MÔNICA GRASSI NOGUEIRA

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CAMPO DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM CAP 30-45 E COM CAP 50-70 PARA
REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS

São Paulo
2008

MÔNICA GRASSI NOGUEIRA

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CAMPO DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM CAP 30-45 E COM CAP 50-70 PARA
REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
Julho de 2.008

MÔNICA GRASSI NOGUEIRA

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM CAMPO DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS COM CAP 30-45 E COM CAP 50-70 PARA
REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo
Julho de 2.008

FICHA CATALOGRÁFICA

Nogueira, Mônica Grassi

**Comparação do comportamento em campo de concretos
asfálticos com cap 30-45 e com cap 50-70 para revestimentos de
pavimentos / M.G. Nogueira. -- São Paulo, 2008.**

168 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.**

**1.Infra-estrutura de transportes 2.Pavimentação 3.Asfalto
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Transportes II.t.**

*Ao meu marido Gabriel.
Aos meus pais, exemplos de vida
e de amor pela profissão,
Roberto e Maria Celina.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus. Pela vida e por ser, em muitos momentos, as duas pegadas na areia.

Em especial ao meu marido e sempre companheiro Gabriel. Pela presença constante, pelo incansável incentivo principalmente nas horas difíceis e pela paciência sem fim.

Aos meus pais Roberto e Maria Celina. Pelo amor incondicional, por todo o sacrifício que fizeram, por tudo o que me deram, mas principalmente pelo exemplo e incentivo, sempre.

Às minhas irmãs Estela e Bianca. Por serem minhas amigas, companheiras e proporcionarem momentos de alegria e descontração sempre que eu precisei.

Aos meus avós Anna Cecília, Oswaldo, Arany e Lázaro (*in memorian*). Pela torcida e pelas orações.

Aos meus sogros Lucia e Kleber. Pelo apoio e pela compreensão nos momentos de ausência.

De maneira especial à minha querida orientadora, Professora Liedi. Pelas portas abertas no início deste trabalho, pela paciência, carinho e atenção desprendidos durante toda a jornada, por acreditar em mim quando eu não acreditei e por me fazer confiar que este dia chegaria.

À Concessionária NovaDutra do grupo CCR. Pela seção dos dados e total apoio durante a execução do trabalho, em especial aos colegas Eng^a Valéria Faria e Vagner Alba do Centro de Pesquisas Rodoviárias da Engellog.

À Dynatest Engenharia Ltda., em especial ao Eng^o André Vale pelos dados e pelo apoio.

Ao Prof Carlos Suzuki e ao Prof. João Virgílio Merighi. Pelas críticas e sugestões no exame de qualificação.

À equipe do Laboratório de Pavimentação, principalmente à querida Diomária Santos e ao Professor Edson de Moura pela enorme disponibilidade.

A toda a equipe da Roma Engenharia em especial aos Eng^{os} Camilo, Djalma, Giovana e Victor. Pelo apoio nos períodos de ausência e pela sempre disponibilidade em ajudar no que fosse preciso.

A todos os meus amigos e familiares. Obrigada pela paciência nestes anos quando minha presença foi mais rara e por torcerem sempre por esta conquista.

Muito obrigada a todos vocês!

RESUMO

No Brasil é crescente o número de veículos pesados que transitam pelas rodovias do país. Este fato, somado com as altas temperaturas atuantes, tem causado a ocorrência de defeitos precoces nas camadas de revestimento dos pavimentos asfálticos. Em função disso têm sido estudadas alternativas às misturas asfálticas usinadas a quente convencionalmente empregadas como revestimentos de pavimentos em rodovias com alto volume de tráfego. Uma das alternativas que vêm sendo estudadas é a substituição do CAP 50-70, ligante asfáltico mais utilizado no país, por CAP 30-45, devido à maior consistência e viscosidade deste último. Este trabalho compara o comportamento mecânico de misturas asfálticas usinadas com estes dois diferentes ligantes, para fins de utilização em vias de tráfego pesado, e, além disso, analisa as diferenças de desempenho entre misturas projetadas por duas metodologias de dosagem de misturas asfálticas distintas, Marshall e Superpave. Para esta comparação foram analisados os resultados de um estudo de caso realizado na Rodovia Presidente Dutra, onde foram construídos três trechos experimentais com diferentes materiais no revestimento: concreto asfáltico usinado com CAP 50-70 e dosado pelo método Marshall, a mesma mistura dosada pelo método Superpave, e concreto asfáltico com 30-45 dosado pelo método Marshall. Estes três trechos foram submetidos ao ensaio de simulação de tráfego em verdadeira grandeza pelo equipamento HVS. Foram analisados resultados de pesquisa desenvolvida em laboratório e em campo visando a determinação de benefícios e limitações de cada alternativa empregada. Os resultados das análises mostraram que, para as condições estudadas, o concreto asfáltico com CAP 50-70 Superpave apresentou um baixo teor de ligante em sua composição, o que acabou causando problemas em seu comportamento como reflexão de trincas existentes na camada subjacente, maior trilha de rodas em comparação aos outros dois, embora ainda em valor compatível ao limite aceitável. O concreto asfáltico com CAP 50-70 Marshall apresentou um desempenho satisfatório, mas já mostrava ocorrência de alguns defeitos ao final do ensaio como trincamentos e início de trilha de rodas. O concreto asfáltico com CAP 30-45 Marshall apresentou um bom comportamento em campo, com a menor trilha de rodas medida e sem trincamento aparente, sendo recomendada sua utilização em rodovias com tráfego pesado, em condições similares à estudada, onde as deflexões são muito baixas devido à presença de base cimentada. O simulador de tráfego em verdadeira grandeza mostrou-se uma ferramenta eficiente na previsão de comportamento e desempenho de estruturas de pavimento.

Palavras-chave: Infra-estrutura de transportes. Pavimentação. Asfalto.

ABSTRACT

In the last years, the volume of commercial heavy vehicles that transit through Brazilian highways is increasing. In addition, pavement wearing courses are exposed to the influence of high temperatures, that cause precocious asphalt layer distresses. Therefore, asphalt mixture alternatives to the high traffic highways have been studied. One of the possibilities is the substitution of CAP 50-70, the most used asphalt binder in the country, for CAP 30-45, due to its higher consistency and viscosity. This thesis compares the mechanical behavior of asphalt concrete using CAP 50-70 with the mixture employing CAP 30-45, concerning the wearing courses for high traffic highways. It is also analysed the differences of mechanical results using Marshall and Superpave mix design methods. The performance of wearing courses was analyzed based on the results obtained from a study developed at the Presidente Dutra Highway, where three experimental trails were built using different asphalt concretes: a CAP 50-70 mix designed according Marshall, a CAP 50-70 mix designed by Superpave and a CAP 30-45 mix designed by Marshall Method. The three experimental trails were submitted to a full scale traffic simulation test, using the HVS equipment. The results of this research, developed at laboratories and field, were analyzed to determine the benefits and limitations of each of the alternatives. The analyses showed that the mixture using the CAP 50-70 Superpave presented a lower asphalt content, what caused performance problems such as reflective cracks and rutting. The AC using CAP 50-70 Marshall presented a satisfactory performance, however some distresses at the end of the simulation test were occurred. The mixture using CAP 30-45 Marshall presented a good field performance, and its use can be recommended at the high traffic highways, since the structure provides the necessary stiffness and low deflections. The full scale traffic simulator proved to be an efficient tool in order to preview the pavement structure behavior and field performance.

Keywords: Transportation infra-structure. Paving. Asphalt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Distribuição de rodovias pavimentadas e não pavimentadas no Brasil em 2005	19
Figura 2:	Localização das Refinarias de Asfalto no Brasil	28
Figura 3:	Produção de CAP no Brasil	29
Figura 4:	Descrição do ensaio de viscosidade – Viscosímetro de placas paralelas	34
Figura 5:	Ilustração do equipamento utilizado no ensaio de reômetro de fluência em viga	46
Figura 6:	Ilustração do equipamento utilizado no ensaio de reômetro de cisalhamento dinâmico	47
Figura 7:	Ilustração do ensaio de tração direta	48
Figura 8:	Ilustração do equipamento viscosímetro rotacional	49
Figura 9:	Curva granulométrica e divisão de faixas de agregados	55
Figura 10:	Prensa para ensaio Marshall	65
Figura 11:	Gráficos de resultados do ensaio de dosagem Marshall	66
Figura 12:	Gráfico de estabilidade e durabilidade em função do teor de asfalto	68
Figura 13:	Testes exigidos nos Níveis 2 e 3 do método Superpave	70
Figura 14:	Fluxograma do método de dimensionamento de misturas Superpave	71
Figura 15:	Compactador Giratório	73
Figura 16:	Curva de densificação obtida do Compactador Giratório	73
Figura 17:	Mesa compactadora do Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo	78
Figura 18:	Simulador LCPC do Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo	79
Figura 19:	Simulador móvel HVS	81
Figura 20:	Simulador móvel HVS	81
Figura 21:	Esquema do ensaio de compressão diametral	85
Figura 22:	Equipamentos para ensaio de compressão diametral de carga repetida	86
Figura 23:	Micro e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico	89

Figura 24:	Pêndulo Britânico em operação	90
Figura 25:	Teste da mancha de areia em execução	92
Figura 26:	Ilustração das seções teste	95
Figura 27:	Local de retirada de placa para ensaios em laboratório – vista 1	97
Figura 28:	Local de retirada de placa para ensaios em laboratório – vista 2	98
Figura 29:	Local de retirada de amostras cilíndricas para ensaios em laboratório	98
Figura 30:	Gráfico de deflexão antes da construção da pista	101
Figura 31:	Gráfico das bacias de deflexão antes da construção da pista, nas regiões de atuação do simulador móvel HVS	101
Figura 32:	Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 50-70 Marshall	102
Figura 33:	Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 50-70 Superpave	103
Figura 34:	Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 30-45 Marshall	103
Figura 35:	Curva granulométrica utilizada para os agregados das misturas asfálticas	108
Figura 36:	Gráfico comparativo entre as misturas: teor de CAP, volume de vazios e vazios do agregado mineral	110
Figura 37:	Gráfico comparativo entre as misturas: massa específica máxima e massa específica aparente	110
Figura 38:	Valores de módulo de resiliência obtidos	112
Figura 39:	Valores de resistência à tração obtidos	113
Figura 40:	Resultados do ensaio de deformação permanente no simulador LCPC	114
Figura 41:	Resultados granulometria de materiais aplicados em pista	118
Figura 42:	Resultados do controle deflectométrico da execução das obras	119
Figura 43:	Controle de temperatura durante a simulação (medições realizadas próximo ao meio dia)	121
Figura 44:	Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 50-70 Marshall	122
Figura 45:	Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 50-70 Superpave	123

Figura 46:	Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 30-45 Marshall	123
Figura 47:	Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 50-70 Marshall	126
Figura 48:	Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 50-70 Superpave	127
Figura 49:	Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 30-45 Marshall	127
Figura 50:	Avanço das deflexões medidas com Viga eletrônica durante a simulação com o HVS	128
Figura 51:	Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 50-70 Marshall	130
Figura 52:	Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 50-70 Superpave	130
Figura 53:	Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 30-45 Marshall	131
Figura 54:	Levantamento da deformação da trilha de rodas durante a simulação	133
Figura 55:	Levantamento da altura de areia durante a simulação	134
Figura 56:	Levantamento do valor de resistência à derrapagem durante a simulação	134
Figura 57:	Levantamentos durante a simulação	135
Figura 58:	Valores de módulo de resiliência nas diversas etapas analisadas	138
Figura 59:	Comparação de perda de módulo de resiliência entre as misturas produzidas em laboratório e as produzidas em usina e compactadas em laboratório	139
Figura 60:	Comparação de perda de módulo de resiliência entre as misturas asfálticas produzidas em usina e compactadas em laboratório e as extraídas de pista da camada de revestimento após a compactação	139
Figura 61:	Valores de resistência à tração nas diversas etapas analisadas	140
Figura 62:	Comparação de perda de resistência à tração entre as misturas produzidas em laboratório e as produzidas em usina e compactadas em laboratório	140

Figura 63:	Comparação de perda de resistência à tração entre as misturas asfálticas produzidas em usina e compactadas em laboratório e as extraídas de pista da camada de revestimento após a compactação	141
Figura 64:	Comparação de perda por umidade induzida relacionada com o volume de vazios	143
Figura 65:	Comparação levando em consideração a previsão de deformação permanente	145
Figura 66:	Comparação entre perdas de volume de vazios devido à simulação com o HVS	146
Figura 67:	Comparação entre evolução das flechas devido à simulação com o HVS	147
Figura 68:	Comparação entre perdas de altura de mancha de areia devido à simulação com o HVS	148
Figura 69:	Comparação entre evolução das deflexões devido à simulação com o HVS	150
Figura 70:	Retigráfica e dados do trecho com CAP 50-70 Marshall	151
Figura 71:	Retigráfica e dados do trecho com CAP 50-70 Superpave	152
Figura 72:	Retigráfica e dados do trecho com CAP 30-45 Marshall	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Dados das refinarias brasileiras de asfalto	27
Tabela 2:	Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP – Classificação por viscosidade (portaria DNC 5/18.02.93) vigentes até julho 2005	31
Tabela 3:	Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP – Classificação por penetração (portaria DNC 5/18.02.93) vigentes até julho 2005	31
Tabela 4:	Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP – Nova especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (resolução nº 19 da ANP, 11/07/2005)	32
Tabela 5:	Especificações para Cimento Asfáltico baseada no desempenho - ASTM D6373-07 (ASTM, 2007b)	41
Tabela 6:	Classificação de asfalto na Comunidade Européia - EN12591 / 2000	50
Tabela 7:	Classificação de agregados	54
Tabela 8:	Granulometria do fíler segundo o DNIT	59
Tabela 9:	Faixas granulométricas e requisitos para CA, segundo o DNIT	61
Tabela 10:	Faixas granulométricas e requisitos para CA, segundo o DER/SP	62
Tabela 11:	Características exigidas para o CA	68
Tabela 12:	Giros indicados para a compactação das amostras	74
Tabela 13:	Classificação da textura de um pavimento	88
Tabela 14:	Classificação da microtextura	90
Tabela 15:	Classificação da macrotextura	91
Tabela 16:	Resumo dos resultados de teor ótimo para cada mistura	96
Tabela 17:	Resumo da retroanálise - dados anteriores à obra	102
Tabela 18:	Resultados de caracterização dos agregados – Brita 1	104
Tabela 19:	Resultados de caracterização dos agregados – Pedrisco	105
Tabela 20:	Resultados de caracterização dos agregados – Pó de Pedra	105
Tabela 21:	Resultados de caracterização do CAP – material utilizado no projeto das misturas	106
Tabela 22:	Resultados de caracterização do CAP – material retirado da usina	106
Tabela 23:	Resultados de caracterização da Cal	107

Tabela 24:	Projeto das misturas - composição	107
Tabela 25:	Projeto das misturas – granulometria utilizada para todas as misturas	108
Tabela 26:	Projeto das misturas - resultados	109
Tabela 27:	Resultados de módulo de elasticidade e resistência à tração das misturas	112
Tabela 28:	Resultados do ensaio de deformação permanente no simulador LCPC	114
Tabela 29:	Resistência de misturas betuminosas a danos por umidade induzida	115
Tabela 30:	Resultados dos ensaios com os materiais ensaiados antes de aplicados na pista	117
Tabela 31:	Controle de temperatura dos materiais na saída da usina	117
Tabela 32:	Controle de deflexão durante a obra de reforço	119
Tabela 33:	Resultados dos ensaios de verificação de compactação e espessura após a construção	120
Tabela 34:	Características dos ensaios de simulação com o equipamento HVS	121
Tabela 35:	Deflexões medidas antes e depois da simulação (FWD)	125
Tabela 36:	Resultados dos ensaios de verificação de compactação e espessura após a simulação	129
Tabela 37:	Resultados das medições de trilha de roda (flecha), altura de areia (HS) e valor de resistência à derrapagem (VRD) medidos durante a simulação	132
Tabela 38:	Resumo das propriedades de projeto das misturas asfálticas	137
Tabela 39:	Controle de temperatura dos materiais na saída da usina	147
Tabela 40:	Valores de VRD medidos	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAPT	<i>Association of Asphalt Paving Technologists</i>
AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPV	Associação Brasileira de Pavimentação
AC	<i>Asphalt Concrete</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APA	<i>Asphalt Pavement Analyser</i>
ARTESP	Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
C	Relação entre a massa específica relativa e a massa específica máxima prevista no Superpave
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CH	Cal Hidratada
COPPE	Antiga sigla para o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo-de-prova
cSt	CentiStoke
δ	Ângulo de fase do ensaio de reômetro de cisalhamento dinâmico
DAER-RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
daN	Deca Newton
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DOP	Agente melhorador de adesividade
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
ε	Deformação
ECA	Efeito do Calor e do Ar
EM	Especificação de Material
ES	Especificação de Serviço
EUA	Estados Unidos da América
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
G*	Módulo complexo de cisalhamento
HRB	<i>Highway Research Board</i>
HS	Altura de mancha de areia
HVS	<i>Heavy Vehicle Simulator</i>
I	Índice de susceptibilidade térmica
IP	Índice de Penetração
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
λ	Comprimento de onda
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
η	Coeficiente de viscosidade
N _{inicial}	Número de giros do ponto inicial da curva de densificação no compactador giratório do Superpave
N _{máx}	Número de giros do ponto máximo da curva de densificação no compactador giratório do Superpave
N _{projeto}	Número de giros de projeto no compactador giratório do Superpave
N	Número de repetições do eixo padrão
P	Poise
PA	Ponto de Amolecimento
Petrobrás	Petróleo Brasileiro S.A.
PG	<i>Performance Grade</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>

RBV	Relação Betume Vazios
RRT	Resistência à Tração Retida
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à Tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
σ	Tensão
S ₂ C	Bissulfeto de Carbono
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SSF	Segundos Saybolt-Furol
Superpave	<i>Superior Pavement Asphalt Pavements</i>
τ	Força de cisalhamento
TFOT	<i>Thin Film Oven Test</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>
USP	Universidade de São Paulo
VAM	Volume de Vazios do Agregado Mineral
VDM	Volume Diário Médio
VRD	Valor de Resistência à Derrapagem
VV	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Importância dos Revestimentos Asfálticos na Infra-estrutura Rodoviária Brasileira	19
1.2	Objetivos da Dissertação	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Ligantes Asfálticos Convencionais – Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs)	24
2.1.1	Produção do Asfalto no Brasil	25
2.1.2	Classificação dos Asfaltos	29
2.1.2.1	Classificação Brasileira	30
2.1.2.2	Classificação Americana - Superpave	39
2.1.2.3	Classificação Comunidade Européia	50
2.2	Misturas Asfálticas a Quente	51
2.2.1	Materiais das Misturas Asfálticas a Quente	52
2.2.1.1	Agregados	52
2.2.1.2	Fíler	58
2.2.1.3	Asfalto	59
2.2.2	Concreto Asfáltico (CA)	60
2.2.3	Dosagem de Concreto Asfáltico	62
2.2.3.1	Método Marshall	63
2.2.3.2	Método Superpave	68
2.2.4	Propriedades Mecânicas e Complementares	74
2.2.4.1	Deformação Permanente	74
2.2.4.2	Trincamento e Fadiga	82
2.2.4.3	Módulo de Resiliência	84
2.2.4.4	Desgaste Cântabro	86
2.2.4.5	Perda por Umidade Induzida	87
2.2.5	Avaliação da Textura dos Pavimentos	88
2.2.5.1	Microtextura	89
2.2.5.2	Macrotextura	90
3	ESTUDO DE CASO: NOVADUTRA	93

3.1	Descrição do Experimento	94
3.2	Caracterização de Materiais e Misturas em Laboratório	96
3.3	Metodologia de Testes em Campo	99
3.4	Resultados	100
3.4.1	Caracterização da Pista Antes do Experimento	100
3.4.2	Dados dos Materiais Utilizados no Experimento	104
3.4.2.1	Agregados	104
3.4.2.2	Ligantes Asfálticos (CAP 50-70 e CAP 30-45)	105
3.4.2.3	Cal	106
3.4.3	Dados do Projeto das Misturas	107
3.4.3.1	Composição das Misturas	107
3.4.3.2	Granulometria dos Agregados	107
3.4.3.3	Resultados dos Projetos das Misturas	108
3.4.4	Dados das Propriedades Mecânicas e Complementares	111
3.4.4.1	Módulo de Resiliência e Resistência à Tração	111
3.4.4.2	Deformação Permanente	114
3.4.4.3	Perda por Umidade Induzida - AASHTO T 283	115
3.4.5	Dados da Construção	115
3.4.5.1	Usina	116
3.4.5.2	Controle do Material Aplicado em Pista	116
3.4.5.3	Controle Deflectométrico	118
3.4.5.4	Controle de Grau de Compactação e Espessura Final de Reforço	120
3.4.6	Dados da Pista Durante e Após a Simulação com HVS	120
3.4.6.1	Controle do Aparecimento de Fissuras no Pavimento	122
3.4.6.2	Controle Deflectométrico	124
3.4.6.3	Controle de Grau de Compactação e Espessura Final de Reforço	128
3.4.6.4	Outras Verificações	131
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	136
4.1	Análise Comparativa de Resultados Obtidos	136
4.1.1	Análise Comparativa Individual dos Dados	136
4.1.2	Análise Comparativa Geral dos Dados	150
4.1.2.1	Análise do Segmento com CAP 50-70 Marshall	154

4.1.2.2	Análise do Segmento com CAP 50-70 Superpave	155
4.1.2.3	Análise do Segmento com CAP 30-45 Marshall	156
5	CONCLUSÕES	158
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância dos Revestimentos Asfálticos na Infra-estrutura Rodoviária Brasileira

O estudo da pavimentação rodoviária vem adquirindo importância crescente ao longo dos últimos 60 anos no Brasil. Isso se dá devido à participação fundamental da malha rodoviária brasileira no transporte de cargas e de pessoas, e da constante necessidade de melhoria da qualidade desta malha e de sua ampliação.

Segundo levantamento da ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2007a), apenas cerca de 12% das vias existentes no país são pavimentadas. Deste número, a maior parte utiliza algum material asfáltico como solução para revestimento. A Figura 1 indica a distribuição da porcentagem de vias pavimentadas no país de acordo com as Unidades da Federação das Rodovias (ANTT, 2007a), o que mostra que a maioria absoluta de vias não pavimentadas se encontra no âmbito municipal.

Figura 1: Distribuição de rodovias pavimentadas e não pavimentadas no Brasil em 2005
(Fonte: Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres 2006)

Cerca de 61,8% das cargas no Brasil são transportadas por meio rodoviário, 19,46% ferroviário, 13,8% por aquavias, 0,31% por vias aéreas e 4,63% por dutos. Além disso, 96,2% do transporte de passageiros é feito pela malha rodoviária no país (CNT, 2007).

As principais rodovias do Estado de São Paulo são administradas pela DERSA (Desenvolvimento Rodoviário S.A.), pelo DER-SP (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo), pelo DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes) ou ainda por Concessionárias Privadas. Estas rodovias apresentam um alto tráfego de veículos pesados, que é crescente e solicita o pavimento de forma intensa, causando uma necessidade constante de melhoria na qualidade ao rolamento e capacidade de suporte do pavimento. Um exemplo disso é o tráfego da Rodovia Presidente Dutra que apresenta um VDM¹ total de 10.000 a 100.000 veículos nas regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro² e uma porcentagem de Veículos Pesados³, contados no pedágio, aproximadamente igual a 32% (ANTT, 2.007b).

Todos estes órgãos administradores são cobrados periodicamente por resultados e têm a obrigação de manter a qualidade estrutural e funcional dos pavimentos dentro de certos limites mínimos de aceitação. Em função disso são constantemente realizados estudos de materiais e soluções economicamente e estruturalmente mais eficientes para a aplicação nas rodovias brasileiras.

O revestimento mais utilizado no Brasil para vias com tráfego pesado é o Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ⁴ ou Concreto Asfáltico - CA. Isto se deve ao fato da produção deste material ser realizada em usinas dosadoras e misturadoras a quente, o que proporciona um amplo controle da produção, que associado à tradição de utilização e profundo conhecimento das propriedades deste material no país,

¹ VDM: Volume Diário Médio: É o volume (número) médio diário de veículos reais que trafegaram em uma dada seção da rodovia (2 sentidos).

² Informação fornecida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da NovaDutra.

³ Foram considerados nesta categoria os seguintes tipos de veículos: caminhão, caminhão-trator, caminhão-trator com semi-reboque, ônibus, caminhão com reboque e veículos acima de 6 eixos.

⁴ CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Adotado no texto o termo Concreto Asfáltico – CA

gera plena capacidade de fabricação e execução das camadas asfálticas de revestimento.

O Concreto Asfáltico mais usado no Brasil é aquele usinado com asfalto convencional do tipo CAP⁵ 50-70 (antigo CAP-20). Este material é produzido hoje em 9 refinarias no território nacional.

Os ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos, incluindo do tipo SBS (estireno butadieno estireno), e os modificados por borracha moída de pneus inservíveis vêm ganhando espaço no mercado brasileiro, principalmente para aplicações especiais ou tráfego pesado. Os asfaltos modificados por polímeros foram introduzidos no país de maneira mais importante a partir da segunda metade da década de 90, mas ainda contam com uma pequena fatia do mercado brasileiro, sendo mais utilizados no Estado de São Paulo. Os asfaltos modificados por borracha datam do final da década de 90, com as primeiras aplicações em campo nos anos 2000.

