% de cal + 1,2% de PPA;
- os melhores valores da relação resistência à tração (RRT) foram obtidos para maiores concentrações de PPA, exceto quando combinado a cal;
- a RRT devido ao condicionamento apresentou valores significativos para adição de 1,5% de cal.

Quanto ao registro fotográfico:

- ocorreu melhora de adesividade com adição de 1,5% de cal;
- o aumento da concentração de PPA diminui a quantidade de agregados rompidos na face de ruptura do corpo-de-prova.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

- Repetir os ensaios realizados nessa pesquisa com diferentes concentrações de ácido polifosfórico e da cal hidratada, de forma a se obter melhores especificações ao uso destes materiais.
- Utilizar ácidos polifosfóricos de outra classe para comparação de eficiência com o usado nessa pesquisa (Exemplo: 110, 115 e 120%).
- Para as mesmas condições e fatores usados nessa pesquisa, analisar propriedades que representem a suscetibilidade à fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. T 283: **Standard method of test for resistance of compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage**. USA, 2007.
- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. TP 31-94 – **Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by indirect Tension**, Washington, D. C., 31p, 1994.
- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. T 312: **Preparing and determining the density of the hot-mix asphalt (HMA) specimens by means of the Superpave Gyratory Compactor**. USA, 2003.
- ADORJÁNYI, K., **Water sensitivity evaluation of ac mixes with antistripping additives by different mechanical tests**, 4th Euroahphalt & Eurobitumen Congress, Copenhagen, Dinamarca, 2008.
- ANDERSON, D.A. *et al.* (1991), **Physical properties os asphalt cement and the development of permance-related specifications**, Journal of the Association os Asphalt Paving Technologists, White Bear Lake, v. 60, p. 437-456.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Manual Series n° 4 (MS-4), 1989.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM C 1252 – 03. **Standard test methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)**. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 127: **Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate**. USA, 1998.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 128: **Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregates.** USA, 1997.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 113 – 99. **Standard test method for Ductility of Bituminous Materials.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 36 – 95 (Reapproved 2000). **Standard test method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 2041 – 90. **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.** USA, 2000.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 4402 – 02. **Standard test method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotacional Viscometer.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 4791 – 99. **Standard test method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 5 – 05a. **Standard test method for Penetration of Bituminous Materials.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 5821 – 01. **Standard test method for Determining the**

Percentage of Fracured Particles in Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Edição publicada sob a designação ASTM D 92 – 02b. **Standard test method for Flash and Fire by Cleveland Open Cup Tester.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 3203-94: **Standard test method for percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures.** USA, 1994.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 4123-82: **Standard method of indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures.** USA, 1982.

BAUMGARDNER, G. L., MASSON, J. F., HARDEE, J. R., MENAPACE, A. M., WILLIAMS, A. G., **Polyphosphoric acid modified asphalt: Proposed mechanisms,** 2005.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, 2007.

BERNUCCI, L.L.B.; CAMPOS, O.S.; DOMINGUES, F.A.A.; CASTRO NETO, A.M.; RABAÇA, S.R. **Influência do tipo de asfalto no comportamento à deformação de misturas asfálticas.** In: 9º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Asunción, Paraguay: Anais, 1997. Tomo 1, nov., p.459-467.

BERNUCCI, L.L.B.; MOURA, E.; FURLAN, A.P.; MOTTA, R.S.; LEITE, F.C.; FARIA, V.C. **Efeito do teor e do tipo de ligante na formação de trilhas de roda em misturas asfálticas.** In: 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BERTOLLO, S. A. M. ; FERNANDES JUNIOR, J. L. ; BERNUCCI, L. L. B. ; MOURA, EDSON DE . **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica densa modificada com adição de borracha.** Transportes (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, RJ, v. 10, n. 1, p. 65-83, 2002.

BIANCHETTOO, H.; MIRÓ, R.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A.H. ***Effect of Calcareous Fillers on Bituminous Mix Aging***. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 1998, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2007, p.140-148.

CHISTIAN, S., JEAN-VALERY, M., STEPHANIE, P., NICOLAS, P., ***Properties and Performances of asphalt binders and asphalt mixes modified with polyphosphoric acid***, 4th Euroasphalt & Eurobitumen Congress, Copenhagen, Dinamarca, 2008.

COELHO, V. ***Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação***. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 281p. São Carlos, 2004.

COMINSKY, R.J.; KILLINGSWORTH, B.M.; ANDERSON, R.M.; ANDERSON, D.A.; CROCKFORD, W.W. ***Quality control and acceptance of Superpave-designed hot mix asphalt***. National Cooperative Highway Research Program, n. 409, p. 1-26, 1998.

COMINSKY, R.R.; LEAHY, F.B.; HARRIGAN, E.G. ***Level one mix design: Materials selection, compaction, and conditioning***. Relatório Técnico SHRP-a-408, Strategic Highway Research Program (SHRP), 1994.

CURTIS, C. W.; ENSLEY, K.; EPPS, J.; ***Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Adsorption***; SHRP-A-341; Strategic Highway Research Program; National Research Council; Washington, D.C.; 1993.

D'ANGELO, J.; ANDERSON, R.M.; ***Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage***. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, TOPIC 5, Federal Highway Administration, 2003.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 004 (1994). Material asfáltico – determinação da viscosidade “Saybolt-Furol” a alta temperatura: método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 035 (1994). *Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo***. Rio de Janeiro, 1999.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 078 (1994). *Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 079 (1994). *Agregado – adesividade a ligante betuminoso***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 133 (1994). *Agregado – determinação do Módulo de Resiliência***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 138 (1994). *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral***. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro

EDWARDS, Y., ***Influence os waxes on bitumen and asphalt concrete mixture performance***, Road materials and pavement design, Vol 10/2, pg. 313-335, 2009.

EPPS, J.A.; LITTLE, D.N. ***The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt***. Prepared for National Lime Association, 48p, 2001.

FAXINA, A.L. ***Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha***. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2006.

FERNANDES, J.L.; ROQUE, R.; TIA, M.; CASANOVA, L. ***Evaluation of uncompacted void content of fine aggregate as a quality indicator of materials used in Superpave mixtures***. Transportation Research Board, 2000.

FERNANDES, P. R. N., SOUSA, C. R., SOARES, S. A., ***Análise do comportamento térmico de ligante asfáltico puro e modificado com ácido***

polifosfórico, Anais do XXII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Fortaleza/CE, 2008.

FILIPPIS, P., GIAVARINI, C., SCARSELLA, M., ***Improving the aging resistance of straight-run bitumens by addition of phosphorus compounds***, Fuel Vol. 74, n° 6, pg. 836-841, 1995.

FURLAN, A.P. ***Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas***. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2006.

FURLAN, A. P., FABBRI, G. T. P., GIGANTE, A. C., BERNUCCI, L. L. B., ***Considerações sobre a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas***, 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Recife, PE - Brasil, 2008a.

FURLAN, A. P., FABBRI, G. T. P., GIGANTE, A. C., BERNUCCI, L. L. B., ***Considerações sobre o efeito da cal na resiliência de misturas asfálticas densas***, 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Recife, PE - Brasil, 2008b.

FURLAN, A. P.; IWANAGA, FÁBIO ISSAO ; GIGANTE, ANTONIO CARLOS ; FABBRI, GLAUCO TULIO PESSA. ***Influência do modo de preparo e do tipo de fíler nas propriedades das misturas asfálticas densas***. In: XXI Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007, Panorana Nacional da Pesquisa e Ensino de Transportes. p. 1-12, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

FHWA. ***Distress identification manual for the long-term pavement performance program***. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation 4º Edition Revised. 154 p. Mclean, 2003.

GIAVARINI, C., FILIPPIS, P., SANTARELLI, M. L., SCARSELLA, M., ***Production of stable polyphopylene-modified bitumens***, Fuel Vol. 75, n° 6, pg 681-686, 1996.

GOMES, F. P., (1973). ***Estatística experimental***. 5ª Edição. Editora Nobel. 430p. São Paulo, 1973.

GOUVEIA, L. T., FURLAN, A. P., PARREIRA, A. B., FERNANDES JUNIOR, J. L., FABBRI, G. T. P., **Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade**. *Anais do XVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Florianópolis, SC, 2004.

GOUVEIA, L.T. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (faa) da especificação Superpave**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 2002.

GOUVEIA, L.T. **Influência de Propriedades dos Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 293p. São Carlos, 2006.

HERRINGTON, P.R.; WU, Y.; FORBES, M.C.; **Rheological Modification of Bitumen with Maleic Anhydride and Dicarboxylic Acids**. *Fuel*, v. 78, p. 101-110, 1999.

HICKS, G.H. **Moisture damage in asphalt concrete**. NCHRP 175 – National Highway Research, Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board, 1991.

HILLS, J.F. **The Creep of Asphalt Mixes**. *Journal of the Institute of Petroleum*, Volume 59, number 570, 1973.

HUBER, G. A. **Methods to Achieve Rut-Resistant Durable Pavements**. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 274, 1999.

ILDEFONSO, J. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do copolímero etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas (Processo seco)**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2007.

JIMÉNEZ, F. P., BARRAL, M., SÁNCHEZ, J. A. S., JANSORO, J. A. N., **Effect of the nature and filler content on cohesion, adhesiveness and rheological behavior of the bituminous mastics**, 4th Euroahphalt & Eurobitumen Congress, Copenhagen, Dinamarca, 2008.

JOHANNSSON, L., ***Bitumen Aging and Hydrated Lime***, Ph.D., Dissertation, Kungl Tekniska Hogskolan, Royal Institute of Technology, 1998.

KANDHAL, P.S., CHAKRABORTY, S. ***Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures***. Presented at the 75th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 1996.

KANDHAL, P.S.; PARKER JR., F. ***Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements***. National Cooperative Highway Research Program. n. 405, 1998.

KODRAT, I., SOHN, D., HESP, S. A. M., ***Comparison of polyphosphoric acid-modified asphalt binders with straight and polymer-modified materials***, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 1998, Washington D. C., 2007, pg. 47-55.

LEITE, L. F. M., BITTENCOURT, C. P., NASCIMENTO, L. A. H., ***Efeito do ácido polifosfórico no desempenho dos ligantes rodoviários***. *Anais do XVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Florianópolis, SC, 2004.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G. ***O efeito do filler 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, RN, 2002.

LESUEUR, D., LITTLE, D. N. AND EPPS, J. A., ***Effect of Hydrated Lime on the Rheology, Frature and Aging of Bitumen and Asphalt Mixtures***, Paper Presented at Lhoist HMA Symposium, Dusseldorf, Germany, June 1998.

LITTLE, D. N., EPPS, J. A., ***The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt***. *National Lime Association, The Versatile Chemical*, 2001.

LITTLE, D.N. ***Analysis of the influence of low density polyethylene modification (novophalt) of asphalt concrete on mixture shear and creep deformation potential***. Polymer Modified Asphalt binders. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1108, p.186-202, 1992.

LITTLE D. N.; JONES IV D. R.; ***Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements***; Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements – A National Seminar; Transportation Research Board, 2003.

LOTTMAN, R. P. *NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete*, Transportation Research Board, National Research Council, 24p. Washington, 1978.

LUTIF, J. E. S.; KIM, Y-R; SOARES, B. S.; ***Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis***. *Anais do XXII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Fortaleza/CE, 2008.

MAJIDZADEH, K. e BROVOLD, F.N. ***State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures***. Highway Research Board, Special Report n°.98,77, 1968.

