

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE UTILIZADAS EM
GOIÁS**

CAROLINA QUEIROZ ARANTES PRUDENTE

D0120G15
GOIÂNIA
2015

CAROLINA QUEIROZ ARANTES PRUDENTE

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE UTILIZADAS EM
GOIÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de mestre.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof.^a Dr.^a Lilian Ribeiro de Rezende

Co-Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liedi Legi Bariani Bernucci

D0120G15

Goiânia

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

PRUDENTE, CAROLINA QUEIROZ ARANTES
ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
QUENTE UTILIZADAS EM GOIÁS [manuscrito] / CAROLINA
QUEIROZ ARANTES PRUDENTE. - 2015.
cxiii, 113 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE; co
orientadora Dra. LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2015.
Bibliografia. Anexos.
Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Misturas asfálticas a quente. 2. Dosagem Marshall. 3. Módulo de
Resiliência. 4. Deformação Permanente. 5. Ensaios de desempenho. I.
REZENDE, LILIAN RIBEIRO DE, orient. II. BERNUCCI, LIEDI LEGI
BARIANI, co-orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	CAROLINA QUEIROZ ARANTES PRUDENTE		
CPF:	950.598.571-15		
E-mail:	QA.CAROLINA@GMAIL.COM		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo empregatício do autor:	Nenhum		
Agência de fomento: Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES	
País:	Brasil	UF: Go	CNPJ:
Título:	ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE UTILIZADAS EM GOIÁS		
Palavras-chave:	MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE. DOSAGEM MARSHALL. PROPRIEDADES MECÂNICAS. MÓDULO DE RESILIÊNCIA. DEFORMAÇÃO PERMANENTE. ENSAIOS DE DESEMPENHO.		
Título em outra língua:	LABORATORIAL STUDY OF HOT MIX ASPHALT USED IN MIDDLE WEST REGION OF BRAZIL		
Palavras-chave em outra língua:	HOT MIX ASPHALT. MARSHALL MIXTURE DESIGN. MECHANICAL PROPERTIES. RESILIENT MODULUS. PERMANENT DEFORMATION. PERFORMANCE TEST.		
Área de concentração:	GEOTECNIA		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	28/08/2015		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção civil		
Orientador (a):	LILIAN RIBEIRO DE REZENDE		
E-mail:			
Co-orientador (a):	LIEDI LEGI BARIANI BERNUCCI		
E-mail:			

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.


Assinatura do (a) autor (a)

Data: 19 / 10 / 2015

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.



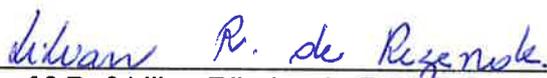
Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

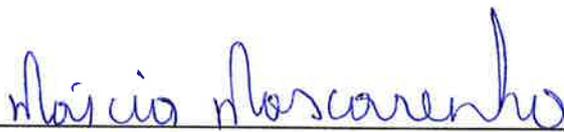
Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas A Quente Utilizadas em Goiás

Carolina Queiroz Arantes Prudente

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:



Prof.^a Dr.^a Lilian Ribeiro de Rezende (GECON/UFG)



Prof.^a Dr.^a Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (GECON/UFG)



Prof. Dr. Renato Resende Angelim (UFG)

Goiânia, 28 de agosto de 2015

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha família, meu marido Marco Antonio,
aos meus pais Ricardo e Heloisa, minha irmã Juliana, aos meus mestres,
amigos e familiares que tanto contribuíram para sua realização.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo que tem me proporcionado, pela benção sobre meus estudos e sobre meus mestres durante toda a experiência do aprendizado e desenvolvimento desta obra, e por ter me dado forças e saúde para concluir esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Ricardo e Heloisa, por sua paciência e compreensão e pelos exemplos de sabedoria, força, perseverança e amor.

À minha irmã Juliana, por todo empenho e incentivo e por compartilhar o amor por essa profissão.

Ao meu marido, Marco Antonio, que sempre com ternura, força e incentivo compartilhou tempo e dedicação fundamentais para a concretização dessa obra e a realização desse sonho.

Agradeço aos meus familiares e amigos, que estiveram sempre atentos no desenvolvimento da pesquisa e no meu crescimento pessoal. Em especial à Fernanda que me motiva todos os dias.

Deixo um agradecimento especial à minha orientadora Professora Dr^a Lilian Rezende, por todo apoio, inspiração profissional, dedicação e por compartilhar seu conhecimento e tempo ao longo do período de confecção dessa obra.

Agradeço a equipe da Basitec, na pessoa do Sr. Antônio Basílio, que com compreensão, suporte e confiança neste meu projeto, me apoiaram integralmente para sua concretização.

Agradeço ao pessoal da Pedreira Araguaia, especialmente ao Divino, e ao pessoal da Distribuidora de asfalto Disbral, Edson, Diogo, Nilson e Afrânio, que me deram suporte com os materiais e ensaios.

Aos técnicos do laboratório, João Junior, Clayton e Renan, que se tornaram amigos durante essa jornada.

À equipe da Universidade de São Paulo, Professora Dr^a Liedi Bernucci, Edson, Robson, Vanderlei, Erasmo e Diomária, pelo companheirismo e parceria no desenvolvimento dos ensaios.

Aos colegas e amigos do mestrado, sintam-se representados aqui nas pessoas Michelle, Melina e Angélica, o meu muito obrigado pelo carinho e incentivo ao longo desses anos.

Aos professores e técnicos do programa de Pós-Graduação GECON da Universidade Federal de Goiás por terem compartilhado seus conhecimentos ao longo das disciplinas e dos ensaios realizados no laboratório.

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A malha rodoviária brasileira é composta, principalmente, por pavimentos do tipo flexível ou asfáltico, que devem, para promover a segurança ao tráfego nas rodovias, suportar os efeitos das mudanças de clima e resistir ao fluxo de veículos. Para isso, a estrutura do pavimento é particularmente importante e deve ser constituída por camadas que distribuam as cargas a que estão submetidas, minimizando os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecendo proteção ao subleito. Em busca de melhores condições de infraestrutura no estado de Goiás, propôs-se avaliar se as misturas asfálticas mais utilizadas na região são consideradas satisfatórias ou não, visto que inexistem estudos desenvolvidos sobre o assunto. As misturas asfálticas a quente são compostas de agregados e ligantes, que são dosados de forma a atender os parâmetros determinados nos projetos de acordo com a demanda e tipos de tráfego. Nesta pesquisa, foi proposto o estudo da dosagem de seis projetos de misturas, com diferentes tipos de ligantes asfálticos para agregados de mesma origem nas faixas granulométricas mais utilizadas na região (Faixas B e C). Foram utilizados ligantes convencionais CAP 30/45 e 50/70, com baixa e média penetração, respectivamente, e asfalto modificado com polímero (AMP). Dos ligantes convencionais, o CAP 50/70 é o mais utilizado na região, seguido do CAP 30/45, já o AMP ainda não é frequentemente utilizado. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais que compõem as misturas, que seguiram os procedimentos e requisitos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Em uma segunda etapa, foram realizados ensaios de dosagem, combinando agregados e ligantes em diferentes taxas até que, por meio da metodologia Marshall com compactação manual, fosse obtida a dosagem considerada ótima para cada mistura estudada. Com essas dosagens, foram realizados ensaios em laboratório, para análise de desgaste, de desempenho das misturas e de suas propriedades mecânicas, por meio da determinação da resistência à tração por compressão diametral, do módulo de resiliência e da deformação permanente. Os resultados obtidos demonstraram que a mistura asfáltica mais comum de ser utilizada como camada de rolamento na região (Faixa C e CAP 50/70) não apresenta comportamento satisfatório. Dessa forma, a faixa granulométrica a ser utilizada deve ser repensada, bem como o tipo de ligante a ser utilizado para cada nível de tráfego. Recomenda-se, também, a reavaliação da utilização da metodologia Marshall para dosagem das misturas, principalmente na questão da forma de compactação e na determinação das densidades máximas.