Os maiores problemas encontrados nas grandes vias rodoviárias do Estado de São Paulo são o tráfego intenso de caminhões e as altas temperaturas a que são submetidos os materiais asfálticos aplicados como revestimentos de pavimentos. A combinação destes elementos impõe ao pavimento solicitações muito significativas, e que, para evitar uma conseqüente vida de serviço de poucos anos, deve-se alterar composições granulométricas, tipo de ligante, incluir aditivos ou alterar processos de dosagem. Um dos efeitos mais danosos nos revestimentos asfálticos submetidos ao tráfego de caminhões pesados e à elevadas temperaturas é a deformação permanente, através da formação de trilhas de roda. O trincamento vem se intensificando, levando à fadiga precoce em algumas situações.

A utilização de um material mais viscoso na produção do Concreto Asfáltico, o CAP 30-45 (antigo CAP-40) vem também sendo intensificada nas rodovias de tráfego pesado do Estado de São Paulo, a fim de proporcionar um aumento da resistência da mistura asfáltica à formação de trilha de roda, em situações de alta porcentagem de veículos comerciais pesados. A Prefeitura do Município do Rio de Janeiro

⁵ CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

também utiliza este material há mais de 20 anos na pavimentação de suas vias urbanas de modo a resistir mais eficientemente às deformações decorrentes das temperaturas muito elevadas (SOARES *et al.*, 1999).

Tendo isso em consideração, a Engelog Engenharia e a Concessionária NovaDutra, empresas membros do Grupo CCR, responsável pela concessão de várias rodovias nas regiões sudeste e sul do país, com o apoio da ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres, construíram trechos experimentais utilizando concretos asfálticos como revestimentos produzidos com o CAP-30-45 e com o CAP 50-70 convencionais na Rodovia Presidente Dutra, a fim de comparar as propriedades mecânicas destas estruturas e compreender as vantagens e desvantagens do uso destes dois ligantes asfálticos.

Estas estruturas foram submetidas à ação do tráfego por meio do uso de um equipamento simulador de tráfego acelerado, em verdadeira grandeza, que proporciona em pouco tempo a ação de anos de tráfego pesado sobre a superfície do pavimento.

1.2 Objetivos da Dissertação

No Brasil, tem sido amplamente empregado em rodovias como revestimento o CA com CAP 50-70, devido à sua disponibilidade em todo o país.

A alta porcentagem de veículos pesados, o aumento do volume de tráfego, combinados a altas temperaturas no país, têm levado ao aparecimento de defeitos precocemente nestas camadas.

Uma das alternativas que órgãos rodoviários e concessionárias de rodovias têm buscado é a substituição do cimento asfáltico de petróleo, CAP 50-70 por CAP 30-45, devido à maior consistência e viscosidade deste último.

Este trabalho tem por objetivos comparar o comportamento mecânico de concretos asfálticos usinados a quente com CAP 50-70 e CAP 30-45 para fins de utilização em vias de tráfego pesado, e, além disso, analisar as diferenças de desempenho entre

misturas projetadas por duas metodologias de dosagem de misturas asfálticas, Marshall e Superpave.

Para tanto, analisaram-se resultados obtidos em um estudo de caso na Rodovia Presidente Dutra, onde três trechos experimentais foram construídos com CA e foram submetidos à simulação de tráfego por equipamento em verdadeira grandeza. Os resultados obtidos em laboratório e em campo foram analisados com o objetivo de estabelecer benefícios e limitações de cada alternativa empregada.

Apresenta-se um estudo envolvendo diversos aspectos e respostas das três estruturas de pavimentos testadas ao carregamento repetido feito pelo simulador de tráfego de campo, em condições estruturais e ambientais similares, de maneira a permitir uma análise comparativa e conclusões sobre as vantagens e desvantagens desses materiais de revestimento dentre estas duas opções analisadas e também entre as duas variações de metodologia de dosagem aplicadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligantes Asfálticos Convencionais – Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs)

O asfalto é um material que, devido às suas características, é comumente usado para colar, revestir e impermeabilizar objetos e é um dos mais versáteis materiais disponíveis na natureza.

Os primeiros materiais asfálticos utilizados foram os encontrados na natureza, chamados asfaltos naturais. No início do século 20 foi descoberto o asfalto proveniente do processo de refino do petróleo (EDWIN, 1968).

Este material desperta uma atenção especial ao engenheiro, devido às suas características de resistência, durabilidade, aderência e impermeabilidade. Suas características termoplásticas permitem uma forte união entre os agregados e conferem flexibilidade controlada às misturas onde é empregado.

No Brasil, as primeiras ruas pavimentadas com material asfáltico, que utilizaram asfalto natural importado de Trinidad, foram no Rio de Janeiro em 1908 (PREGO, 2001).

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um resíduo resultante da destilação de tipos específicos de petróleo, com características particulares para aplicação em serviços de pavimentação, na qual as frações leves (gasolina, diesel e querosene) são retiradas no refino.

Estes materiais são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais) unidos por ligações covalentes. Os CAPS brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais e alto teor de nitrogênio, enquanto que os de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999). Esta composição química do CAP influencia no desempenho físico e mecânico do material.

2.1.1 Produção do Asfalto no Brasil

O asfalto refinado do petróleo é atualmente utilizado nos diversos ramos da Engenharia Civil. Segundo Edwin (1968), a principal fonte de asfaltos é o petróleo, através do processo de refino. Existem, porém, outras fontes muito menos utilizadas deste material, que são os depósitos naturais de asfalto na região do Caribe. Estes asfaltos naturais são refinados para uso comercial e, para que possam ser utilizados na pavimentação, são tratados com óleos.

O asfalto é um produto já existente na composição original do petróleo, por isso é incorreto dizer que ele é fabricado pelo homem. Na verdade, é apenas extraído através da destilação, sem a ocorrência de modificação do material. A quantidade de asfalto obtida no processo de refino depende da composição do petróleo.

O petróleo apresenta diferentes composições e propriedades físicas e químicas variadas. Estes materiais são formados basicamente por componentes parafínicos, naftênicos e aromáticos, que, combinados em diferentes proporções, dão origem aos aproximadamente 1.500 tipos de petróleos já descobertos no mundo. Deste número, porém, apenas uma pequena porção é apropriada para a produção do asfalto (SHELL, 2003 apud BERNUCCI *et al.*, 2007).

A quantidade de asfalto presente nos petróleos varia. Os asfaltos venezuelanos, denominados por Boscan e Bachaquero, são os que produzem asfaltos de melhor qualidade para uso na pavimentação atualmente. No Brasil são encontrados alguns petróleos de qualidade semelhante ao Bachaquero.

Os tipos de petróleo utilizados na obtenção de asfaltos são os pesados, de base naftênica, e os de base intermediária ou semiasfáltica.

Os petróleos de base naftênica (óleos crus pesados) aparecem na natureza em menor número, mas quando acontecem, suas reservas têm grande volume. Estes sofrem um processo de destilação atmosférica para a obtenção do asfalto. Edwin (1968) cita como exemplos deste tipo os petróleos venezuelanos Boscan e Bachaquero e os mexicanos do tipo Ébano e Panuco.

Um exemplo de petróleo extra pesado produzido no Brasil é o do campo de Fazenda Alegre, no Espírito Santo (REVISTA ISTOÉ, 2006a).

Os petróleos de base intermediária, ou também chamados semiasfálticos, passam pelo processo de destilação a vácuo para a extração do asfalto. A variedade de petróleos que se encaixa nesta classificação e que pode gerar produtos asfálticos é maior se comparada aos tipos mais pesados, entretanto este material possui uma menor quantidade de asfalto em sua composição (10 a 25%) (EDWIN, 1968).

O Petróleo mais leve é mais valorizado no mercado e é extraído em países como Arábia Saudita, Nigéria, Argélia, Dubai e Catar (REVISTA ISTOÉ, 2006a).

No Brasil são extraídos vários tipos de petróleo das bacias sedimentares, sendo estes os tipos Alagoano, Albacora, Baiano Mistura, Barracuda, Cabiúnas Mistura, Caraúna, Caravela, Ceará, Mar, Condensado de Merluza, Espadarte, Espírito Santo, Marlim, Marlim Sul P38, Piloto da Área do 1-ESS-100, RGN Mistura, Roncador, Sergipano Mar, Sergipano Terra e Urucu (ANP, 2002). Todos estes tipos de petróleo têm uma característica em comum: baixo teor de enxofre. Praticamente todos os petróleos brasileiros têm menos de 1% deste componente, o que significa menos problemas nos derivados (REVISTA ISTOÉ, 2006a).

As características de dureza do CAP, produzido a partir do refino do petróleo, podem ser alteradas durante a destilação. A aplicação de maiores temperaturas e vácuo durante o processo permitem a elevação da viscosidade do material.

A história do refino de petróleo no Brasil começou em 1933 quando entrou em operação a Destilaria Sul-Riograndense de Petróleo, em Uruguaiana (RS), que não existe mais. Esta era uma refinaria particular e refinava cerca de 150 barris de petróleo por dia, todo ele vindo da Argentina. Nessa época, todo o petróleo bruto processado no país era importado (REVISTA ISTOÉ, 2006b).

No final da década de 90 a Petrobrás, Petróleo Brasileiro S.A, produzia cerca de dois milhões de toneladas anuais de CAP, sendo 60% com petróleos nacionais, 20% petróleos venezuelanos e 20% de petróleos argentinos e árabes (LEITE, 1999).

Hoje, as fontes de petróleo do país são suficientes para a produção do asfalto e o Brasil conta com 9 refinarias de extração deste material, todas comandadas pela

Petrobrás. A Tabela 1 apresenta a localização das refinarias brasileiras e o percentual de produção de cada uma dentro da produção de 2007.

A Figura 2 mostra a localização das refinarias que produzem asfalto no Brasil, enquanto que a Figura 3 apresenta a produção de CAP no Brasil nos últimos anos.

Tabela 1: Dados das refinarias brasileiras de asfalto

Refinaria	Proprietário	Localização	Produção 2007 (m³)	Produção 2007 (%)
REGAP	Petrobrás	Betim / MG	355.651	21,17
REVAP	Petrobrás	São José dos Campos / SP	351.327	20,91
REPAR	Petrobrás	Araucária / PR	255.699	15,22
LUBNOR	Petrobrás	Fortaleza / CE	177.824	10,58
REDUC	Petrobrás	Duque de Caxias / RJ	179.691	10,70
REPLAN	Petrobrás	Paulinia / SP	123.232	7,34
RLAM	Petrobrás	São Francisco do Conde / BA	91.593	5,45
REFAP	Petrobrás	Canoas / RS	78.468	4,67
REMAN	Petrobrás	Manaus / AM	66.555	3,96

(Fonte: ANP, 2008)

No Brasil o CAP 50-70 é produzido nas 9 refinarias as asfalto, enquanto que o CAP 30-45 é produzido atualmente apenas na Refinaria REDUC, em Duque de Caxias no Estado do Rio de Janeiro.

Segundo Leite (1999) os tipos de asfalto existentes no mercado brasileiros atualmente recebem a seguinte denominação:

- Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP);
- Asfaltos Diluídos;
- Asfaltos Emulsionados;
- Asfaltos Modificados;
- Asfaltos Oxidados ou Soprados; e
- Agentes Rejuvenescedores.

Figura 2: Localização das Refinarias de Asfalto no Brasil
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

Figura 3: Produção de CAP no Brasil
(Fontes: ANP, 2007, e ANP, 2008)

2.1.2 Classificação dos Asfaltos

Os asfaltos são materiais de cor escura compostos predominantemente por betume, cerca de 99,5%. O betume é uma substância aglutinante, composta predominantemente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúveis em dissulfeto de carbono.

O CAP é um material adesivo termoplástico que se liquefaz gradualmente e de maneira reversível quando aquecido. É utilizado em várias aplicações na construção civil, principalmente em trabalhos de pavimentação, pois, além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis. Na pavimentação o CAP é aplicado em misturas a quente, tais como concreto asfáltico, pré-misturado e areia-asfalto.

Todas as propriedades dos asfaltos estão associadas a sua temperatura. Seu modelo estrutural como dispersão de moléculas polares em meio não-polar ajuda a entender o efeito da temperatura nos ligantes asfálticos. Logo, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfáltico têm temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento, visto que o asfalto é um material termoviscoelástico (BERNUCCI *et al.*, 2007).

2.1.2.1 Classificação Brasileira

No Brasil, a especificação de Cimento Asfáltico de Petróleo vigente até julho de 2005 classificava os asfaltos de acordo com a sua viscosidade (CAP-7, CAP-20 e CAP-40) para as regiões Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Sul e por penetração (CAP-30-45, CAP-50-60, CAP-80-100 e CAP-150-200) para a região Nordeste. A nova especificação em vigor desde então classifica os CAPs de acordo com a sua penetração em quatro classes distintas (CAP-30-45, CAP-50-70, CAP-85-100 e CAP-150-200).

Além da mudança na característica que dá nome ao CAP, foram adicionados ensaios que devem ser realizados no material para sua classificação, visando uma avaliação mais completa do material. Foram reduzidas as faixas de variação do índice de susceptibilidade térmica dos asfaltos e foram introduzidos ensaios após a perda de voláteis mais rigorosa que na norma anterior.

As Tabelas 2 e 3 apresentam as classificações por viscosidade e penetração, vigentes até 2005 e a Tabela 4 a classificação por penetração válida a partir de 2005.

Tabela 2: Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP –
Classificação por viscosidade (portaria DNC 5/18.02.93) vigentes até julho 2005

Características	Unidade	Valores		
		CAP-7	CAP-20	CAP-40
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	100	120	170
Viscosidade Saybolt-Furol, 177°C, mín.	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150
Ductibilidade a 25°C mín.	cm	50	20	10
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)	(-1,5) a (+1,0)
Penetração (100g, 5s, 25°C) mín.	0,1mm	90	50	30
Ponto de Fulgor, mín.	°C	220	235	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5
Massas Específicas (20/4°C) mín.		0,9990	0,9990	0,9990
Efeito do Calor e Ar, 163°C por 5h				
Razão de Viscosidade, máx.		4,0	4,0	4,0
Variação de Massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0

Tabela 3: Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP –
Classificação por penetração (portaria DNC 5/18.02.93) vigentes até julho 2005

Características	Unidade	Valores			
		CAP 30-45	CAP 50-60	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (100g, 5s, 25°C) mín.	0,1mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	150 a 200
Ductibilidade a 25°C mín.	cm	60	60	100	100
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	220
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	110	110	85	70
Efeito do Calor e Ar, 163°C por 5h					
Penetração, mín.	%	50	50	47	40
Variação de Massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 4: Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP –
Nova especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (resolução nº 19 da ANP,
11/07/2005)

Características	Unidade	Limites			
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt-Furol					
a 135°C	s	192	141	110	80
a 150°C		90	50	43	36
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, SP 21, 20rpm mín.	cP	374	274	214	155
a 150°C, SP 21, mín.		203	112	97	81
a 177°C, SP 21, mín.		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114
Índice de Susceptibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	235	235	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductibilidade de 25°C, mín.	cm	60	60	100	100
Efeito Calor e Ar a 163°C, 85 mín.					
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
Ductibilidade a 25°C	cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de Amolecimento	°C	8	8	8	8
Penetração Retida (*)	%	60	55	55	50

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio.

A seguir são apresentadas descrições sucintas dos ensaios especificados para avaliação das propriedades físicas e reológicas utilizados na classificação de acordo com as Normas Brasileiras.

– *Ensaio de Penetração:*

Este ensaio avalia a profundidade que uma agulha padronizada penetra em uma amostra de volume especificado durante 5 segundos a 25°C.

O ensaio é realizado utilizando o equipamento denominado Penetrômetro, que é descrito na Metodologia de Ensaio da ABNT NBR 6576/2007 (ABNT, 2007) ou do DNIT – Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transportes, ME 003/99 (DNIT, 1999a), como “aparelho que permite o movimento da haste que suporta a agulha, sem fricção, e que seja cuidadosamente calibrado, para dar resultados de acordo com a definição de penetração”.

A penetração é atualmente utilizada na determinação e denominação das faixas de especificação do CAP no Brasil e na Comunidade Européia.

– *Ensaio de Viscosidade:*

A viscosidade é a medida da consistência do Concreto Asfáltico determinada através da resistência ao escoamento do material. É uma grandeza extremamente importante na determinação das temperaturas de mistura do material ligante com os agregados e aplicação do material asfáltico em campo.

A viscosidade é dada pelo coeficiente de viscosidade η , comumente apresentado em Poise (1P = 100g/m.s).

A viscosidade cinemática pode ser definida de forma conceitual por meio de um esquema experimental representado por um viscosímetro de placas paralelas. O teste consiste na aplicação de uma força cisalhante em uma placa de vidro, unida a outra placa por um líquido viscoso perfeitamente aderido, conforme indicado na Figura 4.

Figura 4: Descrição do ensaio de viscosidade – Viscosímetro de placas paralelas
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

Através deste esquema, a viscosidade do material viscoso entre as placas é obtida através da seguinte expressão:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta\gamma}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

- . τ é a força de cisalhamento aplicada (N/m^2);
- . η é o coeficiente de viscosidade (Pa.s);
- . $\Delta\gamma$ é a deformação da placa superior em relação à espessura D e é igual a $\Delta x/D$; e
- . $\Delta\gamma/\Delta t$ é a velocidade da deformação ($1/\text{s}$), sendo Δt o tempo decorrido para que a força τ cause o deslocamento Δx .

Um exemplo de viscosímetro que não tem a capacidade de variar a velocidade de deformação ou a força de cisalhamento aplicada é o viscosímetro de Cannon-Manning. Neste viscosímetro capilar é permitido o escoamento do líquido viscoso por entre um tubo capilar, em sentido ascendente, sob condições controladas de temperatura (60°C na especificação brasileira) e vácuo. O tempo de escoamento é multiplicado pelo fator de calibração do viscosímetro (obtido através do ensaio de um material padrão), afim da obtenção da viscosidade absoluta, em poise (P).

Pode-se medir também a viscosidade cinemática através do escoamento do material por tubos capilares. Nestes casos a medida é apresentada em m^2/s ou mm^2/s (centistoke – cSt). A relação entre a viscosidade absoluta e a viscosidade cinemática é dada pela massa específica do material.

Em equipamento semelhante ao viscosímetro de Cannon-Manning, embora com ausência de vácuo, é medida a viscosidade cinemática, com temperatura de ensaio de 135°C . Este viscosímetro é chamado de Cannon-Fenske.

No Brasil o viscosímetro mais usado é o Saybolt-Furol, que consiste em um tubo padronizado por onde escoa, através de orifício com abertura padronizada, o material viscoso à temperatura controlada (135°C para cimentos asfálticos). O tempo de escoamento de 60ml de material é cronometrado e a viscosidade é dada em segundos Saybolt-Furol (SSF). Este procedimento encontra-se descrito na norma brasileira ABNT NBR 14756/2001, (ABNT, 2001a).

Para a definição da melhor faixa de temperatura de trabalho dos materiais asfálticos é necessária a obtenção de uma curva viscosidade x temperatura para o material. Para elaboração da curva, no caso de asfaltos convencionas, pode-se empregar qualquer um dos equipamentos descritos.

Entretanto o equipamento Brookfield, amplamente utilizado na comunidade européia e nos EUA, ensaio normatizado pelo documento ASTM D 4402-06 (ASTM, 2006a), permite mais facilmente a obtenção da curva viscosidade x temperatura com a mesma amostra de asfalto, aquecendo-o de forma controlada para o ensaio - ABNT NBR 15184/2004 (ABNT, 2004a). Este equipamento mede a viscosidade rotacional através da rotação de cilindros padronizados mergulhados nas amostras ensaiadas.

Até junho de 2005 os coeficientes de viscosidade absoluta, medidos a 60°C , e cinemática, medidos a 135°C , eram utilizados para classificar os asfaltos segundo a especificação vigente do DNC e norma do DNER de 1996.

– *Ensaio de Ponto de Amolecimento:*

O ensaio do ponto de amolecimento do concreto asfáltico de petróleo é uma medida empírica que relaciona a temperatura na qual o asfalto amolece e atinge uma determinada condição de escoamento.

O ensaio é realizado através da colocação de uma esfera metálica, de dimensões e peso especificados, no centro de um anel padronizado. Acontece então o mergulho em banho de água e a elevação da temperatura a uma taxa de 5°C por minuto. Em um determinado momento o peso da esfera desloca a mesma e o asfalto em direção a uma placa distante uma polegada dos anéis. No momento em que a mistura toca a placa do becker é marcada a temperatura e este é o ponto de amolecimento do material. Este ensaio é normatizado no Brasil pelo documento ABNT NBR 6560/2000 (ABNT, 2000).

– *Ensaio de Ductibilidade:*

É a medida indireta de coesão dos Concretos Asfálticos dada através do ensaio empírico de ductilidade, que mede a capacidade do material de se alongar na forma de um filamento.

O ensaio é realizado com corpos-de-prova em formas de ossos de cachorro – *dog bone* - ou gravatas borboleta, imersos em banho com água a 25°C, que são tracionados pelas pontas com deformação de 5cm/min e se alongam até a ruptura com seção estrangulada. A ductibilidade é dada pelo alongamento da amostra antes de sua ruptura. A descrição do procedimento de ensaio é apresentada no documento ABNT NBR 6293/2001 (ABNT, 2001b).

– *Ensaio de Solubilidade:*

O ensaio de solubilidade mede as impurezas presentes no Concreto Asfáltico, e é realizado através da dissolução do CAP em solventes e posterior filtragem por meio de um cadinho perfurado, para verificação de resíduos retidos. A

presença destes resíduos indica impurezas no material asfáltico. Este ensaio é normatizado por ASTM D 2042-01 (ASTM, 2001a) e ABNT NBR 14855/2002 (ABNT, 2002).

Para o caso da verificação da quantidade de betume no CAP é utilizado o bissulfeto de carbono (S_2C) ou o tricloroetileno como solvente.

– *Ensaio de Durabilidade:*

Os materiais asfálticos utilizados em pavimentação sofrem envelhecimento em duas etapas. O envelhecimento de curto prazo ocorre durante a usinagem do material e mistura com os agregados devido às altas temperaturas aplicadas no processo. O envelhecimento de longo prazo ocorre durante a vida útil do material e é devido às condições ambientais às quais o material é submetido em campo.

Os ensaio de previsão de envelhecimento acelerado chamado no Brasil de efeito do calor e do ar (ECA) tenta simular a ação do processo de usinagem sobre o material. Este ensaio é similar ao ensaio do “*Thin Film Oven Test*” (TFOT), ou ensaio de película delgada, no exterior. Este ensaio consiste em submeter amostras do material ensaiado a jatos de ar e temperatura elevada por exposição dentro de estufa. O ensaio provoca a oxidação e evaporação de parte dos componentes voláteis do material.

Após o ensaio são realizadas medidas de penetração, ductilidade ou viscosidade e os valores comparados aos originalmente medidos antes do envelhecimento acelerado.

Em 1963, foi proposta por Hveem *et al.*⁶ (apud BERNUCCI *et al.*, 2007) uma nova metodologia de ensaio que passou a ser conhecida como “*Rolling Thin Film Oven Test*” (RTFOT), ou ensaio de película delgada rotativa, e que veio a substituir o ensaio TFOF. Ambos os ensaios tem a mesma finalidade, porém o

⁶ HVEEM, F. N.; ZUBE, E.; SKOG, J. Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts. *Proceedings*. Association of Asphalt Paving Technologists. AAPT. 1963

RTFOT apresenta condições mais severas por expor o material sempre ao calor e jatos de ar a cada 3 a 4 segundos, através de um mecanismo que mantém uma película de asfalto sempre girando e em contato com as condições impostas pela estufa. Este ensaio foi adotado no Brasil em 2005, através da norma ABNT NBR 15235/2006 (ABNT, 2006a), substituindo o ensaio ECA na caracterização de ligantes asfálticos.

– *Ensaio de Ponto de Fulgor:*

O ensaio de ponto de fulgor é realizado para garantir a segurança no manuseio do material asfáltico às temperaturas de usinagem e aplicação em campo. O valor obtido no experimento representa a menor temperatura na qual os vapores emanados pelo CAP são inflamados em contato com uma chama padronizada, segundo o documento ABNT NBR 11341/2004 (ABNT, 2004b).

– *Ensaio de Espuma:*

O aparecimento de espuma no Concreto Asfáltico quando aquecido indica a presença de água na composição do material, sob a forma de vapores aprisionados pelas películas do material.

A liberação destes vapores d'água pode causar acidentes pelo lançamento de partículas de material quente a longas distâncias.

A especificação brasileira de CAP atualmente observa que o ligante não pode espumar quando aquecido até 175°C (ANP, 2005).

– *Ensaio de Susceptibilidade Térmica:*

A susceptibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência do material asfáltico à variação das temperaturas. Esta é uma propriedade importante do CAP para seu uso na pavimentação, devido ao desejo de pequena variação das

propriedades mecânicas do mesmo, dentro dos limites de temperatura de trabalho, evitando assim grandes diferenças de comportamento.

Esta propriedade é medida através do índice de susceptibilidade térmica ou índice de penetração (IP), que é obtido utilizando a relação entre o ponto de amolecimento (PA), e a penetração do material a uma temperatura de 25°C. Isso é feito considerando que a penetração medida à temperatura do ponto de amolecimento é igual a 800×10^{-2} mm.

Quanto menor o valor absoluto do IP encontrado para o material, menor sua susceptibilidade térmica. A maioria dos cimentos asfálticos brasileiros apresenta IP entre (0) e (-1,5) (BERNUCCI *et al.*, 2007).