MALDONADO, R., FEE, D., ***Bitumen modification with polyphosphoric acid***, 4th Euroahphalt & Eurobitumen Congress, Copenhagen, Dinamarca, 2008.

MANUAL DO ASFALTO. ***Instituto do Asfalto***. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.
MEDINA, J; & MOTTA, L.M. ***Mecânica dos Pavimentos***. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MARQUES, G.L.O. ***Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica, efeito da compactação por impacto e giratório***. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MARTIN, J.V.; BAUMGARDNER, G. ***A new method to produce polymer asphalt with crumb rubber and polyphosphoric acid, combining recycling and performance***. Asphalt Rubber – Proceedings, Brazili, Brazil, p.903-930, 2006.

MASSON, J-F., ***Brief review of the chemistry of polyphosphoric acid (PPA) and bitumen***, Energy & Fuels, 2637-2640, 2008.

MOTTA, L.M.G.; LEITE, F.L.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. **Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas.**

Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MOTTA, L.M.G.; PINTO, S.. **O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas.** 12° Encontro de Asfalto, p. 152-178, 1994.

MOTTA, L.M.G.; TONIAL, I.; LEITE, L.M.; CONSTANTINO, R.S.; BUKOWSKI, J.R.; MCGENNIS, R.B.; ANDERSON, M.; KENNEDY, T.W.; SOLAIMANIAN, M. **Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas.** Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.

Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system. NCHRP 9-12, 2000.

NEVES FILHO, A. S., PINTO, S., CARNEIRO, L. A. V., **Influência da adição de dopes na adesividade em misturas asfálticas a quente,** 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Manaus, AM - Brasil, 2007.

NÚÑEZ, W. P., CERATTI, J. A. V. P., TSUKUDA, R. S., **Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada,** 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Manaus, AM - Brasil, 2007.

PETERSEN, J.C. **Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art.** In Transportation Research Record 999, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1984, p.13-30, 1984.

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos, SP, 2008.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 1ª ed. Napa Education Foundation. Lenham, Maryland, 1991.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction**. 2. ed. Lanham: Napa Education Foundation, 1996.

SANTANNA-GRECO, J. A., FABBRI, G. T. P., **Avaliação dos efeitos do envelhecimento e da adição de modificadores ao ligante na deformação permanente sofrida por misturas asfálticas densas**, *Anais do XVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Florianópolis, SC, 2004.

SEBAALY, P. E., LITTLE D., HAJJ, E. Y., BHASIN, A., **Impact of Lime and Liquid Antistripping Agents on Properties of Idaho Hot-Mix Asphalt Mixture**, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n° 1998, Washington, D.C., pg. 65-74, 2007.

SEBAALY, P.E.; McCANN, M.; HITTI, E.; EPPS, J. **Performance of lime in hot mix asphalt pavements**. Pavements/Material Program – Department of Civil Engineering – University of Nevada Technical Report Documentation Page 101;. Distribution Statement: Unrestricted. Nevada, 2001.

SENÇO, W.; **Manual de técnicas de pavimentação** (vol.1). Ed.; Pini, São Paulo, 1997.

SILVA, L. S.; FORTE, M. M. C.; FARCAS, F. D. F.; BARTOLOMEO, P.; **Simulação e Envelhecimento UV em ligantes asfálticos**, 17º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2004.

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

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

WU, Y.; PARKER JR., R.; KANDHAL, P.S. ***Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements***. Transportation Research Record, n. 1638, p. 85 – 93, 1998.

***ANEXO I – MASSAS ESPECÍFICAS “CORRIGIDA”
APARENTE E MÁXIMA MEDIDA***

Tabela I. 1. Determinação dos valores da massa específica aparente “corrigida”.

Teor de Ligante (%)	CP	Peso seco (g)	Peso Imeroso (g)	G _{sb} (g/cm ³)
4,5	T11	1251,51	728,7	2,394
	T12	1257,1	727,8	2,375
	T13	1252,36	725,1	2,375
5,0	T21	1268,81	737,5	2,388
	T22	1286,06	749,2	2,396
	T23	1258,69	732,7	2,393
5,5	T31	1264,71	735,1	2,388
	T32	1265,37	735,3	2,387
	T33	1266,59	736,1	2,388
6,0	T41	1267,75	734,9	2,379
	T42	1273,7	738,6	2,380
	T43	1268,53	735,6	2,380

Tabela I. 2. Determinação dos valores da massa específica aparente “corrigida”.

CP	Peso seco (g)	Peso Imeroso (g)	G _{sb} (g/cm ³)
1	1252,1	726,1	2,380
2	1248,9	725,3	2,385
3	1251,4	724,7	2,376
4	1254,0	727,2	2,380
5	1255,0	723,3	2,360
6	1255,7	724,6	2,364
7	1251,4	722,3	2,365
8	1252,9	725,7	2,377
9	1252,7	720,5	2,354
10	1255,1	726,9	2,376
11	1256,3	723,6	2,358
12	1254,9	721,5	2,353
13	1253,7	723,2	2,363
14	1253,7	726,2	2,377
15	1255,4	730,1	2,390
16	1254,5	727,1	2,379
17	1254,5	723,8	2,364
18	1252,2	721,6	2,360

Tabela I. 3. Calculo do Gmm para 1,5% de cal e 0,6% de PPA para diferentes teores de ligante.

Teor de Ligante	4,5% LA	5% LA	5,5% LA	6,0% LA
Modificador	0,6% de PPA			
Aditivo	1,5% de cal			
A	1254,5	1261,3	1267,6	1274,5
E	4329,6	4328,9	4327	4327,2
D	3588,5	3589,4	3587,3	3585,5
G_{mm}	2,452	2,425	2,409	2,400

Tabela I. 4. Cálculo do Gmm para todas as combinacoes de fatores.

Teor de ligante	4,67% LA								
	0% de PPA			0,6% de PPA			1,2% de PPA		
Modificador	0% de cal			1,5% de cal			3,0% de cal		
Aditivo	0% de cal	1,5% de cal	3,0% de cal	0% de cal	1,5% de cal	3,0% de cal	0% de cal	1,5% de cal	3,0% de cal
A	1553,4	1592	1662,3	1792,9	1553,6	1622,7	1541,2	1536,6	1548
E	4515	4536,5	4575,4	4656,7	4513,9	4551,1	4506,3	4501,6	4506,1
D	3592	3590,2	3590,2	3590,2	3590,2	3589,4	3588,5	3588,5	3589
G_{mm} (g/cm ³)	2,471	2,472	2,461	2,474	2,473	2,461	2,479	2,471	2,460

ANEXO II – PROPRIEDADES OBTIDAS DA MOLDAGEM

Tabela II. 1. Resultado das propriedades da moldagem dos corpos-de-prova.

Aditivo	Modificador	CP	Altura (mm)	Gmb (est) (g/cm ³)	Gmb (corr) (g/cm ³)	%Gmm@Nprojeto (100)	Vv (%)	Vv,méd (%)	Gmm médio (g/cm ³)	VAM (%)	RBV (%)
0% cal	0% PPA	1	65,87	2,328	2,371	95,94	4,06	3,97	2,471	11,45	0,65
		2	65,84	2,328	2,371	95,96	4,04			11,43	0,65
		3	65,79	2,331	2,376	96,18	3,82			11,23	0,66
		4	65,73	2,328	2,376	96,18	3,82			11,23	0,66
		5	65,96	2,324	2,376	96,16	3,84			11,24	0,66
		6	65,8	2,323	2,366	95,77	4,23			11,61	0,64
		7	68,68	2,231	2,301	93,13	6,87	7,08	2,471	14,04	0,51
		8	68,96	2,223	2,286	92,53	7,47			14,60	0,49
		9	68,7	2,224	2,306	93,32	6,68			13,87	0,52
		10	68,63	2,228	2,297	92,98	7,02			14,18	0,50
		11	68,73	2,225	2,283	92,39	7,61			14,72	0,48
		12	68,65	2,228	2,302	93,15	6,85			14,02	0,51
	13	65,78	2,325	2,378	96,10	3,90	4,01	2,474	11,18	0,65	
	14	65,63	2,328	2,377	96,10	3,90			11,19	0,65	
	15	65,87	2,320	2,371	95,82	4,18			11,45	0,63	
	16	65,73	2,330	2,381	96,23	3,77			11,06	0,66	
	17	65,83	2,321	2,372	95,87	4,13			11,40	0,64	
	18	65,87	2,320	2,371	95,84	4,16			11,43	0,64	
	19	68,96	2,216	2,285	92,37	7,63	7,61	2,474	14,64	0,48	
	20	68,94	2,216	2,279	92,12	7,88			14,86	0,47	
	21	68,93	2,217	2,289	92,53	7,47			14,48	0,48	
	22	68,91	2,217	2,285	92,34	7,66			14,66	0,48	
	23	68,93	2,217	2,292	92,64	7,36			14,38	0,49	
	24	68,91	2,217	2,285	92,35	7,65			14,65	0,48	
	25	65,43	2,337	2,385	96,19	3,81	4,09	2,479	10,92	0,65	
	26	65,66	2,329	2,376	95,85	4,15			11,24	0,63	
	27	65,79	2,328	2,373	95,74	4,26			11,34	0,62	
	28	66,02	2,320	2,375	95,79	4,21			11,29	0,63	
	29	65,69	2,330	2,377	95,89	4,11			11,20	0,63	
	30	65,74	2,324	2,380	96,02	3,98			11,08	0,64	
	31	67,62	2,260	2,321	93,62	6,38	6,23	2,479	13,31	0,52	
	32	68,65	2,226	2,289	92,34	7,66			14,49	0,47	
	33	68,69	2,228	2,307	93,05	6,95			13,83	0,50	
	34	68,72	2,227	2,324	93,76	6,24			13,17	0,53	
	35	68,71	2,229	2,370	95,59	4,41			11,47	0,62	
	36	68,73	2,227	2,336	94,22	5,78			12,74	0,55	

Continua...

Continuação da Tabela II.1

<i>Aditivo</i>	<i>Modificador</i>	<i>CP</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>Gmb (est) (g/cm³)</i>	<i>Gmb (corr) (g/cm³)</i>	<i>%Gmm@ Nprojeto (100)</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>Vv,méd (%)</i>	<i>Gmm médio (g/cm³)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV (%)</i>
1,5% cal	0% PPA	37	65,36	2,338	2,371	95,90	4,10	4,00	2,472	11,44	0,64
		38	65,57	2,330	2,372	95,94	4,06			11,40	0,64
		39	65,66	2,327	2,376	96,12	3,88			11,24	0,65
		40	65,5	2,333	2,377	96,15	3,85			11,21	0,66
		41	65,69	2,326	2,377	96,16	3,84			11,20	0,66
		42	65,77	2,323	2,367	95,75	4,25			11,58	0,63
		43	69,24	2,207	2,301	93,43	6,57	6,79	2,472	13,72	0,52
		44	68,93	2,217	2,286	92,82	7,18			14,28	0,50
		45	68,88	2,218	2,306	93,61	6,39			13,55	0,53
		46	68,94	2,216	2,297	93,28	6,72			13,86	0,52
		47	68,93	2,217	2,283	92,69	7,31			14,40	0,49
		48	68,9	2,218	2,302	93,45	6,55			13,71	0,52
	0,6% PPA	49	65,55	2,331	2,371	95,83	4,17	4,07	2,473	11,47	0,64
		50	66,04	2,314	2,372	95,87	4,13			11,43	0,64
		51	65,79	2,322	2,376	96,04	3,96			11,27	0,65
		52	65,97	2,316	2,377	96,07	3,93			11,25	0,65
		53	66,28	2,305	2,377	96,08	3,92			11,23	0,65
		54	65,99	2,315	2,367	95,67	4,33			11,61	0,63
	0,6% PPA	55	69,22	2,207	2,301	93,01	6,99	7,20	2,473	14,07	0,50
		56	69,17	2,209	2,286	92,41	7,59			14,63	0,48
		57	69,17	2,209	2,306	93,20	6,80			13,90	0,51
		58	69,18	2,209	2,297	92,86	7,14			14,21	0,50
		59	69,2	2,208	2,283	92,28	7,72			14,75	0,48
		60	69,19	2,208	2,302	93,03	6,97			14,05	0,50
1,2% PPA	61	66,03	2,314	2,368	95,80	4,20	4,27	2,471	11,56	0,64	
	62	66,29	2,305	2,365	95,71	4,29			11,65	0,63	
	63	66,49	2,298	2,362	95,59	4,41			11,76	0,62	
	64	66,18	2,309	2,367	95,76	4,24			11,60	0,63	
	65	65,8	2,322	2,371	95,93	4,07			11,44	0,64	
	66	66,21	2,308	2,363	95,61	4,39			11,74	0,63	
	67	68,89	2,218	2,301	93,43	6,57	7,24	2,471	13,75	0,52	
	68	68,95	2,216	2,286	92,52	7,48			14,59	0,49	
	69	68,97	2,215	2,294	92,83	7,17			14,31	0,50	
	70	68,98	2,215	2,295	92,85	7,15			14,29	0,50	
	71	68,93	2,217	2,285	92,47	7,53			14,63	0,49	
	72	68,98	2,215	2,285	92,44	7,56			14,66	0,48	

Continua...