Palavras-chave: Misturas asfálticas a quente. Dosagem Marshall. Propriedades mecânicas. Módulo de Resiliência. Deformação Permanente. Ensaio de Desempenho.

ABSTRACT

Flexible or asphalt pavements compose the Brazilian highway network, which have to promote security on traffic on the highways, to support the effects of changes in climate and to resist the traffic of vehicles. By this reasons, the structure of the pavement is particularly important and must be constituted by layers, which can distribute the loads into the structure, reducing the vertical load produced by the action of traffic and, consequently, providing protection to the subgrade. In the middle western Brazil, in the state of Goiás, there is not advanced studies on asphalt mixtures used in highways and in urban pavements, and there is not a technical scientific proofing that the local aggregates available in the region, is the best option considering the local conditions. Forward better conditions of infrastructure, it is proposed to develop more efficient asphalt mixtures for pavements, by submitting the mixtures through analysis of mechanical strength and performance test, analyzing if the most used asphalts mixtures are satisfactory or not. The hot asphalt mixture are composed by aggregates and asphalt binders that are design in order to attend the parameters set in the projects according to demand and traffic types. In this research, it was proposed the study of six asphalt mixture design with different types of asphalt binders with the same aggregates origin in a different grain size range (Bands B and C). The binders used in this study are the conventional cement asphalt in the region, CAP 30/45 e 50/70 (Brazilian penetration grade), with low and medium penetration, respectively, and the polymer modified asphalt (AMP). The CAP 50/70 is the most used conventional binder in the region, followed by CAP 30/45. Tha AMP binder is not often used. The characterization tests of the materials that composed the mixture are presented and their selection and characterization attended the standardized procedures and requirements by the brazilian department responsible for highway structures (DNIT). In a second stage, the design tests were performed, combining aggregates and binders in different rates, by the Marshall Mix Design Method using manual compression, until the great design was obtained The laboratory tests were realized with this great design to analyze the mass loss and obtain its mechanical properties, given by the tensile strength (RT). Performance tests were realized to obtain its resilient modulus (MR) and, using wheel tracking test, to obtain the permanent deformation (DP). The results showed that the common hot mixture asphalt used in the region (range C and CAP 50/70), is not a good option, because its performance is not satisfactory. Therefore, the range to be used, and the binder, must be analyzed for each traffic level. It is also recommended to evaluate the Marshall methodology for design mixtures, considering mainly the compression way and the determination of the maximum densities.

Palavras-chave: Hot mix asphalt. Marshall Mixture Design. Mechanical Properties. Resilient Modulus. Permanent Deformation. Performance Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gráfico de Estabilidade x Fluência (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006)	26
Figura 2.2: Pontos de controle <i>Superpave</i>	30
Figura 2.3: Esquema do Ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial	33
Figura 3.1: Localização da Pedreira (GOOGLE EARTH, 2013).....	45
Figura 3.2: Pedreira onde foram coletados os agregados	46
Figura 3.3: Preparação da Amostra: (a) Quarteamento; (b) Redução	48
Figura 3.4: Secagem e pesagem da amostra: (a) Secagem em estufa; (b) Pesagem.....	48
Figura 3.5: Massa do agregado: (a) Condição saturada superfície seca; (b) Condição seca....	49
Figura 3.6: Balança hidrostática para obtenção da massa imersa em água	49
Figura 3.7: Picnômetros com amostras	51
Figura 3.8: Frasco Le Chatelier com querosene e amostra: (a) com agregado sem ultrapassar a faixa superior da graduação do frasco; (b) movimentos giratórios para expulsar o ar.....	52
Figura 3.9: Ensaio de Equivalente de areia	53
Figura 3.10: Ensaio Abrasão “Los Angeles”: (a) agregados colocados no tambor; (b) agregados e esferas após a realização do ensaio.....	55
Figura 3.11: Ensaio de Índice de forma: (a) peneiras circulares; (b) crivo redutor.....	56
Figura 3.12: Ensaio de Penetração (a) Preparação do ensaio; (b) Três medidas obtidas no ensaio, (c) Amostra preparada para ser ensaiada.....	58
Figura 3.13: Ensaio de Viscosidade Brookfield	59
Figura 3.14: Ponto de amolecimento, momento do registro da temperatura.....	60
Figura 3.15: Ponto de Fulgor, temperatura 340°C e sem chama.....	61
Figura 3.16: Ensaio de Massa específica.....	62
Figura 3.17: Preparação do Corpo de Prova Marshall, pesagem	64
Figura 3.18: Moldagem do Corpo de Prova Marshall.....	64
Figura 3.19: Prensa Marshall.....	66

Figura 3.20: Ensaio de Perda de Massa por Desgaste: (a) CP colocado no tambor; (b) CP após ensaio.....	69
Figura 3.21: Corpo de Prova Marshall no molde com frisos	70
Figura 3.22: Molde preparado para RT, com termômetro para calibração	70
Figura 3.23: Ruptura no CP – Resistência à tração	71
Figura 3.24: Corpo de prova em ensaio.....	72
Figura 3.25: Mesa Compactadora desenvolvida no LCPC	73
Figura 3.26: Ensaio de Deformação Permanente	74
Figura 4.1: Composição Granulométrica de cada agregado.....	76
Figura 4.2: Ensaio de Adesividade: (a) CAP 30/45; (b) CAP 50/70; (c) AMP.....	77
Figura 4.3: Gráfico Viscosidade x Temperatura.	78
Figura 4.4: Composição granulométrica da mistura para Faixa B	79
Figura 4.5: Composição granulométrica da mistura para Faixa C	80
Figura 4.6: FAIXA B - Teor de Ligante <i>versus</i> : (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) Estabilidade; (e) RBV; (f) DMT.....	83
Figura 4.7: FAIXA C - Teor de Ligante <i>versus</i> : (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) Estabilidade; (e) RBV; (f) DMT.....	84
Figura 4.8: Curva Granulométrica da Mistura para Faixa B - <i>Superpave</i>	88
Figura 4.9: Curva Granulométrica da Mistura para Faixa C - <i>Superpave</i>	89
Figura 4.10: Deformação Permanente (%).....	95
Figura 4.11: Placas ensaiadas na deformação permanente: (a) consolidação; (b) fluência.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tipos de agregados mais usados para pavimentação no país (modificado de Bernucci <i>et al.</i> , 2006)	14
Tabela 2.2: Limites <i>Superpave</i> dos pontos de controle conforme TMN (AASHTO, 2001)....	29
Tabela 3.1: Quantidade de amostras preparadas para os ensaios	43
Tabela 3.2: Volume Médio Diário de Tráfego (AGETOP, 2014).....	44
Tabela 3.3: Ensaio de laboratório realizados com os agregados.....	47
Tabela 3.4: Ensaio de laboratório realizados com os ligantes.	57
Tabela 4.1: Tamanho Nominal Máximo (TNM) dos agregados	75
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	76
Tabela 4.3: Resultados dos Ensaio de caracterização dos ligantes asfálticos.....	77
Tabela 4.4: Parâmetros obtidos para ligantes asfálticos de diferentes origens.....	78
Tabela 4.5: Composição Granulométrica – Faixa B.....	79
Tabela 4.6: Composição Granulométrica – Faixa C.....	79
Tabela 4.7: Temperaturas de mistura e de compactação dos CPs.....	80
Tabela 4.8: Composição dos CPs – Faixa B.....	80
Tabela 4.9: Composição dos CPs – Faixa C.....	81
Tabela 4.10: Parâmetros volumétricos para a mistura Faixa B	81
Tabela 4.11: Parâmetros volumétricos para a mistura Faixa C	82
Tabela 4.12: Resultados de dosagem Marshall	86
Tabela 4.13: Massa específica máxima medida - Gmm e Volume de vazios – V _v	88
Tabela 4.14: Recomendações <i>Superpave</i> para VAM (AASHTO, 2001)	91
Tabela 4.15: Recomendações <i>Superpave</i> para RBV (AASHTO, 2001)	91
Tabela 4.16: Perda de massa por desgaste (P _d)	92
Tabela 4.17: Resistência à tração	92
Tabela 4.18: Comparação de resultados de resistência à tração.....	93