2.1.2.2 Classificação Americana - Superpave

O “*Superior Pavement Asphalt Pavements*” (Superpave) é o produto final de um programa de pesquisas realizado nos Estados Unidos, o “*SHRP Asphalt Research Program*”, desenvolvido a partir dos anos 80 devido a um grande número de ocorrência de falhas precoces nos revestimentos dos pavimentos, que veio unificar a classificação de asfaltos dos Estados Unidos da América e do Canadá. Este sistema leva em consideração a performance do material frente às condições específicas de tráfego, clima e seção estrutural do pavimento.

O Programa SHRP resultou em mais de 25 produtos, todos reunidos no Superpave. São novas especificações de materiais, métodos de ensaios, métodos de projetos de misturas, reunidos em um único sistema baseado no desempenho dos materiais asfálticos envolvidos. Além disso, foi desenvolvido um software que disponibiliza meios para o desenvolvimento de um projeto racional de misturas, e para o relacionamento entre a mistura determinada e o projeto estrutural.

O sistema pode ser aplicado em materiais novos, asfaltos reciclados, com ou sem modificação, para serem usados em pavimentos novos ou em recapeamentos e foi desenvolvido visando minimizar a deformação permanente, aparecimento de trincas

causadas pela fadiga e por baixas temperaturas, sempre considerando a ação do envelhecimento no comportamento do material.

A classificação se inicia com a verificação do histórico de temperaturas da região de implantação do material asfáltico.

A especificação do material é dada por: PG x-y

Sendo:

PG = "*Performance Grade*";

x = Temperatura média dos 7 dias consecutivos de maior calor, a uma profundidade de 20mm da superfície do pavimento, no período de um ano; e

y = Menor temperatura encontrada na superfície do pavimento no período de um ano (y).

A Tabela 5 apresenta a especificação de asfaltos baseada na performance, indicada no *Superpave*.

A especificação exige testes no material em três fases: quando novo, após a simulação do envelhecimento de curto prazo, ocorrido durante usinagem e aplicação do material, e após a simulação do envelhecimento de longo prazo, devido à oxidação do asfalto e perda de componentes voláteis do material durante os primeiros 5 a 10 anos de sua vida útil em pista.

Tabela 5: Especificações para Cimento Asfáltico baseada no desempenho - ASTM D6373-07
(ASTM, 2007b)

Grau de Desempenho	PG 46-						PG 52-			
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46
Temperatura média de projeto dos 7 dias consecutivos de maior calor, °C			<46					<52		
Temperatura mínima de projeto, °C	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46
LIGANTE ORIGINAL										
Ponto de Fulgor, °C						230				
Viscosidade Brookfield, Max 3000cP, °C						135				
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 1,0kPa), °C			46					52		
Após o "RTFOT"										
Variação em massa, Porcentagem						1				
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 2,2kPa), °C			46					52		
Após o "RTFOT" / "PAV"										
Temperatura no PAV, °C			90					90		
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 5,0kPa), °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7
Fluência (BBR) @ 60s, °C Módulo de rigidez, S (max. 300Mpa), Coeficiente angular, m (mín. 0,3)	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36
Alongamento na ruptura, °C mín. 1,0% @1,0mm/min	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36

(Continua)

Grau de Desempenho	PG-58-						PG-64-					
	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	
Temperatura média de projeto dos 7 dias consecutivos de maior calor, °C			<58					<64				
Temperatura mínima de projeto, °C	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	
LIGANTE ORIGINAL												
Ponto de Fulgor, °C						230						
Viscosidade Brookfield, Max 3000cP, °C						135						
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 1,0kPa), °C			58					64				
Após o “RTFOT”												
Variação em massa, Porcentagem						1						
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 2,2kPa), °C			58					64				
Após o “RTFOT” / “PAV”												
Temperatura no PAV, °C			100					100				
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 5,0kPa), °C	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	
Fluência (BBR) @ 60s, °C												
Módulo de rigidez, S (max. 300Mpa), Coeficiente angular, m (mín. 0,3)	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	
Alongamento na ruptura, °C mín. 1,0% @ 1,0mm/min	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	

(Continua)

Grau de Desempenho	PG-70-						PG-76-					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	
Temperatura média de projeto dos 7 dias consecutivos de maior calor, °C	<70						<76					
Temperatura mínima de projeto, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	
LIGANTE ORIGINAL												
Ponto de Fulgor, °C	230											
Viscosidade Brooksfeld, Max 3000cP, °C	135											
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 1,0kPa), °C	70						76					
Após o “RTFOT”												
Variação em massa, Porcentagem	1											
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 2,2kPa), °C	70						76					
Após o “RTFOT” / “PAV”												
Temperatura no PAV, °C	100 (110)						100 (110)					
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 5,0kPa), °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	
Fluência (BBR) @ 60s, °C												
Módulo de rigidez, S (max. 300Mpa),	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	
Coeficiente angular, m (mín. 0,3)												
Alongamento na ruptura, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	
mín. 1,0% @1,0mm/min												

(Continua)

Grau de Desempenho	PG-82-				
	10	16	22	28	34
Temperatura média de projeto dos 7 dias consecutivos de maior calor, °C			<82		
Temperatura mínima de projeto, °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
LIGANTE ORIGINAL					
Ponto de Fulgor, °C			230		
Viscosidade Brookfield, Max 3000cP, °C			135		
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 1,0kPa), °C			82		
Após o "RTFOT"					
Varição em massa, Porcentagem			1		
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 2,2kPa), °C			82		
Após o "RTFOT" / "PAV"					
Temperatura no PAV, °C			100 (110)		
Cisalhamento dinâmico 10 rad/s, G*/senδ (mín. 5,0kPa), °C	40	37	34	31	28
Fluência (BBR) @ 60s, °C Módulo de rigidez, S (max. 300Mpa), Coeficiente angular, m (mín. 0,3)	0	-6	-12	-18	-24
Alongamento na ruptura, °C mín. 1,0% @1,0mm/min	0	-6	-12	-18	-24

(Conclusão)

O maior objetivo do programa foi avaliar e relacionar propriedades que poderiam interferir no desempenho do material asfáltico quando aplicado em campo. Este objetivo foi atingido e propriedades relacionadas são avaliadas na especificação proposta, através das seguintes exigências:

- Uma rigidez medida pelo reômetro com valor mínimo de 1,0kPa é especificada para o material asfáltico novo para a prevenção de perda de consistência (amolecimento) exagerada e deformação permanente em temperaturas elevadas;

- Uma rigidez medida pelo reômetro com valor mínimo de 2,2kPa é especificada para o material asfáltico após o envelhecimento de curto prazo, a fim de garantir adequada resistência à deformação permanente imediatamente após a construção;
- Uma rigidez medida pelo reômetro com valor máximo de 5.000kPa é especificada para o material asfáltico após o envelhecimento de longo prazo, para a prevenção de trincamento devido à fadiga, causado por excesso de dureza do material;
- Uma rigidez medida pelo reômetro com valor máximo de 300MPa e mínima declividade (*slope*) no ensaio *creep* são especificadas para limitar a rigidez do material a baixas temperaturas; e
- Uma alta rigidez medida pelo ensaio *creep* é permitida pela especificação se uma mínima deformação na tração (1%) na ruptura for atingida.

Para simular o envelhecimento dos materiais asfálticos em curto prazo é utilizado o ensaio do “*Rolling Thin Film Oven Test*” (RTFOT). O teste consiste no uso de uma certa quantidade de material asfáltico em um recipiente colocado dentro de um forno em suportes que giram verticalmente, ao redor de um eixo horizontal. A rotação dos recipientes causa a exposição constante de filmes asfálticos aos jatos de ar quente soprados contra as garrafas a cada rotação. O teste é realizado a 163°C durante 85 minutos segundo a especificação ASTM 2872/2004 (ASTM, 2004).

Para a simulação do envelhecimento em longo prazo é utilizado o Vaso de Envelhecimento sob Pressão (Pressure Aging Vessel – PAV). O asfalto, previamente ensaiado na RTFOT, é colocado nos recipientes que são inseridos no PAV, onde a amostra é submetida a pressões elevadas por 20 horas à temperatura de 90, 100 ou 110°C, dependendo do tipo de material segundo o documento ASTM 6521/2005 (ASTM, 2005).

A seguir são apresentadas descrições sucintas dos ensaios baseados na *performance* presentes nas especificações de material asfáltico publicadas no Superpave.

- *Ensaio do Reômetro de Fluência em Viga (Bending Beam Rheometer) – ASTM D6648/2001 (ASTM, 2001b):*

O teste avalia as características de resistência do material asfáltico em baixas temperaturas.

O corpo-de-prova na forma de uma viga de asfalto, com 125mm de comprimento, 12,5mm de largura e 6,25mm de espessura, é moldada e resfriada. Então a viga é colocada na plataforma de carregamento do equipamento, que é imersa em um banho para manutenção da temperatura e controle da flutuação do corpo-de-prova, o que evita a deflexão devido ao peso próprio da amostra.

A viga é apoiada em dois suportes separados de 100mm e é carregada no ponto central com uma carga de 95 a 100g. A deflexão no ponto central do corpo-de-prova é medida continuamente no intervalo de 240s.

Esta deflexão é relacionada ao vão, à geometria da amostra e à rigidez da estrutura.

A Figura 5 indica um esquema que ilustra o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 5: Ilustração do equipamento utilizado no ensaio de reômetro de fluência em viga (Fonte: modificado de Soares, 2007)

- *Ensaio de Tração Direta (Direct Tension Test) – ASTM D6723/2002 (ASTM, 2002):*

O ensaio de tração direta mede as propriedades de fratura a baixas temperaturas.

Um corpo-de-prova no formato de ossos de cachorro – *dog bone* - ou gravatas borboleta são alongados a taxa de 0,1mm/min em temperatura especificada até a fratura.

As tensões e deformações na ruptura são calculadas usando a geometria do corpo-de-prova e a carga aplicada na ruptura.

Para o controle de trincamento a baixas temperaturas do material asfáltico, os valores encontrados para a deformação na ruptura devem ser maiores que 1% a uma temperatura igual à mínima especificada para o pavimento mais 10°C.

A Figura 7 indica um esquema que ilustra o ensaio.

Figura 7: Ilustração do ensaio de tração direta
(Fonte: modificado de Soares, 2007)

- *Ensaio com o Viscosímetro Rotacional (Rotational Viscosimeter) – ASTM D4402/2006 (ASTM, 2006a):*

O viscosímetro rotacional mede a viscosidade dos materiais asfálticos a altas temperaturas. O teste é conduzido através da rotação de cilindros mergulhados em amostras de asfalto a temperaturas especificadas. Para garantir a circulação de asfalto entre as paredes do cilindro e recipiente, o resultado para a viscosidade deve ser no mínimo igual a 3Pa.s na temperatura de 135°C.

A Figura 8 indica um esquema que ilustra o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 8: Ilustração do equipamento viscosímetro rotacional
(Fonte: Soares, 2007)

- *Ensaio de Perda de Massa:*

A perda de massa indica a quantidade de material volátil que se perdeu após a simulação do envelhecimento do material através do ensaio RTOFT. A perda máxima especificada é igual a 1% em peso.

No Brasil, os equipamentos utilizados na classificação dos asfaltos pelo método Superpave estão disponíveis na íntegra, com o conjunto necessário para todas os testes previstos, apenas no CENPES, Centro de Pesquisas da Petrobrás, porém algumas universidades e centros de pesquisas, possuem parte destes equipamentos.

Pode-se dispensar no Brasil a caracterização para baixas temperaturas, dando preferência para o comportamento em temperaturas elevadas (deformação permanente) e nas médias de serviço (fadiga).

2.1.2.3 Classificação Comunidade Européia

A especificação de ligantes da Comunidade Européia, EM 12591/2000, que resultou de um acordo entre os vários países participantes, especifica nove classes de asfalto pela penetração, desde a classe 20/30 até 250/330 (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A Tabela 6 apresenta a Classificação Européia de Concretos Asfálticos em vigor.

Está sendo elaborada uma nova classificação européia que, assim como a classificação americana Superpave, também se baseia na performance. Porém, a Comunidade Européia ainda classifica seus ligantes por ensaios empíricos devido à facilidade e disponibilidade de equipamentos de laboratório e prática consolidada em todos os países que fazem parte da Comunidade.

Tabela 6: Classificação de asfalto na Comunidade Européia - EN12591 / 2000

Ensaio	Unidade	Método	Designação de Classe								
			20/30	30-45	35/50	40/60	50-70	70/100	100/150	160/220	250/330
Penetração a 25°C	0,1mm	EN 1426	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Ponto de Amolecimento	°C	EN 1427	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Resistência ao Endurecimento a 163°C	Varição em massa, máx(±)	EN2607-1 ou 3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1	1
	Penetração Retida, mín.		55	53	53	50	50	46	43	37	35
	Ponto de Amolecimento, mín.		57	54	52	49	48	45	41	37	32
Ponto de Fulgor, mín.	°C	EM 22592	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilidade, mín.	%	EM 12592	99	99	99	99	99	99	99	99	99

(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

Pode-se observar que a classificação brasileira, em sua revisão no ano de 2005, apresentou melhorias quanto à ampliação da gama de ensaios realizados e à unificação das faixas de classificação no país. Entretanto, continua não contemplando a performance dos materiais em campo, o que é uma tendência mundial na evolução das classificações do CAP.

Essa tendência é observada na classificação americana Superpave que foi implantada nos EUA a partir de 1993 (LEITE, 2005) e na classificação europeia que está sendo revisada para incluir estudos e previsões de desempenho dos materiais.

2.2 Misturas Asfálticas a Quente

A mistura asfáltica a quente consiste na combinação de material asfáltico, agregados e materiais finos, eventualmente com adição de aditivos ou produtos especiais, misturados de maneira uniforme, de modo a formar uma massa homogênea. O componente asfáltico age como um aglutinador que mantém os agregados unidos em uma massa coesa, além de dar características impermeáveis à mistura, enquanto que o agregado, independentemente de seu processo de produção, proporciona um esqueleto sólido que dá sustentação para resistir à aplicação de cargas repetidas (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1995).

A fim de proporcionar ao material asfáltico a fluidez necessária à uniformização do conjunto e proporcionar trabalhabilidade à mistura durante a aplicação, o asfalto e o material granular são aquecidos, daí então o nome de mistura asfáltica a quente.

O asfalto e os agregados separados em proporções pré-definidas são aquecidos separadamente e misturados no misturador para a produção da mistura. Completada a mistura na usina, esta, ainda quente, é transportada ao local de aplicação e é espalhada na superfície, já preparada e limpa, a ser pavimentada por meio de uma vibroacabadora. Com a mistura ainda quente é realizada a compactação do material por uma combinação de rolos pesados de pneus e de rolos lisos, até que a camada final seja bem consolidada e tenha superfície plana. Dependendo do processo,

pode-se alternar o uso destes equipamentos, ou mesmo eliminar o de pneus em algumas situações e tipos de misturas.

Devido ao fato do comportamento do produto final ser afetado pelas características individuais dos materiais asfálticos e pétreos que o compõem, são descritas a seguir algumas das propriedades destes componentes.

2.2.1 Materiais das Misturas Asfálticas a Quente

2.2.1.1 Agregados

Os agregados formam a maior parte da mistura asfáltica, compondo de 90 a 95% em peso e de 75 a 85% em volume do material (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989), e suas características físicas e químicas afetam de maneira significativa o desempenho do revestimento de misturas a quente, especificamente do Concreto Asfáltico.

Agregados minerais são definidos pelo Instituto do Asfalto (1995, p. 81) como “todo material inerte, resistente, usado nas misturas sob a forma de partículas ou fragmentos graduados. Inclui areia, pedregulhos, rocha britada e pó de pedra”.

Uma grande variedade de agregados minerais é usada na produção das misturas asfálticas e eles são geralmente classificados conforme sua fonte e modo de preparação.

Existem os agregados naturais, produzidos a partir de depósitos glaciais ou fluviais, e que não passam por nenhum processo antes de serem incorporados à mistura. São exemplos deste tipo de agregado os pedregulhos e a areia.

Os agregados processados incluem o pedregulho e a pedra britados e peneirados. Este processo de britagem acontece com a finalidade de tornar o agregado mais adequado para o uso nas misturas de pavimentação, tornando suas formas mais angulosas. Estes agregados são separados em frações de diferentes tamanhos e

misturados a fim de atribuir certas características à mistura. Alguns autores classificam este tipo de agregado também como naturais, quando provenientes de jazidas disponíveis no meio ambiente.

Os agregados sintéticos consistem em materiais que não são minados, extraídos de pedreiras ou materiais modificados por processos físicos ou químicos. Ocasionalmente um agregado sintético é produzido especialmente para proporcionar certas características à mistura asfáltica.

O agregado artificial mais utilizado na pavimentação é a escória de alto forno, um subproduto do processo de fundição do minério de ferro.

Acontece também a utilização de material proveniente de pavimentos removidos e re-processados (reciclagem de pavimentos), de entulhos sólidos de construção e de demolição, borracha de pneus moída e de outros resíduos.

Independente do processo de obtenção do agregado é esperado que este dê à mistura a resistência necessária para que esta suporte a aplicação de cargas repetidas, sem apresentar rupturas, desprendimento de partículas ou fissuração.

Para a escolha de um determinado tipo de agregado no uso da mistura asfáltica, deve-se levar em consideração as características físicas do material, sua disponibilidade, custo e adequação ao uso pretendido. Para avaliação desta adequação devem ser avaliados os seguintes aspectos:

– *Tamanho e Graduação:*

O tamanho máximo de um agregado corresponde à maior malha da peneira pela qual passa 100% do material e o tamanho máximo nominal é o da malha da peneira em que 5 a 10% em peso de agregado ficam retidos.

Os agregados utilizados em pavimentação asfáltica são especificados e tratados de acordo com suas faixas de graduação. Para a determinação da composição granulométrica dos agregados é realizado o ensaio de peneiramento, que

consiste na passagem progressiva do material por uma série de peneiras padronizadas e posterior pesagem do material retido em cada uma das peneiras.

As especificações do material granular de acordo com sua granulação foram criadas visando um controle das características da mistura, que são muito dependentes do tipo de graduação.

A curva granulométrica de um material é representada pela relação entre a porcentagem acumulada de material passante em uma dada peneira e o logarítmo de sua abertura.

De maneira geral os agregados são classificados em graúdo, miúdo e fino, de acordo com sua graduação. Segundo o Instituto do Asfalto (1995) o agregado graúdo é o material retido na peneira nº 8, com abertura de malha igual a 2,36mm, o miúdo é o material que passa na peneira nº 8, e o agregado fino ou fíler mineral é o material que tem pelo menos 70% passante na peneira nº 200, com abertura de malha igual a 75µm.

Já nas especificações do DNIT e da ABNT o agregado é considerado fino quando passa na peneira 200 (abertura da malha igual a 0,075mm) (DNIT, 1998a) e na peneira 100 (abertura da malha igual a 0,150mm) (ABNT, 2005), respectivamente. O agregado graúdo é aquele retido na peneira no 4 (abertura de malha igual a 4,8mm) para ambas classificações.

A Tabela 7 apresenta os limites estabelecidos para a classificação dos agregados de acordo com cada órgão normativo.

Tabela 7: Classificação de agregados

Classificação	Instituto do Asfalto	DNIT	ABNT
Agregado Fino	< 0,075mm	< 0,075mm	< 0,150mm
Agregado Miúdo	Entre 0,075mm e 2,36mm	Entre 0,075mm e 4,8mm	Entre 0,075mm e 4,8mm
Agregado Graúdo	> 2,36mm	> 4,8mm	> 4,8mm

A Figura 9 apresenta um exemplo de faixa granulométrica (Faixa A do DNIT) e também as faixas indicativas de classificação geral dos agregados (graúdos,

miúdos e finos) pelo DNIT, que corresponde aos limites de 0,075mm para o agregado miúdo e 4,8mm para o agregado graúdo.

Figura 9: Curva granulométrica e divisão de faixas de agregados
(Fonte: DNIT, 2006 e DNIT, 1998a)

– Limpeza:

Para uso em massas asfálticas, o agregado pétreo deve estar livre de impurezas e substâncias nocivas que prejudiquem seu desempenho. Muitas vezes é possível verificar a presença de impurezas indesejadas através de inspeção visual e o peneiramento com lavagem costuma ser um procedimento eficiente.

O ensaio de Equivalência de Areia⁷ é realizado nos agregados para a determinação da proporção de finos e material argiloso nocivo na fração do agregado que passa na peneira nº 4 (abertura de malha de 4,75mm).

⁷ Equivalente de Areia: Relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas no método publicado pelo DNIT no documento DNER – ME 054/97, Método de Ensaio: Equivalente de Areia.

A especificação do DNIT para CA no Brasil - DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006), indica que os agregados devem estar livres de torrões de argila e de substâncias nocivas e devem apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%. No Brasil o DNIT apresenta a especificação de ensaio para a obtenção do equivalente de areia no documento DNER – ME 054/97 (DNIT, 1997b).

– *Rigidez:*

Os agregados utilizados na pavimentação devem ser capazes de resistir a esmagamento, degradação e desintegração, ocorrentes durante a fabricação, espalhamento e compactação das misturas asfálticas.

Kim *et al.* (1992) concluíram após muitas pesquisas que os agregados de maior rigidez e maior dureza proporcionam à mistura elevada resistência à fadiga.

O ensaio de abrasão “Los Angeles” é realizado para verificar a resistência do material ao desgaste e abrasão. O ensaio consiste na colocação do material granular juntamente com carga abrasiva em um tambor rotacional, onde é aplicado um determinado número de revoluções. Após este procedimento são avaliadas as condições de desagregação de material por diferença de graduação. No Brasil o DNIT apresenta a especificação de ensaio no documento DNER – ME 035/98 (DNIT, 1998b).

– *Textura Superficial:*

A textura superficial dos agregados reflete-se na resistência e trabalhabilidade das misturas asfálticas.

A textura superficial rugosa tende a aumentar a resistência da mistura e pede uma maior quantidade de material asfáltico para compensar a perda de trabalhabilidade, entretanto este material adere mais facilmente em superfícies desta natureza. Os materiais com superfícies lisas, como os seixos de rios, são

costumeiramente submetidos a processos de britagem a fim de produzir uma superfície rugosa, mais propícia na pavimentação.

– *Forma das Partículas:*

De acordo com Orchard⁸ apud Balbo (2007) a forma dos grãos dos agregados pode ser definida em termos de sua esfericidade e angularidade.

A forma das partículas do agregado, assim como a textura superficial, influenciam na resistência e na trabalhabilidade da mistura asfáltica e também no esforço de compactação necessário para se atingir as características desejadas para o material.

As partículas com formas angulosas e irregulares tendem a um melhor agrupamento quando compactados, formando uma mistura mais densa.

No Brasil, para a avaliação da forma do agregado em pavimentação, é utilizado o ensaio de Índice de Forma de acordo com o procedimento indicado na Norma do DNIT - DNER-ME 086/94 (DNIT, 1994a) ou na publicação da ABNT NRB 7809/2006 (ABNT, 2006b). Este índice tem valores limites especificados nas normas de CA.

– *Absorção:*

A capacidade do agregado em absorver água deve ser observada, uma vez que um agregado poroso também pode absorver asfalto, resultando numa mistura mais seca ou menos coesa, caso esta compensação não venha a ser realizada. Para os casos de agregados porosos deve-se considerar uma quantidade adicional de asfalto na mistura, a fim de evitar este tipo de problema.

⁸ ORCHARD, D, F. Concrete technology. 3 ed. London: Applied Science Publishers

Os agregados muito porosos não são usados normalmente, a não ser que tenham alguma característica que os tornem aceitáveis, apesar do alto grau de absorção. As escórias de alto forno são um exemplo disso. São materiais muito porosos, e com alta resistência a abrasão, o que os tornam aptos à pavimentação.

– *Afinidade pelo Asfalto:*

Alguns agregados não aderem bem ao asfalto, mostrando problemas de adesividade. Isso se transforma em uma deficiência grave e torna o agregado impróprio aos serviços de pavimentação. Nestes casos, a adesividade deficiente ou não satisfatória deve ser corrigida adicionando-se melhoradores de adesividade, como os aditivos químicos líquidos conhecidos por DOP⁹ ou ainda cal hidratada. Exemplos de agregados que geralmente apresentam este tipo de problemas são agregados silícicos como o quartzito e alguns granitos, que merecem atenção especial quanto ao descolamento de película de asfalto.

2.2.1.2 Fíler

Segundo o Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transportes, DNIT através do documento DNER-EM 367/97 (DNIT, 1997a), o fíler, ou material de enchimento, é um “material inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075mm de abertura de malha quadrada”.

Sua utilização em misturas asfálticas visa o preenchimento dos vazios deixados pelos agregados graúdos e miúdos. Além disso, o fíler adicionado ao CAP proporciona um aumento da viscosidade e conseqüentemente um incremento em seu ponto de amolecimento. Isto acarreta na mistura elevação da estabilidade, do

⁹ DOP: Agente melhorador de adesividade. Composto orgânico tensoativo derivado do óleo de xisto que adicionado ao CAP melhora a aderência do mesmo ao agregado mineral.

módulo de resiliência e da resistência (LEITE *et al.*, 2002). No entanto, pode tornar a mistura mais frágil e diminuir sua vida de fadiga.

Este material engloba os finos provenientes do processo de britagem de rochas, a cal e os ligantes hidráulicos como o cimento Portland, cimento siderúrgico e pozolanas que resultam da queima de carvão e microsilica. Estes materiais têm características não inertes.