Continuação da Tabela II.1

<i>Aditivo</i>	<i>Modificador</i>	<i>CP</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>Gmb (est) (g/cm3)</i>	<i>Gmb (corr) (g/cm3)</i>	<i>%Gmm@ Nprojeto (100)</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>Vv,méd (%)</i>	<i>Gmm médio (g/cm3)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV (%)</i>	
3,0% cal	0% PPA	73	65,82	2,321	2,370	96,28	3,72	4,01	2,461	11,48	0,68	
		74	66,4	2,301	2,366	96,13	3,87			11,62	0,67	
		75	66,36	2,302	2,359	95,83	4,17			11,89	0,65	
		76	66,06	2,313	2,358	95,82	4,18			11,90	0,65	
		77	66,4	2,301	2,359	95,85	4,15			11,88	0,65	
		78	66,13	2,310	2,364	96,04	3,96			11,70	0,66	
		79	69,17	2,209	2,284	92,80	7,20	7,23	2,461	14,68	0,51	
		80	69,18	2,209	2,279	92,60	7,40			14,87	0,50	
		81	69,23	2,207	2,274	92,40	7,60			15,05	0,49	
		82	69,2	2,208	2,293	93,18	6,82			14,33	0,52	
		83	69,17	2,209	2,277	92,51	7,49			14,95	0,50	
		84	69,22	2,207	2,293	93,17	6,83			14,34	0,52	
		0,6% PPA	85	66,1	2,311	2,357	95,76	4,24	4,20	2,461	11,95	0,65
			86	66,08	2,312	2,361	95,91	4,09			11,82	0,65
	87		66,33	2,303	2,358	95,79	4,21	11,93			0,65	
	88		66,37	2,302	2,354	95,65	4,35	12,06			0,64	
	89		66,18	2,309	2,358	95,82	4,18	11,90			0,65	
	90		66,21	2,308	2,360	95,89	4,11	11,84			0,65	
	91		69,19	2,208	2,291	93,06	6,94	7,28	2,461	14,43	0,52	
	92		69,25	2,206	2,299	93,39	6,61			14,13	0,53	
	93		69,17	2,209	2,278	92,54	7,46			14,91	0,50	
	94		69,17	2,209	2,276	92,48	7,52			14,97	0,50	
	95		69,23	2,207	2,275	92,41	7,59			15,03	0,50	
	96		69,23	2,207	2,275	92,42	7,58			15,03	0,50	
	1,2% PPA	97	66,28	2,305	2,354	95,68	4,32	4,39	2,460	12,06	0,64	
		98	66,21	2,308	2,357	95,78	4,22			11,97	0,65	
		99	66,82	2,287	2,349	95,48	4,52			12,24	0,63	
		100	66,41	2,301	2,351	95,57	4,43			12,17	0,64	
		101	66,43	2,300	2,353	95,65	4,35			12,09	0,64	
		102	66,73	2,290	2,350	95,50	4,50			12,23	0,63	
		103	69,13	2,210	2,258	91,79	8,21	7,27	2,460	15,64	0,47	
		104	69,23	2,207	2,276	92,49	7,51			14,99	0,50	
		105	69,2	2,208	2,294	93,23	6,77			14,32	0,53	
		106	69,23	2,207	2,279	92,63	7,37			14,87	0,50	
		107	69,25	2,206	2,284	92,83	7,17			14,68	0,51	
		108	69,23	2,207	2,298	93,39	6,61			14,17	0,53	

***ANEXO III – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA PARA AS
TEMPERATURAS DE 10, 25 E 40°C.***

Tabela III. 1. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 40°C.

Aditivo	Modificador	V _v (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRT)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	4	1	1406,40	1872,23	0,25	0,05
			2	1061,90	1481,37	0,28	0,05
			3	1105,50	1509,20	0,27	0,05
			4	961,77	1280,87	0,25	0,05
			5	893,57	1197,20	0,25	0,05
			6	1030,00	1375,20	0,25	0,05
			Média	1076,52	1452,68	0,26	0,05
			Desvio	178,15	237,00	0,01	0,00
		Relação	16,55	16,31	5,22	0,94	
		7	7	928,03	1201,37	0,23	0,05
			8	859,53	1096,90	0,22	0,05
			9	1351,75	1446,65	0,07	0,05
			10	888,85	1139,35	0,22	0,05
			11	769,05	987,95	0,22	0,05
	12		1035,20	1201,05	0,14	0,05	
	Média		972,07	1178,88	0,18	0,05	
	Desvio		205,37	153,26	0,06	0,00	
	Relação	21,13	13,00	34,98	1,42		
	0,6% de PPA	4	13	2412,05	3156,90	0,24	0,05
			14	2072,70	2679,55	0,23	0,05
			15	3477,60	4362,50	0,20	0,05
			16	1810,90	2335,10	0,22	0,05
			17	2204,30	2844,20	0,23	0,05
			18	1500,45	1941,25	0,23	0,05
			Média	2246,33	2886,58	0,22	0,05
			Desvio	681,37	835,92	0,01	0,00
		Relação	30,33	28,96	4,95	3,16	
		7	19	1256,15	1566,85	0,20	0,05
			20	1344,70	1636,10	0,18	0,05
			21	2304,30	2883,30	0,20	0,05
			22	2020,40	2681,15	0,25	0,05
			23	1557,15	1925,10	0,19	0,05
	24		1226,80	1640,00	0,25	0,05	
	Média		1618,25	2055,42	0,21	0,05	
	Desvio		446,16	579,83	0,03	0,00	
	Relação	27,57	28,21	14,52	1,88		
1,2% de PPA	4	25	2678,65	3292,80	0,19	0,04	
		26	2131,35	2788,85	0,24	0,04	
		27	2695,35	3383,50	0,20	0,04	
		28	2931,65	3615,75	0,19	0,04	
		29	3097,05	3873,05	0,20	0,05	
		30	1872,70	2365,15	0,21	0,05	
		Média	2567,79	3219,85	0,20	0,04	
		Desvio	472,17	553,49	0,02	0,00	
	Relação	18,39	17,19	8,55	2,41		
	7	31	1954,70	2460,10	0,21	0,05	
		32	1602,10	2015,95	0,21	0,05	
		33	2686,85	3356,45	0,20	0,04	
		34	2020,50	2571,15	0,21	0,04	
		35	1468,15	1826,70	0,20	0,05	
36		1863,50	2412,60	0,23	0,05		
Média		1932,63	2440,49	0,21	0,05		
Desvio		425,87	531,83	0,01	0,00		
Relação	22,04	21,79	5,43	4,62			

Continua...

Continuação da Tabela III.1

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MR_i - MR_t)/MR_i)$ - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	1509,60	2108,45	0,28	0,05
			38	1275,35	1797,95	0,29	0,05
			39	1279,15	1739,70	0,26	0,05
			40	1159,20	1636,70	0,29	0,05
			41	1768,60	2529,60	0,30	0,05
			42	1541,90	2116,00	0,27	0,05
			Média	1422,30	1988,07	0,28	0,05
			Desvio	225,01	330,27	0,01	0,00
		Relação	15,82	16,61	4,79	1,26	
		7	43	1032,45	1380,15	0,25	0,05
			44	1141,40	1539,45	0,26	0,05
			45	1417,40	1909,95	0,26	0,05
			46	1312,75	1744,00	0,25	0,05
			47	976,35	1356,05	0,28	0,05
	48		1467,45	1976,55	0,26	0,05	
	Média		1224,63	1651,03	0,26	0,05	
	Desvio		204,64	266,27	0,01	0,00	
	Relação	16,71	16,13	4,33	1,24		
	0,6% de PPA	4	49	1212,55	1620,10	0,25	0,05
			50	1198,90	1626,95	0,26	0,05
			51	1151,90	1495,25	0,23	0,05
			52	1883,50	2558,85	0,26	0,05
			53	1615,40	2215,10	0,27	0,05
			54	1522,10	2071,20	0,27	0,05
			Média	1430,73	1931,24	0,26	0,05
			Desvio	292,08	417,98	0,01	0,00
		Relação	20,41	21,64	5,79	1,43	
		7	55	1423,55	1934,75	0,26	0,05
			56	1319,35	1749,80	0,25	0,05
			57	3584,70	4625,95	0,23	0,05
			58	1574,75	2048,65	0,23	0,05
			59	1621,95	2126,40	0,24	0,05
60	1394,50		1826,35	0,24	0,05		
Média	1819,80		2385,32	0,24	0,05		
Desvio	872,06		1106,36	0,01	0,00		
Relação	47,92	46,38	5,72	2,26			
1,2% de PPA	4	61	1893,65	2350,45	0,19	0,05	
		62	1683,85	2222,90	0,24	0,05	
		63	1955,60	2498,65	0,22	0,05	
		64	2537,15	3318,70	0,24	0,05	
		65	2038,55	2698,30	0,24	0,05	
		66	1898,00	2553,75	0,26	0,05	
		Média	2001,13	2607,13	0,23	0,05	
		Desvio	287,63	385,43	0,02	0,00	
	Relação	14,37	14,78	9,69	1,11		
	7	67	1890,25	2545,00	0,26	0,05	
		68	1349,45	1858,30	0,27	0,05	
		69	2974,85	3886,70	0,23	0,05	
		70	1922,45	2444,75	0,21	0,05	
		71	1761,45	2314,05	0,24	0,05	
72		1730,35	2261,95	0,24	0,05		
Média		1938,13	2551,79	0,24	0,05		
Desvio		547,40	694,97	0,02	0,00		
Relação	28,24	27,23	8,58	1,73			

Continua...