Tabela 4.19: Resultados do ensaio de módulo de resiliência	94
Tabela 4.20: Deformação Permanente.....	95
Tabela 4.21: Resultados de deformação permanente para outros estudos	96
Tabela 4.22: Volume de vazios após o ensaio de deformação permanente	97
Tabela A.1: Dados de Ensaio – CAP 30/45	111
Tabela A.2: Dados de Ensaio – CAP 50/70	112
Tabela A.3: Dados de Ensaio - AMP	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGETOP	Agência Goiana de Transportes e Obras Públicas
AMP	Asfalto Modificado com Polímero
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transporte
COPPE	Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia
CP	Corpo de Prova
DAER-RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – Rio Grande do Sul
DCP	Cone Dinâmico de Penetração
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DVIII	Modelo do Viscosímetro Rotacional
EA	Equivalente de Areia
EEC	Escola de Engenharia Civil
ES	Especificação
ESAL	<i>Equivalent Single Axle Loads</i>
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho
FV	Fator de Veículos da Frota Comercial
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
HVS	<i>Heavy Vehicle Simulator</i>
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo

IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transport, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
IPR	Instituto de Pesquisa Rodoviária
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Normas Brasileiras
PRO	Procedimento
RBV	Relação Betume/Vazios
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
RT	Resistência à Tração
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
<i>Superpave</i>	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
TC	Tensão Controlada
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
VAM	Volume do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios com Betume
VMD	Volume Médio Diário

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetro
cm ³	Centímetros cúbicos
D	Diâmetro
dε/dt	Velocidade de deformação
E*	Módulo complexo
f	Índice de forma
F	Carga de ruptura
FP	Fator de pista
FR	Fator Climático Regional
g	Grama
GAgG	Massa específica de agregados graúdos
GAgM	Massa específica de agregados miúdos
Gasf	Massa específica de ligante
Gf	Densidade do material finamente pulverizado
GF	Massa específica de filer
Gmb	Massa específica aparente
Gmb	Massa específica aparente da mistura
Gmm	Massa específica máxima medida
Gsa	Densidade real do agregado miúdo
Gsb	Densidade aparente do agregado
H	Altura
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
kN	Quilo Newton
kN/m ³	Quilo Newton por metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal

N	Newton
<i>N</i>	Número N - repetições do eixo padrão
°C	Grau Celsius
s	Segundo
T	Temperatura
t	Tensão de cisalhamento aplicada
σ_c	Tensão de compressão
σ_t	Tensão de tração
ρ	Massa específica da água à temperatura do ensaio
ϵ_t	Deformação específica recuperável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE.....	13
2.1.1 Agregados	13
2.1.1.1 Classificação	14
2.1.1.2 Propriedades.....	15
2.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	19
2.1.2.1 Ensaio de Penetração	22
2.1.2.2 Ensaio de Viscosidade.....	22
2.1.2.3 Ensaio de Ductilidade	23
2.1.2.4 Ensaio de Ponto de Amolecimento	23
2.1.2.5 Ensaio de Ponto de Fulgor	23
2.1.2.6 Ensaio de Massa Específica e Densidade Relativa.....	23
2.2 DOSAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	24
2.2.1 Dosagem Marshall	26
2.2.2 Dosagem Superpave.....	27
2.2.2.1 Seleção de Materiais Segundo a Metodologia <i>Superpave</i>	28
2.3 DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MISTURA.....	30
2.3.1 Ensaio Laboratoriais.....	31
2.3.1.1 Ensaio para Determinação da Resistência à Tração Estática.....	31
2.3.1.2 Ensaio para Determinação do Módulo de Resiliência	31
2.3.1.3 Ensaio para Determinação da Vida de Fadiga	33
2.3.1.4 Ensaio para Determinação da Deformação Permanente.....	35
2.3.2 Ensaio de Campo	37
2.4 QUALIDADE DA MISTURA <i>VERSUS</i> SERVENTIA DO PAVIMENTO.....	38

3	METODOLOGIA	42
3.1	PLANEJAMENTO DA FASE EXPERIMENTAL	42
3.2	AGREGADOS.....	45
3.2.1	Granulometria	47
3.2.2	Absorção e Densidade Aparente dos Agregados Graúdos	48
3.2.3	Densidade Real dos Agregados Miúdos	50
3.2.4	Densidade do Material Finamente Pulverizado	51
3.2.5	Equivalente de Areia	52
3.2.6	Ensaio de Abrasão “Los Angeles”	54
3.2.7	Índice de Forma	55
3.2.8	Adesividade	56
3.3	LIGANTES ASFÁLTICOS	57
3.3.1	Penetração	58
3.3.2	Viscosidade Rotacional	59
3.3.3	Ponto de Amolecimento	60
3.3.4	Ponto de Fulgor	60
3.3.5	Massa Específica e Densidade Relativa	61
3.4	DOSAGEM MARSHALL.....	62
3.5	ANÁLISE DOS AGREGADOS PELA METODOLOGIA <i>SUPERPAVE</i>	67
3.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO	68
3.6.1	Avaliação do Desgaste	69
3.6.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral (método brasileiro)	70
3.6.3	Módulo de Resiliência	71
3.6.4	Deformação Permanente	73
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	75
4.1	AGREGADOS.....	75
4.1.1	Caracterização dos Agregados	75
4.2	LIGANTES ASFÁLTICOS	77
4.3	DOSAGEM MARSHALL.....	78
4.4	ANÁLISE DOS AGREGADOS PELA METODOLOGIA <i>SUPERPAVE</i>	88
4.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO	91
4.5.1	Avaliação do Desgaste	91

4.5.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	92
4.5.3 Módulo de Resiliência.....	93
4.5.4 Deformação Permanente.....	94
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5.1 CONCLUSÕES	99
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS	102
ANEXO A.....	109

1 INTRODUÇÃO

A importância das rodovias na vida econômica e social do Brasil é incontestável. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2014), as mesmas são utilizadas para mais de 60% de transporte de cargas e de 90% de transporte de passageiros. A oferta inadequada de infraestrutura é o fator que mais dificulta a realização de negócios no Brasil, segundo o relatório do Fórum Econômico Mundial (SCHWAB; SALA-I-MARTÍN; BRENDE, 2014). O resultado do estado geral baseado na média da variação das características da via, conforme pesquisa desenvolvida pela CNT (2014), mostrou que em 79.515km de rodovias sob gestão pública, 70,7% são classificadas como regular, ruim ou péssima.

Com o objetivo de promover a segurança no tráfego das rodovias, o pavimento deve ser projetado e construído para suportar, principalmente, os efeitos das mudanças de clima e resistir ao fluxo de veículos (DNIT, 2010a). Para atender a esses requisitos, a estrutura do pavimento é particularmente importante e deve ser constituída por camadas que distribuam as cargas, com controle das tensões e das deformações, de forma a garantir um desempenho adequado da via por um longo período de tempo. Nesse sentido, os pavimentos rodoviários são divididos em camadas, distribuindo as tensões oriundas dos veículos nas camadas subsequentes, minimizando os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecendo proteção a integridade da estrutura do pavimento, de tal forma que tensões elevadas não causem recalques ao subleito (BERNUCCI *et al.*, 2006). Assim, a construção de pavimentos de qualidade é de fundamental importância para a eficiência dos investimentos em infraestrutura viária no país.