A especificação de fíler do Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transportes, DNIT - DNER-EM 367/97 (DNIT, 1997a), apresenta a granulometria que o material deve seguir. Esta classificação granulométrica é apresentada na Tabela 8.

Segundo Al-Suhaibani *et al.*¹⁰, 1992 apud Amaral, 2000, após pesquisas realizadas com materiais de enchimento variados em vários teores, chegou-se a conclusão que estes diferentes materiais produzem variações nas características físicas e mecânicas dos CAs.

Tabela 8: Granulometria do fíler segundo o DNIT

Abertura da Malha (mm)	% em Peso, passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

(Fonte: DNIT, 1997a)

2.2.1.3 Asfalto

O item 2.1 deste trabalho trata detalhadamente das características do CAP, o Cimento Asfáltico de Petróleo, utilizado na pavimentação. A seguir é apenas

¹⁰ AL-SUHAIBANI, A; MUDAIHEEM, J; ALFOZAN, F. **Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes.** Effects os agregates and minerals fillers on asphalt mixes performance, American Society for Testing and Materials – ASTM STP 1147, 1992. p. 107-130.

apresentada uma breve descrição de algumas características do material, uma vez que o mesmo já foi abordado em itens anteriores.

Uma das características mais importantes do Cimento Asfáltico de Petróleo é ser um material viscoelástico, dependente da temperatura e do tempo e frequência de carregamento. A susceptibilidade térmica de um ligante asfáltico é em geral indesejada na pavimentação pois é responsável pela variação de propriedades mecânicas da mistura asfáltica, dependendo da temperatura ambiental e da massa aplicada no revestimento.

A altas temperaturas o ligante asfáltico convencional se comporta quase como um fluido viscoso newtoniano e a baixas temperaturas como um sólido quase elástico.

Outro fator importante de se levar em conta no desempenho das misturas asfálticas é seu envelhecimento. A usinagem é um dos processos mais críticos para os ligantes asfálticos pois há uma perda de leves durante o aquecimento, o que torna o ligante mais consistente. Outro fator de envelhecimento é a mistura asfáltica exposta ao ar, que oxida o ligante asfáltico, à temperatura ambiente, que promove a remoção de mais uma certa quantidade de leves conhecida por volatilização, e à luz, que causa também reações químicas indesejáveis, principalmente na frequência do ultravioleta.

2.2.2 Concreto Asfáltico (CA)

No Brasil o material asfáltico mais utilizado nos revestimentos de pavimentos é o CA. Isso acontece devido à disponibilidade dos materiais utilizados em sua composição e ao domínio da tecnologia de dosagem, execução e controle deste material no país.

O CA é utilizado no revestimento de pavimentos e é obtido pela mistura e homogeneização de agregados minerais, materiais finos de enchimentos e CAP. A mistura é executada em usina misturadora e em temperaturas elevadas.

Este material apresenta uma série de possibilidades de dosagem de asfalto e distribuição granulométrica dos agregados, cada uma com características e indicações de aplicação diferentes.

No Brasil as especificações vigentes indicam faixas granulométricas e teores de asfalto variando de acordo com o uso do material.

As Tabelas 9 e 10 apresentam as composições do CA, segundo o Departamento Nacional de Infra Estrutura Rodoviária, DNIT, e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, DER/SP, respectivamente.

A espessura da camada de revestimento acaba resultando na necessidade de aplicação do material em mais de uma camada, sendo, nestes casos, possível a variação da granulometria dos materiais pétreos utilizados, uma vez que a camada superficial recebe o nome de camada de rolamento e as camadas inferiores são chamadas de camada de regularização, ligação ou binder. O CA ainda pode ser utilizado como camada de reperfilagem ou nivelamento, ou seja, camada que visa a regularização de deformações de pequenas amplitudes, sem função estrutural.

Tabela 9: Faixas granulométricas e requisitos para CA, segundo o DNIT

Peneira de Malha Quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerância
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Teor de Asfalto (%)		4,0 - 7,0	4,5 – 7,5	4,5 - 9,0	±0,3%
Tipo de camada de revestimento asfáltico		Camada de ligação	Camada de ligação e rolamento	Camadas de rolamento	-

(Fonte: DNIT, 2006)

Tabela 10: Faixas granulométricas e requisitos para CA, segundo o DER/SP

Peneira de Malha Quadrada		Designação				Tolerâncias
		I	II	III	IV	
ASTM	Abertura (mm)	% em Massa, passando				
2"	50,0	100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 – 100	100	-	-	± 7%
1"	25,0	75 – 100	90 – 100	-	-	± 7%
3/4"	19,0	60 – 90	80 – 100	100	-	± 7%
1/2"	12,5	-	-	90 – 100	-	± 7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	100	± 7%
Nº 4	4,75	25 – 50	28 – 60	44 – 72	80 – 100	± 5%
Nº 10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 – 50	50 – 90	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	8 – 26	20 – 50	± 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	7 – 28	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 – 10	3 – 10	± 2%
Camadas		Ligação (Binder)	Ligação ou Rolamento	Rolamento	Reperfilagem	
Variação do teor de ligante		3,5 – 5,0	4,0 – 5,5	4,5 – 6,5	4,5 – 7,0	
Espessura máxima (cm)		6,0	6,0	6,0	3,0	

(Fonte: DER/SP, 2005)

2.2.3 Dosagem de Concreto Asfáltico

A dosagem do CA consiste na obtenção da combinação das diferentes faixas granulométricas de agregados, materiais finos e asfálticos de modo a formar uma mistura que, aplicada em campo a uma dada temperatura e com determinada condição de compactação, atinja a resistência desejada às cargas aplicadas no pavimento e não apresente deterioração prematura.

Segundo Balbo (2007), os objetivos da dosagem das misturas asfálticas são a obtenção de materiais que sejam adequados ao lançamento e compactação no local desejado, estáveis sob a ação de cargas estáticas ou móveis, duráveis, apresentem baixa deformação permanente, baixa susceptibilidade à fissuração por fadiga e que

possua vazios com ar suficientes, que mesmo uma redução pelo efeito do tráfego não comprometa a eficiência da mistura.

Algumas metodologias de dosagem estão disponíveis e são utilizadas mundialmente. A seguir são indicados os procedimentos e princípios de dosagem propostos por Marshall e os apresentados no programa Superpave.

2.2.3.1 Método Marshall

A maioria das agências nos Estados Unidos da América utiliza o processo de Marshall para o projeto das misturas asfálticas. Este é de longe o método mais utilizado no mundo para tal tarefa. No Brasil este procedimento também é adotado e especificado através da Norma do Departamento Nacional de Infra Estruturas de Transportes – DNIT, DNER-ME 043/95 (DNIT, 1995).

Esta técnica foi desenvolvida por Bruce Marshall, um engenheiro do “*Mississippi State Highway Department*”, na década de 1940 para a dosagem de misturas asfálticas a quente, através de intensa pesquisa e estudos de correlações. O Corpo dos Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) consagrou esta metodologia de dosagem e publicou as primeiras especificações na década de 1960 (BALBO, 2007).

O Método Marshall faz uso de experimentos laboratoriais para o desenvolvimento de misturas asfálticas que tenham características desejadas de estabilidade/fluência e massa específica/vazios e também para controle em campo destes materiais.

Os corpos-de-prova são preparados com misturas com distribuições granulométricas dos agregados fixa e previamente definida, variando-se o teor de asfalto, geralmente de 4% a 6% do peso em relação aos agregados.

O teor de asfalto na dosagem é definido de modo a criar misturas com vazios preenchidos por ar da ordem de 3% a 5% para camada de rolamento e, em geral de 4 a 6% para camada intermediária. Este critério baseia-se no fato da necessidade da existência de um espaço para acomodação do ligante sob a ação do tráfego inicial, sob pena da ocorrência de exsudação do material asfáltico.

Após a mistura do material, os corpos-de-prova são moldados em molde cilíndrico e compactados com soquete de 4,5kg, que é solto de uma altura pré-fixada de 457,2mm sobre a seção do cilindro com a mistura. São aplicados 75 golpes por face do corpo-de-prova no caso de camada de rolamento. Dependendo da especificação e do tráfego, há indicações até de 50 golpes por face. Após este procedimento, o corpo-de-prova é extraído do cilindro e deixado à temperatura ambiente para resfriamento.

Antes do ensaio Marshall ser realizado, o corpo-de-prova a ser ensaiado deve ficar em banho à temperatura de 60°C, por cerca de 2 horas, para que atinja tal temperatura.

O ensaio Marshall é realizado em uma prensa que aplica uma força de compressão ao corpo-de-prova através de um molde especial para acomodação do corpo-de-prova. A Figura 10 indica uma prensa para ensaio Marshall. Durante o ensaio é aplicada uma carga diametral controlada através do deslocamento do pistão, que se move com uma velocidade de 50,8mm por minuto, até o rompimento da amostra. São registrados os deslocamentos verticais sofridos pelo corpo-de-prova, denominados por fluência, e os valores de força aplicados ao longo de todo o ensaio.

Com os resultados dos ensaios são obtidos os valores de duas grandezas denominadas estabilidade e fluência. A estabilidade é o valor máximo da força vertical aplicada, que causou a ruptura do corpo-de-prova quando comprimido diametralmente. A fluência é a deformação vertical sofrida pela amostra imediatamente antes de sua ruptura.

Além destes valores obtidos nos ensaios são avaliadas outras características das misturas que são medidas e empregadas na dosagem. São elas a massa específica aparente do corpo-de-prova (relação entre massa e volume), a porcentagem de vazios (relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra compactada) e a relação betume-vazios, RBV (relação entre o volume de vazios do agregado preenchido por betume e o volume de vazios do agregado mineral, VAM).

Figura 10: Prensa para ensaio Marshall
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2006)

Tendo todas estas grandezas medidas e calculadas, são elaborados gráficos com a massa específica, a porcentagem ou volume de vazios, VAM, RBV, estabilidade e fluência em função do teor de asfalto utilizado nas dosagens. Com estes gráficos, obedecendo a limites estabelecidos para cada grandeza analisada, é obtido o teor ótimo de asfalto para a mistura estudada. A Figura 11 apresenta exemplos de gráficos traçados a partir de um estudo de dosagem de CA.

A análise dos gráficos para a obtenção do teor ótimo, no caso da camada de rolamento, deve levar em consideração os seguintes pontos chave:

- Teor de asfalto para o qual o volume de vazios é igual a 4%;
- Teor de asfalto para o qual o RBV entre 75 e 82%, segundo o DNIT e entre 65 e 80%, segundo o DER/SP;
- Teor de asfalto para a máxima estabilidade;
- Teor de asfalto para a máxima massa específica; e

- Teor de asfalto de modo que a curva do VAM fique no ramo esquerdo próximo do ponto de mínimo.

ENSAIO MARSHALL - GRÁFICOS

Resumo dos parâmetros Marshall	
Teor de Ligante	4,8%
Densidade Aparente	2,562
Volume de Vazios	4,0%
RBV	77%
VAM	16,2
Estabilidade	764
Fluência	3,8

Figura 11: Gráficos de resultados do ensaio de dosagem Marshall
(Fonte: acervo próprio)

Com posse destes valores é feita uma média dos teores obtidos, ocorrendo também uma verificação deste teor médio, que deve resultar em estabilidade e fluência dentro dos limites aceitáveis.

Atualmente, tem-se dado preferência para a escolha do teor de projeto para a fixação de 4% de volume de vazios. Todas as outras propriedades passam a ser somente verificadas.

Uma das vantagens do método é sua atenção quanto às propriedades volumétricas. Outra vantagem é que o equipamento necessário no processo é relativamente barato e portátil.

A Tabela 11 apresenta os valores requeridos para as grandezas estudadas na dosagem Marshall, de acordo com alguns dos órgãos reguladores no Brasil.

A configuração final da mistura tem grande importância no comportamento do material em campo. A Figura 12 apresenta a relação do teor de asfalto com a estabilidade e a durabilidade de uma mistura asfáltica. Observa-se que o teor de asfalto deve estar em uma faixa restrita do gráfico para que o material seja durável e não tenha problemas de estabilidade, como deformações permanentes.

Um ponto de atenção ao método é a sua natureza empírica. Isso faz com que qualquer alteração na moldagem do corpo-de-prova e procedimentos de ensaios, com relação ao método original, acarrete em perda de confiabilidade na relação da mistura ensaiada em laboratório com o comportamento em campo. Um exemplo de uma modificação na preparação dos corpos-de-prova é o preparo dos mesmos com materiais reaquecidos.

O método Marshall pode não conseguir garantir bom desempenho em campo e, internacionalmente, vem sendo substituído. Este fato já ocorre nos Estados Unidos e Canadá e em alguns países da Europa, que usam a tecnologia Superpave, onde foi abandonado o Marshall. Na França, em especial, há muitos anos não se usa mais a dosagem Marshall, havendo uma metodologia bastante diferenciada desta.

Tabela 11: Características exigidas para o CA

	DNIT	DNIT	DER/SP	DER/SP
Emprego da Mistura	Capa	Binder	Capa	Binder
Estabilidade (kgf)	500	500	800	800
Fluência (mm)	2,0 a 4,5	2,0 a 4,5	2,0 a 4,0	4,0 a 6,0
Percentual de Vazios	3 a 5	4 a 6	4	3 a 5
RBV	75 a 82	65 a 72	65 a 80	65 a 75

(Fontes: DER/SP, 2005, DNIT, 2006)

Figura 12: Gráfico de estabilidade e durabilidade em função do teor de asfalto
(Fonte: MONISMITH *et al.*, 1989)

2.2.3.2 Método Superpave

O método de projeto de misturas asfálticas proposto no programa Superpave, desenvolvido nos EUA a partir dos anos 80, está incluído no modelo baseado na *performance* desenvolvido no programa SHRP – “*Strategic Highway Research Program*”. O programa Superpave foi desenvolvido para englobar todas as classes de rodovias, incluindo rodovias rurais e urbanas com tráfego pesado ou leve.

O dimensionamento é composto por três níveis, sendo que cada um deles, numa escala crescente, aprimora ainda mais a mistura que se está projetando. O tráfego e a importância da rodovia são indicadores da complexidade do processo.

Uma descrição sucinta dos processos de cada etapa é apresentada na sequência.

– *Nível 1:*

O Nível 1 consiste em um projeto volumétrico, e é baseado em avaliações laboratoriais de agregados e asfalto, de modo a obter uma mistura com uma proporção adequada de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume-vazios. Esta fase do projeto, em linhas gerais, segue os seguintes passos:

- . Seleção do tipo de asfalto;
- . Seleção do tipo de agregado;
- . Medição da compatibilidade do asfalto e agregados escolhidos;
- . Determinação da estrutura / graduação do agregado;
- . Determinação do teor de asfalto; e
- . Verificação quanto à resistência a ação da umidade.

A avaliação final e obtenção das proporções dos componentes da mistura se dá através de análise de propriedades como volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume-vazios (RBV), assim como se faz no método de Marshall, porém com outro tipo de adensamento da mistura, através de um compactador giratório, como será apresentado nos itens adiante.

– *Nível 2 e Nível 3:*

Nos Níveis 2 e 3 de dimensionamento da mistura são utilizados testes mecânicos de previsão do desempenho em pista, permitindo que a mistura seja capaz de resistir a deformações permanentes e trincamentos.

O Nível 2 do procedimento utiliza a mistura resultado do Nível 1, melhorando suas características no que diz respeito ao comportamento perante a deformação permanente, trincamento devido à fadiga e o trincamento devido a baixas temperaturas.

O Nível 3 é muito similar ao Nível 2, com a utilização de uma gama maior de ensaios baseados na performance da mistura. Além da caracterização do material ser feita de forma mais completa nesta etapa, a avaliação e consideração dos dados relacionados ao clima ao qual a mistura está sujeita são mais rigorosos.

A Figura 13 apresenta os testes exigidos para a previsão da performance de misturas nos Níveis 2 e 3 para pavimentos novos. A descrição detalhada dos testes listados é apresentada na publicação SHRP A-410 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a).

Figura 13: Testes exigidos nos Níveis 2 e 3 do método Superpave
(Fonte: SHRP-410, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a – tradução desta autora)

Além disso, é proposta também a realização de testes de controle durante a construção da camada asfáltica, a fim de verificar se a produção da mistura segue de acordo com o projetado em laboratório.

A Figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia de projeto de misturas proposto pelo Superpave.

Figura 14: Fluxograma do método de dimensionamento de misturas Superpave
(Fonte: SHRP-410, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a - tradução desta autora)

Segundo o National Research Council (1994b), é esperado que a maioria dos processos de dimensionamento de misturas use os Níveis 1 e 2, enquanto que o

Nível 3 deve ser usado apenas em projetos de pavimentos que levam tráfego muito pesado ou em rodovias de importância elevada.

Todo o sistema de dimensionamento proposto é baseado na compactação dos corpos-de-prova feita através do compactador giratório. Este equipamento está representado na Figura 15 e tem um ângulo de giro de $1,25 \pm 0,02^\circ$, uma taxa de 30 giros por minuto, uma pressão vertical durante os giros igual a 600kPa e a capacidade de produzir amostras com 150 x 150mm.

A partir dos dados do processo de compactação é obtida a chamada Curva de Densificação, que relaciona o percentual da massa específica máxima esperada que já se atingiu e o número de giros executados pelo equipamento. Um exemplo desta curva é apresentado na Figura 16.

São pontos notáveis da curva aqueles onde acontecem os giros $N_{inicial}$ e $N_{máx}$, utilizados para a avaliação da compactação da mistura, e $N_{projeto}$, que é utilizado na definição do percentual de asfalto.

Segundo o National Research Council (1994a) o $N_{projeto}$ é função da temperatura do ar e do número “N” de repetições do eixo padrão, e varia entre 68 e 172, como apresentado na Tabela 12. Os valores de $N_{inicial}$ e $N_{máx}$ são calculados por equações em função do $N_{projeto}$.

As especificações do Superpave fazem indicações quanto aos valores de $C_{inicial}$ e $C_{máx}$, que são respectivamente a relação entre a massa específica relativa e a massa específica máxima prevista para os pontos de $N_{inicial}$ e $N_{máx}$. A indicação é que $C_{inicial}$ seja menor ou igual a 89% e $C_{máx}$ seja menor ou igual a 98% (vazios de ar devem ser maiores que 2%). Estes valores garantem que a mistura possua uma boa estrutura de agregados e também que não sejam compactadas excessivamente de modo a apresentar deformações permanentes devido à ação do tráfego.

Figura 15: Compactador Giratório
(Fonte: modificado de SHRP-410, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a)

Figura 16: Curva de densificação obtida do Compactador Giratório
(Fonte: Modificado de: SHRP-410, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a)

Tabela 12: Giros indicados para a compactação das amostras

Tráfego (N_{AASHTO})	Média da Temperatura de Projeto do Ar ($^{\circ}C$)			
	<39	Entre 39 e 41	Entre 41 e 43	Entre 43 e 45
$< 3 \times 10^5$	68	74	78	82
$< 1 \times 10^6$	76	83	88	93
$< 3 \times 10^6$	86	95	100	105
$< 1 \times 10^7$	96	106	113	119
$< 3 \times 10^7$	109	121	128	135
$< 1 \times 10^8$	126	139	146	153
$> 1 \times 10^8$	143	158	165	172

(Fonte: SHRP – 410, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1994a)

Pela Tabela 12, é possível observar a preocupação demonstrada na tecnologia SHRP, que prevê para climas mais quentes um maior número de giros para projeto.

2.2.4 Propriedades Mecânicas e Complementares

A caracterização mecânica dos materiais asfálticos é uma tarefa complexa em virtude dos resultados dependerem de uma série de fatores como o meio ambiente, a magnitude, tempo e forma de aplicação de cargas, frequências das mesmas e o envelhecimento das misturas com a ação do tempo.

Neste item são descritos os principais defeitos que ocorrem na mistura asfáltica e os meios de previsão e avaliação destes defeitos, quais sejam: a deformação permanente e o trincamento por fadiga.

Além disso, são apresentados também ensaios complementares que vem sendo bastante utilizados no Brasil para caracterização de misturas asfálticas.

2.2.4.1 Deformação Permanente

A deformação permanente em revestimentos asfálticos é caracterizada pela seção da superfície que não se encontra mais em sua posição original. Ela é chamada de

permanente, pois representa o acúmulo de pequenas deformações que ocorrem a cada aplicação de cargas e esta deformação não pode ser recuperada. A forma mais comum das deformações permanentes é a trilha de roda.

A deformação permanente nas misturas asfálticas pode ser um fenômeno de acomodação e redução de vazios no próprio material ou nas demais camadas. Em geral provém de falta de ligante asfáltico ou compactação deficiente, ou ainda o uso de temperaturas baixas de compactação. Pode ainda ser proveniente do cisalhamento do subleito.

A deformação permanente por fluência é um fenômeno que ocorre em altas temperaturas e que afeta a sensação de conforto do usuário, aumenta a formação de lâmina d'água sobre a pista em períodos chuvosos, diminuindo assim a segurança. Outra razão é o excesso de ligante ou uso de temperatura muito elevada na compactação, reduzindo o volume de vazios.

A ocorrência deste defeito indica problemas estruturais no pavimento, problemas no projeto das misturas asfálticas do revestimento ou ambos. Este problema poderia ser evitado por uma seleção de materiais e compactação adequados e por um projeto bem feito de forma a limitar as tensões atuantes na estrutura.

No caso das misturas asfálticas, uma grande porção da resistência à deformação permanente vem do esqueleto sólido dos agregados, mas a porção proveniente do material asfáltico também é muito importante.

Nos ensaios realizados na pista experimental da AASHO, foram notadas as contribuições de cada camada do pavimento na deformação permanente, sendo que 1/3 das deformações eram de responsabilidade do revestimento asfáltico (HRB, 1962¹¹ apud MEDINA *et al.*, 2005). Com a alteração dos processos e equipamentos de compactação e mesmo dos procedimentos de dosagem, pode-se hoje obter revestimentos asfálticos muito resistentes a deformações permanentes.

¹¹ Highway Research Board, HRB. **The AASHO Road Test**, Report 5: Pavement Research; Report 6: Special Studies and Report 7: Summary Report. 1962

Nas pistas a medição da deformação permanente é realizada com o auxílio de uma régua ou treliça que mede a flecha ou afundamento nas trilhas de roda. Segundo Medina *et al.* (2005) em alguns países o valor admissível para o afundamento da trilha de rodas para auto-estradas é de 10mm e para estradas com volume de tráfego menor poderia chegar até 16mm. Se for atingido o valor de 20mm é recomendado o reparo imediato da pista. Na França, em auto-estradas, limita-se em 5mm a deformação permanente em trilhas de roda e no Brasil a ARTESP limita este valor em 10mm.

Os ensaios de laboratório disponíveis para avaliação da deformação permanente são os ensaios fundamentais (triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não confinada - *creep* estático e *creep* dinâmico), e os ensaios de simulação de laboratório (SHELL, 2003 apud BERNUCCI *et al.*, 2007). Estes últimos serão descritos adiante.

O ensaio triaxial com carregamento repetido simula as condições de campo, entretanto devido à complexidade de sua execução este ensaio não vem sendo usado no Brasil.

A seguir é apresentada a descrição dos ensaios utilizados no Brasil para estudos de deformação permanente.

– *Testes Acelerados de Simulação:*

O projeto de pavimentos leva em consideração a vida útil que se deseja para a estrutura. Vida útil é o período no qual o pavimento deve ser capaz de resistir aos esforços e solicitações impostos pelo tráfego, mantendo condições aceitáveis de conforto e segurança ao usuário. Este período é adotado considerando características do tráfego da região onde a estrutura será implantada e seu crescimento.

O pavimento recém construído deve apresentar condições ideais de conforto e segurança ao rolamento. Com o passar do tempo ocorre um decréscimo destas condições que chegariam ao seu limite aceitável ao fim da vida útil.

A presença de tráfego intenso e cargas elevadas sobre a estrutura acarretam um decréscimo acelerado das condições estruturais e funcionais do pavimento.

A fim de simular a ação do tráfego ao longo dos anos são realizados nas estruturas ensaios aplicados diretamente em campo (verdadeira grandeza) ou em laboratório por meio da utilização de simuladores de tráfego em verdadeira grandeza.

Os simuladores de tráfego são equipamentos desenvolvidos com o intuito de, como o nome diz, simular a ação de carregamentos provenientes da passagem de veículos na pista, num período reduzido de tempo.

A utilização de simuladores de tráfego vem sendo realizada por órgãos viários e pesquisadores para a obtenção de dados mais realistas do comportamento do pavimento em escala real, em curto espaço de tempo. Os resultados obtidos são utilizados em melhorias nos modelos de dimensionamento de estruturas, na caracterização e comparação do comportamento de materiais de pavimentação, ou na previsão de desempenho destas estruturas principalmente para programar antecipadamente manutenções ou reabilitações.

Sem a utilização da simulação, seja em laboratório como em campo, resultados de propriedades determinadas em laboratório podem levar 10 a 20 anos para serem confirmados em pista.

No Brasil são encontrados apenas dois equipamentos de simulação de tráfego em laboratório, o francês desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) e o norte-americano *Asphalt Pavement Analyser* (APA) de propriedade da BR Distribuidora (BERNUCCI *et al.*, 2007).