Continuação da Tabela III.1

<i>Aditivo</i>	<i>Modificadç</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>CP n°</i>	<i>Mod. Res. Total - NCHRP</i>	<i>Mod. Res. Instant. - NCHRP</i>	<i>((MRI - MRt)/MRI) - NCHRP</i>	<i>Atraso Médio</i>
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	1350,15	1892,25	0,29	0,05
			74	1079,20	1475,15	0,27	0,05
			75	1419,65	1909,60	0,26	0,05
			76	822,35	1133,20	0,27	0,05
			77	1105,05	1431,85	0,23	0,05
			78	1559,30	1934,75	0,19	0,05
			Média	1222,62	1629,47	0,25	0,05
			Desvio	269,46	331,62	0,03	0,00
		Relação	22,04	20,35	13,66	1,83	
		7	79	1039,60	1339,20	0,22	0,05
			80	1127,35	1460,60	0,23	0,05
			81	1079,90	1382,30	0,22	0,05
			82	1076,40	1384,85	0,22	0,05
			83	932,65	1267,00	0,26	0,05
	84		807,65	1097,30	0,26	0,05	
	Média		1010,59	1321,88	0,24	0,05	
	Desvio		119,05	126,97	0,02	0,00	
	Relação	11,78	9,61	8,94	1,58		
	0,6% de PPA	4	85	1871,90	2548,10	0,27	0,05
			86	1497,35	2061,80	0,27	0,05
			87	1625,85	2218,40	0,27	0,05
			88	1294,95	1659,65	0,22	0,05
			89	1256,05	1713,30	0,27	0,05
			90	1267,25	1720,00	0,26	0,05
			Média	1468,89	1986,88	0,26	0,05
			Desvio	246,61	354,21	0,02	0,00
		Relação	16,79	17,83	7,60	0,86	
		7	91	1266,60	1740,00	0,27	0,05
			92	1389,95	1943,40	0,28	0,05
			93	1493,25	1939,50	0,23	0,05
			94	1481,00	1994,20	0,26	0,05
			95	1464,90	2003,60	0,27	0,05
96	1475,60		2028,30	0,27	0,05		
Média	1428,55		1941,50	0,26	0,05		
Desvio	87,40		104,67	0,02	0,00		
Relação	6,12	5,39	7,15	2,17			
1,2% de PPA	4	97	2723,25	3614,80	0,25	0,05	
		98	2223,80	2926,65	0,24	0,05	
		99	2529,25	3211,15	0,21	0,05	
		100	2277,55	3104,80	0,27	0,05	
		101	2433,25	3194,55	0,24	0,05	
		102	1588,10	2142,45	0,26	0,05	
		Média	2295,87	3032,40	0,24	0,05	
		Desvio	390,50	491,09	0,02	0,00	
	Relação	17,01	16,19	7,73	1,49		
	7	103	1306,55	1688,15	0,23	0,05	
		104	1436,85	1926,75	0,25	0,05	
		105	2137,50	2866,50	0,25	0,05	
		106	2226,10	2803,05	0,21	0,05	
		107	1341,15	1828,25	0,27	0,05	
108		1697,85	2510,10	0,32	0,05		
Média		1691,00	2270,47	0,26	0,05		
Desvio		405,10	519,44	0,04	0,00		
Relação	23,96	22,88	15,74	5,24			

Tabela III. 2. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C.

Aditivo	Modificadç	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRi - MRt)/MRi)$ - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	4	1	5745,73	7763,03	0,26	0,05
			2	5683,53	7837,20	0,27	0,05
			3	4778,23	6406,03	0,25	0,05
			4	7089,40	9659,23	0,27	0,05
			5	4426,57	6170,90	0,28	0,05
			6	5397,60	7286,83	0,26	0,05
		Média	5520,18	7520,54	0,27	0,05	
		Desvio	927,52	1253,10	0,01	0,00	
		Relação	16,80	16,66	4,02	1,76	
		7	7	3352,37	4677,63	0,28	0,05
			8	3346,20	4600,67	0,27	0,05
			9	4233,60	5619,33	0,25	0,05
	10		3252,67	4436,43	0,27	0,05	
	11		3457,77	4687,03	0,26	0,05	
	12		4355,27	6003,80	0,27	0,05	
	Média	3666,31	5004,15	0,27	0,05		
	Desvio	492,36	643,43	0,01	0,00		
	Relação	13,43	12,86	4,71	2,26		
	0,6% de PPA	4	13	4103,86	5489,24	0,24	0,04
			14	4693,97	6047,73	0,22	0,04
			15	4912,17	6254,07	0,21	0,04
			16	5990,35	7632,60	0,22	0,04
			17	7081,13	9023,83	0,22	0,04
			18	5807,60	7610,80	0,24	0,05
		Média	5431,51	7009,71	0,22	0,04	
		Desvio	1072,51	1312,57	0,01	0,00	
		Relação	19,75	18,73	5,50	1,91	
		7	19	5881,88	8312,93	0,29	0,05
			20	4516,17	6057,13	0,25	0,05
			21	9318,33	12339,63	0,25	0,05
	22		4415,65	5757,90	0,23	0,04	
	23		4411,27	5829,10	0,24	0,05	
	24		4556,03	6064,17	0,25	0,05	
	Média	5516,55	7393,48	0,25	0,05		
	Desvio	1946,48	2607,11	0,02	0,00		
	Relação	35,28	35,26	7,47	3,16		
1,2% de PPA	4	25	10065,43	11943,30	0,16	0,04	
		26	4212,78	5151,03	0,18	0,04	
		27	8884,54	10868,81	0,18	0,04	
		28	8483,80	10648,83	0,20	0,04	
		29	9947,00	11943,33	0,17	0,05	
		30	8568,13	10742,80	0,20	0,04	
	Média	8360,28	10216,35	0,18	0,04		
	Desvio	2142,91	2549,99	0,02	0,00		
	Relação	25,63	24,96	10,11	3,32		
	7	31	9244,57	11577,10	0,20	0,04	
		32	5566,47	7192,93	0,23	0,04	
		33	10299,23	12025,60	0,14	0,04	
34		8284,87	10103,87	0,18	0,05		
35		7827,50	10216,53	0,23	0,04		
36		4671,80	6126,03	0,24	0,04		
Média	7649,07	9540,34	0,20	0,04			
Desvio	2154,36	2377,71	0,04	0,00			
Relação	28,17	24,92	17,97	2,29			

Continua...

Continuação da Tabela III.2

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	((MRi - MRt)/MRi) - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	5024,67	6480,87	0,22	0,04
			38	5638,20	7603,80	0,26	0,05
			39	5191,33	6832,40	0,24	0,04
			40	5215,83	6730,73	0,22	0,04
			41	6899,03	9151,83	0,25	0,04
			42	4846,33	6362,17	0,24	0,05
			Média	5469,23	7193,63	0,24	0,04
		Desvio	748,32	1053,27	0,01	0,00	
		Relação	13,68	14,64	5,38	1,53	
		7	43	4690,40	6465,43	0,27	0,05
			44	4690,40	6465,43	0,27	0,05
			45	4572,67	6060,90	0,25	0,05
			46	5698,07	7484,50	0,24	0,05
			47	4515,00	6045,70	0,25	0,05
	48		4175,97	5655,13	0,26	0,05	
	Média		4723,75	6362,85	0,26	0,05	
	Desvio	513,42	627,98	0,01	0,00		
	Relação	10,87	9,87	5,79	1,19		
	0,6% de PPA	4	49	5460,80	7189,87	0,24	0,04
			50	6251,97	8260,17	0,24	0,05
			51	5090,47	6696,37	0,24	0,04
			52	8192,35	10539,03	0,22	0,04
			53	5703,93	7601,40	0,25	0,05
			54	5268,00	6967,48	0,24	0,04
			Média	5994,58	7875,72	0,24	0,04
		Desvio	1149,89	1414,38	0,01	0,00	
		Relação	19,18	17,96	3,80	1,60	
		7	55	4773,40	6385,07	0,25	0,05
			56	4954,33	6558,80	0,24	0,05
			57	5730,53	7389,83	0,22	0,04
			58	4969,58	6433,65	0,23	0,04
			59	5452,33	7231,63	0,25	0,05
	60		4153,80	5580,50	0,26	0,05	
	Média		5005,66	6596,58	0,24	0,05	
	Desvio	549,27	653,86	0,01	0,00		
	Relação	10,97	9,91	5,27	1,91		
1,2% de PPA	4	61	6472,47	8353,13	0,22	0,04	
		62	7040,40	9238,90	0,24	0,04	
		63	6176,70	8064,27	0,23	0,04	
		64	6225,70	7913,50	0,21	0,04	
		65	8970,63	11518,23	0,22	0,04	
		66	6734,58	8832,80	0,24	0,04	
		Média	6936,75	8986,81	0,23	0,04	
	Desvio	1047,58	1334,17	0,01	0,00		
	Relação	15,10	14,85	4,37	1,31		
	7	67	6037,15	7732,60	0,22	0,04	
		68	4404,93	5834,90	0,25	0,05	
		69	6796,24	8487,34	0,20	0,04	
		70	7210,90	9242,50	0,22	0,04	
		71	5864,70	7476,57	0,22	0,04	
72		5573,83	7440,80	0,25	0,05		
Média		5981,29	7702,45	0,22	0,04		
Desvio	984,25	1148,56	0,02	0,00			
Relação	16,46	14,91	8,65	3,23			

Continua...

Continuação da Tabela III.2

<i>Aditivo</i>	<i>Modificad</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>CP n°</i>	<i>Mod. Res. Total - NCHRP</i>	<i>Mod. Res. Instant. - NCHRP</i>	<i>((MRi - MRt)/MRi) - NCHRP</i>	<i>Atraso Médio</i>
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	5479,43	7426,73	0,26	0,05
			74	5032,27	6824,50	0,26	0,05
			75	5598,73	7418,10	0,25	0,05
			76	4571,60	6428,67	0,29	0,05
			77	7409,10	10111,30	0,27	0,05
			78	6837,73	9157,07	0,25	0,05
			Média	5821,48	7894,39	0,26	0,05
			Desvio	1086,74	1431,61	0,01	0,00
		Relação	18,67	18,13	5,59	0,85	
		7	79	3792,40	5210,93	0,27	0,05
			80	3807,87	5169,20	0,26	0,05
			81	5446,33	7383,40	0,26	0,05
			82	4689,35	6345,95	0,26	0,05
			83	4090,70	5597,70	0,27	0,05
	84		3432,40	4828,80	0,29	0,05	
	Média		4209,84	5756,00	0,27	0,05	
	Desvio		736,65	951,07	0,01	0,00	
	Relação	17,50	16,52	3,95	1,61		
	0,6% de PPA	4	85	5765,00	7454,93	0,23	0,05
			86	5758,07	7612,53	0,24	0,05
			87	5379,93	6971,33	0,23	0,04
			88	5196,17	6815,63	0,24	0,04
			89	5024,67	6463,13	0,22	0,04
			90	5953,00	7707,10	0,23	0,04
			Média	5512,81	7170,78	0,23	0,04
			Desvio	367,08	496,02	0,01	0,00
		Relação	6,66	6,92	3,34	1,31	
		7	91	5329,45	6988,35	0,24	0,05
			92	4259,53	5616,93	0,24	0,05
			93	6635,38	8490,38	0,22	0,04
			94	4388,33	5764,57	0,24	0,04
			95	4308,60	5751,87	0,25	0,04
	96		3160,17	4300,80	0,27	0,05	
	Média		4680,24	6152,15	0,24	0,04	
	Desvio		1179,40	1427,65	0,02	0,00	
	Relação	25,20	23,21	6,42	0,89		
1,2% de PPA	4	97	4350,27	5398,57	0,19	0,04	
		98	7520,90	9263,13	0,19	0,04	
		99	5017,90	6346,67	0,21	0,04	
		100	4952,50	6209,25	0,20	0,04	
		101	7042,35	8551,40	0,18	0,04	
		102	5659,57	7316,30	0,23	0,04	
		Média	5757,25	7180,89	0,20	0,04	
		Desvio	1260,58	1486,54	0,02	0,00	
	Relação	21,90	20,70	8,76	1,60		
	7	103	4857,83	6204,93	0,22	0,04	
		104	4597,87	6027,63	0,24	0,04	
		105	7094,90	8869,63	0,20	0,04	
		106	7280,85	9172,55	0,21	0,04	
		107	6344,23	8120,23	0,22	0,05	
108		4374,93	5663,18	0,23	0,04		
Média		5758,43	7343,03	0,22	0,04		
Desvio		1305,31	1557,51	0,01	0,00		
Relação	22,67	21,21	6,27	2,00			

Tabela III. 3. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C e condicionamento.