No entanto, o aumento do volume de veículos, o excesso de carga nas rodovias brasileiras e a não utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos que contemplem parâmetros mecânicos são fatores que, geralmente, implicam na deterioração prematura do pavimento e geram elevada despesa com manutenção. Em busca de melhores condições da infraestrutura, a engenharia rodoviária tem o desafio de utilizar misturas asfálticas mais eficientes para os pavimentos, escolhidas por meio de ensaios de dosagem e análise de desempenho. Existem diferentes soluções de misturas asfálticas que podem ser empregadas e sua variação acontece

na granulometria dos agregados e no tipo de ligante asfáltico utilizado, que influenciam diretamente na qualidade do pavimento, e também, na sua segurança e durabilidade.

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas em todo o país, a exemplo da realizada para o Relatório Técnico de pesquisa da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR, 2004). Esse relatório embasou estudos realizados por entidades técnicas e, principalmente, pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) que fundamentaram a Resolução da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005), onde foram definidas as atuais especificações dos cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.

No entanto, no estado de Goiás, verifica-se a inexistência de estudos avançados sobre as misturas asfálticas utilizadas tanto nas rodovias como nos pavimentos urbanos. Os dados obtidos para as misturas asfálticas a quente, geralmente, são apresentados e controlados somente pelas empresas que produzem a massa, e a fiscalização pouco avalia parâmetros do material entregue na obra. Os ensaios realizados ainda são baseados na metodologia Marshall e não conseguem prever o comportamento da mistura utilizada quando submetida ao carregamento dinâmico e à variação de temperatura. Como não há comprovação técnico-científica de que, para os agregados disponíveis na região, os ligantes asfálticos mais utilizados sejam os mais adequados para serem empregados, para as condições locais, fez-se necessário a realização da presente pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

No ano de 2013, por meio do convênio realizado entre a Petrobrás e a Universidade Federal de Goiás (UFG), foi concluída a reforma do Laboratório de Geotecnia e a compra de equipamentos para implantação do Laboratório de Asfalto na universidade. Com isso, houve a possibilidade de serem iniciadas pesquisas com ligantes e misturas asfálticas em Goiânia.

Como primeiro tema de pesquisa nessa linha, devido à realidade local, tornou-se importante a realização de estudos mais aprofundados com os concretos asfálticos produzidos na região, tanto em termos de metodologias convencionais, quanto com a determinação de parâmetros que poderão avaliar se, para as condições de tráfego e clima locais, as misturas utilizadas são adequadas ou não. Esse, então, é foco da presente pesquisa. Dessa forma, pretende-se

contribuir para a garantia da qualidade dos revestimentos asfálticos executados e maior conforto, segurança e economia na implantação e manutenção da infraestrutura viária.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho pretendeu avaliar se as misturas asfálticas a quente mais utilizadas no estado de Goiás são consideradas satisfatórias ou não para as condições de tráfego e clima a que são submetidas.

Os objetivos específicos foram:

- Estudar os agregados e os ligantes disponíveis para utilização na região;
- Avaliar as misturas asfálticas produzidas a partir dos materiais existentes;
- Obter parâmetros, tais como estabilidade Marshall e resistência à tração, que reflitam o comportamento mecânicos dessas misturas;
- Avaliar seus desempenhos em termos de resiliência e deformação permanente.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. Neste capítulo, encontra-se a abordagem introdutória sobre a pesquisa, a justificativa para seu desenvolvimento e seus objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica e faz uma revisão na literatura sobre materiais e dosagens utilizados em misturas asfálticas a quente, determinação de suas propriedades mecânicas e qualidade da mistura *versus* serventia do pavimento, contribuindo para o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema.

No Capítulo 3 deste estudo está a descrição dos materiais selecionados para o estudo e os métodos utilizados na pesquisa. Foi realizada a caracterização dos agregados e dos ligantes, dosagens de diferentes misturas, ensaios de compressão diametral, módulo de resiliência e deformação permanente.

Já no Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa assim como as análises realizadas e o Capítulo 5 finaliza a pesquisa com as conclusões obtidas sobre o trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão na literatura sobre materiais e dosagens utilizados em misturas asfálticas a quente, determinação de suas propriedades mecânicas e qualidade da mistura *versus* serventia do pavimento, contribuindo para o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema.

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

As misturas asfálticas a quente são compostas de agregados e ligantes que são dosados de forma a atender os parâmetros determinados nos projetos de acordo com a demanda e tipos de tráfego. Os materiais são misturados com determinada taxa de forma a oferecer uma estrutura compacta e resistente. A adesividade entre agregado e ligante asfáltico é fator de grande relevância para a durabilidade e o desempenho dos pavimentos. A literatura relata que defeitos como deformação permanente, fadiga e dano por umidade estão diretamente relacionados com a natureza e qualidade da adesão entre os dois materiais (CHENG *et al.*, 2002).

A seguir são descritos os materiais que compõem a mistura, suas características e propriedades.

2.1.1 Agregados

Sabe-se que os agregados são materiais granulares, que não apresentam forma e volume definidos, mas, quando analisados, demonstram ter dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de construção civil. Podem ser classificados levando-se em conta a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos. Os agregados são provenientes de rochas que existem a milhões de anos e prever o comportamento dos mesmos em um projeto de pavimento, e durante a vida útil da estrutura depende de estudos, experiência prática e pesquisas científicas fundamentadas para subsidiar, com confiabilidade e segurança, as escolhas de projetos.

Prever o comportamento de uma rocha, que existe há milhões de anos, em um projeto de pavimento e durante a vida útil do mesmo, depende de experiência prática e de ensaios de laboratório.

Lopes (2010) afirma que a caracterização de agregados direciona a escolha adequada de materiais capazes de resistir às cargas as quais o pavimento será submetido. Alguns procedimentos do processo de caracterização dos agregados, como o detalhamento dos métodos de ensaio, são apresentados nos próximos itens.

No Brasil, os tipos de agregados mais utilizados em pavimentação estão apresentados na Tabela 2.1. Os agregados com potencial de utilização na região em estudo são o calcário, na região do Distrito Federal, o micaxisto, na região metropolitana de Goiânia, e o granulito, na região centro-norte de Goiás.

Tabela 2.1: Tipos de agregados mais usados para pavimentação no país (modificado de Bernucci *et al.*, 2006)

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica, de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaiss	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico
Granulito	Rocha metamórfica, constituída principalmente de feldspato potássico, plagioclásio, quartzo
Micaxisto	Rocha metamórfica, constituída essencialmente por quartzo e mica

2.1.1.1 Classificação

Os agregados utilizados em pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

Quanto à natureza, os agregados são classificados em: natural, que inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais; artificial, que são resíduos de processos industriais de britagem ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho; e reciclado, que são os provenientes de reuso de materiais diversos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Quanto ao tamanho, os agregados são classificados, conforme ME 083 (DNER, 1998a), como: gráudo, que é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira nº 10; miúdo, que é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm, ou seja, retido na peneira de nº 200, mas que passa na de abertura nº 10; e material de enchimento ou filler, que é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm (peneira de nº 200).