O modelo LCPC francês é um exemplo de simulador de pequeno porte tipo “*Wheel-Tracking Rutting Test*”, que foi desenvolvido pelo “*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*” e tem como finalidade a avaliação de afundamentos de trilhas de roda em misturas asfálticas em laboratório, em escala reduzida a de pista. Um exemplar deste simulador pode ser encontrado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP. Este ensaio emprega em geral limites máximos de afundamentos em laboratório, que se forem respeitados, a probabilidade de ocorrência de afundamentos em pista é insignificante.

O ensaio no simulador é realizado com placas moldadas na temperatura de projeto, através de amassamento por pneus com cargas e pressão reguláveis, com o auxílio de um equipamento denominado mesa compactadora (Figura 17). A compactação produz placas de dimensões padronizadas de 500mm de comprimento por 180mm de largura. A espessura das placas pode ser igual a 50 ou 100mm (MERIGHI, 1999).

O ensaio é realizado no equipamento que possui roda com pressão dos pneus e carga do eixo controláveis. A temperatura de ensaio também é controlada, usualmente sendo empregado o valor de 60°C para aceleração do processo.

O ensaio é realizado em duas placas simultaneamente, posicionadas uma em cada lado do equipamento, carregadas por um eixo com dois pneumáticos.

O pneu fica constantemente em contato com a placa e realiza movimentos longitudinais de ida e vinda em ciclos de 1Hz. A cada determinado número de ciclos é medido o afundamento na trilha de roda em diversos pontos. A Figura 18 ilustra o simulador LCPC.

Figura 17: Mesa compactadora do Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
(Fonte: acervo do laboratório)

Figura 18: Simulador LCPC do Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
(Fonte: acervo do laboratório)

Os simuladores de campo podem ser instalados de forma estacionária em pistas-teste, ou podem ser transportáveis ou móveis para serem empregados sobre vias ou rodovias. Isto é uma vantagem, pois permite o teste em estradas em uso.

A solicitação da estrutura é feita unidirecionalmente, no sentido do tráfego, com movimentos de vai-e-vem, ou seja, nos dois sentidos. Durante o carregamento ou passagem de pneus, sensores previamente calibrados medem forças e deslocamentos. O objetivo destes ensaios é acelerar a ação do tráfego previsto para uma dada situação real, possibilitando a verificação dos danos deste tráfego ao pavimento por meio de ensaios de campo que são realizados periodicamente entre baterias de solicitações feitas pelo simulador.

A utilização destes simuladores possibilita uma investigação mais próxima à realidade, porém devem ser considerados fatores de correção laboratório-campo na avaliação dos resultados obtidos.

No Brasil são encontrados três tipos de simuladores de campo em operação.

O primeiro a ser utilizado foi o simulador instalado na pista experimental do IPR/DNER, construída no Rio de Janeiro em 1975, que gerou diversas pesquisas

e trabalhos no Brasil. O segundo foi o simulador da UFRGS/DAER-RS que está instalado no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre, desde 1995, e que já gerou vários trabalhos de pesquisa que vêm sendo implementados nas rodovias do Estado (FRITZEN, 2005 e NUÑES, 1997).

O terceiro tipo é o simulador denominado “*Heavy Vehicle Simulator*” (HVS), que foi desenvolvido na África do Sul pelo “*Council for Scientific and Industrial Research*” e se encontra disponível para uso em testes desde 1978. Desde então mais de 400 seções já foram submetidas às quatro gerações do simulador desenvolvidas até hoje. Existem dois destes tipos de equipamentos disponíveis e atuantes no Brasil desde 2003.

Este último simulador citado é o equipamento que foi utilizado nos estudos que são objeto deste trabalho.

Segundo a Dynatest (DYNATEST, 2004) os simuladores móveis HVS possuem sistema hidráulico de carregamento e podem ser aplicadas, através de eixo com roda simples ou roda dupla, cargas entre 30kN e 200kN, com velocidades de até 12km/h. O carregamento é feito com passagens do eixo para frente, e para trás, em uma linha reta de aproximadamente 6 metros de comprimento.

Influências ambientais como temperatura e variação de umidade no pavimento também podem ser simuladas através da utilização do equipamento em câmaras climatizadas.

Dependendo das condições, o HVS é capaz de simular até 20 anos de carregamento pesado em aproximadamente dois ou três meses de operação. Isso acontece quando o ensaio se realiza por vinte e quatro horas ao dia, sete dias por semana e com carregamento de até duas vezes e meia o aplicado por um eixo típico de veículo pesado.

As Figuras 19 e 20 apresentam ilustrações do simulador HVS utilizado no presente estudo.

Figura 19: Simulador móvel HVS
(Fonte: Dynatest, 2006a)

Figura 20: Simulador móvel HVS
(Fonte: Dynatest, 2006a)

– *Ensaio de Creep:*

O ensaio de *creep* estático é o mais simples para a avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas. No Brasil este ensaio também é conhecido como ensaio de compressão uniaxial, por ser realizado por meio da aplicação de cargas compressivas. Entretanto o ensaio também pode ser realizado com a aplicação de cargas de torção.

Os corpos-de-prova utilizados no ensaio são geralmente cilíndricos e podem ser retirados do campo por extração ou moldado no laboratório. O ensaio consiste,

em linhas gerais, na aplicação de uma carga de compressão estática e contínua no corpo-de-prova. O tempo de aplicação de carga pode variar mais existe uma tendência de que esse tempo seja igual a 1 hora (TAIRA, 2001).

A cada determinado intervalo de tempo é medido o deslocamento sofrido devido à ação da carga.

O histórico de deformação ao longo do ensaio e a tensão aplicada determinam a função fluência (*creep compliance*), dada pela expressão a seguir (BERNUCCI *et al.*, 2007).

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2)$$

Onde:

- . $D(t)$ é a função fluência;
- . $\varepsilon(t)$ é a deformação em função do tempo; e
- . σ_0 é a tensão constante aplicada.

2.2.4.2 Trincamento e Fadiga

O defeito mais freqüente nos pavimentos asfálticos no Brasil é a ocorrência de trincas do revestimento asfáltico. O trincamento se desenvolve, em geral, pela flexão da camada de revestimento asfáltico apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente.

O fenômeno de fadiga ocorre devido ao fato de que os materiais da pavimentação não são sólidos ideais e a cada carregamento, que solicite o material com tensões abaixo da sua resistência à ruptura, os deslocamentos e deformações causam um dano ao material, mesmo que ínfimo. O acúmulo destes danos leva às microfissurações que progridem com a continuidade de solicitações repetidas pois o material perde as características originais por sofrer estas descontinuidades. A

evolução das microfissuras leva ao aparecimento de fissuras e trincas interligadas, visíveis a olho nu, e caracterizam a fadiga do material.

O trincamento devido à fadiga é um defeito que ocorre mais freqüentemente em trilhas de roda, onde altos carregamentos são aplicados repetidamente. Um sinal precoce de fadiga é o aparecimento de trincas longitudinais intermitentes na trilha de roda das pistas.

Um estado intermediário do trincamento por fadiga são as chamadas “trincas jacaré” e o estágio final do fenômeno é o destacamento de parcelas do revestimento formando na superfície “painéis”.

Quando as misturas asfálticas mostram elevada rigidez elas trabalharão de forma favorável caso as deflexões da estrutura sejam baixas, de tal sorte que as tensões de tração estarão limitadas. Em casos de camadas de revestimento asfáltico delgada e rígida, sobre estrutura de alta deflexão, o trincamento será precoce por fadiga. As camadas delgadas e rígidas, neste caso, somente serão indicadas sobre estruturas de baixa deflexão.

Os revestimentos muito delgados e flexíveis aplicados diretamente sobre a base poderão trabalhar somente à compressão. Outra situação que faz o material asfáltico trabalhar diretamente à compressão é quando a base é rígida e o revestimento está aderido a ela.

As misturas asfálticas menos rígidas, com menor módulo de resiliência e elevado retorno elástico poderão, por sua vez, ser empregadas em pavimentos com deflexões mais elevadas, pois aceitam maiores deformações sem causar danos precoces.

Em muitos casos a ocorrência da fadiga apenas indica que a estrutura já suportou o número de repetições para o qual foi projetada. Se o trincamento ocorrer muito antes do fim da vida útil de projeto, pode ser um sinal de que o pavimento recebeu mais carregamentos do que o esperado em projeto.

Segundo o Federal Highway Administration (1995), as melhores maneiras de evitar a fadiga são:

- Previsão correta do número de repetições de carga que irá solicitar a estrutura durante a vida útil de projeto;
- Manter o subleito “seco” usando as maneiras disponíveis de garantia de drenagem eficiente;
- Usar pavimentos mais espessos;
- Usar materiais que não são susceptíveis de forma significativa à queda de resistência em presença de umidade; e
- Usar materiais com a resiliência compatível para resistir às deflexões usuais.

Existe também a ocorrência do trincamento causado por condições ambientais adversas, principalmente devido ao clima frio. Este tipo de defeito é caracterizado pela ocorrência de trincas transversais intermitentes que ocorrem com espaçamentos surpreendentemente similares.

O concreto asfáltico é o principal agente quando se fala em trincamento pela ação de baixas temperaturas.

Para evitar a ocorrência destes fenômenos os engenheiros devem utilizar um material asfáltico mais mole, de menor consistência, que apresente uma tendência ao envelhecimento de forma controlada e com controle rígido de quantidade de ar incorporado à mistura para evitar a oxidação.

No Brasil não é comum este tipo de defeito devido à quase não ocorrência de baixas temperaturas.

2.2.4.3 Módulo de Resiliência

Segundo Bernucci *et al.* (2007), os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais de pavimentação foram iniciados na década de 30 com Francis Hveem. Foi

ele quem, nesta época, relacionou as deformações recuperáveis (resiliência¹²) com as fissuras nos revestimentos. O nome módulo de resiliência foi definido para que não fosse confundido com o módulo de Young, que é determinado estaticamente.

No Brasil, o ensaio para obtenção de módulo de resiliência em misturas asfálticas, é preconizado pela especificação do DNIT - DNER-ME 133/94 (DNIT, 1994c).

Este ensaio é realizado aplicando-se uma carga repetida no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e é então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal, correspondente à tensão gerada. A Figura 21 apresenta o esquema de carregamento no ensaio de módulo de resiliência.

Figura 21: Esquema do ensaio de compressão diametral
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

No país existem equipamentos que já incorporam todo o aparato necessário para a realização do ensaio. Um exemplo deste equipamento é apresentado na Figura 22.

¹² Resiliência: é a “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Figura 22: Equipamentos para ensaio de compressão diametral de carga repetida
(Fonte: BERNUCCI et al., 2007)

2.2.4.4 Desgaste Cântabro

O ensaio Cântabro avalia o desgaste da massa asfáltica, que vem a ser uma ocorrência comum em pavimentos brasileiros. Segundo Santana¹³ apud Bernucci et al., (2007) o desgaste é o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento.

Este ensaio é original da Espanha (*Centro de Estudios de Carreteras e Universitat Politècnica de Catalunya*) e originou a norma espanhola em 1996 (BERNUCCI et al., 2007). No Brasil a especificação do DNIT DNER-ME 383/99 (DNIT, 1999b) e a NBR 15140 (ABNT, 2004c) apresentam a metodologia deste ensaio.

A perda de agregados da massa asfáltica é verificada através da colocação de um corpo-de-prova Marshall, devidamente pesado e condicionado a 25°C, dentro do equipamento utilizado para a realização do ensaio de Abrasão Los Angeles sem as esferas de aço. Após isto o corpo-de-prova é submetido à 300 revoluções na velocidade angular de 30 a 33rpm e pesado novamente.

¹³ SANTANA, H. Manual de pré-misturados a frio. Rio de Janeiro: IBP / Comissão de Asfalto, 1993.

O desgaste Cântabro é determinado pela seguinte expressão:

$$D = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

- . D é o valor do desgaste (%);
- . M_1 é a massa do corpo-de-prova antes do ensaio (kg); e
- . M_2 é a massa do corpo-de-prova após o ensaio (kg).

O desgaste é a média aritmética de três ensaios realizados para um mesmo teor de asfalto.

A especificação brasileira indica que, para misturas porosas, o valor máximo do desgaste deve ser igual a 25% (DNIT, 1999b). Não existem referências para CA denso.

2.2.4.5 Perda por Umidade Induzida

O ensaio de perda por umidade induzida avalia os danos causados pela ação da água nas misturas asfálticas. Estes danos evidenciam os possíveis problemas de adesividade da massa.

No Brasil o teste mais utilizado é o descrito na publicação AASHTO T 283 (AASHTO, 2007). Segundo este procedimento os corpos-de-prova de misturas asfálticas podem ser preparadas em laboratório seguindo os métodos de dosagem Marshall ou Superpave e devem ter volume de vazios entre 6 e 8%.

Para o experimento são moldados 6 corpos-de-prova, sendo que 3 deles são submetidos a um condicionamento. Os corpos-de-prova sem condicionamento são colocados em sacos plásticos para proteção, imersos em banho de água a 25°C por 2 ± 1 h e submetidas ao ensaio de resistência à tração, que tem seu valor final sem condicionamento como sendo a média dos três valores encontrados.

O condicionamento é constituído das seguintes etapas:

- Colocação dos corpos-de-prova em um recipiente com água destilada com aplicação de pressão de 33.863 a 87.993Pa a fim de se obter a saturação dos vazios de 55 a 80% de água;
- Congelamento a -18°C por um período mínimo de 16 hs;
- Imersão em um banho de água a 60°C por um período de 24 ± 1 h; e
- Imersão em um banho de água a 25°C por um período de 2 ± 1 h.

Após o condicionamento são realizados ensaios de resistência à tração em todas as amostras e através da razão entre a resistência à tração dos corpos-de-prova condicionados e o valor obtido sem condicionamento é calculado o valor da resistência à tração retida por umidade induzida - RRT.

Para as misturas contínuas o valor mínimo de RRT indicado é igual a 70% (MOURA, 2001).

2.2.5 Avaliação da Textura dos Pavimentos

A textura da superfície é um dos principais aspectos a ser considerado na avaliação da aderência entre os pneus e o pavimento. A classificação da textura depende do comprimento de onda ou distância entre dois picos ou depressões na superfície, de acordo com a Tabela 13 (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Tabela 13: Classificação da textura de um pavimento

Classificação da Textura	Faixa de comprimento de onda
Microtextura	$\lambda < 0,5\text{mm}$
Macrotextura	$0,5\text{mm} \leq \lambda < 50\text{mm}$
Megatextura	$50\text{mm} \leq \lambda < 500\text{mm}$
Irregularidade	$0,5\text{m} \leq \lambda < 50\text{m}$

(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

A megatextura e a irregularidade interferem na dinâmica do movimento dos veículos e no contato com o pavimento, afetando a estabilidade direcional e a aderência em pistas molhadas. A microtextura e a macrotextura interferem na aderência e na textura da superfície. Neste trabalho são apresentados meios de avaliação destes dois últimos grupos.

A Figura 23 apresenta uma representação esquemática da microtextura e macrotextura

Figura 23: Micro e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

2.2.5.1 Microtextura

A microtextura é dependente da superfície e da aspereza dos agregados, ela é muito importante para o rompimento da película de água sobre a superfície e a melhoria da aderência a baixas velocidades de rolamento, até cerca de 40km/h (BERNUCCI *et al.*, 2007). Ela pode ser avaliada através do uso de um equipamento simples como é o pêndulo britânico, cujo ensaio é apresentado no documento ASTM E 303-93 (ASTM, 2003). O aparelho é equipado com um braço perpendicular, cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha que é atritada com a superfície do pavimento umedecida. Através do uso do pêndulo é obtido o valor do VRD – valor de resistência à derrapagem. A Tabela 14 apresenta as classes de microtextura dependentes do valor obtido para o VRD.

A Figura 24 apresenta ilustrações do equipamento em uso.

Tabela 14: Classificação da microtextura

Classe	Valor de resistência à derrapagem
Perigosa	< 25
Muito lisa	$25 \leq \text{VRD} < 31$
Lisa	$32 \leq \text{VRD} < 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq \text{VRD} < 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq \text{VRD} < 54$
Rugosa	$55 \leq \text{VRD} < 75$
Muito rugosa	$\text{VRD} > 75$

(Fonte: ABPV, 1999)

Figura 24: Pêndulo Britânico em operação
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

2.2.5.2 Macrotextura

A macrotextura depende da rugosidade formada pelos agregados e material asfáltico e é uma das características mais importantes para a aderência, principalmente para velocidades acima de 50km/h (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A maneira mais comum para se determinar a macrotextura tem sido através do ensaio da mancha de areia, apresentado na especificação ASTM E965/96 (ASTM, 2006b), devido à facilidade de execução e ao baixo custo dos materiais envolvidos no experimento. Utiliza-se neste procedimento um volume de 25.000mm³ de areia,

que deve ser arredondada e uniforme, passante na peneira nº 60 (0,177mm) e retida na peneira nº 80 (0,250mm).

A areia então é espalhada sobre a superfície do pavimento com o auxílio de uma base de um pistão circular, que é movimentada em círculos, paralelamente à superfície do pavimento, de modo a distribuí-la de forma homogênea, formando um círculo de areia. O movimento deve ser interrompido quando algumas pontas dos agregados forem visualizadas. Na seqüência mede-se então o diâmetro do círculo de areia em quatro dimensões distintas e faz-se a média destas quatro leituras. A altura da mancha de areia deve ser calculada da seguinte forma:

$$HS = \frac{4.V}{D^2 . \pi} \quad (3)$$

Onde:

HS é a altura média da mancha de areia (mm);

V é o volume de areia (25.000mm); e

D é o diâmetro médio do círculo de areia (mm).

A partir deste valor tem-se a classificação da macrotextura segundo apresentado na Tabela 15. A Figura 25 apresenta a seqüência de execução do teste de mancha de areia.

Tabela 15: Classificação da macrotextura

Classe	Valor de altura média de mancha de areia (mm)
Muito fina ou muito fechada	$HS \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 < HS \leq 0,40$
Média	$0,40 < HS \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 < HS \leq 1,20$
Muito grosseira ou muito aberta	$HS > 1,20$

(Fonte: ABPV, 1999)

Figura 25: Teste da mancha de areia em execução
(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2007)

3 ESTUDO DE CASO: NOVADUTRA

O objetivo principal deste trabalho, como anteriormente apresentado, é a comparação de comportamento entre dois revestimentos asfálticos do tipo Concreto Asfáltico, sendo um usinado com CAP 50-70 e outro com CAP 30-45, ambos convencionais. Este objetivo será alcançado pela avaliação dos resultados de ensaios realizados em pista da Rodovia Presidente Dutra, em especial em três trechos construídos com revestimento de CA com CAP 30-45 e com CAP 50-70, que foram monitorados periodicamente e que sofreram a simulação de tráfego por equipamento tipo HVS da Simular. Graças a estes resultados, é possível promover a comparação das características e do desempenho em pista destes dois tipos de ligantes asfálticos convencionais, o CAP-30-45 e o CAP-50-70.

Toda a descrição deste projeto, que teve a participação e apoio de diversas entidades, é feita nos subitens que se seguem. Para tanto, foram colaboradores no desenvolvimento do experimento:

- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres;
- NovaDutra / Centro de Pesquisas Rodoviárias / Engellog;
- COPPE-UFRJ, através do Setor de Misturas Asfálticas do Laboratório de Geotecnia;
- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação;
- Dynatest Engenharia Ltda.;
- Simular – Tecnologia de Pavimento Ltda.;
- Usina Jambeiro da Serveng Civilsan; e
- Construtora Dan Hebert.

A Concessionária da Rodovia Presidente Dutra, a NovaDutra cedeu gentilmente todos os resultados disponíveis para a finalidade da pesquisa desta dissertação.

3.1 Descrição do Experimento

A pesquisa desenvolvida consistiu na concepção de diferentes tipos de misturas asfálticas, sua caracterização em laboratório, previsão e determinação de comportamento por meio de ensaios de laboratório e a realização de uma série de ensaios na pista antes e após a utilização de simulador de tráfego acelerado para a determinação dos resultados em campo e confirmação de previsões de laboratório.

Foram realizadas dosagens de misturas com diferentes ligantes e com um único tipo e graduação de agregado, assim, a avaliação dos resultados obtidos para cada mistura permite conhecer os reflexos da ação de cada tipo de material asfáltico ou método de dosagem utilizado.

Todos os dados referentes a materiais e misturas utilizados são descritos adiante, no sub-item caracterização de materiais e misturas em laboratório.

Cinco misturas foram projetadas e selecionadas para aplicação em pista, sendo objeto de interesse desta dissertação três destes materiais, sendo eles:

- CA faixa C do DNIT com CAP 50-70 – Marshall com 75 golpes;
- CA faixa C do DNIT com CAP 50-70 – Superpave com 125 giros; e
- CA faixa C do DNIT com CAP 30-45 – Marshall com 75 golpes.

Estas misturas foram implantadas em trechos experimentais, com 60 metros cada, construídos na alça de acesso da Via Dutra (BR-116/SP) com a Rodovia D. Pedro (SP-65), nas proximidades do km 169 da BR-116. A Figura 26 apresenta uma ilustração do posicionamento das seções-teste.

BR-116/SP – Rodovia Presidente Dutra – km 169

Figura 26: Ilustração das seções teste
(Fonte: Dynatest, 2006a)

A região selecionada se localiza em uma alça que sofreu pouca ação do tráfego desde sua inauguração, há cerca de 20 anos. Foi realizado um furo de sondagem no local que mostrou a seguinte estrutura de pavimento:

- Revestimento de Concreto Asfáltico (CA) com 12cm;
- Base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) com 20cm;
- Sub-base de Brita Graduada Simples (BGS) com 17cm;
- Reforço do subleito em solo com 21cm;

- Reforço do subleito com Rachão com 14cm; e
- Subleito.

Para a determinação dos módulos de resiliência das camadas foi executado um ensaio de levantamento defletoométrico, com o equipamento “*Falling Weight Deflectometer*” (FWD), no pavimento das pistas em questão e realizado um estudo de retroanálise das camadas através do programa computacional Elmod4.

A execução dos serviços de pavimentação das pistas foi realizada entre 16 de setembro e 07 de outubro de 2005, quando foram fresados 4cm do revestimento asfáltico existente e, após a limpeza da pista com jato de ar e execução da pintura de ligação, o revestimento do pavimento foi recomposto com a mistura projetada para cada trecho de teste.

3.2 Caracterização de Materiais e Misturas em Laboratório

A primeira fase dos trabalhos foi a realização de ensaios em laboratório, e teve início com a evolução das dosagens das misturas utilizando ligantes asfálticos e metodologias diferentes.

Para as misturas de interesse, os projetos das dosagens resultaram nos valores de interesse apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resumo dos resultados de teor ótimo para cada mistura

Tipo de Ligante	Método de Dosagem	Massa específica máx (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Volume de Vazios (%)	VAM (%)	CAP (% peso)
CAP 50-70	Marshall 75 golpes	2,463	2,363	4,0	14,3	4,7
CAP 50-70	Superpave 125 giros	2,475	2,376	3,9	13,5	4,4
CAP 30-45	Marshall 75 golpes	2,459	2,358	4,1	14,7	5,0

(Fonte: Dynatest, 2006a)

Para as misturas testadas em pista foram também realizados em laboratório ensaios e procedimentos adicionais de caracterização e desempenho, quais sejam:

- Ensaios de caracterização do ligante quando do recebimento dos materiais;
- Ensaios de Deformação Permanente com o simulador de tráfego tipo LCPC francês (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) com material compactado e extraído da própria pista; e
- Determinação de propriedades de resistência e deformabilidade considerando amostras moldadas em laboratório, moldadas com material coletado na usina e retiradas da pista. Para esta determinação foram realizados ensaios em compressão diametral, com aplicação de carga em diferentes velocidades. Foi escolhido este ensaio em vista da facilidade de moldagem do corpo-de-prova e da facilidade de se dispor de equipamentos capazes de aplicar as cargas necessárias à mobilização das tensões de interesse prático.

As Figuras 27, 28 e 29 mostram imagens da pista que mostram os locais onde foram extraídas as amostras, em forma de placas ou cilíndricas, para a realização dos ensaios em laboratório.

Figura 27: Local de retirada de placa para ensaios em laboratório – vista 1

Figura 28: Local de retirada de placa para ensaios em laboratório – vista 2

Figura 29: Local de retirada de amostras cilíndricas para ensaios em laboratório

3.3 Metodologia de Testes em Campo

A segunda fase do projeto foi a execução dos estudos de desempenho em campo das camadas asfálticas dosadas e investigadas em laboratório, através da utilização do simulador de tráfego acelerado e do monitoramento da pista.

Esta fase pôde ser dividida nas seguintes etapas:

- Definição do local para a realização dos ensaios de carregamento acelerado no pavimento;
- Construção dos trechos experimentais; e
- Execução dos ensaios.

O ensaio de carregamento acelerado, com o simulador móvel HVS, foi realizado com as seguintes características:

- Movimentos carregados bidirecionais;
- Deslocamento longitudinal total de 10m e útil de 7m;
- Deslocamento transversal de 70cm (largura do semi-eixo + 15cm);
- Velocidade do semi-eixo de aproximadamente 10km/h;
- Carga do semi-eixo de roda dupla de aproximadamente 7,9tf, aferidas com balanças móveis no início dos ciclos em cada seção de teste;
- Simulação de chuvas através do espargimento de 500 litros de água durante uma hora por dia, em períodos descontínuos;
- Medição de temperatura do pavimento e do ar; e
- Monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e da textura superficial.

Os ensaios em cada seção de testes foram finalizados sempre que se atingiu um número de semiciclos de carga em torno de 250.000.