Aditivo	Modificador	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MR_i - MR_t)/MR_i)$ - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	7	10	3252,67	4436,43	0,27	0,05
			11	3457,77	4687,03	0,26	0,05
			12	4355,27	6003,80	0,27	0,05
			Média	3666,31	5004,15	0,27	0,05
			Desvio	492,36	643,43	0,01	0,00
			Relação	13,43	12,86	4,71	2,26
	0,6% de PPA	7	22	4415,65	5757,90	0,23	0,04
			23	4411,27	5829,10	0,24	0,05
			24	4556,03	6064,17	0,25	0,05
			Média	5516,55	7393,48	0,25	0,05
			Desvio	1946,48	2607,11	0,02	0,00
			Relação	35,28	35,26	7,47	3,16
	1,2% de PPA	7	34	8284,87	10103,87	0,18	0,05
			35	7827,50	10216,53	0,23	0,04
			36	4671,80	6126,03	0,24	0,04
Média			7649,07	9540,34	0,20	0,04	
Desvio			2154,36	2377,71	0,04	0,00	
Relação			28,17	24,92	17,97	2,29	
1,5% de cal	0% de PPA	7	46	5698,07	7484,50	0,24	0,05
			47	4515,00	6045,70	0,25	0,05
			48	4175,97	5655,13	0,26	0,05
			Média	4723,75	6362,85	0,26	0,05
			Desvio	513,42	627,98	0,01	0,00
			Relação	10,87	9,87	5,79	1,19
	0,6% de PPA	7	58	4969,58	6433,65	0,23	0,04
			59	5452,33	7231,63	0,25	0,05
			60	4153,80	5580,50	0,26	0,05
			Média	5005,66	6596,58	0,24	0,05
			Desvio	549,27	653,86	0,01	0,00
			Relação	10,97	9,91	5,27	1,91
	1,2% de PPA	7	70	7210,90	9242,50	0,22	0,04
			71	5864,70	7476,57	0,22	0,04
			72	5573,83	7440,80	0,25	0,05
Média			5981,29	7702,45	0,22	0,04	
Desvio			984,25	1148,56	0,02	0,00	
Relação			16,46	14,91	8,65	3,23	
3,0% de cal	0% de PPA	7	82	4689,35	6345,95	0,26	0,05
			83	4090,70	5597,70	0,27	0,05
			84	3432,40	4828,80	0,29	0,05
			Média	4209,84	5756,00	0,27	0,05
			Desvio	736,65	951,07	0,01	0,00
			Relação	17,50	16,52	3,95	1,61
	0,6% de PPA	7	94	4388,33	5764,57	0,24	0,04
			95	4308,60	5751,87	0,25	0,04
			96	3160,17	4300,80	0,27	0,05
			Média	4680,24	6152,15	0,24	0,04
			Desvio	1179,40	1427,65	0,02	0,00
			Relação	25,20	23,21	6,42	0,89
	1,2% de PPA	7	106	7280,85	9172,55	0,21	0,04
			107	6344,23	8120,23	0,22	0,05
			108	4374,93	5663,18	0,23	0,04
Média			5758,43	7343,03	0,22	0,04	
Desvio			1305,31	1557,51	0,01	0,00	
Relação			22,67	21,21	6,27	2,00	

Tabela III. 4. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 10°C.

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	((MRI - MRt)/MRI) - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	4	1	16274,53	18708,27	0,13	0,04
			2	14451,83	16522,43	0,13	0,04
			3	16496,33	19034,57	0,13	0,04
			4	17127,60	19690,80	0,13	0,04
			5	16088,70	18490,20	0,13	0,04
			6	16125,83	18574,53	0,13	0,04
			Média	16094,14	18503,47	0,13	0,04
			Desvio	890,01	1064,28	0,00	0,00
		Relação	5,53	5,75	2,07	2,06	
		7	7	13170,67	15256,93	0,14	0,04
			8	11481,70	13540,10	0,15	0,04
			9	12187,53	14185,97	0,14	0,04
			10	12993,23	15651,63	0,17	0,04
			11	12012,20	14234,57	0,16	0,04
	12		11831,83	14130,53	0,16	0,04	
	Média		12279,53	14499,96	0,15	0,04	
	Desvio		666,39	790,72	0,01	0,00	
	Relação	5,43	5,45	8,26	1,35		
	0,6% de PPA	4	13	11371,90	13139,10	0,13	0,04
			14	12094,53	14154,63	0,15	0,04
			15	17441,67	19819,20	0,12	0,04
			16	17409,87	20044,03	0,13	0,04
			17	16130,30	18359,57	0,12	0,04
			18	15983,07	18530,00	0,14	0,04
			Média	15071,89	17341,09	0,13	0,04
			Desvio	2667,85	2956,62	0,01	0,00
		Relação	17,70	17,05	7,41	0,97	
		7	19	12699,87	14710,27	0,14	0,04
			20	12547,63	14564,47	0,14	0,04
			21	14522,20	16527,43	0,12	0,04
			22	13799,57	15820,40	0,13	0,04
			23	13325,33	15300,03	0,13	0,04
	24		13256,70	15435,43	0,14	0,04	
	Média		13358,55	15393,01	0,13	0,04	
	Desvio		728,22	725,62	0,01	0,00	
	Relação	5,45	4,71	5,72	0,62		
1,2% de PPA	4	25	11349,00	12719,90	0,11	0,04	
		26	17959,73	20086,20	0,11	0,04	
		27	17756,57	20566,20	0,14	0,04	
		28	15861,20	18073,97	0,12	0,04	
		29	16067,50	17961,00	0,11	0,04	
		30	16733,50	18863,77	0,11	0,04	
		Média	15954,58	18045,17	0,12	0,04	
		Desvio	2412,77	2812,75	0,01	0,00	
	Relação	15,12	15,59	10,66	2,79		
	7	31	16290,47	18474,90	0,12	0,04	
		32	10987,23	12691,70	0,13	0,04	
		33	16433,83	18256,33	0,10	0,04	
		34	17524,20	19178,80	0,09	0,04	
		35	16423,83	18785,47	0,13	0,04	
36		19917,93	22184,93	0,10	0,04		
Média		16262,92	18262,02	0,11	0,04		
Desvio		2927,07	3084,72	0,02	0,00		
Relação	18,00	16,89	16,23	1,14			

Continua...

Continuação da Tabela III.4

Aditivo	Modificadç	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	((MRi - MRt)/MRi) - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	16588,30	19392,03	0,14	0,04
			38	13368,93	15076,43	0,11	0,04
			39	15310,13	17733,10	0,14	0,04
			40	14677,73	16948,03	0,13	0,04
			41	19855,90	22056,57	0,10	0,04
			42	16532,77	18818,33	0,12	0,04
			Média	16055,63	18337,42	0,12	0,04
			Desvio	2219,29	2370,87	0,02	0,00
		Relação	13,82	12,93	13,31	1,33	
		7	43	13653,83	15848,37	0,14	0,04
			44	14503,23	16413,43	0,12	0,04
			45	15508,63	18357,90	0,16	0,04
			46	13752,47	15980,90	0,14	0,04
			47	13894,73	16249,10	0,14	0,04
	48		14799,10	16890,93	0,12	0,04	
	Média		14352,00	16623,44	0,14	0,04	
	Desvio		723,40	924,96	0,01	0,00	
	Relação	5,04	5,56	10,34	1,13		
	0,6% de PPA	4	49	11706,30	13417,00	0,13	0,04
			50	15172,03	17231,07	0,12	0,04
			51	13778,83	16151,50	0,15	0,04
			52	17820,33	21351,60	0,17	0,04
			53	16283,97	19047,27	0,14	0,04
			54	15118,77	17761,27	0,15	0,04
			Média	14980,04	17493,28	0,14	0,04
			Desvio	2096,85	2678,00	0,02	0,00
		Relação	14,00	15,31	11,55	2,28	
		7	55	14138,53	16600,37	0,15	0,04
			56	12855,93	15275,30	0,16	0,04
			57	12533,60	14789,53	0,15	0,04
			58	12819,93	14984,37	0,14	0,04
			59	12394,73	14665,20	0,15	0,04
60	13709,97		16300,83	0,16	0,04		
Média	13075,45		15435,93	0,15	0,04		
Desvio	693,28		817,99	0,01	0,00		
Relação	5,30	5,30	3,77	1,69			
1,2% de PPA	4	61	11593,57	13293,43	0,13	0,04	
		62	15581,33	17885,80	0,13	0,04	
		63	16908,17	19274,77	0,12	0,04	
		64	16396,87	18618,47	0,12	0,04	
		65	16106,57	18599,07	0,13	0,04	
		66	14334,37	16405,37	0,13	0,04	
		Média	15153,48	17346,15	0,13	0,04	
		Desvio	1952,45	2214,00	0,01	0,00	
	Relação	12,88	12,76	4,02	2,16		
	7	67	15194,73	17884,70	0,15	0,04	
		68	12911,40	15026,43	0,14	0,04	
		69	15322,93	17455,83	0,12	0,04	
		70	14825,33	17053,43	0,13	0,04	
		71	12244,73	14473,43	0,15	0,04	
72		13633,30	16070,27	0,15	0,04		
Média		14022,07	16327,35	0,14	0,04		
Desvio		1285,01	1372,70	0,01	0,00		
Relação	9,16	8,41	9,11	3,39			

Continua...