Quanto à distribuição granulométrica dos agregados, sabe-se que é uma de suas principais características e tem efetiva influência no comportamento dos revestimentos asfálticos. É, usualmente, determinada por meio de uma análise por peneiramento em que uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, e obtém-se a porcentagem entre a massa retida e a massa total (BERNUCCI *et al.*, 2006). Dessa forma, a composição da amostra de agregado na mistura deve obedecer fielmente às porcentagens dos tamanhos dos agregados para garantir a concepção do projeto.

2.1.1.2 Propriedades

A seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação. Estudos publicados na literatura relatam a importância das propriedades dos agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas (BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012 e BESSA *et al.*, 2014).

Segundo Roberts *et al.* (1996), as propriedades físicas dos agregados são a principal razão para determinar sua aplicação em misturas asfálticas. São propriedades físicas e mecânicas básicas: a resistência, a porosidade e a densidade. Propriedades físico-químicas tais como umidade, adesividade e, em consequência, descolamento da película de asfalto, são função da

composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores. As propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no seu desempenho, exceto quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivos antidescolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico.

A seguir, são apresentadas algumas das características analisadas para aceitação de agregados para misturas asfálticas, conforme especificações, especialmente as do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

a) Tamanho e graduação

O tamanho máximo do agregado e sua graduação são controlados por especificações que prescrevem a distribuição granulométrica a ser usada para uma determinada aplicação. A norma ME 083 (DNER, 1998a) contém os procedimentos a serem executados para a determinação da composição granulométrica de agregados.

Essa distribuição é uma das características que asseguram o intertravamento das partículas, das graúdas às mais finas. Conforme Cunha (2004), propriedades de uma mistura asfáltica, como estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente, estão ligadas à sua granulometria. Lopes (2010) acrescenta que o entrosamento entre as partículas e atrito gerado entre elas, devido à distribuição granulométrica, assegura estabilidade da camada de revestimento.

b) Resistência à abrasão

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego. Eles devem apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração. Agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores.

As normas técnicas procuram estabelecer a qualidade de um agregado em função de sua utilização, através do ensaio de abrasão Los Angeles, que pode ser realizado seguindo a NBR NM 51 (ABNT, 2001a).

c) Forma dos agregados e textura superficial

Através da norma ME 086 (DNER, 1994a), o índice de forma pode ser definido, sendo que a forma cúbica é a que apresenta melhor trabalhabilidade, e é a forma desejável para a produção de uma mistura asfáltica.

A textura superficial dos agregados influi na trabalhabilidade, na adesividade e na resistência ao atrito e ao cisalhamento das misturas asfálticas para pavimentação. À medida que aumenta a rugosidade do agregado, há uma tendência de perda de trabalhabilidade da mistura asfáltica e de crescimento da resistência ao cisalhamento dessa mistura, bem como do teor de ligante asfáltico de projeto. Não há um método consagrado para medir a textura superficial, embora existam procedimentos de avaliação indireta, através de avaliação visual obtida com a experiência adquirida em ensaios.

d) Adesividade ao ligante asfáltico

Bernucci *et al.* (2006) afirmam que o efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Os ensaios para determinação das características de adesividade podem ser subdivididos em dois grupos com metodologias diferentes, sendo o primeiro o avalia o comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico através de métodos empíricos, onde o contato entre o ligante asfáltico e o agregado é avaliado visualmente e procura-se correlacionar o resultado com o possível desempenho da mistura em campo, que segue a ME 078 (DNER, 1994b), que simula o agregado envolvido com o ligante na presença de água.

O segundo grupo de ensaio avalia o desempenho de determinadas propriedades mecânicas de misturas sob a ação da água, na qual amostras de concreto asfáltico são submetidas a um condicionamento e/ou esforço mecânico para provocar de forma acelerada o que ocorre em campo, realizado através do ensaio Lottman Modificado (MSHTO T-283 ou ASTM D-4867) e pertence à atual especificação por desempenho americana de ligantes e misturas asfálticas denominada SUPERPAVE.

e) Equivalente de areia (EA)

Materiais como argila, matéria orgânica, pó e silte, quando em contato com os agregados, prejudicam a adesão com o ligante. Sua limpeza é determinada através do ensaio de

equivalente de areia, que verifica a presença de material no agregado. O ensaio pode ser realizado seguindo a norma ME 054 (DNER, 1997a).

f) Densidade específica/massa específica

Pinto (2000) afirma que massa específica é a relação entre quantidade de matéria (massa) e volume, geralmente expressa em g/cm^3 , e peso específico é a relação entre peso e volume, geralmente expressa em kN/m^3 . A relação entre os valores numéricos que expressam as duas grandezas é constante.

Para realização dos ensaios em agregados miúdos utiliza-se as normas técnicas NBR NM 52 (ABNT, 2009a) para determinação da massa específica e ME 084 (DNER, 1995a) para determinação da densidade. Para realização dos ensaios em agregados graúdos utiliza-se a norma técnica NBR NM 53 (ABNT, 2009b) para determinação da massa específica e ME 081 (DNER, 1998b) para determinação da densidade.

Para a determinação de parâmetros secundários de relações volumétricas necessárias durante a dosagem de uma mistura (relação betume vazios – RBV, vazios do agregado mineral – VAM e volume de vazios - V_v) é necessária utilização correta das densidades, que podem ser densidade real, aparente e efetiva.

Densidade real (G_{sa}) é aquela que não inclui o volume dos poros permeáveis à água ou ao asfalto. Aparente (G_{sb}) é aquela que inclui o volume de poros permeáveis à água e ao asfalto. A densidade efetiva é aquela que inclui o volume dos poros permeáveis à água, mas não ao asfalto. Para o cálculo das densidades real e aparente, respectivamente, seguem as Equações (2.1) e (2.2).

$$G_{sa} = \frac{M}{M - Ma} \quad (2.1)$$

$$G_{sb} = \frac{M}{M_s - Ma} \quad (2.2)$$

Onde:

M = Massa do agregado seco;

M_s = Massa da amostra na condição saturada com superfície seca;

M_a = Massa da amostra imersa em água.

A massa específica efetiva não é diretamente calculada e é admitida como sendo a média entre a massa específica real e a massa específica aparente.

g) Absorção

A norma NBR NM 53 (ABNT, 2009b) também determina a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver, que direciona a utilização ou não de agregados que absorvam muito ligante asfáltico. A porcentagem de absorção dos agregados exerce grande efeito nos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, e a consequência direta deste fenômeno é a diminuição do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, ou seja, a diminuição da quantidade de asfalto efetivo na mistura, tornando a mistura mais suscetível às tensões causadas pelo tráfego e às intempéries.

Se no projeto de misturas a absorção não for considerada, certamente serão produzidas misturas com teores de asfalto efetivos inferiores àqueles projetados, pois parte do asfalto adicionado durante a produção dessas misturas será absorvido, portanto, não estará mais disponível para agir como ligante.

2.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O asfalto é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo, utilizado em pavimentação, com propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. No entanto, mesmo com a baixa reatividade química a muitos agentes, esse material, em contato com ar e água, pode sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta (CERATTI; REIS, 2011).

Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) são ligantes semissólidos, viscoelásticos ou líquidos em função das temperaturas às quais estão submetidos, sendo respectivamente, temperaturas baixas, ambiente e altas. Se enquadram em limites de consistência, conforme aplicação, e são caracterizados segundo as normas brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da Agência Nacional do Petróleo (ANP).

No comportamento mecânico do CAP, segundo Bernucci *et al.* (2006), pode-se observar a característica termoviscoelástica, quando submetido a variações de velocidade, temperatura de serviço e tempo e intensidade de carregamento. É mais comum assumir o comportamento termoviscoelástico do material do que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação de seu real comportamento.