Durante todo o experimento foi realizado o controle de temperatura do pavimento através de termômetro em óleo.

3.4 Resultados

Neste item serão apresentados os resultados obtidos com os estudos realizados em laboratório e em campo, nas seções teste de interesse.

A coleta de dados e a realização de testes com os materiais foram divididas em etapas e se encontram apresentadas de acordo com o momento de caracterização.

Todos os resultados apresentados nos itens seguintes se encontram nos relatórios finais de projeto elaborados pela Dynatest (DYNATEST, 2006a, 2006b) e pela Concessionária NovaDutra (NOVADUTRA, 2006).

3.4.1 Caracterização da Pista Antes do Experimento

Foram realizados ensaios de deflexão na pista antes do início das obras, ainda sobre a camada de CA existente no local. As Figuras 30 e 31 apresentam os resultados destas medidas das deflexões e das bacias de deflexão realizadas através do equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*). As leituras apresentadas foram realizadas com a utilização de cargas de 4,1 tf.

Na Figura 31 as linhas representam as bacias de deflexão dos postos de leitura, localizados na região de atuação do simulador em cada trecho.

Com os valores das deflexões e bacias, foi realizada uma retroanálise, através do programa computacional Elmod4. Os resultados da retroanálise são apresentados na Tabela 17.

Figura 30: Gráfico de deflexão antes da construção da pista

Figura 31: Gráfico das bacias de deflexão antes da construção da pista, nas regiões de atuação do simulador móvel HVS

Tabela 17: Resumo da retroanálise - dados anteriores à obra

Análise: Carga de 4,1 tf					
Módulos de Resiliência Retroanalizadas (MPa)					
Local / Revestimento	Revestimento	Base	Sub-Base	Reforço	Subleito
Trecho 1 / CAP 50-70 Marshall	1.484	9.439	333	181	212
Trecho 2 / CAP 50-70 Superpave	1.107	4.784	204	108	325
Trecho 3 / CAP 30-45 Marshall	1.124	7.545	283	158	176

Após a fresagem de 4cm do CA antigo, foi realizada na pista a avaliação de superfície e mapeamentos das trincas existentes. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os resultados deste levantamento visual da pista. Nestas figuras a região verde representa o local de simulação e as linhas indicam as fissuras observadas ao longo de todo o segmento.

Figura 32: Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 50-70 Marshall

Figura 33: Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 50-70 Superpave

Figura 34: Defeitos avaliados na pista após a fresagem do revestimento existente – segmento com aplicação de CAP 30-45 Marshall

3.4.2 Dados dos Materiais Utilizados no Experimento

A seguir são apresentadas as características dos materiais utilizados nos trechos. Esta caracterização engloba todos os materiais utilizados nas misturas asfálticas: agregados, ligantes e aditivos.

3.4.2.1 Agregados

As Tabelas 18, 19 e 20 apresentam as características dos tipos de agregados utilizados nos projetos das misturas utilizados. As colunas da extrema direita destas tabelas indicam os valores requeridos na especificação utilizada.

A especificação utilizada na verificação dos agregados é a da Engellog ES-2.0/P-GG.000.002 Rev 4 (CBUQ) de 19/03/2004 (ENGELOG CENTRO DE ENGENHARIA, 2004).

Tabela 18: Resultados de caracterização dos agregados – Brita 1

Agregado	Resultados	Especificação
Agregado: 20,0% Brita 1		
Origem: Pedreira Jambeiro		
Massa específica real efetiva (g/cm ³):	2,648	
Desgaste Los Angeles (%):	31,1	< 40
Durabilidade 5 ciclos em Sulfato de Sódio (%):	1,2	< 12
Índice de Forma:	2,4	<3 (relação 1:X)
Porcentagem de grãos lamelares (Relação c/e>3):	14,5	< 20
Reação ao ácido clorídrico:	Negativo	Negativo

Tabela 19: Resultados de caracterização dos agregados – Pedrisco

Agregado	Resultados	Especificação
Agregado: 36,2% Pedrisco		
Origem: Pedreira Jambeiro		
Massa específica real efetiva (g/cm ³):	2,645	
Desgaste Los Angeles (%):	31,1	< 40
Durabilidade 5 ciclos em Sulfato de Sódio (%):	1,2	< 12
Índice de Forma:	2,5	<3 (relação 1:X)
Porcentagem de grãos lamelares (Relação c/e>3):	20,5	< 20
Reação ao ácido clorídrico:	Negativo	Negativo

Tabela 20: Resultados de caracterização dos agregados – Pó de Pedra

Agregado	Resultados	Especificação
Agregado: 37,6% Pó de pedra		
Origem: Pedreira Jambeiro		
Massa específica real efetiva (g/cm ³):	2,659	
Durabilidade 5 ciclos em Sulfato de Sódio (%):	1,3	< 12
Angulosidade (%):	49,0	>45
Equivalente de Areia (%):	70,2	> 65
Adsorção de Azul de Metileno (mg/g):	3,4	< 10
Reação ao ácido clorídrico:	Negativo	Negativo
Limite de Liquidez (%):	NP	<25
Índice de Plasticidade (%):	NP	<6

3.4.2.2 Ligantes Asfálticos (CAP 50-70 e CAP 30-45)

As Tabelas 21 e 22 apresentam as características dos materiais asfálticos utilizados, sendo que a Tabela 21 apresenta as características dos materiais utilizados no projeto das misturas, e a Tabela 22 as características dos materiais retirados em amostras na usina. As colunas da extrema direita destas tabelas indicam os valores requeridos na especificação utilizada.

A especificação utilizada na verificação dos agregados é a da Engellog ES-2.0/P-GG.000.002 Rev 4 (CBUQ) de 19/03/2004.

Tabela 21: Resultados de caracterização do CAP – material utilizado no projeto das misturas

CAP		Resultados		Especificação	
		CAP 50-70	CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 30-45
Origem:	Diversos				
Teor (%)		4,7	5,0		
Massa específica (g/cm³):		1,016	1,048		
Penetração (0,1mm):		55	36	> 50	> 30
Índice de Susceptibilidade Térmica (I):		-1,0	-1,0	-1,5 < I < 1,0	-1,5 < I < 1,0
Viscosidade SSF a 135°C (s):		168	231	> 120	> 170
Viscosidade SSF a 177°C (s):		31	39	30 - 150	40 - 150

Tabela 22: Resultados de caracterização do CAP – material retirado da usina

CAP		Resultados		Especificação	
		CAP 50-70	CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 30-45
Teor de voláteis em peso (%P):		0,8	0,2	-	-
Massa específica (g/cm³):		1,0	1,0	-	-
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C (s):		163	284	>141	>192
Viscosidade Saybolt-Furol a 150°C (s):		77	127	>50	>90
Viscosidade Saybolt-Furol a 177°C (s):		29	41	30-150	40-150
Penetração (100g, 5s, 25°C) (0,1mm):		63	28	50-70	30-45
Ponto de Amolecimento (°C):		53	59	>46	>52
Índice de Susceptibilidade Térmica (I):		0,2	-0,5	-1,5 < I < 0,7	-1,5 < I < 0,7
Espuma a 177°C:		Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

3.4.2.3 Cal

Foi utilizada nas misturas a cal hidratada como material de enchimento. A Tabela 23 apresenta as características da cal utilizada nas misturas.

Tabela 23: Resultados de caracterização da Cal

Material	Resultados
	CAP 50-70
Filer:	1,4% Cal CH I
Origem:	Diversos
Massa específica (g/cm ³):	2,450

3.4.3 Dados do Projeto das Misturas

3.4.3.1 Composição das Misturas

A Tabela 24 apresenta a composição das misturas de cada um dos materiais estudados.

Tabela 24: Projeto das misturas - composição

Tipo de Material	Marshall 75 golpes ¹⁴		Superpave ¹⁵
	CAP 50-70	CAP 30-45	CAP 50-70
Brita 1	20,0%	20,0%	20,1%
Pedrisco	36,2%	36,1%	36,3%
Pó de Pedra	37,6%	37,5%	37,8%
Cal CH I	1,4%	1,4%	1,4%
CAP	4,7%	5,0%	4,4%

3.4.3.2 Granulometria dos Agregados

A Faixa Granulométrica indicada para as misturas foi a Faixa C do DNIT. Esta faixa é indicada na Figura 35, bem como a distribuição granulométrica utilizada nas misturas, que também é apresentada na Tabela 25.

¹⁴ Projetos realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias da Engelog – NovaDutra.

¹⁵ Projeto realizado na COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Laboratório de Geotecnia – Setor de Misturas Asfálticas.

Figura 35: Curva granulométrica utilizada para os agregados das misturas asfálticas

Tabela 25: Projeto das misturas – granulometria utilizada para todas as misturas

Peneira	Abertura da Malha (mm)	Porcentagem que passa na malha (%)
1"	25,40	100
¾"	19,10	100
½"	12,70	90
3/8"	9,52	82
Nº 4	4,75	46
Nº 10	2,00	32
Nº 40	0,42	18
Nº 80	0,18	11
Nº 200	0,075	6,6

3.4.3.3 Resultados dos Projetos das Misturas

Foram realizados em laboratório os ensaios necessários para a definição das propriedades das misturas a serem utilizadas. Os resultados obtidos para as diferentes misturas são apresentados na Tabela 26.

As Figuras 36 e 37 apresentam gráficos comparativos entre as misturas, através de alguns de seus parâmetros de projeto.

Tabela 26: Projeto das misturas - resultados

	Marshall 75 golpes		Superpave
	CAP 50-70	CAP 30-45	CAP 50-70
Valores encontrados para teor ótimo em peso de asfalto adicionado	4,7%	5,0%	4,4%
Teor ótimo de asfalto efetivo, após 2h da mistura	4,4%	4,7%	4,1%
Absorção de asfalto pelo agregado	0,3%	0,3%	0,3%
Espessura do filme de asfalto (microns)	7,34 μ	7,69 μ	6,82 μ
Massa específica do asfalto	1,02g/cm ³	1,04g/cm ³	1,02g/cm ³
Diâmetro nominal do agregado combinado para 95% passando	15,60mm	15,60mm	15,60mm
Módulo de riqueza "K" de duriez	3,05	3,25	2,84
Massa específica efetiva dos agregados combinados	2,65g/cm ³	2,65g/cm ³	2,65g/cm ³
Massa específica aparente da mistura compactada	2,36g/cm ³	2,36g/cm ³	2,38g/cm ³
Massa específica máxima da mistura (sem vazios)	2,46g/cm ³	2,46g/cm ³	2,47g/cm ³
Volume de vazios	4,0%	4,1%	3,9%
Vazios cheios de betume	10,2%	10,6%	9,5%
Vazios do agregado mineral	14,3%	14,7%	13,4%
Relação betume / vazios	71,6%	72,1%	71,1%
Estabilidade Marshall	1225,8daN	1350,0daN	1137,6daN
Fluência	3,2mm	3,4mm	2,9mm
Porcentagem de asfalto em volume / volume total de massa (adicionado)	11,3%	11,8%	10,7%
Cálculo da % de asfalto em volume / volume total de massa (efetivo)	10,6%	11,1%	10,0%
Relação estabilidade / fluência	383	396	395

Figura 36: Gráfico comparativo entre as misturas: teor de CAP, volume de vazios e vazios do agregado mineral

Figura 37: Gráfico comparativo entre as misturas: massa específica máxima e massa específica aparente

3.4.4 *Dados das Propriedades Mecânicas e Complementares*

3.4.4.1 Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

O Módulo de Resiliência e a Resistência à tração dos materiais asfálticos foram determinados através da realização de ensaios de compressão diametral devido à facilidade de moldagem do corpo-de-prova e à disponibilidade de equipamentos capazes de aplicar as cargas necessárias à mobilização das tensões de interesse prático. Os ensaios de módulo de resiliência (MR) foram realizados na COPPE-UFRJ sob responsabilidade da Profa. Dra. Laura Motta e os ensaios de resistência à tração foram realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias da Engelog – NovaDutra.

O ensaio brasileiro de resistência à tração por compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro em 1943, e foi adaptado para materiais betuminosos. No Brasil este ensaio segue o apresentado na especificação do DNIT - DNER-ME 138/94 (DNIT, 1994b). Atualmente existe o procedimento ABNT NBR 15087-2004 que normatizou o ensaio em maiores detalhes (ABNT, 2004d).

No ensaio, a carga é aplicada diametralmente, de maneira progressiva e com velocidade fixada até que se dê a ruptura no plano diametral vertical. Devido ao modo de aplicação da carga ocorre o aparecimento de tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro solicitado.

Com a carga capaz de provocar a ruptura do corpo-de-prova, calcula-se a tensão de tração associada a ela que é denominada resistência à tração indireta.

O ensaio de módulo de resiliência é determinado por compressão diametral, onde são medidos os deslocamentos resilientes na direção horizontal. O procedimento empregado segue a norma do DNIT - DNER-ME 133/94 (DNIT, 1994c).

A Tabela 27 e as Figuras 38 e 39 apresentam os resultados de módulo de resiliência e de resistência à tração.

Tabela 27: Resultados de módulo de elasticidade e resistência à tração das misturas

Amostra	Local de Coleta	Módulo de Resiliência (MR) MPa	Resistência à Tração (RT) MPa
CAP 50-70 Marshall	Amostra de Projeto	5.528	1,34
	Amostra da Usina	6.357	1,49
	Corpo-de-prova da Pista	5.377	1,07
CAP 50-70 Superpave	Amostra de Projeto	7.166	1,38
	Amostra da Usina	5.682	1,33
	Corpo-de-prova da Pista	3.340	0,80
CAP 30-45 Marshall	Amostra de Projeto	6.572	2,25
	Amostra da Usina	9.358	2,19
	Corpo-de-prova da Pista	6.247	1,26

Figura 38: Valores de módulo de resiliência obtidos

Figura 39: Valores de resistência à tração obtidos

3.4.4.2 Deformação Permanente

Foram realizados com as misturas de interesse ensaios de previsão de deformação permanente no simulador francês LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*). Os ensaios foram realizados em placas extraídas da pista, no laboratório de tecnologia de pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e os resultados são apresentados na Tabela 28 e Figura 40.

Tabela 28: Resultados do ensaio de deformação permanente no simulador LCPC

Amostras	Porcentagem de deformação de trilha de rodas					
	Ciclos					
	100	300	1.000	3.000	10.000	30.000
CAP 50-70 Marshall	0,9	1,4	2,0	2,9	4,3	6,1
CAP 50-70 Superpave	1,2	1,5	2,1	2,8	3,8	5,0
CAP 30-45 Marshall	1,4	1,8	2,4	3,1	4,2	5,4

Figura 40: Resultados do ensaio de deformação permanente no simulador LCPC

3.4.4.3 Perda por Umidade Induzida - AASHTO T 283

A Tabela 29 apresenta os resultados dos ensaios para perda por umidade induzida realizados de acordo com a especificação AASHTO T 283. Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisas Rodoviárias da Engellog – NovaDutra.

Tabela 29: Resistência de misturas betuminosas a danos por umidade induzida

Tipo da Mistura	Teor de CAP (%)	Volume de Vazios (%)	Resistência à tração sem condicionamento (MPa)	Resistência à tração com condicionamento (MPa)	Razão da resistência à tração retida (%)
CAP 50-70 Marshall	4,8	5,9	1,39	1,31	93,7
CAP 50-70 Superpave	4,4	7,4	1,49	1,26	84,9
CAP 30-45 Marshall	4,9	6,2	1,89	1,68	88,9

3.4.5 *Dados da Construção*

As obras de construção das pistas testes foram executadas entre os dias 16 de setembro e 07 de outubro de 2005. Como já apresentado, foi efetuada a fresagem de 4cm do revestimento asfáltico existente e a construção, após limpeza com jatos de ar e pintura de ligação, da camada da mistura estudada com 4cm.

A Construtora Dan Hebert foi responsável pela aplicação da nova massa. A aplicação da camada de reforço dos trechos de interesse ocorreu nas seguintes datas:

- Trecho 1: CAP 50-70 – Marshall 75 golpes: dia 16/09/05;
- Trecho 2: CAP 50-70 – Superpave 125 giros: dia 17/09/05; e
- Trecho 3: CAP 30-45 – Marshall 75 golpes: dia 22/09/05.

Para estes serviços foram utilizados: uma fresadora Wirtgen modelo W 1000, uma acabadora de asfalto Ciber modelo SA 114, um rolo pneumático Dynapac modelo

271, um rolo pneumático Dynapac modelo 221 e um rolo chapa tandem modelo SPA RC 115.

Segundo informações da NovaDutra o controle de temperatura na obra foi feito através de medições nos caminhões na saída da usina.

Todo período de obra foi acompanhado e fiscalizado pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da NovaDutra.

3.4.5.1 Usina

A usina utilizada na produção dos materiais asfálticos empregados nos trechos construídos é de propriedade da empresa Serveng Civilsan e é do tipo gravimétrica da marca Ciber. O modelo é o UAB 18-E e tem capacidade de 120t/h. Esta usina está localizada no km 14 da Rodovia dos Tamoios, no município de Jambeiro.

3.4.5.2 Controle do Material Aplicado em Pista

Foram realizados ensaios de controle do material que foi aplicado na pista. Este material foi retirado dos caminhões que realizaram o transporte da usina até o campo. A Tabela 30 apresenta os resultados destes ensaios e a Figura 41 os resultados de granulometria das misturas asfálticas inseridos na faixa indicada no projeto.

A Tabela 31 apresenta o controle de temperatura dos materiais ao saírem da usina, medida nos caminhões.

Tabela 30: Resultados dos ensaios com os materiais ensaiados antes de aplicados na pista

Ensaio		CAP 50-70 Marshall	CAP 50-70 Superpave	CAP 30-45 Marshall
Granulometria		Porcentagem que passa na malha (%)		
1"	25,40	100	100	100
3/4"	19,10	100	100	100
1/2"	12,70	94	93	94
3/8"	9,52	85	87	86
Nº 4	4,75	46	50	49
Nº 10	2,00	31	34	32
Nº 40	0,42	19	20	20
Nº 80	0,18	13,0	13,1	12,9
Nº 200	0,075	8,5	8,4	7,3
Teor ótimo em peso de asfalto adicionado (%)		4,8	4,4	4,9
Massa específica aparente da mistura (g/cm³)		2,358	2,331	2,341
Volume de vazios (%)		4,1	5,3	4,9
Vazios do agregado mineral (%)		14,4	14,6	15,4
Relação betume / vazios (%)		71,9	63,6	68,0
Estabilidade Marshall		1077	1276	1209
Fluência (mm)		2,7	3,0	2,8

Tabela 31: Controle de temperatura dos materiais na saída da usina

Viagem número	Temperatura (°C)		
	CAP 50-70 Marshall	CAP 50-70 Superpave	CAP 30-45 Marshall
1	155,0	170,0	172,0
2	158,0	170,2	170,0
3	154,0	165,0	158,0
4	156,0	160,0	174,2
5	164,0	170,0	170,0
6	-	158,0	173,9

Figura 41: Resultados granulometria de materiais aplicados em pista

3.4.5.3 Controle Deflectométrico

Durante a realização das obras foi efetuado um controle deflectométrico em campo com o uso da Viga Benkelman eletrônica com a aplicação de uma carga de 4,1tf no semi-eixo padrão rodoviário.

A Tabela 32 e Figura 42 apresentam os resultados destas deflexões medidas antes e após a fresagem.

Tabela 32: Controle de deflexão durante a obra de reforço

Trecho	Posição (m)	Deflexão (10-2mm)	
		Antes da Fresagem	Após a Fresagem
CAP 50-70 Marshall	100	9,0	22,0
	115	12,0	10,5
	140	10,3	10,5
CAP 50-70 Superpave	175	10,0	27,1
	195	12,9	45,4
	220	13,9	43,5
CAP 50-70 Marshall	235	8,3	13,2
	255	12,5	14,2

Figura 42: Resultados do controle deflectométrico da execução das obras

3.4.5.4 Controle de Grau de Compactação e Espessura Final de Reforço

Foram realizados com amostras retiradas da pista ensaios de verificação de grau de compactação da massa asfáltica e de controle de espessura executada.

A Tabela 33 apresenta os resultados destes ensaios.

Tabela 33: Resultados dos ensaios de verificação de compactação e espessura após a construção

Trecho	Identificação do corpo-de-prova			Massa específica de pista (g/cm³)	Volume de vazios (%)	Espessura do CP (cm)	Grau de compactação
	nº	Marcação	Marginal				
CAP 50-70 Marshall	1	100	Sul	2,277	7,3	4,68	96,5%
	2	115	Sul	2,351	4,3	4,35	99,6%
	3	115	Sul	2,348	4,4	4,40	99,5%
	4	140	Sul	2,327	5,2	5,00	98,6%
CAP 50-70 Superpave	1	160	Sul	2,301	6,5	4,13	97,5%
	2	175	Sul	2,397	2,7	4,13	101,6%
	3	175	Sul	2,327	5,5	4,77	98,6%
	4	195	Sul	2,265	8,0	4,30	96,0%
CAP 30-45 Marshall	1	220	Sul	2,343	4,8	4,00	98,4%
	2	235	Sul	2,347	4,7	4,73	98,6%
	3	235	Sul	2,366	3,9	5,38	99,4%
	4	255	Sul	2,308	6,3	4,20	97,0%

3.4.6 *Dados da Pista Durante e Após a Simulação com HVS*

Os ensaios de simulação com o uso do simulador móvel HVS foram realizados nos trechos de interesse no período de 5 de outubro de 2005 a 2 de janeiro de 2006.

Como dito anteriormente os ensaios foram realizados com uma carga do semi-eixo de roda dupla de aproximadamente 7,9tf com ciclos com deslocamento longitudinal total de 10m (útil igual a 7m) e transversal de 15cm. O simulador levava 7min e 36s para voltar ao mesmo ponto transversalmente e 12s longitudinalmente.

Foi realizada também a simulação da ocorrência de chuvas com uma molhagem diária da pista em diversos períodos em uma área de 12 x 2,5m a uma vazão de 500l/h.

A Tabela 34 apresenta características importantes dos ensaios.

A temperatura do pavimento foi acompanhada durante o período de simulação com a utilização de termômetro no óleo, em alguns momentos do dia. A Figura 43 apresenta as temperaturas medidas próximo do meio dia.

Tabela 34: Características dos ensaios de simulação com o equipamento HVS

	CAP 50-70 Marshall	CAP 50-70 Superpave	CAP 30-45 Marshall
Início da aplicação da carga	5/10/2005	1/11/2005	9/12/2005
Fim da aplicação da carga	10/11/2005	7/12/2005	2/1/2006
Total de ciclos (passadas) aplicados	326.538	286.572	286.388
Carga aplicada:	7,90	7,90	7,90
Fator de carga	57,46	57,49	57,49
Número N aplicado	1,88E+07	1,65E+07	1,65E+07

Figura 43: Controle de temperatura durante a simulação (medições realizadas próximo ao meio dia)

A seguir são apresentados os dados relevantes levantados durante e após a simulação.

3.4.6.1 Controle do Aparecimento de Fissuras no Pavimento

Durante a realização dos ensaios de simulação com o equipamento HVS foi realizado um acompanhamento visual do pavimento, de modo que se pôde perceber o aparecimento e a evolução de fissuras no pavimento. Estas fissuras foram mapeadas e estão indicadas nas Figuras 44, 45 e 46.

Figura 44: Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 50-70 Marshall

Figura 45: Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 50-70 Superpave

Figura 46: Mapeamento de fissuras no pavimento ao final do experimento de simulação – trecho com CAP 30-45 Marshall

3.4.6.2 Controle Deflectométrico

Antes e após a execução do ensaio de simulação de tráfego com o equipamento HVS, foram realizadas as medições das deflexões do pavimento, com o uso do FWD, com altura de queda da carga compatíveis com cargas da ordem de 4,1tf para pavimentos asfálticos convencionais. A diferença das cargas observadas na Tabela 35 se dá devido à estrutura estudada. Por esta ser rígida e robusta acaba levando a cargas variáveis e mais elevadas nos ensaios de deflexão. As deflexões apresentadas nas Figuras 47, 48 e 49 são as transformadas para a carga de 4,1tf, considerando uma relação linear de carga aplicada e leituras de deflexão, para que possam ser comparadas.

Além destas leituras iniciais e finais, foram medidas, ao longo da realização do ensaio com o simulador, as deflexões e avaliada a sua evolução. Estas medidas foram levantadas, com o uso da Viga Benkelman Eletrônica, uma vez ao dia com a própria carga do simulador (~8tf), por questões de calibração do equipamento. Os valores apresentados na Figura 50 são os valores já transformados para a carga de 4,1tf.

Para fins de avaliação e análise dos resultados foram utilizados os valores medidos pelo equipamento FWD antes e depois da simulação, apresentados na Tabela 35 e nos gráficos das Figuras 47, 48 e 49.