Continuação da Tabela III.4

<i>Aditivo</i>	<i>Modificad</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>CP n°</i>	<i>Mod. Res. Total - NCHRP</i>	<i>Mod. Res. Instant. - NCHRP</i>	<i>((MRi - MRt)/MRi) - NCHRP</i>	<i>Atraso Médio</i>
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	13420,53	15750,47	0,15	0,04
			74	16231,50	18691,43	0,13	0,04
			75	13993,27	16176,63	0,13	0,04
			76	13866,57	15664,73	0,11	0,04
			77	13586,60	16015,07	0,15	0,04
			78	16587,03	19357,70	0,14	0,04
			Média	14614,25	16942,67	0,14	0,04
			Desvio	1409,47	1636,60	0,01	0,00
		Relação	9,64	9,66	9,76	2,22	
		7	79	16235,83	18623,60	0,13	0,04
			80	11712,10	14068,97	0,17	0,04
			81	13160,83	15392,70	0,15	0,04
			82	12268,10	14485,77	0,15	0,04
			83	12305,93	14636,17	0,16	0,04
	84		10991,27	13157,47	0,16	0,04	
	Média		12779,01	15060,78	0,15	0,04	
	Desvio		1839,27	1893,20	0,01	0,00	
	Relação	14,39	12,57	9,55	1,58		
	0,6% de PPA	4	85	14839,13	17353,63	0,14	0,04
			86	14085,43	16071,03	0,12	0,04
			87	13801,90	15806,63	0,13	0,04
			88	13829,40	16338,70	0,15	0,04
			89	13716,80	16055,10	0,15	0,04
			90	14370,23	16609,33	0,13	0,04
			Média	14107,15	16372,41	0,14	0,04
			Desvio	430,85	553,48	0,01	0,00
			Relação	3,05	3,38	8,74	1,40
		7	91	14628,70	17241,73	0,15	0,04
			92	11691,70	13870,67	0,16	0,04
			93	16039,10	18281,40	0,12	0,04
			94	13030,17	15487,50	0,16	0,04
			95	13988,60	16668,27	0,16	0,04
			96	13002,43	15390,50	0,16	0,04
			Média	13730,12	16156,68	0,15	0,04
			Desvio	1508,66	1562,96	0,01	0,00
			Relação	10,99	9,67	9,48	2,97
1,2% de PPA	4	97	11006,97	12486,67	0,12	0,04	
		98	15830,03	17613,43	0,10	0,04	
		99	16574,43	19071,83	0,13	0,04	
		100	19417,77	22746,57	0,15	0,04	
		101	20465,35	22808,10	0,10	0,04	
		102	18318,73	20799,13	0,12	0,04	
		Média	16935,55	19254,29	0,12	0,04	
		Desvio	3377,42	3892,01	0,02	0,00	
		Relação	19,94	20,21	14,23	1,06	
	7	103	13708,10	15462,90	0,11	0,04	
		104	13482,90	15748,60	0,14	0,04	
		105	14712,43	17001,57	0,13	0,04	
		106	14353,20	16537,97	0,13	0,04	
		107	14982,20	17082,73	0,12	0,04	
		108	13532,60	15735,23	0,14	0,04	
		Média	14128,57	16261,50	0,13	0,04	
		Desvio	643,26	703,75	0,01	0,00	
		Relação	4,55	4,33	8,58	1,21	

***ANEXO IV – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA
DESCARTANDO OS FORA DA MÉDIA \pm UM DESVIO
PADRÃO.***

Tabela IV. 1. Módulo de Resiliência Total e Instantânea para todos os fatores a 40°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.

<i>Aditivo</i>	<i>Modificad</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>CP n°</i>	<i>Mod. Res. Total - NCHRP</i>	<i>Mod. Res. Instant. - NCHRP</i>	<i>((MRi - MRt)/MRi) - NCHRP</i>	<i>Atraso Médio</i>
0% de cal	0% de PPA	7	2	1061,90	1481,37	0,28	0,05
			3	1105,50	1509,20	0,27	0,05
			4	961,77	1280,87	0,25	0,05
			5	893,57	1197,20	0,25	0,05
			6	1030,00	1375,20	0,25	0,05
			Média	1010,55	1368,77	0,26	0,05
			Desvio	83,81	131,91	0,01	0,00
			Relação	8,29	9,64	5,38	0,48
		7	7	928,03	1201,37	0,23	0,05
			8	859,53	1096,90	0,22	0,05
			10	888,85	1139,35	0,22	0,05
			11	769,05	987,95	0,22	0,05
			12	1035,20	1201,05	0,14	0,05
			Média	896,13	1125,32	0,20	0,05
	Desvio		97,34	88,59	0,04	0,00	
	Relação	10,86	7,87	18,25	1,59		
	0,6% de PPA	4	13	2412,05	3156,90	0,24	0,05
			14	2072,70	2679,55	0,23	0,05
			16	1810,90	2335,10	0,22	0,05
			17	2204,30	2844,20	0,23	0,05
			18	1500,45	1941,25	0,23	0,05
			Média	2000,08	2591,40	0,23	0,05
			Desvio	354,30	469,00	0,00	0,00
		Relação	17,71	18,10	2,04	2,01	
		7	19	1256,15	1566,85	0,20	0,05
			20	1344,70	1636,10	0,18	0,05
			22	2020,40	2681,15	0,25	0,05
			23	1557,15	1925,10	0,19	0,05
24			1226,80	1640,00	0,25	0,05	
Média			1481,04	1889,84	0,21	0,05	
Desvio	328,06		463,29	0,03	0,00		
Relação	22,15	24,51	15,85	1,75			
1,2% de PPA	4	25	2678,65	3292,80	0,19	0,04	
		26	2131,35	2788,85	0,24	0,04	
		27	2695,35	3383,50	0,20	0,04	
		28	2931,65	3615,75	0,19	0,04	
		29	3097,05	3873,05	0,20	0,05	
		Média	2706,81	3390,79	0,20	0,04	
		Desvio	365,69	404,71	0,02	0,00	
	Relação	13,51	11,94	9,52	2,60		
	7	31	1954,70	2460,10	0,21	0,05	
		32	1602,10	2015,95	0,21	0,05	
		34	2020,50	2571,15	0,21	0,04	
		36	1863,50	2412,60	0,23	0,05	
		Média	1860,20	2364,95	0,21	0,05	
		Desvio	183,71	241,97	0,01	0,00	
Relação		9,88	10,23	4,87	4,73		

Continua...

Continuação da Tabela IV.1

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRi - MRt)/MRi)$ - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	1509,60	2108,45	0,28	0,05
			38	1275,35	1797,95	0,29	0,05
			39	1279,15	1739,70	0,26	0,05
			40	1159,20	1636,70	0,29	0,05
			42	1541,90	2116,00	0,27	0,05
			Média	1353,04	1879,76	0,28	0,05
			Desvio	165,26	219,94	0,01	0,00
		Relação	12,21	11,70	4,27	1,13	
		7	43	1032,45	1380,15	0,25	0,05
			44	1141,40	1539,45	0,26	0,05
			45	1417,40	1909,95	0,26	0,05
			46	1312,75	1744,00	0,25	0,05
			48	1467,45	1976,55	0,26	0,05
			Média	1274,29	1710,02	0,25	0,05
	Desvio		184,00	250,04	0,00	0,00	
	Relação	14,44	14,62	1,94	1,03		
	0,6% de PPA	4	49	1212,55	1620,10	0,25	0,05
			50	1198,90	1626,95	0,26	0,05
			51	1151,90	1495,25	0,23	0,05
			53	1615,40	2215,10	0,27	0,05
			54	1522,10	2071,20	0,27	0,05
			Média	1340,17	1805,72	0,26	0,05
			Desvio	212,45	316,57	0,02	0,00
		Relação	15,85	17,53	6,36	1,28	
		7	55	1423,55	1934,75	0,26	0,05
			56	1319,35	1749,80	0,25	0,05
			58	1574,75	2048,65	0,23	0,05
			59	1621,95	2126,40	0,24	0,05
			60	1394,50	1826,35	0,24	0,05
			Média	1466,82	1937,19	0,24	0,05
	Desvio		127,05	154,62	0,01	0,00	
	Relação	8,66	7,98	5,34	2,49		
1,2% de PPA	4	61	1893,65	2350,45	0,19	0,05	
		62	1683,85	2222,90	0,24	0,05	
		63	1955,60	2498,65	0,22	0,05	
		65	2038,55	2698,30	0,24	0,05	
		66	1898,00	2553,75	0,26	0,05	
		Média	1893,93	2464,81	0,23	0,05	
		Desvio	131,21	183,83	0,03	0,00	
	Relação	6,93	7,46	10,84	0,97		
	7	67	1890,25	2545,00	0,26	0,05	
		68	1349,45	1858,30	0,27	0,05	
		70	1922,45	2444,75	0,21	0,05	
		71	1761,45	2314,05	0,24	0,05	
		72	1730,35	2261,95	0,24	0,05	
		Média	1730,79	2284,81	0,24	0,05	
Desvio		228,32	262,95	0,02	0,00		
Relação	13,19	11,51	9,38	1,77			

Continua...

Continuação da Tabela IV.1

<i>Aditivo</i>	<i>Modificad</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>CP n°</i>	<i>Mod. Res. Total - NCHRP</i>	<i>Mod. Res. Instant. - NCHRP</i>	<i>((MRI - MRt)/MRI) - NCHRP</i>	<i>Atraso Médio</i>
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	1350,15	1892,25	0,29	0,05
			74	1079,20	1475,15	0,27	0,05
			75	1419,65	1909,60	0,26	0,05
			77	1105,05	1431,85	0,23	0,05
			78	1559,30	1934,75	0,19	0,05
			Média	1302,67	1728,72	0,25	0,05
			Desvio	206,63	252,16	0,04	0,00
			Relação	15,86	14,59	14,70	1,96
		7	79	1039,60	1339,20	0,22	0,05
			80	1127,35	1460,60	0,23	0,05
			81	1079,90	1382,30	0,22	0,05
			82	1076,40	1384,85	0,22	0,05
			83	932,65	1267,00	0,26	0,05
			Média	1051,18	1366,79	0,23	0,05
	Desvio		73,22	70,86	0,02	0,00	
	Relação		6,97	5,18	7,97	1,73	
	0,6% de PPA	4	86	1497,35	2061,80	0,27	0,05
			87	1625,85	2218,40	0,27	0,05
			88	1294,95	1659,65	0,22	0,05
			89	1256,05	1713,30	0,27	0,05
			90	1267,25	1720,00	0,26	0,05
			Média	1388,29	1874,63	0,26	0,05
			Desvio	165,21	249,68	0,02	0,00
			Relação	11,90	13,32	8,45	0,88
		7	92	1389,95	1943,40	0,28	0,05
			93	1493,25	1939,50	0,23	0,05
			94	1481,00	1994,20	0,26	0,05
			95	1464,90	2003,60	0,27	0,05
96			1475,60	2028,30	0,27	0,05	
Média			1460,94	1981,80	0,26	0,05	
Desvio	40,98		38,91	0,02	0,00		
Relação	2,80		1,96	7,88	2,41		
1,2% de PPA	4	97	2723,25	3614,80	0,25	0,05	
		98	2223,80	2926,65	0,24	0,05	
		99	2529,25	3211,15	0,21	0,05	
		100	2277,55	3104,80	0,27	0,05	
		101	2433,25	3194,55	0,24	0,05	
		Média	2437,42	3210,39	0,24	0,05	
		Desvio	200,84	252,71	0,02	0,00	
		Relação	8,24	7,87	8,06	1,41	
	7	103	1306,55	1688,15	0,23	0,05	
		104	1436,85	1926,75	0,25	0,05	
		105	2137,50	2866,50	0,25	0,05	
		107	1341,15	1828,25	0,27	0,05	
		108	1697,85	2510,10	0,32	0,05	
		Média	1583,98	2163,95	0,26	0,05	
Desvio		345,30	502,18	0,04	0,00		
Relação		21,80	23,21	13,59	5,80		