A temperatura tem grande influência nas propriedades físicas do asfalto, cuja estrutura é composta por uma dispersão de moléculas polares em meio não polar. Segundo Bernucci *et al.* (2006), essas moléculas, à baixas temperaturas, não têm condições de se mover elevando a viscosidade do asfalto, e o ligante se comporta quase como um sólido. Com o aumento da temperatura, começa o movimento de algumas moléculas, reduzindo a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível.

Para especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, são utilizadas características físicas do ligante: a dureza, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade.

A especificação brasileira do CAP convencional, segundo Resolução nº 19 (ANP, 2005), separa os ligantes em classes por penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio NBR 6576 (ABNT, 2007). Para o CAP modificado por polímero elastomérico estireno-butadieno-estireno – SBS, segundo Resolução nº 32 (ANP, 2010), a classificação é de acordo com o ponto de amolecimento e recuperação elástica a 25°C, nos tipos 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E, valores obtidos nos ensaios NBR 6560 (ABNT, 2008a) e NBR 15086 (ABNT, 2006), respectivamente.

O uso de ligantes modificados com polímero pode ser uma forma de se aumentar a durabilidade das misturas. Os polímeros são utilizados como aditivos para modificar as características elásticas das misturas betuminosas com o objetivo de produzir um pavimento menos sensível às variações climáticas, com maior flexibilidade e maior resistência à ação do tráfego. (SILVEIRA, 1999).

Alguns autores apresentaram estudos comparativos entre misturas convencionais e de asfalto modificado com polímeros, com o objetivo de verificar qual mistura apresenta melhor desempenho, conforme resumido a seguir.

Amaral (2000) realizou um estudo com o objetivo de avaliar as vantagens ou desvantagens de se utilizar asfalto modificado com polímero em misturas densas. Os resultados dos ensaios Marshall e de resistência à tração, realizados com corpos de prova das duas misturas, acusaram um melhor desempenho das misturas com asfalto modificado, assim como a relação MR/RT (módulo de resiliência / resistência à tração por compressão diametral).

A ocorrência de alguns defeitos na Rodovia Presidente Dutra, ligando São Paulo ao Rio de Janeiro, motivou o estudo de misturas empregando dois asfaltos convencionais: CAP 20 e CAP 50/60, e dois modificados por polímeros (3,0% e 6,5% de SBS). Silva (2005) realizou ensaios laboratoriais e observou que o uso de asfalto modificado por polímero acarretou uma redução significativa de afundamentos em trilha de roda.

Gusmão (2009) apresentou um estudo sobre a utilização de asfalto modificado por polímero. Com intuito de se verificar a efetividade do teor de polímero nos parâmetros avaliados, foram ensaiadas misturas com CAP 50/70, convencional, e CAP 50/70 modificados com teores de polímeros de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em peso sobre o cimento asfáltico de petróleo, chegando-se à conclusão da superioridade do asfalto modificado em relação ao CAP puro, principalmente no aumento da vida de fadiga e na redução da deflexão do pavimento.

Lucena, Soares e Soares (2005) realizaram estudo sobre a caracterização química e reológica do CAP e os efeitos decorrentes da adição de 4,5% de polímero (SBS). As características estruturais foram analisadas através da espectroscopia no infravermelho (FTIR) e ressonância magnética nuclear (RMN). O estudo mostrou que o SBS não é um aditivo inerte e provoca um aumento da viscosidade do asfalto, de forma não linear e que o comportamento Newtoniano que os ligantes asfálticos geralmente possuem a temperaturas elevadas também foi verificado para o ligante modificado com SBS. Ensaio dinâmico mecânico demonstraram que o polímero elevou o grau de desempenho do ligante.

Araujo *et al.* (2014) fizeram uma análise térmica em ligantes que mostrou uma queda acentuada da estabilidade térmica em amostras envelhecidas, que aconteceu após 50 horas para os betumes convencionais e após 100 horas para o betume de polímero modificado.

Os ensaios físicos dos cimentos asfálticos podem ser categorizados entre ensaios de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança. A seguir são apresentados os ensaios mais usuais para definição de suas propriedades (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.1.2.1 Ensaio de Penetração

A penetração é obtida pela medição da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. A norma brasileira para esse ensaio é a NBR 6576 (ABNT, 2007).

2.1.2.2 Ensaio de Viscosidade

A viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. A relação entre a tensão de cisalhamento (τ) aplicada ao líquido viscoso e a velocidade de deformação ($\Delta\gamma/\Delta t$) do mesmo é chamada de coeficiente de viscosidade (η).

No Brasil, o viscosímetro mais usado é o Saybolt-Furol, que mede empiricamente a viscosidade através do tempo, em segundos, do escoamento de uma quantidade padronizada do fluido em determinada temperatura, segundo a NBR 14756 (ABNT, 2001b).

A medida da viscosidade do ligante asfáltico tem grande importância na determinação da consistência adequada que ele deve apresentar quando da mistura com os agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos e para aplicação da mistura em campo, e para isso é necessário se obter a curva de viscosidade *versus* temperatura.

Atualmente, o viscosímetro mais utilizado nos Estados Unidos e Europa, segundo Bernucci *et al* (2006), é o chamado Brookfield, que mede a chamada viscosidade rotacional e permite obter a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra, reduzindo o tempo de execução do ensaio. Os dados são obtidos por meio de medida do comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais, que ficam mergulhados na amostra em teste. A norma brasileira para esse ensaio é a NBR 15184 (ABNT, 2004), e a unidade da viscosidade é expressa em centiPoise ($cP = 1mPa.s$).

2.1.2.3 Ensaio de Ductilidade

A coesão dos asfaltos é avaliada indiretamente pela medida empírica da ductilidade que é a capacidade do material de se alongar na forma de um filamento. A ductilidade é dada pelo alongamento em centímetros obtido antes da ruptura de uma amostra de CAP, na seção diminuída do molde com largura inicial de 10mm, em banho de água a 25°C, submetida pelos dois extremos à velocidade de deformação de 5cm/minuto. A norma brasileira para este ensaio é a NBR 6293 (ABNT, 2001c).

2.1.2.4 Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é a medida que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. A norma brasileira para este ensaio é a NBR 6560 (ABNT, 2008a).

2.1.2.5 Ensaio de Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor é um ensaio ligado a segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Os valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C. A NBR 11341 (ABNT, 2008b) é a norma brasileira para este ensaio.

2.1.2.6 Ensaio de Massa Específica e Densidade Relativa

A massa específica do ligante asfáltico é obtida por meio de picnômetro para a determinação do volume do ligante e é definida como a relação entre a massa e o volume. A massa específica e a densidade relativa do CAP devem ser medidas e anotadas para uso posterior na dosagem das misturas asfálticas. O ensaio é realizado de acordo com a norma NBR 6296 (ABNT, 2012a).

2.2 DOSAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os revestimentos asfálticos modernos constituem um material composto formado por agregados de vários tamanhos e proporções que são mantidos unidos por um ligante asfáltico. Espera-se que o nível de desempenho do revestimento seja melhor, quanto maior for a compreensão do comportamento dos materiais constituintes ao reagirem juntos sob as condições a que estão submetidos.

A dosagem de uma mistura asfáltica é uma escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. Como esse teor “ótimo” varia conforme o critério de avaliação é usualmente chamado de teor de projeto.

A dosagem é um processo complexo da combinação de determinada taxa entre os materiais, para satisfazer as propriedades volumétricas e mecânicas. Se a quantidade de ligante estiver 0,5% abaixo do teor de projeto, um revestimento pode sofrer desagregação ou trincamento. E pode sofrer exsudação e deformação permanente se a quantidade de ligante estiver 0,5% acima do teor de projeto. Quanto às propriedades volumétricas e mecânicas, dentre os fatores que influenciam tem-se: graduação dos agregados, formato e textura dos grãos, processo de compactação, propriedades do ligante asfáltico e a relação agregados e ligante asfáltico (VASCONCELOS, 2004).