Tabela 35: Deflexões medidas antes e depois da simulação (FWD)

Trecho	Posição (m)	Antes da Simulação		Após a Simulação	
		Carga (tf)	Deflexão (10 ⁻² mm)	Carga (tf)	Deflexão (10 ⁻² mm)
CAP 50-70 Marshall	119,0	5,040	15,4	10,688	27,4
	119,5	9,536	17,3	10,758	25,5
	120,0	6,970	14,5	13,862	33,2
	120,5	5,372	16,3	11,098	36,0
	121,0	4,835	14,7	10,257	40,9
	121,5	5,287	13,2	6,199	38,1
	122,0	4,736	13,1	7,634	28,6
	122,5	4,757	12,3	10,447	21,5
	123,0	6,235	12,8	19,474	20,1
	123,5	4,793	11,4	8,412	16,5
	124,0	4,785	11,5	9,232	19,4
	124,5	7,634	12,2	12,236	18,2
	125,0	5,711	12,2	4,842	14,6
	125,5	4,736	11,4	4,828	12,3
	126,0	6,242	11,8	4,821	12,5
CAP 50-70 Superpave	165,0	4,934	16,3	4,785	15,6
	165,5	6,948	16,5	4,778	19,0
	166,0	4,729	16,2	8,270	19,8
	166,5	9,373	16,1	8,701	19,2
	167,0	5,174	15,5	5,153	16,5
	167,5	4,736	16,9	4,771	16,9
	168,0	6,454	20,7	6,333	23,2
	168,5	4,686	24,6	6,524	29,8
	169,0	4,793	20,4	4,722	27,9
	169,5	4,694	19,2	6,150	25,0
	170,0	5,874	20,3	4,701	34,4
	170,5	4,807	20,7	4,453	87,2
	171,0	6,715	18,8	5,450	56,6
	171,5	4,708	18,6	9,133	55,0
	172,0	4,708	23,9	8,631	38,5

(Continua)

Trecho	Posição (m)	Antes da Simulação		Após a Simulação	
		Carga (tf)	Deflexão (10^{-2} mm)	Carga (tf)	Deflexão (10^{-2} mm)
CAP 50-70 Marshall	236,0	4,785	8,4	11,274	15,0
	236,5	10,716	9,8	10,228	20,5
	237,0	14,052	11,5	6,362	26,2
	237,5	4,842	13,2	9,825	20,1
	238,0	13,388	10,5	8,489	17,4
	238,5	5,464	9,4	10,518	15,9
	239,0	4,743	9,2	12,017	16,7
	239,5	13,049	9,9	4,856	20,4
	240,0	8,659	9,5	4,771	19,0
	240,5	4,849	10,3	4,877	18,2
	241,0	4,750	10,8	5,259	18,3
	241,5	7,620	10,7	9,444	22,9
	242,0	4,750	12,5	6,030	29,8
	242,5	7,288	12,4	4,750	24,8
	243,0	4,715	10,9	7,740	16,3

Figura 47: Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 50-70 Marshall

Figura 48: Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 50-70 Superpave

Figura 49: Deflexões antes e após a simulação – trecho com CAP 30-45 Marshall

Figura 50: Avanço das deflexões medidas com Viga eletrônica durante a simulação com o HVS

3.4.6.3 Controle de Grau de Compactação e Espessura Final de Reforço

Assim como na fase construtiva, os ensaios de verificação de grau de compactação da massa asfáltica e de controle de espessura foram realizados com amostras retiradas da pista.

Os ensaios foram realizados nos locais onde ocorreu a passagem do simulador, locais estes indicados nas Figuras 51, 52 e 53. A Tabela 36 apresenta os resultados destes ensaios.

Tabela 36: Resultados dos ensaios de verificação de compactação e espessura após a simulação

Trecho	Identificação do corpo-de-prova			Massa específica de pista	Volume de vazios	Espessura do CP (cm)	Grau de compactação
	nº	Marcação	Marginal				
CAP 50-70 Marshall	7574	120	SUL	2,381	3,0%	4,03	100,9%
	7575	121	SUL	2,350	4,3%	4,03	99,6%
	7576	122	SUL	2,360	3,9%	4,01	100,0%
	7577	123	SUL	2,357	4,0%	4,00	99,9%
	7578	124	SUL	2,377	3,2%	4,01	100,7%
	7579	125	SUL	2,343	4,6%	4,05	99,3%
	7580	126	SUL	2,344	4,5%	4,09	99,3%
CAP 50-70 Superpave	7581	165	SUL	2,336	5,1%	4,06	99,0%
	7582	166	SUL	2,318	5,9%	4,07	98,2%
	7583	167	SUL	2,310	6,2%	4,01	97,9%
	7584	168	SUL	2,306	6,4%	3,99	97,7%
	7585	169	SUL	2,298	6,7%	4,03	97,4%
	7586	170	SUL	2,326	5,5%	4,03	98,6%
	7587	171	SUL	2,353	4,4%	4,06	99,7%
CAP 30-45 Marshall	7588	172	SUL	2,333	5,2%	4,02	98,9%
	7589	237	SUL	2,365	3,9%	3,95	99,4%
	7590	238	SUL	2,374	3,6%	3,95	99,7%
	7591	239	SUL	2,361	4,1%	3,99	99,2%
	7592	240	SUL	2,376	3,5%	4,02	99,8%
	7593	241	SUL	2,386	3,1%	3,98	100,3%
	7594	242	SUL	2,386	3,1%	4,00	100,3%

Figura 51: Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 50-70 Marshall

Figura 52: Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 50-70 Superpave

Figura 53: Localização da retirada de amostras para os ensaios de compactação – trecho com CAP 30-45 Marshall

3.4.6.4 Outras Verificações

São apresentados adiante os resultados de deformação de trilha de roda (flecha), média de altura da mancha de areia (HS) e atrito expresso pelo valor de resistência à derrapagem (VRD). A Tabela 37 e as Figuras 54, 55 e 56 apresentam os resultados.

Estes valores foram levantados durante o ensaio de simulação. O equipamento era paralisado uma vez ao dia para as medições e a Figura 57 indica os procedimentos realizados para a coleta de dados.

Tabela 37: Resultados das medições de trilha de roda (flecha), altura de areia (HS) e valor de resistência à derrapagem (VRD) medidos durante a simulação

Trecho	Ciclos acumulados	Flecha * (mm)	HS (mm)	VRD
CAP 50-70 Marshall	0	0,00	0,96	76,66
	38.000	0,20	0,96	56,00
	45.560	0,27	0,93	59,66
	60.802	0,20	0,92	55,33
	82.699	0,20	0,91	59,00
	97.948	0,20	0,91	55,66
	122.107	0,33	0,91	63,66
	148.030	0,33	0,91	64,33
	160.838	0,40	0,90	65,13
	199.838	0,59	0,89	57,67
	227.868	0,83	0,86	56,00
	242.537	1,19	0,85	54,66
	255.150	0,86	0,87	60,30
	269.270	1,09	0,86	60,00
	285.559	1,53	0,89	60,66
	301.848	1,86	0,86	61,00
	326.536	1,86	0,90	61,60
CAP 50-70 Superpave	0	0,07	1,00	76,33
	38.888	0,26	0,98	57,00
	48.722	0,46	0,97	53,66
	81.680	0,60	0,97	59,66
	93.219	0,53	0,95	60,00
	103.524	0,40	0,94	55,66
	117.210	0,41	0,90	53,00
	164.235	0,60	0,96	-
	179.033	0,60	0,94	-
	188.600	0,80	1,00	-
	206.900	0,86	0,90	53,33
	223.235	0,80	0,91	53,66
	261.385	1,86	0,88	60,33
	273.200	1,86	0,89	60,33
	286.256	2,20	0,91	60,33

(Continua)

Trecho	Ciclos acumulados	Flecha * (mm)	HS (mm)	VRD
CAP 30-45 Marshall	0	0,73	1,00	76,33
	38.888	0,93	0,98	57,00
	48.722	1,13	0,97	53,67
	81.680	1,33	0,96	59,67
	93.219	1,27	0,95	60,00
	103.524	1,07	0,94	55,67
	159.280	0,47	1,07	53,33
	168.205	-	1,08	52,67
	216.289	1,73	1,03	57,67
	231.575	1,20	1,10	57,67
	245.900	1,73	0,97	56,33
	286.388	1,60	0,96	56,33

* Para a elaboração do gráfico os valores foram zerados no início de cada simulação para melhor interpretação comparativa

Figura 54: Levantamento da deformação da trilha de rodas durante a simulação

Figura 55: Levantamento da altura de areia durante a simulação

Figura 56: Levantamento do valor de resistência à derrapagem durante a simulação

Figura 57: Levantamentos durante a simulação
(Fonte: Dynatest, 2006)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os valores apresentados anteriormente, levantados antes, durante e depois do experimento realizado com o simulador de campo, foram feitas análises dos dados procurando relacionar e comparar as propriedades dos materiais.

Após a realização das análises foi feito um estudo crítico comparativo dos resultados obtidos, procurando-se assim analisar a diferença entre os materiais empregados e entre as estruturas estudadas, chegando-se a uma conclusão sobre a utilização destas estruturas em situações de tráfego intenso e de altos volumes de cargas pesadas.

4.1 Análise Comparativa de Resultados Obtidos

4.1.1 *Análise Comparativa Individual dos Dados*

Para a realização desta análise, foram comparados os resultados dos estudos das três misturas ensaiadas e os dados considerados relevantes foram ordenados de acordo com a ordem crescente dos valores visando melhor visualização. Além disso, foram elaborados gráficos de barras e tabelas com estas comparações efetuadas.

A primeira verificação realizada foi quanto à composição das misturas. Observa-se na Tabela 38, que mostra um resumo dos dados do projeto dos materiais, que a mistura compactada pelo equipamento giratório, apresentado no método do SHRP, resultou em um material com teor de CAP inferior ao moldado pelo compactador Marshall. Isto acontece devido ao intenso processo de compactação que, no método Superpave, aplica um esforço de amassamento de 125 giros nas amostras cilíndricas, provocando uma maior proximidade de agregados, reduzindo assim o volume de asfalto necessário para alcançar 4% de vazios. No Método Marshall utilizou-se 75 golpes por face, que não dá equivalência volumétrica ao número de giros do Superpave. Para a correta comparação das metodologias de dosagem de

misturas asfálticas, seria importante a verificação da equivalência entre o número de golpes adotados na dosagem Marshall e o número de giros na dosagem Superpave (VASCONCELOS, 2004), logo, no presente caso de estudo, o número de giros utilizado no método Superpave pode ter aplicado uma energia de compactação maior que o aplicado pelo método Marshall, o que explicaria a diferença encontrada no teor de asfalto.

O CA com CAP 30-45 apresentou um teor de asfalto 0,3% superior ao com CAP 50-70 para um mesmo volume de vazios, ambos projetados pelo mesmo método, demonstrando que a diferença é na espessura de película, superior no caso com CAP mais viscoso (CAP 30-45).

Soares *et al.* (1999) apresentam um trabalho de investigação sobre a necessidade de um maior teor de asfalto para misturas usinadas com CAP mais viscosos através de estudos em pista experimental implantada no Ceará. Neste estudo foi concluído que desvios de massa específica de $0,01\text{g/cm}^3$ dos CAPs levam a diferenças de aproximadamente 0,1% em seu teor ótimo de asfalto. Portanto, o valor de 0,3% encontrado para esta diferença entre teores no caso de interesse, enquadra-se no valor esperado se for levada em consideração a diferença de massas específicas dos materiais asfálticos.

Tabela 38: Resumo das propriedades de projeto das misturas asfálticas

Tipo de Ligante	Massas Específicas do CAP (g/cm^3)	Método de Dosagem	Massas Específicas (g/cm^3)	Volume de Vazios (%)	VAM (%)	Teor de CAP (% peso)
CAP 50-70 Marshall	1,02	Marshall 75 golpes	2,36	4,0	14,3	4,7
CAP 50-70 Superpave	1,02	Superpave 125 giros	2,38	3,9	13,4	4,4
CAP 30-45 Marshall	1,05	Marshall 75 golpes	2,36	4,1	14,7	5,0

A próxima análise realizada é a que envolve os resultados do estudo de propriedades mecânicas. Foram analisados valores de perda de módulo de resiliência e resistência à tração entre as amostras misturadas em laboratório, colhidas durante a usinagem e compactadas em laboratório e também as aplicadas

em pista, por extração de corpos-de-prova. Os valores analisados de módulo de resiliência são apresentados na Figura 58 e os de resistência à tração na Figura 61.

Com estes valores de perda foram realizados gráficos de barras, ordenados dos menores para os maiores valores. Os gráficos são apresentados nas Figuras 59 e 60 para o estudo do módulo de resiliência e nas Figuras 62 e 63 para os resultados de resistência à tração.

Vale ressaltar que não foram considerados nos estudos os resultados de módulo de resiliência obtidos pela retroanálise elaborada antes da execução da obra, apresentados na Tabela 17, pois os valores resultantes se referem às camadas antigas de revestimento antes da fresagem.

Figura 58: Valores de módulo de resiliência nas diversas etapas analisadas

Figura 59: Comparação de perda de módulo de resiliência entre as misturas produzidas em laboratório e as produzidas em usina e compactadas em laboratório

Figura 60: Comparação de perda de módulo de resiliência entre as misturas asfálticas produzidas em usina e compactadas em laboratório e as extraídas de pista da camada de revestimento após a compactação

Figura 61: Valores de resistência à tração nas diversas etapas analisadas

Figura 62: Comparação de perda de resistência à tração entre as misturas produzidas em laboratório e as produzidas em usina e compactadas em laboratório

Figura 63: Comparação de perda de resistência à tração entre as misturas asfálticas produzidas em usina e compactadas em laboratório e as extraídas de pista da camada de revestimento após a compactação

Os resultados da análise de perda de módulo de resiliência do laboratório para a usina mostram ganho de valores para os CAs com CAP 30-45 (42,4% de ganho) e com CAP 50-70 Marshall (15% de ganho). Estes aumentos dos valores de módulo de resiliência podem ter sido causados por um sobreaquecimento das misturas durante o processo de usinagem. O envelhecimento durante a usinagem é um processo comum e esperado. Já o material com CAP 50-70 Superpave apresentou perda significativa de MR (20,7% de perda) nas mesmas condições de comparação. Este material não seguiu o padrão de alteração de MR apresentado pelas outras misturas, e não se tem uma explicação para tal fenômeno.

Na análise de perda de módulo de resiliência da usina para a pista observou-se menor perda do CA com CAP 50-70 (15,4%) do que no com CAP 30-45 (33,3%), ambos dosados pelo método Marshall. Além disso, a perda de MR do material moldado pelo método Superpave foi ainda maior do que os dois outros materiais (41,2%). A diminuição de módulo de resiliência na pista com relação ao compactado em laboratório com a mistura produzida em usina é comum e esperado pois o processo de compactação em geral não atinge 100% do grau de compactação,

deixando a mistura compactada em pista com um maior volume de vazios e, portanto, com menor MR. O resultado do Superpave demonstra uma maior diminuição, o que pode refletir que os materiais em pista nestas condições sofreram mais o efeito do baixo teor de ligante e dificuldade de compactação, reduzindo o valor de MR.

A análise das perdas de resistência à tração entre os valores de laboratório e de usina mostram que o material com CAP 50-70 Marshall apresentou um aumento de resistência (11% de ganho), enquanto que o CA com CAP 30-45 Marshall (2,4% de perda) e com CAP 50-70 Superpave (3,3% de perda) apresentaram perdas semelhantes. Na realidade o ensaio de resistência à tração possui erros inerentes ao ensaio da ordem de variação dos valores encontrados, sendo difícil tecer conclusões aprofundadas a partir destes resultados.

Já nos resultados para a perda de resistência à tração da usina para a pista, o CA com CAP 50-70 Marshall foi o que apresentou menor perda (28,1%), enquanto que o material com CAP 30-45 Marshall (45,0%) e o com CAP 50-70 Superpave (40,8%) apresentaram perdas semelhantes de resistência à tração. As perdas mais pronunciadas nesta comparação podem estar relacionadas com o volume de vazios e com a indução de fissuras causadas pela extração do corpo-de-prova, que reduz a resistência.

Através dos resultados obtidos nos ensaios de perda por umidade induzida, foi realizada a análise dos valores de resistência à tração retida – RRT¹⁶ devido ao condicionamento. O CA com CAP 50-70 Superpave foi o que apresentou menor valor (85%), enquanto o moldado pelo método Marshall apresentou a maior RRT (94%). O CA com CAP 30-45 Marshall apresentou RRT intermediário (89%), inferior ao CAP 50-70, projetado pela mesma metodologia.

Uma vez que os resultados são muito afetados pelo volume de vazios disponíveis para a entrada de água, que causa danos no material, é difícil concluir se o volume de vazios ou o tipo de mistura e teor de ligante comandam os resultados.

¹⁶ RRT – Resistência à Tração Retida: valor de RT dos corpos-de-prova com condicionamento dividido pelo valor de RT 80 dos corpos-de-prova sem condicionamento.

Em princípio, a mistura de CAP 50-70 Marshall e CAP 50-70 Superpave deveriam resultar em valores semelhantes para o mesmo volume de vazios, pois os agregados e o ligante são os mesmos. Assim, acredita-se que a diferença seja inerente ao erro de ensaio e que todas as misturas, neste quesito, sejam semelhantes.

Observa-se que a seqüência da perda de resistência à tração após o ensaio de danos por umidade induzida foi inversa à ordem decrescente dos volumes de vazios de projeto medidos para as misturas, ou seja, quanto maior o volume de vazios medido para a amostra ensaiada, maior a perda. Isso foi condizente com o esperado, quando realizada uma análise apenas levando em conta o volume de vazios da mistura, pois quanto maior o volume de vazios, maior é a área de contato da água com o material durante o condicionamento.

O gráfico de barras resultante desta análise é apresentado na Figura 64. Ressalta-se que todas as misturas asfálticas ensaiadas mostram RRT maior que 70% que é o limite empregado para caracterizar as misturas asfálticas para perdas a médio e longo prazo por dano por umidade induzida.

Figura 64: Comparação de perda por umidade induzida relacionada com o volume de vazios

Com os resultados dos ensaios de previsão de deformação permanente no simulador LCPC do Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica da USP, realizados em placas de misturas asfálticas extraídas da pista logo após a execução do recapeamento, foi observado que aos 30.000 ciclos no simulador o material submetido à dosagem pelo método Superpave apresentou a menor deformação percentual (5,0%). Dentre os materiais dosados através do método Marshall o constituído pelo CAP 30-45 (5,4%) apresentou menor valor de deformação permanente se comparado ao com CAP 50-70 (6,1%).

Normalmente as misturas asfálticas produzidas com a mesma graduação, mas com ligantes mais viscosos são aquelas que apresentam menor deformação permanente. Isto foi comprovado pelos resultados obtidos em laboratório, onde a mistura com CAP 30-45 apresenta-se mais resistente à deformação permanente que as misturas com CAP 50-70.

Outro fato que se pode esperar é que misturas asfálticas com leve redução de teor de ligante em relação ao ótimo do Marshall, como a mistura Superpave com CAP 50-70, apresentem-se mais resistentes à deformação permanente. O menor teor aumenta o atrito no contato e aumenta a resistência. Com o aumento do teor, para o mesmo tipo de ligante, aumenta-se a lubrificação entre agregados, reduzindo o atrito interno, e a mistura tende a aumentar a deformação permanente (MONISMITH *et al.*, 1989). Somente para casos de baixíssimos teores de asfalto, a deformação permanente é maior devido à consolidação da mistura, que não é o caso da mistura SUPERPAVE.

A mistura com CAP 30-45 apesar de conter mais ligante, possui o CAP mais viscoso que é o que mais resiste à fluência à 60°C provocada pelo simulador de laboratório.

Além disso, os ensaios foram feitos em placas extraídas de pista que sofrem o processo da heterogeneidade do trecho, além de estarem sujeitas às próprias tensões provocadas para a remoção do material em campo.

A Figura 65 apresenta a comparação de valores de deformação permanente realizada.

Figura 65: Comparação levando em consideração a previsão de deformação permanente

Com os dados colhidos após a utilização do simulador de pista foram realizadas as comparações das perdas de volume de vazios, evolução da flecha, perda de altura de macha de areia e de resistência à derrapagem e evolução das deflexões em pista em relação ao estado após compactação e anterior à simulação, com os dados no final do experimento.

Comparando-se as perdas de volume de vazios devido à simulação, o CA com CAP 50-70 dosado pelo método Superpave apresentou-se sem perdas, ou seja, a média do volume de vazios permaneceu constante. Quanto aos materiais projetados pelo método Marshall, o CA com CAP 50-70 e o com CAP 30-45 apresentaram perdas similares de 26% e 28%, respectivamente.

Em primeiro lugar, deve-se ressaltar que as medidas foram feitas com 4 corpos-de-prova para cada segmento antes da simulação e 7 corpos-de-prova, em média, para cada segmento após a simulação. Estes CPs, dependendo da heterogeneidade do trecho e da amostragem, podem conter alguns desvios. Observando-se os resultados no simulador de laboratório, constata-se que há uma certa deformação permanente nas placas que foram extraídas de campo e testadas em laboratório,

que deve ocasionar uma redução de volume de vazios em consequência. Portanto, haveria de se esperar uma redução do volume de vazios após a simulação. A Figura 66 apresenta a comparação entre perdas de volume de vazios devido à simulação.

Figura 66: Comparação entre perdas de volume de vazios devido à simulação com o HVS

A análise da evolução das flechas, medidas nas regiões onde foram realizadas as passagens do simulador em pista, resultou em uma menor evolução para o CA com o CAP 30-45 Marshall (0,9mm), seguido pelo material com CAP 50-70 Marshall (1,9mm) e levemente mais pronunciado com a mistura com CAP 50-70 Superpave (2,1mm), que apresentou a maior evolução de deformação em trilha de roda, avaliada através da flecha.

Este resultado condiz com o esperado (material mais viscoso apresenta menor deformação permanente). O ensaio de deformação permanente no simulador tipo LCPC da Escola Politécnica da USP mostra maior resistência à deformação permanente da mistura com CAP 30-45 Marshall em comparação com a mistura asfáltica com CAP 50-70 Marshall. Os resultados de laboratório apontaram, no entanto, um valor de deformação permanente menor na mistura com CAP 50-70

Superpave em comparação com as outras duas misturas devido ao baixo teor de ligante. A ocorrência de tal diferença de comportamento é mais difícil de ser explicada.

A diferença entre os valores de laboratório e os valores encontrados na pista poderia ser explicada por um superaquecimento da mistura da usina, o que teria causado um envelhecimento precoce da mistura e conseqüente enrijecimento da mesma, mas outros ensaios complementares deveriam ter sido realizados para poder afirmar que está é uma das causas.

A Tabela 39 apresenta um resumo das médias das temperaturas de saída de usina medidas para as misturas.

Tabela 39: Controle de temperatura dos materiais na saída da usina

Média das Temperaturas (°C)		
CAP 50-70 Marshall	CAP 50-70 Superpave	CAP 30-45 Marshall
157,4	165,5	169,7

A Figura 67 apresenta o gráfico com os resultados de evolução das flechas devido ao ensaio de simulação.

Figura 67: Comparação entre evolução das flechas devido à simulação com o HVS

A comparação dos resultados das perdas de altura de mancha de areia, ou seja de fechamento de textura, durante a simulação mostrou menor valor para o material com CAP 30-45 Marshall (4,0%), seguido pelo CAP 50-70 Marshall (6,7%) e finalmente, com perda de altura de mancha de areia de maior valor para o CAP 50-70 Superpave (9,4%). Estes valores são apresentados na Figura 68.

O material com CAP 30-45 Marshall é o mais estável neste caso, isso ocorre devido à maior viscosidade do asfalto que não exsuda na camada e mantém suas características iniciais.

A perda de altura de mancha de areia significa que a macrotextura da superfície do pavimento sofreu alterações, ficando a superfície da camada mais fechada do que antes da simulação. Entretanto os valores obtidos após a passagem do simulador ainda se encontram dentro dos limites aceitáveis para rodovias e a redução não foi significativa.

Figura 68: Comparação entre perdas de altura de mancha de areia devido à simulação com o HVS

A comparação dos resultados de perda de valor de resistência à derrapagem, VRD, devido à simulação apresenta os seguintes valores: 19,6% para o CAP 50-70 Marshall, 20,9% para o CAP 50-70 Superpave e 26,2% para o CAP 30-45 Marshall.

As perdas do VRD são muito similares entre as misturas. No caso dos materiais com o CAP 50-70 (Marshall e Superpave) isso acontece pois inicialmente os testes obrigam a passagem do pêndulo sobre agregados recobertos com o mesmo ligante, resultando em valores iniciais similares. Após a saída da película restam os mesmos tipos de agregados, resultando, portanto, em valores muito próximos de VRD finais nos dois casos.

Para a mistura com o ligante CAP 30-45, apesar da diferença na viscosidade do CAP, os valores iniciais de VRD foram praticamente iguais aos apresentados para as outras duas misturas. Isso também ocorreu com os valores medidos. Essa similaridade se dá pelo fato de terem sido utilizados os mesmos agregados em todas as misturas, que, encontrando-se expostos ao final do processo dão às superfícies a mesma microtextura.

A Tabela 40 apresenta um resumo com os valores de VRD medidos antes e depois da simulação para cada material.

Tabela 40: Valores de VRD medidos

Trecho	VRD antes	VRD depois
CAP 50-70 Marshall	76,7	61,6
CAP 50-70 Superpave	76,3	60,3
CAP 30-45 Marshall	76,3	56,3

A avaliação da evolução das deflexões nos segmentos devido à simulação de carga apresentou os resultados indicados na Figura 69.

A análise do segmento com CA com CAP 50-70 Superpave foi dividida em dois trechos devido à presença intensa de trincamentos da região da marcação 169 em diante. O trecho 1 é composto pelo segmento entre as marcações 165 e 168,5 e o trecho 2, pelas marcações 169 a 172.

As deflexões medidas antes da simulação apresentaram valores baixos devido à presença da camada cimentada que enrijeceu a estrutura. Da mesma maneira as leituras realizadas após a simulação apresentaram uma evolução, mas continuaram baixas.