Tabela IV. 2. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 25°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRT)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	4	1	5745,73	7763,03	0,26	0,05
			2	5683,53	7837,20	0,27	0,05
			5	4426,57	6170,90	0,28	0,05
			6	5397,60	7286,83	0,26	0,05
			Média	5313,36	7264,49	0,27	0,05
			Desvio	610,32	768,76	0,01	0,00
			Relação	11,49	10,58	4,26	2,13
		7	7	3352,37	4677,63	0,28	0,05
			8	3346,20	4600,67	0,27	0,05
			10	3252,67	4436,43	0,27	0,05
			11	3457,77	4687,03	0,26	0,05
			Média	3352,25	4600,44	0,27	0,05
			Desvio	83,84	115,98	0,01	0,00
			Relação	2,50	2,52	3,35	1,22
	0,6% de PPA	4	14	4693,97	6047,73	0,22	0,04
			15	4912,17	6254,07	0,21	0,04
			16	5990,35	7632,60	0,22	0,04
			18	5807,60	7610,80	0,24	0,05
			Média	5351,02	6886,30	0,22	0,04
			Desvio	643,30	853,38	0,01	0,00
			Relação	12,02	12,39	4,70	2,36
		7	19	5881,88	8312,93	0,29	0,05
			20	4516,17	6057,13	0,25	0,05
			21	9318,33	12339,63	0,25	0,05
			22	4415,65	5757,90	0,23	0,04
			23	4411,27	5829,10	0,24	0,05
			24	4556,03	6064,17	0,25	0,05
			Média	5516,55	7393,48	0,25	0,05
	Desvio	1946,48	2607,11	0,02	0,00		
	Relação	35,28	35,26	7,47	3,16		
	1,2% de PPA	4	25	10065,43	11943,30	0,16	0,04
			26	4212,78	5151,03	0,18	0,04
			27	8884,54	10868,81	0,18	0,04
			28	8483,80	10648,83	0,20	0,04
			29	9947,00	11943,33	0,17	0,05
			30	8568,13	10742,80	0,20	0,04
Média			8360,28	10216,35	0,18	0,04	
Desvio			2142,91	2549,99	0,02	0,00	
Relação			25,63	24,96	10,11	3,32	
7		31	9244,57	11577,10	0,20	0,04	
		32	5566,47	7192,93	0,23	0,04	
		33	10299,23	12025,60	0,14	0,04	
		34	8284,87	10103,87	0,18	0,05	
		35	7827,50	10216,53	0,23	0,04	
		36	4671,80	6126,03	0,24	0,04	
		Média	7649,07	9540,34	0,20	0,04	
		Desvio	2154,36	2377,71	0,04	0,00	
		Relação	28,17	24,92	17,97	2,29	

Continua...

Continuação da Tabela IV.2

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP nº	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRt)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	5024,67	6480,87	0,22	0,04
			38	5638,20	7603,80	0,26	0,05
			39	5191,33	6832,40	0,24	0,04
			40	5215,83	6730,73	0,22	0,04
			42	4846,33	6362,17	0,24	0,05
			Média	5183,27	6801,99	0,24	0,04
			Desvio	294,44	486,18	0,01	0,00
			Relação	5,68	7,15	5,85	1,70
		7	44	4690,40	6465,43	0,27	0,05
			45	4572,67	6060,90	0,25	0,05
			47	4515,00	6045,70	0,25	0,05
			48	4175,97	5655,13	0,26	0,05
			Média	4488,51	6056,79	0,26	0,05
			Desvio	220,78	330,89	0,01	0,00
	Relação	4,92	5,46	4,80	1,51		
	0,6% de PPA	4	49	5460,80	7189,87	0,24	0,04
			50	6251,97	8260,17	0,24	0,05
			51	5090,47	6696,37	0,24	0,04
			52	8192,35	10539,03	0,22	0,04
			53	5703,93	7601,40	0,25	0,05
			54	5268,00	6967,48	0,24	0,04
			Média	5994,58	7875,72	0,24	0,04
			Desvio	1149,89	1414,38	0,01	0,00
		Relação	19,18	17,96	3,80	1,60	
		7	55	4773,40	6385,07	0,25	0,05
			56	4954,33	6558,80	0,24	0,05
			58	4969,58	6433,65	0,23	0,04
			59	5452,33	7231,63	0,25	0,05
			Média	5037,41	6652,29	0,24	0,05
			Desvio	290,61	393,10	0,01	0,00
Relação		5,77	5,91	4,26	1,63		
1,2% de PPA	4	61	6472,47	8353,13	0,22	0,04	
		62	7040,40	9238,90	0,24	0,04	
		63	6176,70	8064,27	0,23	0,04	
		64	6225,70	7913,50	0,21	0,04	
		66	6734,58	8832,80	0,24	0,04	
		Média	6529,97	8480,52	0,23	0,04	
		Desvio	361,62	550,06	0,01	0,00	
		Relação	5,54	6,49	4,53	1,47	
	7	67	6037,15	7732,60	0,22	0,04	
		69	6796,24	8487,34	0,20	0,04	
		71	5864,70	7476,57	0,22	0,04	
		72	5573,83	7440,80	0,25	0,05	
		Média	6067,98	7784,33	0,22	0,04	
		Desvio	521,80	486,36	0,02	0,00	
Relação	8,60	6,25	9,78	3,86			

Continua...

Continuação da Tabela IV.2

Aditivo	Modificadoc	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRt)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	5479,43	7426,73	0,26	0,05
			74	5032,27	6824,50	0,26	0,05
			75	5598,73	7418,10	0,25	0,05
			78	6837,73	9157,07	0,25	0,05
			Média	5737,04	7706,60	0,26	0,05
			Desvio	773,24	1007,23	0,01	0,00
			Relação	13,48	13,07	3,23	1,03
		7	79	3792,40	5210,93	0,27	0,05
			80	3807,87	5169,20	0,26	0,05
			82	4689,35	6345,95	0,26	0,05
			83	4090,70	5597,70	0,27	0,05
			Média	4095,08	5580,95	0,27	0,05
			Desvio	419,24	545,27	0,01	0,00
			Relação	10,24	9,77	1,93	1,63
	0,6% de PPA	4	85	5765,00	7454,93	0,23	0,05
			86	5758,07	7612,53	0,24	0,05
			87	5379,93	6971,33	0,23	0,04
			88	5196,17	6815,63	0,24	0,04
			89	5024,67	6463,13	0,22	0,04
			90	5953,00	7707,10	0,23	0,04
			Média	5512,81	7170,78	0,23	0,04
		Desvio	367,08	496,02	0,01	0,00	
		Relação	6,66	6,92	3,34	1,31	
		7	91	5329,45	6988,35	0,24	0,05
			92	4259,53	5616,93	0,24	0,05
			94	4388,33	5764,57	0,24	0,04
			95	4308,60	5751,87	0,25	0,04
			Média	4571,48	6030,43	0,24	0,04
	Desvio		508,09	642,10	0,01	0,00	
	Relação		11,11	10,65	2,51	0,86	
	1,2% de PPA	4	99	5017,90	6346,67	0,21	0,04
			100	4952,50	6209,25	0,20	0,04
			101	7042,35	8551,40	0,18	0,04
			102	5659,57	7316,30	0,23	0,04
			Média	5668,08	7105,90	0,20	0,04
			Desvio	970,13	1082,31	0,02	0,00
Relação			17,12	15,23	10,22	1,78	
7		103	4857,83	6204,93	0,22	0,04	
		104	4597,87	6027,63	0,24	0,04	
		107	6344,23	8120,23	0,22	0,05	
		108	4374,93	5663,18	0,23	0,04	
		Média	5043,71	6503,99	0,22	0,04	
		Desvio	889,18	1100,84	0,01	0,00	
		Relação	17,63	16,93	4,19	1,61	

Tabela IV. 3. Módulo de Resiliência para todos os fatores a 10°C, descartando ensaios fora de um desvio padrão em relação à média.

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRT)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
0% de cal	0% de PPA	4	1	16274,53	18708,27	0,13	0,04
			3	16496,33	19034,57	0,13	0,04
			5	16088,70	18490,20	0,13	0,04
			6	16125,83	18574,53	0,13	0,04
			Média	16094,14	18503,47	0,13	0,04
			Desvio	890,01	1064,28	0,00	0,00
			Relação	5,53	5,75	2,07	2,06
		7	7	13170,67	15256,93	0,14	0,04
			8	11481,70	13540,10	0,15	0,04
			9	12187,53	14185,97	0,14	0,04
			10	12993,23	15651,63	0,17	0,04
			11	12012,20	14234,57	0,16	0,04
			12	11831,83	14130,53	0,16	0,04
			Média	12279,53	14499,96	0,15	0,04
	Desvio	666,39	790,72	0,01	0,00		
	Relação	5,43	5,45	8,26	1,35		
	0,6% de PPA	4	15	17441,67	19819,20	0,12	0,04
			16	17409,87	20044,03	0,13	0,04
			17	16130,30	18359,57	0,12	0,04
			18	15983,07	18530,00	0,14	0,04
			Média	15071,89	17341,09	0,13	0,04
			Desvio	2667,85	2956,62	0,01	0,00
			Relação	17,70	17,05	7,41	0,97
		7	19	12699,87	14710,27	0,14	0,04
			20	12547,63	14564,47	0,14	0,04
			22	13799,57	15820,40	0,13	0,04
			23	13325,33	15300,03	0,13	0,04
			24	13256,70	15435,43	0,14	0,04
Média			13358,55	15393,01	0,13	0,04	
Desvio			728,22	725,62	0,01	0,00	
Relação	5,45	4,71	5,72	0,62			
1,2% de PPA	4	26	17959,73	20086,20	0,11	0,04	
		27	17756,57	20566,20	0,14	0,04	
		28	15861,20	18073,97	0,12	0,04	
		29	16067,50	17961,00	0,11	0,04	
		30	16733,50	18863,77	0,11	0,04	
		Média	15954,58	18045,17	0,12	0,04	
		Desvio	2412,77	2812,75	0,01	0,00	
	Relação	15,12	15,59	10,66	2,79		
	7	31	16290,47	18474,90	0,12	0,04	
		33	16433,83	18256,33	0,10	0,04	
		34	17524,20	19178,80	0,09	0,04	
		35	16423,83	18785,47	0,13	0,04	
		36	19917,93	22184,93	0,10	0,04	
		Média	16262,92	18262,02	0,11	0,04	
Desvio		2927,07	3084,72	0,02	0,00		
Relação	18,00	16,89	16,23	1,14			

Continua...

Continuação da Tabela IV.3

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRt)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
1,5% de cal	0% de PPA	4	37	16588,30	19392,03	0,14	0,04
			39	15310,13	17733,10	0,14	0,04
			40	14677,73	16948,03	0,13	0,04
			42	16532,77	18818,33	0,12	0,04
			Média	16055,63	18337,42	0,12	0,04
			Desvio	2219,29	2370,87	0,02	0,00
			Relação	13,82	12,93	13,31	1,33
		7	43	13653,83	15848,37	0,14	0,04
			44	14503,23	16413,43	0,12	0,04
			46	13752,47	15980,90	0,14	0,04
			47	13894,73	16249,10	0,14	0,04
			48	14799,10	16890,93	0,12	0,04
			Média	14352,00	16623,44	0,14	0,04
			Desvio	723,40	924,96	0,01	0,00
	Relação	5,04	5,56	10,34	1,13		
	0,6% de PPA	4	50	15172,03	17231,07	0,12	0,04
			51	13778,83	16151,50	0,15	0,04
			53	16283,97	19047,27	0,14	0,04
			54	15118,77	17761,27	0,15	0,04
			Média	14980,04	17493,28	0,14	0,04
			Desvio	2096,85	2678,00	0,02	0,00
			Relação	14,00	15,31	11,55	2,28
		7	56	12855,93	15275,30	0,16	0,04
			57	12533,60	14789,53	0,15	0,04
			58	12819,93	14984,37	0,14	0,04
			59	12394,73	14665,20	0,15	0,04
			60	13709,97	16300,83	0,16	0,04
			Média	13075,45	15435,93	0,15	0,04
Desvio			693,28	817,99	0,01	0,00	
Relação	5,30	5,30	3,77	1,69			
1,2% de PPA	4	62	15581,33	17885,80	0,13	0,04	
		63	16908,17	19274,77	0,12	0,04	
		64	16396,87	18618,47	0,12	0,04	
		65	16106,57	18599,07	0,13	0,04	
		66	14334,37	16405,37	0,13	0,04	
		Média	15153,48	17346,15	0,13	0,04	
		Desvio	1952,45	2214,00	0,01	0,00	
	Relação	12,88	12,76	4,02	2,16		
	7	67	15194,73	17884,70	0,15	0,04	
		68	12911,40	15026,43	0,14	0,04	
		69	15322,93	17455,83	0,12	0,04	
		70	14825,33	17053,43	0,13	0,04	
		72	13633,30	16070,27	0,15	0,04	
		Média	14022,07	16327,35	0,14	0,04	
Desvio		1285,01	1372,70	0,01	0,00		
Relação	9,16	8,41	9,11	3,39			

Continua...