Specht (2004) afirma que valores muito reduzidos de vazios do agregado mineral (espaço intergranular do esqueleto mineral) levam a teores muito baixos de ligante o que pode comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas (filme de ligante delgado recobrando os agregados). Já valores excessivamente altos de vazios podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

Harman *et al.* (2002) afirmam que os procedimentos de dosagens variam quanto à forma das amostras e quanto à compactação das mesmas. Segundo Bernucci *et al.* (2006), o método de dosagem que define o teor de projeto de ligante asfáltico é em função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros, sendo que no Brasil o mais usado é o método Marshall.

Na década de 80, rodovias norte-americanas de tráfego pesado evidenciaram deformações permanentes prematuras, atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Supunha-se que a

compactação por impacto das misturas durante a dosagem produzia corpos de prova com densidades não condizentes com as do pavimento em campo. O congresso dos Estados Unidos estabeleceu um plano de estudos para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas, designado *Strategic Highway Research Program* (SHRP). Como principal resultado desse estudo foram propostas novas especificações, com mudanças significativas nos procedimentos de ensaio de ligantes e misturas asfálticas, conhecido como *SUPERior Performing Asphalt PAVement* (*Superpave*).

A forma de compactação dos corpos de prova foi uma das maiores mudanças propostas pelo *Superpave*, uma vez que os pesquisadores do SHRP buscaram aproximar a compactação dos corpos de prova à compactação que acontece no campo, com valores de densidades próximos aos reais, obtidos no pavimento através de condições reais de clima e carregamento.

A maior diferença entre os dois procedimentos de dosagem citados é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem *Superpave* é realizada por amassamento (giros). No Brasil, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas, cujo procedimento é descrito pela norma ME 043 (DNER, 1995b), ainda é o mais utilizado e já sofreu algumas alterações.

Khan *et al.* (1998) afirmam que a compactação através do método Marshall, pela ausência do efeito de amassar durante a compactação, possui propriedades diferentes das obtidas em campo. Foi observado que a compactação manual no método Marshall proporciona um melhor resultado devido à ação de compactação proporcionada pelo operador não cair sempre na mesma porção da amostra, proporcionando o rearranjo das partículas de agregado após cada golpe.

O método Marshall foi criado para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares, durante a 2ª Guerra Mundial. Trata-se da compactação utilizando um esforço de golpes com o soquete Proctor, seguido de aplicação de uma carga estática durante um tempo, com a finalidade de nivelar a superfície do corpo de prova.

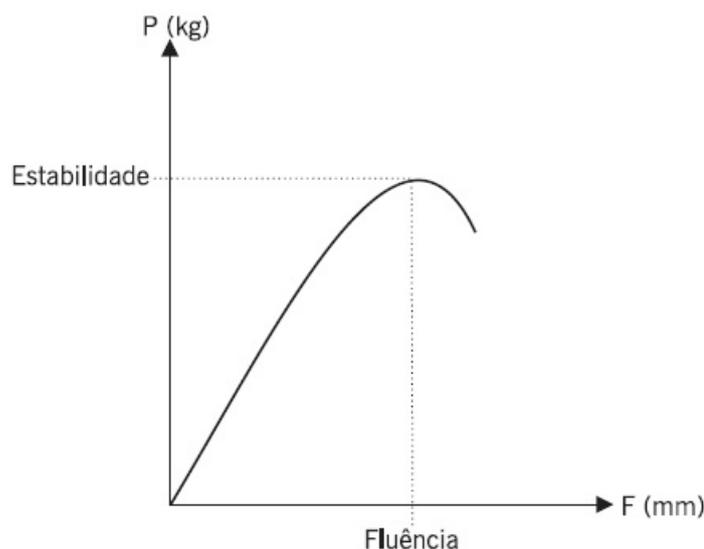
2.2.1 Dosagem Marshall

O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão sobre o corpo de prova cilíndrico regular, chamado Marshall, de 100mm de diâmetro e 63,5mm de altura a temperatura de 60°C e taxa de carregamento de 5cm/minuto, e pode ser realizado de acordo com a norma ME 043 (DNER, 1995b).

Em geral, a parte superior da prensa é fixa e o prato inferior se desloca para cima conforme a taxa mencionada. Devido à resistência do material ensaiado, é necessária uma força exponencial para manter o prato inferior deslocando na taxa especificada. Esta força aumenta até ocorrer uma perda de estabilidade do material, ocasionada por deslocamento ou quebra de agregados.

A carga máxima correspondente a este ponto antes da ruptura é denominada estabilidade Marshall e é expressa em unidade de força. O deslocamento vertical total do prato, correspondente ao ponto de carga máxima, é denominado fluência, expressa em unidade de deslocamento. Com os dados de estabilidade e fluência gera-se o gráfico conforme Figura 2.1, apresentada a seguir.

Figura 2.1: Gráfico de Estabilidade x Fluência (BERNUCCI *et al.*, 2006)



A seguir tem-se uma explicação passo a passo do procedimento de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para mistura asfáltica usada em camada de

rolamento. Passos semelhantes valem para outras misturas a quente considerando as respectivas particularidades.

Na dosagem Marshall são determinadas as massas específicas reais do CAP e dos agregados. Em seguida serão escolhidas as composições dos agregados, de forma a enquadrar a mistura nos limites da faixa granulométrica do DNIT escolhida para o projeto. Então, adota-se as temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura dos ligantes escolhidos.

Após a compactação, deve haver o resfriamento e a desmoldagem dos CPs, e então determina-se suas massas seca (M_s) e submersa em água ($M_{s\text{sub}}$), para obter sua massa específica aparente (G_{mb}), que, por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), vai permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem. Calcula-se, então, os parâmetros de dosagem para cada CP.

Após as medidas volumétricas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C de 30 a 40 minutos. Então, retira-se cada CP colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão e determinam-se, então, por meio da prensa Marshall parâmetros mecânicos, como estabilidade e fluência.

2.2.2 Dosagem *Superpave*

O SHRP foi estabelecido nos Estados Unidos como um plano de estudos para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas e um dos principais resultados foi o *Superpave*. A dosagem *Superpave* trabalha com duas ferramentas principais que são o sistema de compactação em laboratório e os testes de desempenho, e consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto pela fixação do volume de vazios e conhecimento da granulometria dos agregados (CERATTI; REIS, 2011).

O sistema de compactação em laboratório é realizado usando um compactador giratório específico, que acrescentou características operacionais aos modelos existentes. Enquanto o objetivo principal é compactação dos CPs, através de golpes, o compactador giratório promove a compactação através de amassamento e pode fornecer informações sobre a compactabilidade da mistura através da captura de dados durante a compactação.

O procedimento de dosagem *Superpave* e suas análises dependem do nível do tráfego à qual o pavimento será submetido e das variações de temperatura. Dependendo do tráfego, o projeto de mistura pode estar completo após o projeto volumétrico. Para valores de tráfego mais altos, ensaios baseados em desempenho são realizados para otimizar o projeto. A dosagem volumétrica é utilizada em todos os projetos de pavimentação, e implica a compactação de CPs utilizando o compactador giratório e a seleção do asfalto, com base em requisitos de projetos volumétricos.

Testes de desempenho e modelos de previsão de desempenho foram importantes metodologias desenvolvidas em pesquisas da SHRP. Os dados de saída destes testes são usados para fazer previsões detalhadas do desempenho real do pavimento. Procedimentos de testes e modelos de previsão de desempenho foram desenvolvidos para permitir a estimativa do desempenho da vida útil da mistura, de forma a resistir a falhas como deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento à baixa temperatura (ASPHALT INSTITUTE, 1996).