Entretanto deve-se observar um comportamento diferente dos demais no segmento com CAP 50-70 Superpave – trecho 2. Nesta região ocorreu o trincamento de grande parte da superfície, o que ocasionou um aumento mais expressivo das deflexões.

Figura 69: Comparação entre evolução das deflexões devido à simulação com o HVS

4.1.2 Análise Comparativa Geral dos Dados

Uma outra análise realizada foi a que relacionou algumas das principais informações de forma visual em uma retrógrfica das regiões onde foram realizados os ensaios de simulação.

As figuras 70, 71 e 72 apresentam as análises para os trechos com CAP 50-70 Marshall, CAP 50-70 Superpave e CAP 30-45 Marshall, respectivamente.

Teor de asfalto de projeto:	4,80%
Teor de asfalto do material do caminhão:	4,70%
Evolução da trilha de rodas:	1,86mm
Volume de vazios de projeto:	4,0%
Volume de vazios (média) antes da simulação:	5,3%
Volume de vazios (média) após a simulação:	3,9%
Grau de compactação (média) antes da simulação:	98,5%
Grau de compactação (média) após a simulação:	100,0%
Modulo de resiliência de laboratório:	5528MPa
Modulo de resiliência de usina:	6357MPa
Modulo de resiliência de pista:	5377MPa
Temperatuda média na saída da usina:	157,4°C

- Fissuras após a fresagem
- Fissuras após a simulação
- Deflexão antes da simulação medidas com FWD
- Deflexão após a simulação medidas com FWD

Figura 70: Retrágrfica e dados do trecho com CAP 50-70 Marshall

Teor de asfalto de projeto:	4,40%
Teor de asfalto do material do caminhão:	4,40%
Evolução da trilha de rodas:	2,13mm
Volume de vazios de projeto:	3,9%
Volume de vazios (média) antes da simulação:	5,7%
Volume de vazios (média) após a simulação:	5,7%
Grau de compactação (média) antes da simulação:	98,40%
Grau de compactação (média) após a simulação:	98,50%
Modulo de resiliência de laboratório:	7166MPa
Modulo de resiliência de usina:	5682MPa
Modulo de resiliência de pista:	3340MPa
Temperatuda média na saída da usina:	165,5°C

- Fissuras após a fresagem
- Fissuras após a simulação
- Deflexão antes da simulação medidas com FWD
- Deflexão após a simulação medidas com FWD

Figura 71: Retigráfica e dados do trecho com CAP 50-70 Superpave

Teor de asfalto de projeto:	4,90%
Teor de asfalto do material do caminhão:	5,00%
Evolução da trilha de rodas:	0,87mm
Volume de vazios de projeto:	4,1%
Volume de vazios (média) antes da simulação:	4,9%
Volume de vazios (média) após a simulação:	3,6%
Grau de compactação (média) antes da simulação:	98,40%
Grau de compactação (média) após a simulação:	99,80%
Modulo de resiliência de laboratório:	6572MPa
Modulo de resiliência de usina:	9358MPa
Modulo de resiliência de pista:	6247MPa
Temperatuda média na saída da usina:	169,7°C

- Fissuras após a fresagem
- Fissuras após a simulação
- Deflexão antes da simulação medidas com FWD
- Deflexão após a simulação medidas com FWD

Figura 72: Retográfica e dados do trecho com CAP 30-45 Marshall

4.1.2.1 Análise do Segmento com CAP 50-70 Marshall

O trecho com CAP 50-70 Marshall possui 0,3% a menos de ligante se comparado ao CA com CAP 30-45 com mesma graduação, devido à menor viscosidade do material. Neste caso, o menor consumo de ligante levará, em longo prazo, ao aparecimento mais rápido de trincas.

Foi verificado apenas o início de trincamento no momento do término da simulação, quando as microfissuras não são visíveis a olho nu. A evolução do trincamento pode ser prevista com a extensão das medidas ao longo do tempo de operação da via com as solicitações do tráfego real, afim do levantamento da curva de desempenho do pavimento.

Quanto ao controle da reflexão de trincas, a mistura apresentou bom desempenho, visto que a fissura existente após a fresagem do material não apareceu na superfície mesmo após o final do processo de simulação completo. Deve-se ressaltar que a camada de reforço executada trabalha pronunciadamente à compressão devido à estrutura do pavimento construída, aos materiais empregados (BGTC) e à espessura de revestimento asfáltico.

A trilha de rodas, apesar de ser muito pequena, já é praticamente o dobro do desenvolvido no trecho com CAP 30-45. Mesmo com menor consumo de ligante a potencialidade de formação de trilha de rodas é maior devido ao fato da menor consistência à mesma temperatura de trabalho na pista.

A graduação dos agregados utilizada apresenta um bom entrosamento entre grãos, o que aumenta a resistência ao cisalhamento e, portanto, a resistência à deformação permanente.

Se a camada de revestimento fosse mais solicitada à flexão, talvez o trincamento fosse mais pronunciado do que o ocorrido.

Quando analisados os módulos de resiliência encontrados juntamente com a temperatura de usinagem percebeu-se que o ligante foi usinado na temperatura esperada, não causando elevado envelhecimento do ligante e conseqüentemente

enrijecimento da mistura e aumento do MR. O MR encontrado na pista, muito próximo ao obtido em laboratório, mostra a boa qualidade da compactação e um volume de vazios adequado.

4.1.2.2 Análise do Segmento com CAP 50-70 Superpave

Neste trecho o consumo de ligante é 0,3% inferior àquele dosado pelo método Marshall com o mesmo ligante, e 0,6% inferior àquele com o CAP 30-45.

Devido ao menor consumo de ligante, sua baixa consistência e maior volume de vazios em campo, a reflexão de trincas na marcação 169 já pôde ser observada de forma inicial após 81.680 ciclos, e mais fortemente após o ciclo 164.235 da simulação, mostrando uma “fragilidade” quanto a este problema.

O trincamento entre as marcações 169 e 172 foi muito intenso. Uma vez que este fato não é observado entre as marcações 165 e 168, pode-se concluir que há algum problema concentrado no trecho mais deteriorado que não foi identificado na obra e durante os ensaios. Este problema pode ser relacionado ao trincamento de base, a problemas localizados de aderência entre camadas ou outro fator que acelerou a ocorrência da deterioração.

Pode-se observar que na região com trincamento acentuado, as deflexões medidas após a simulação sofreram um aumento considerável.

A trilha de rodas, devido à baixa consistência e elevado volume de vazios em comparação aos dois outros trechos, é cerca de 10% maior que a ocorrida no trecho com CAP 50-70 Marshall e cerca de duas vezes à no CAP 30-45, e apesar dos valores medidos serem baixos, seu potencial desenvolvimento é maior que nos demais trechos.

Avaliando os módulos de resiliência obtidos, o valor de laboratório, cerca de 7000Mpa, não é o esperado para o baixo consumo de ligante empregado na mistura, principalmente comparado aos demais valores para CAP 50-70 e 30-45 Marshall.

Quanto ao valor de MR medido com corpo-de-prova moldado com massa retirada na usina, seria esperado que este tivesse sofrido um aumento em relação ao valor de laboratório, devido ao sobreaquecimento do material na usinagem. Não se tem uma explicação comparativa para a queda ocorrida neste valor, uma vez que o material não segue o padrão de aumento de valor de MR da mistura após a usinagem em comparação com o valor de laboratório.

O valor de MR de pista foi muito baixo em relação ao valor de laboratório e mesmo em relação ao valor de usina. Isto ocorreu provavelmente por deficiência de compactação, causada por baixa temperatura de execução ou por baixa energia de compactação da mistura. O resultado desta compactação deficitária é o maior volume de vazios em pista (cerca de 6%), superior ao outros dois trechos comparativos e provável heterogeneidade na pista e amostragem.

4.1.2.3 Análise do Segmento com CAP 30-45 Marshall

O trecho com CAP 30-45 é o mais rico em ligante, com maior espessura de película e deflexão inicial baixa ou muito baixa.

Em alguns pontos existe um aumento mais expressivo das deflexões medidas, mas estas ainda continuam baixas após a simulação e dentro do possível erro das medidas.

Esta é a camada de revestimento asfáltico com maior rigidez entre os trechos estudados, compatível com o uso sobre base cimentada, trabalhando o revestimento mais pronunciadamente à compressão.

A evolução da trilha de rodas foi muito pequena, coerente com o resultado de deformação permanente de laboratório, e menor em comparação com os trechos com CAP 50-70.

A avaliação dos valores de módulo de resiliência mostra um considerável aumento dos valores das misturas provenientes da usina com relação ao misturado em laboratório, que pode ter sido causado pelas altas temperaturas na usinagem e

conseqüente envelhecimento precoce do ligante, causando o enrijecimento da mistura.

O valor no MR da pista próximo ao obtido em laboratório e o volume de vazios na média próximo dos 4%, mostram uma boa compactação do material apesar do sobreaquecimento. O material, apesar de envelhecido na usinagem não perdeu a trabalhabilidade na aplicação. Isso seria explicado por uma aplicação em pista com a mistura ainda em altas temperaturas, porém não há registros que comprovem a média da temperatura aplicada em pista.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foram levantados dados relativos a misturas asfálticas aplicadas como revestimentos, empregando-se ligantes com características diferentes e métodos de dosagens diferentes.

Com estes materiais foram executados trechos experimentais na Rodovia Presidente Dutra, realizados estudos de caracterização destes materiais e ensaios acelerados em campo com o simulador móvel do tipo HVS.

Da análise dos resultados de todos estes estudos foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- Quanto aos projetos das misturas realizadas em laboratório pôde-se observar que as dosagens que seguiram o procedimento Marshall apresentaram teor de ligante de projeto, para 4% de volume de vazios, mais elevado, se comparados à mistura projetada pela metodologia Superpave. O uso de 125 giros, como preconiza o método Superpave, leva à redução de volume de vazios mais pronunciada que para 75 golpes por face aplicados no Marshall, levando a menores teores “ótimos” ou de projeto. No entanto, a dificuldade de aplicação e rolagem em campo, em função da espessura da camada, devem ser consideradas antes de pré-fixar os teores. Essa diferença de teor de asfalto fez com que a mistura com CAP 50-70 Superpave fosse a que apresentasse o pior desempenho no controle da reflexão das trincas existentes nas camadas de base do pavimento, apesar da camada trabalhar com baixo nível de tração. Em estudos com deflexão mais elevada, o trincamento seria mais pronunciado com o mesmo número de solicitações.
- Os valores de módulo de resiliência obtidos para as diversas fases do experimento mostraram que o CA com CAP 50-70 Marshall apresentou maior coerência nos resultados. Isso se mostra na diferença dos valores que tiveram um pequeno acréscimo na mistura de usina e apresentaram-se semelhantes no projeto e na pista após a aplicação. As outras duas misturas foram prejudicadas pelo sobreaquecimento em usina, que causou perdas mais importantes.

O CA com CAP 50-70 Superpave apresentou um valor elevado de MR no projeto, que não era o esperado para uma mistura com baixo teor de ligante. Além disso,

seguindo o padrão ocorrido nas outras misturas poder-se-ia prever um valor de MR do projeto próximo ao de pista, enquanto que o valor da mistura usinada seria mais elevado devido às altas temperaturas de preparo da mistura. O ocorrido, entretanto, foi um valor de MR para a usina cerca de 80% do valor de projeto e o valor de pista pouco menos de 50% do valor de projeto. Não existe uma explicação para esta queda nos valores de MR a não ser a indução de microfissuras na extração do CP, causando danos prematuros e queda de rigidez, ou ainda elevado volume de vazios destas amostras. Acredita-se na maior heterogeneidade da camada acabada com a mistura de CAP 50-70 Superpave, devido à grande diferença de comportamento encontrada em pista dentro do segmento onde esta mistura foi aplicada.

Quanto ao CA com CAP 30-45 Marshall, apesar do sobreaquecimento ocorrido na usina que causou uma elevação de 30% no MR, este recuperou o valor de projeto na pista, pois deve ter sido compactado ainda a altas temperaturas, o que garantiu sua trabalhabilidade e grau de compactação.

- O material com CAP 50-70 dosado pelo método Superpave apresentou teor de ligante inferior às demais misturas (0,3% a menos que o CAP 50-70 Marshall e 0,6% a menos que o CAP 30-45). Este baixo teor de asfalto ocasionou uma maior vulnerabilidade ao material em contato prolongado com a água, como mostrou o ensaio de umidade induzida que teve como resultado uma perda de cerca de 15% de resistência à tração após o condicionamento de corpos-de-prova, a maior entre os materiais estudados. No entanto, todos os valores obtidos estão dentro do admissível ($RRT \geq 70\%$) para as três misturas.

Além disso, o baixo percentual de material betuminoso na mistura, resultante da dosagem Superpave, também causa uma maior dificuldade de aplicação do material em pista e conseqüentemente maior volume de vazios, menor grau de compactação, menor resistência à reflexão de trincas e menor vida de fadiga.

A mistura com CAP 50-70 Superpave também apresentou a maior evolução de flecha, variação de altura de mancha de areia durante a simulação de campo e um grande trincamento a partir da marcação 169 na pista, que se iniciou no ciclo equivalente a $8,5 \times 10^5$ repetições do eixo padrão rodoviário.

As deflexões medidas em pista antes e depois da simulação apresentaram, em geral, baixa intensidade devido à presença de camada cimentada na estrutura. Em alguns casos foi verificada uma evolução significativa devido ao trincamento excessivo verificado em pista, principalmente no segmento após a marcação 169 na região com CAP 50-70 Superpave.

Logo, analisando todos os dados e levantamentos realizados, pode-se concluir que a mistura dosada pelo método Superpave foi a que apresentou o pior desempenho em todas as etapas de estudos realizados, mas principalmente em pista, devido fundamentalmente ao baixo teor de ligante presente no CA.

- O CAP 50-70 Marshall apresentou temperatura de usinagem dentro de valores adequados e as características de compactação da pista foram satisfatórias (grau de compactação igual a 98,5% e volume de vazios igual a 5,3). O desempenho da mistura em campo, sob as condições de ensaio, foi bom, pois esta apresentou evolução da flecha e variação na altura de mancha de areia intermediárias, módulo de resiliência de corpos-de-prova retirados da pista equivalentes ao previsto em projeto e boa resistência à reflexão de trincas, impedindo que as fissuras existentes na base, comprovadas após a fresagem do material antigo durante a obra, aparecessem na superfície do pavimento após a simulação de tráfego. Além disso, a evolução das deflexões durante a simulação não apresentou valores significativos ou que indiquem algum sinal de fim da vida útil da estrutura após a simulação, com uma aplicação de carga equivalente ao número de repetições do eixo padrão igual aproximadamente a 2×10^7 .

Posto isso, pode-se concluir que o CAP 50-70 apresentou um comportamento adequado em campo, ficando seu desempenho dentro do previsto. Entretanto este desempenho deu-se devido à presença da camada cimentada na estrutura, que teve papel importante na manutenção da integridade da mesma.

- O CA com CAP 30-45 apresentou bom desempenho em pista, apesar da verificação de um sobreaquecimento da mistura na usinagem. Este aquecimento excessivo possivelmente causou um aumento no módulo de resiliência das amostras retiradas na saída da usina, mas não atrapalhou a compactação do

material, que apresentou grau de compactação igual a 98,4% e volume de vazios de 4,9% em pista.

O módulo de resiliência, que se elevou logo após a usinagem, mostrou-se equivalente em pista aos valores alcançados com as amostras de laboratório. Isso mostra que não houve um enrijecimento considerável da mistura na usinagem.

A evolução da trilha de rodas e a perda de altura de mancha de areia (fechamento da textura da superfície) durante a simulação apresentaram os menores valores dentre as misturas estudadas. As deflexões medidas antes e depois da simulação não apresentaram evolução significativa e a superfície do trecho não apresentou o aparecimento de fissuras ao longo do experimento, quando o simulador aplicou um carregamento equivalente a aproximadamente $1,7 \times 10^7$ repetições do eixo padrão sobre o pavimento.

Com base no exposto, conclui-se que o CAP 30-45 é um material que apresenta um desempenho satisfatório nas condições de carregamento ensaiadas, e é indicado para a utilização em rodovias com tráfego pesado, desde que a estrutura conte com a presença de camada cimentada ou promova baixas deflexões, para que esta propicie a rigidez necessária ao suporte das cargas intensas aplicadas.

- Conclui-se também que o simulador de tráfego é um excelente equipamento para prever o comportamento e desempenho das estruturas, nas condições reais às quais as pistas são submetidas durante sua utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO (ABPV). **Informativo técnico sobre avaliação da resistência à derrapagem através de aparelhagem portátil**, Rio de Janeiro: [s.n.], 1999. (Boletim Técnico nº 18).

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Anuário estatístico mensal**. 2008. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp>. Acesso em: 29 de março de 2008.

_____. **Anuário estatístico 2006**. 2007. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2006.asp#secao_2>. Acesso em: 20 de maio de 2007.

_____. **Resolução ANP nº 19**. 2005. Disponível em: <[http://200.179.25.133/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml?f=templates\\$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu](http://200.179.25.133/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml?f=templates$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu)>. Acesso em 14 de abril de 2008.

_____. **Despacho do diretor-geral**. 2002. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/doc/participacoes_governamentais/2002/Revisao_Anexos_II_III_2002.pdf>. Acesso em 24 de maio de 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Anuário estatístico dos transportes terrestres 2.006**. 2007a. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/aett/aett_2006/index.htm>. Acesso em 25 de julho de 2007.

_____. **Relatório anual 2005 – rodovias reguladas pela ANTT**. 2007b. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/relatorios/rodoviario/RelatorioAnual2005_v2.pdf>. Acesso em 29 de julho de 2007.

AMARAL, S. C. **Estudos das misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)**. 2000. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO T 283**. Standard method of test for resistance of compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) to moisture-induced damage. Washington, DC: [s.n.], 2007. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7175-07**. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2007a. 16 p.

_____. **ASTM D6373-07**. Standard specification for performance graded asphalt binder. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2007b. 5 p.

_____. **ASTM D4402-06**. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2006a. 3 p.

_____. **ASTM E965-96**. Standard test method for measuring pavement macro texture depth using a volumetric technique. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2006b. 3 p.

_____. **ASTM D6521-05**. Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2005. 6 p.5

_____. **ASTM D2872-04**. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2004. 6 p.

_____. **ASTM E303-93**. Standard test method for measuring surface frictional properties using the British Pendulum tester. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2003. 5 p.

_____. **ASTM D6723-02**. Standard test method for determining the fracture properties of asphalt binder in direct tension (DT). West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2002. 12 p.

_____. **ASTM D2042-01**. Standard test method for solubility of asphalt materials in trichloroethylene. West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2001a. 3 p.

_____. **ASTM D6648/2001**. Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). West Conshohocken, Pensilvânia, USA: 2001b. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR6576/2007**. Materiais asfálticos – determinação da penetração. 2007. 07 p.

_____. **NBR15235/2006**. Materiais asfálticos - determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. 2006a. 8 p.

_____. **NBR7809/2006**. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. 2006b. 3 p.

_____. **NBR9935/2005**. Agregados - Terminologia. 2005. 4 p.

_____. **NBR15184/2004**. Materiais betuminosos - materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 2004a. 4 p.

_____. **NBR11341/2004**. Derivados de petróleo - determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 2004b. 15 p.

_____. **NBR15140/2004**. Misturas asfálticas - Determinação do desgaste por abrasão Cântabro. 2004c. 2 p.

_____. **NBR15087/2004**. Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2004d. 4 p.

_____. **NBR14855/2002**. Materiais betuminosos - determinação da solubilidade em tricloroetileno. 2002. 5 p.

_____. **NBR14756/2001**. Materiais betuminosos - determinação da viscosidade cinemática. 2001a. 11 p.

_____. **NBR6293/2001**. Materiais betuminosos - determinação da ductilidade. 2001b. 6 p.

_____. **NBR6560/2000**. Materiais betuminosos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. 2000. 4 p.

BALBO, J. T. – **Pavimentação asfáltica. materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B.
Pavimentação asfáltica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2007. 501 p.

_____. **Dosagem de misturas asfálticas**. São Paulo: 2006. 114 p. (Programa asfalto na universidade: Bloco 5)

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Atlas do transporte 2006**. 2007. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 29 de março de 2008.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **ET-DE-P00/027**. Especificação técnica: concreto asfáltico -. São Paulo, 2005. 45 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - 031/2006 – ES**. Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico: especificação de serviço. São Paulo, 2006. 14 p.

_____. **DNER - ME 003/99**. Material betuminoso – determinação de penetração: método de ensaio. São Paulo, 1999a. 7 p.

_____. **DNER – ME 383/99**. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro: método de ensaio. São Paulo, 1999b. 2 p.

_____. **DNER – ME 083/98**. Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. São Paulo, 1998a. 05 p.

_____. **DNER – ME 035/98**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”: método de ensaio. São Paulo, 1998b. 06 p.

_____. **DNER – EM 367/97**. Material de enchimento para misturas betuminosas: especificação de material. São Paulo, 1997a. 3 p.

_____. **DNER – ME 054/97**. Equivalente de areia: método de ensaio. São Paulo, 1997b. 10 p.

_____. **DNER – ME 043/95**. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall: método de ensaio. São Paulo, 1995. 11 p.

_____. **DNER – ME 086/94**. Agregados – determinação do índice de forma: método de ensaio. São Paulo, 1994a. 05 p.

_____. **DNER – ME 138/94**. Misturas betuminosas – determinação da resistência a tração. São Paulo, 1994b. 04 p.

_____. **DNER – ME 133/94**. Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. São Paulo, 1994c. 05 p.

DYNATEST. **Heavy vehicle simulator (Mark IV)**. USA: 2004. Disponível em: <<http://www.dynatest.com/hardware/hvs.htm>>. Acesso em: 20 de agosto de 2007.

DYNATEST ENGENHARIA LTDA. **Estudo de desempenho de pavimento com distintos ligantes asfálticos - Tomo I**. São Paulo, SP, 2006a. 87 p. (relatório final).

_____. **Estudo de desempenho de pavimento com distintos ligantes asfálticos – Tomo II**. São Paulo, SP, 2006b. 83 p (Relatório de andamento).

EDWIN J. B. **Asphalt – science and technology**. Nova York, EUA: Gordon and Breach Science Publishers, 1968.

ENGELOG CENTRO DE ENGENHARIA. **ES – 2.0/P-GG.000-002 Rev.** Especificação particular para execução de concreto betuminoso usinado a quente. Jundiaí, 2004. 17 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Background of superpave asphalt mixture design and analysis**. [S.l.], 1995. p. 1-19.

FRITZEN M. A. **Avaliação de soluções de reforço de pavimento asfáltico com simulador de tráfego na rodovia Rio Teresópolis**. 2005. 267 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

INSTITUTO DE ASFALTO, **Tradução do manual de asfalto**. [S.l.: s.n], 1989. 599 p.

LEITE, L. F. M. **As novas especificações brasileiras para cimentos asfálticos de petróleo**. In: Reunião Anual de Pavimentação – RAP, 36., 2005, Curitiba - PR. Disponível em:
<http://www.rapv.org.br/36RAPv_palestra_Leni_Leite.pdf>. Acesso em 22 de maio de 2007.

_____. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. 268p. Tese (Doutorado) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. **O Efeito do Fíler nas características do ligante asfáltico**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, 16., 2002, Natal -RN. Panorama Nacional de Pesquisa em transportes, 2002. v. 1. p. 183-194.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2 ed., Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. 570 p.

MERIGHI, J. V. **Estudo da deformação permanente de misturas asfálticas em ensaios de laboratório**. 1999. 255 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MONISMITH, C.L; FINN, F.N.; VALLERGA, B. A.. A comprehensive Asphalt Concrete Mixture Design System. In: GARTNER, W, J. **Asphalt Concrete Mix Design - Development of more rational approaches**. Philadelphia: ASTM STP 1041, 1989. p 39-71.

MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e de cal como agentes melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. 2001. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Superior performing asphalt pavements (Superpave): the product of the SHRP asphalt research program – SHRP A-410**. Washington, DC: [s.n.] 1994a. 156 p.

_____. **The SUPERPAVE mix design system manual of specifications, test methods, and practices - SHRP A-379**. Washington, DC: [s.n.] 1994b. 254 p.

NOVA DUTRA: CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA PRESIDENTE DUTRA. **Pesquisa simulador de tráfego “HVS”**. Santa Isabel, SP: 2006. 318 p (Relatório final).

NUÑES, W, P, **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados**. 1997. 271 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001. 640 p.

REVISTA ISTOÉ – **Especial Petrobrás / O futuro começa aqui – o perfil do petróleo**. São Paulo: Editora Três, 2006a. Disponível em: <http://www.terra.com.br/istoe/especiais/petrobras6/perfil_do_petroleo.htm>. Acesso em: 24 de maio de 2007.

_____. – **Especial Petrobrás / A vez do refino – abastecimento garantido**. São Paulo: Editora Três, 2006b. Disponível em: <http://www.terra.com.br/istoe/especiais/petrobras5/abastecimento_garantido.htm>. Acesso em: 30 de julho de 2007.

SOARES, J. B. **ASPHALT: Conventional and current specifications – Superpave**. 2007. Disponível em: <http://www.det.ufc.br/jsoares/arquivos/pos_graduacao/Characterisation_-_Superpave.pdf>. Acesso em: 14 de maio de 2007.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. M.; BRANCO, J.V.C. **O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 13., 1999, São Carlos. Anais: p. 115-125.

TAIRA, C. **Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com Polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2001. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

VASCONCELOS, K. L.. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias**. 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.