Continuação da Tabela IV.3

Aditivo	Modificad	Vv (%)	CP n°	Mod. Res. Total - NCHRP	Mod. Res. Instant. - NCHRP	$((MRI - MRt)/MRI)$ - NCHRP	Atraso Médio
3,0% de cal	0% de PPA	4	73	13420,53	15750,47	0,15	0,04
			74	16231,50	18691,43	0,13	0,04
			75	13993,27	16176,63	0,13	0,04
			76	13866,57	15664,73	0,11	0,04
			77	13586,60	16015,07	0,15	0,04
			Média	14614,25	16942,67	0,14	0,04
			Desvio	1409,47	1636,60	0,01	0,00
			Relação	9,64	9,66	9,76	2,22
		7	80	11712,10	14068,97	0,17	0,04
			81	13160,83	15392,70	0,15	0,04
			82	12268,10	14485,77	0,15	0,04
			83	12305,93	14636,17	0,16	0,04
			84	10991,27	13157,47	0,16	0,04
			Média	12779,01	15060,78	0,15	0,04
	Desvio		1839,27	1893,20	0,01	0,00	
	Relação		14,39	12,57	9,55	1,58	
	0,6% de PPA	4	85	14839,13	17353,63	0,14	0,04
			86	14085,43	16071,03	0,12	0,04
			87	13801,90	15806,63	0,13	0,04
			88	13829,40	16338,70	0,15	0,04
			89	13716,80	16055,10	0,15	0,04
			90	14370,23	16609,33	0,13	0,04
			Média	14107,15	16372,41	0,14	0,04
			Desvio	430,85	553,48	0,01	0,00
		Relação	3,05	3,38	8,74	1,40	
		7	91	14628,70	17241,73	0,15	0,04
			94	13030,17	15487,50	0,16	0,04
			95	13988,60	16668,27	0,16	0,04
			96	13002,43	15390,50	0,16	0,04
			Média	13730,12	16156,68	0,15	0,04
	Desvio		1508,66	1562,96	0,01	0,00	
	Relação	10,99	9,67	9,48	2,97		
	1,2% de PPA	4	98	15830,03	17613,43	0,10	0,04
			99	16574,43	19071,83	0,13	0,04
			100	19417,77	22746,57	0,15	0,04
			101	20465,35	22808,10	0,10	0,04
102			18318,73	20799,13	0,12	0,04	
Média			16935,55	19254,29	0,12	0,04	
Desvio			3377,42	3892,01	0,02	0,00	
Relação			19,94	20,21	14,23	1,06	
7		103	13708,10	15462,90	0,11	0,04	
		104	13482,90	15748,60	0,14	0,04	
		105	14712,43	17001,57	0,13	0,04	
		106	14353,20	16537,97	0,13	0,04	
		107	14982,20	17082,73	0,12	0,04	
		108	13532,60	15735,23	0,14	0,04	
Média	14128,57	16261,50	0,13	0,04			
Desvio	643,26	703,75	0,01	0,00			
Relação	4,55	4,33	8,58	1,21			

***ANEXO V – VALORES OBTIDOS PARA RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO.***

Tabela V. 1. Resultados para Resistência à Tração para todos os corpos-de-prova.

<i>Aditivo</i>	<i>Modificador</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>Condicionamento</i>	<i>CP</i>	<i>Gmb (est)</i>	<i>Gmb (corr)</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>F (Kg)</i>	<i>RT (MPa)</i>
Modificador de Adesividade - Cal - 0%	CAP 50/70	4%	Sem Cond.	1	2,328	2,371	65,87	1740	1,65
				2	2,329	2,372	65,84	1733	1,64
				3	2,330	2,376	65,79	1698	1,61
				4	2,329	2,377	65,73	1794	1,70
				5	2,325	2,377	65,96	1838	1,74
				6	2,324	2,367	65,8	1734	1,65
		7%	Com Cond.	7	2,231	2,301	68,68	1286	1,17
				8	2,223	2,286	68,96	1236	1,12
				9	2,224	2,306	68,7	1424	1,29
				10	2,228	2,297	68,63	1297	1,18
				11	2,225	2,283	68,73	1166	1,06
				12	2,228	2,302	68,65	1191	1,08
	CAP 50/70 + 0,6% PPA	4%	Sem Cond.	13	2,325	2,378	65,78	1876	1,78
				14	2,328	2,377	65,63	1683	1,60
				15	2,320	2,371	65,87	1773	1,68
				16	2,330	2,381	65,73	1870	1,78
				17	2,321	2,372	65,83	1907	1,81
				18	2,320	2,371	65,87	1821	1,73
		7%	Com Cond.	19	2,216	2,285	68,96	1275	1,15
				20	2,216	2,279	68,94	1280	1,16
				21	2,217	2,289	68,93	1624	1,47
				22	2,217	2,285	68,91	1525	1,38
				23	2,217	2,292	68,93	1428	1,29
				24	2,217	2,285	68,91	1279	1,16
	CAP 50/70 + 1,2% PPA	4%	Sem Cond.	25	2,337	2,385	65,43	2069	1,97
				26	2,329	2,376	65,66	1979	1,88
				27	2,328	2,373	65,79	2004	1,90
				28	2,320	2,375	66,02	1969	1,86
				29	2,330	2,377	65,69	2127	2,02
				30	2,324	2,380	65,74	2125	2,02
		7%	Com Cond.	31	2,260	2,321	67,62	1751	1,62
				32	2,226	2,289	68,65	1561	1,42
				33	2,228	2,307	68,69	1875	1,70
				34	2,227	2,324	68,72	1779	1,62
				35	2,229	2,370	68,71	1779	1,62
				36	2,227	2,336	68,73	1494	1,36

Continua...

Continuação da Tabela V.1

Aditivo	Modificador	Vv (%)	Condicionamento	CP	Gmb (est)	Gmb (corr)	Altura (mm)	F (Kg)	RT (MPa)	
Modificador de Adesividade - Cal - 1,5%	CAP 50/70	4%	Sem Cond.	37	2,338	2,371	65,36	1559	1,49	
				38	2,330	2,372	65,57	1515	1,44	
				39	2,327	2,376	65,66	1501	1,43	
				40	2,333	2,377	65,5	1480	1,41	
				41	2,326	2,377	65,69	1578	1,50	
				42	2,323	2,367	65,77	1569	1,49	
		7%		43	2,207	2,301	69,24	1166	1,05	
				44	2,217	2,286	68,93	1225	1,11	
				45	2,218	2,306	68,88	1346	1,22	
				Com Cond.	46	2,216	2,297	68,94	1371	1,24
					47	2,217	2,283	68,93	1358	1,23
					48	2,218	2,302	68,9	1313	1,19
	CAP 50/70 + 0,6% PPA	4%	Sem Cond.	49	2,331	2,371	65,55	1523	1,45	
				50	2,314	2,372	66,04	1576	1,49	
				51	2,322	2,376	65,79	1637	1,55	
				52	2,316	2,377	65,97	1732	1,64	
				53	2,305	2,377	66,28	1617	1,52	
				54	2,315	2,367	65,99	1804	1,71	
		7%		55	2,207	2,301	69,22	1069	0,96	
				56	2,209	2,286	69,17	1168	1,05	
				57	2,209	2,306	69,17	1492	1,35	
				Com Cond.	58	2,209	2,297	69,18	1505	1,36
					59	2,208	2,283	69,2	1328	1,20
					60	2,208	2,302	69,19	1141	1,03
	CAP 50/70 + 1,2% PPA	4%	Sem Cond.	61	2,314	2,368	66,03	1950	1,84	
				62	2,305	2,365	66,29	1922	1,81	
				63	2,298	2,362	66,49	1971	1,85	
				64	2,309	2,367	66,18	1820	1,72	
				65	2,322	2,371	65,8	2121	2,01	
				66	2,308	2,363	66,21	2143	2,02	
		7%		67	2,218	2,301	68,89	1467	1,33	
				68	2,216	2,286	68,95	1313	1,19	
				69	2,215	2,294	68,97	1157	1,05	
				Com Cond.	70	2,215	2,295	68,98	1664	1,51
					71	2,217	2,285	68,93	1592	1,44
					72	2,215	2,285	68,98	1664	1,51

Continua...

Continuação da Tabela V.1

<i>Aditivo</i>	<i>Modificador</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>Condicionamento</i>	<i>CP</i>	<i>Gmb (est)</i>	<i>Gmb (corr)</i>	<i>Altura (mm)</i>	<i>F (Kg)</i>	<i>RT (MPa)</i>
Modificador de Adesividade - Cal - 3,0%	CAP 50/70	4%	Sem Cond.	73	2,321	2,370	65,82	1496	1,42
				74	2,301	2,366	66,4	1430	1,34
				75	2,302	2,359	66,36	1564	1,47
				76	2,313	2,358	66,06	1573	1,49
				77	2,301	2,359	66,4	1543	1,45
				78	2,310	2,364	66,13	1394	1,32
		7%	Com Cond.	79	2,209	2,284	69,17	1271	1,15
				80	2,209	2,279	69,18	1132	1,02
				81	2,207	2,274	69,23	1245	1,12
				82	2,208	2,293	69,2	1294	1,17
				83	2,209	2,277	69,17	1229	1,11
				84	2,207	2,293	69,22	1255	1,13
	CAP 50/70 + 0,6% PPA	4%	Sem Cond.	85	2,311	2,357	66,1	1655	1,56
				86	2,312	2,361	66,08	1749	1,65
				87	2,303	2,358	66,33	1766	1,66
				88	2,302	2,354	66,37	1716	1,61
				89	2,309	2,358	66,18	1921	1,81
				90	2,308	2,360	66,21	1913	1,80
		7%	Com Cond.	91	2,208	2,291	69,19	1299	1,17
				92	2,206	2,299	69,25	1307	1,18
				93	2,209	2,278	69,17	1388	1,25
				94	2,209	2,276	69,17	1420	1,28
				95	2,207	2,275	69,23	1309	1,18
				96	2,207	2,275	69,23	1313	1,18
	CAP 50/70 + 1,2% PPA	4%	Sem Cond.	97	2,305	2,354	66,28	1759	1,66
				98	2,308	2,357	66,21	1932	1,82
				99	2,287	2,349	66,82	1807	1,69
				100	2,301	2,351	66,41	1911	1,80
				101	2,300	2,353	66,43	1920	1,81
				102	2,290	2,350	66,73	1757	1,64
		7%	Com Cond.	103	2,210	2,258	69,13	1297	1,17
				104	2,207	2,276	69,23	1235	1,11
				105	2,208	2,294	69,2	1630	1,47
				106	2,207	2,279	69,23	1504	1,36
				107	2,206	2,284	69,25	1356	1,22
				108	2,207	2,298	69,23	1342	1,21