É de consenso na literatura sobre o assunto, de que misturas asfálticas dosadas pelo método de *Superpave* resultam em teor de projeto menor do que as misturas dosadas pela metodologia Marshall (VASCONCELOS; SOARES; LEITE, 2003). Algumas instituições de pesquisa já estão equipadas com essa metodologia no Brasil.

2.2.2.1 Seleção de Materiais Segundo a Metodologia *Superpave*

Com base nos fatores ambientais e de tráfego, os materiais são definidos para o projeto em estudo. As condições climáticas direcionam a escolha do ligante asfáltico; o volume de tráfego e a espessura de camada, subsidiam a escolha dos agregados.

Durante o desenvolvimento da metodologia *Superpave*, parte do estudo consistiu na nova especificação de ligantes asfálticos, com um conjunto de novos testes, baseados no desempenho do material, no clima e temperatura do pavimento a ser implantado. Quanto aos agregados, foi definido que não haveria nenhum procedimento novo, apenas uma análise detalhada sobre os procedimentos usuais, definidas duas categorias de propriedade: Consenso e Origem.

As propriedades de consenso avaliam a angularidade por meio das normas MP 2 (AASHTO, 2001) e T 304 (AASHTO, 2008); a forma, norma D 4791 (ASTM, 2005) e teor de argila D 2419 (ASTM, 2002) dos agregados. As propriedades de origem são as que, por serem intrínsecas à geologia e formação da rocha, dependem da origem dos agregados, e avaliam a dureza, norma T 96 (AASHTO, 1994) e ES 313 (DNER, 1997b); a sanidade, norma T 104 (AASHTO, 1993a) e materiais deletérios, norma T 112 (AASHTO, 1993b).

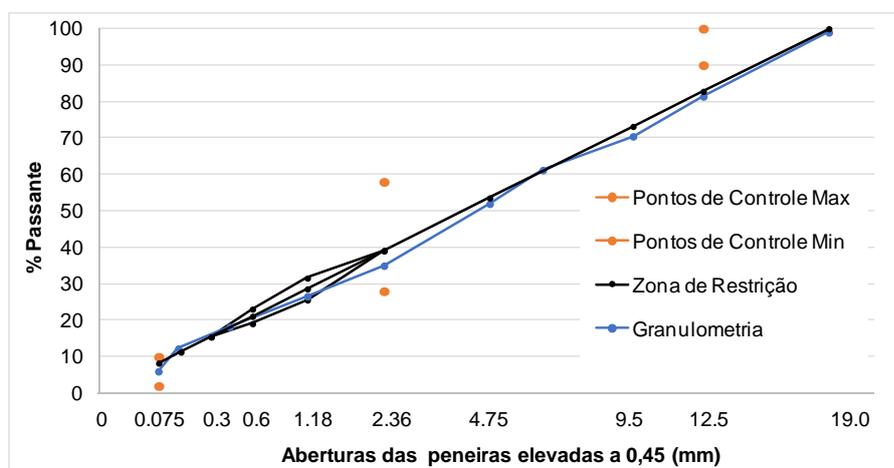
Com relação à questão granulométrica, segundo a metodologia *Superpave*, usa-se uma técnica gráfica em que o eixo das abscissas é representado pelo tamanho das malhas das peneiras em mm elevado à potência de 0,45 e o eixo das ordenadas representa a porcentagem passante nessas peneiras. Em seguida são plotados os pontos de controle, definidos em função do tamanho nominal máximo (TMN) do agregado, e a linha de densidade máxima, constituída por uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto de 100% correspondente ao agregado de tamanho máximo. Assim, para atender aos requisitos dessa metodologia, basta que o projeto de mistura passe pelos pontos de controle e que se evitem misturas com granulometria sobre a linha de densidade máxima.

Na Figura 2.2 é mostrado um exemplo desse gráfico para o agregado de tamanho nominal máximo de 19mm, enquanto que na Tabela 2.2 mostram-se todos os pontos de controle para os diversos TNM, segundo a MP2 (AASHTO, 2001).

Tabela 2.2: Limites *Superpave* dos pontos de controle conforme TMN (AASHTO, 2001)

Peneira	Tamanho Nominal Máximo do Agregado – Pontos de Controle (% passante)									
	37,5mm		25,0mm		19,0mm		12,5mm		9,5mm	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
50,0mm	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5mm	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
25,0mm	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
19,0mm	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-
12,5mm	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-
9,50mm	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
4,75mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90
2,36mm	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67
0,075mm	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10

Figura 2.2: Pontos de controle Superpave



2.3 DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MISTURA

Para a caracterização de materiais de pavimentação, não é possível avaliar todas as variáveis simultaneamente, criando a necessidade de se privilegiar aspectos considerados de maior relevância para a previsão do comportamento das misturas asfálticas em campo. Meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação, frequência das cargas de veículos, estados de tensões e mesmo o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante são fatores que interferem nas propriedades desses materiais.

No Brasil, o ensaio de estabilidade Marshall é extensamente utilizado, porém não é considerado, segundo Roberts *et al.* (1996), apropriado para situações diferentes das condições para qual o pavimento foi desenvolvido e também não são as mais adequadas para a previsão de desempenho dos mesmos.

O ensaio de vida de fadiga fornece resultados que tem sido frequentemente utilizado como critério de dimensionamento no caso de misturas, segundo Pinto (1991). As cargas usadas nesse ensaio são determinadas em função do ensaio de resistência à tração estática.

A caracterização das misturas também é importante para evitar deformações permanentes no pavimento, e para isso têm sido realizados ensaios de simulação de tráfego em laboratório, geralmente utilizando corpos de prova prismáticos. Outro ensaio que permite obter a caracterização das misturas é o *Creep*, que ainda possibilita a determinação de propriedades

viscoelásticas das misturas (SOUZA; SOARES, 2003). Bernucci *et al.* (2006) afirmam que a importância dessas propriedades é permitir a caracterização do comportamento estrutural em função do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento).

Essas avaliações podem ser feitas por meio de ensaios de laboratório ou ensaios de campo, conforme apresentado a seguir.

2.3.1 Ensaios Laboratoriais

A seguir são descritos ensaios mecânicos que podem ser realizados em laboratório para caracterização de misturas asfálticas.

2.3.1.1 Ensaio para Determinação da Resistência à Tração Estática

Um importante parâmetro para a caracterização de misturas asfálticas é a resistência à tração (RT). O ensaio de compressão diametral é utilizado para a determinação indireta da RT e segue a norma NBR 15087 (ABNT, 2012b). A configuração desse ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão, através de frisos de carga no CP cilíndrico Marshall.

A RT aumenta com o envelhecimento das misturas na pista, tendo como desvantagem a perda de sua flexibilidade, criando uma relação diretamente proporcional ao seu módulo resiliente (MR). Essa correlação entre os parâmetros MR e RT é interessante, desde que seja analisada para cada tipo de mistura, particularizada pela composição granulométrica e de ligantes, e permanece constante com o envelhecimento da mistura.

A resistência à tração estática é obtida através do ensaio de compressão diametral, na prensa Marshall. No ensaio, são aplicadas duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro, e então será obtida a resistência à tração estática.

2.3.1.2 Ensaio para Determinação do Módulo de Resiliência

Estudos sobre o comportamento resiliente, energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações,

geraram uma metodologia de ensaio chamado módulo de resiliência (MR). O ensaio para a determinação do MR em misturas asfálticas é padronizado no país pela ME 133 (DNER, 1994c), e é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um CP cilíndrico com 10cm de diâmetro e alturas variáveis, entre 3,5 e 6,5cm, moldados em laboratório ou extraídos do campo. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T).

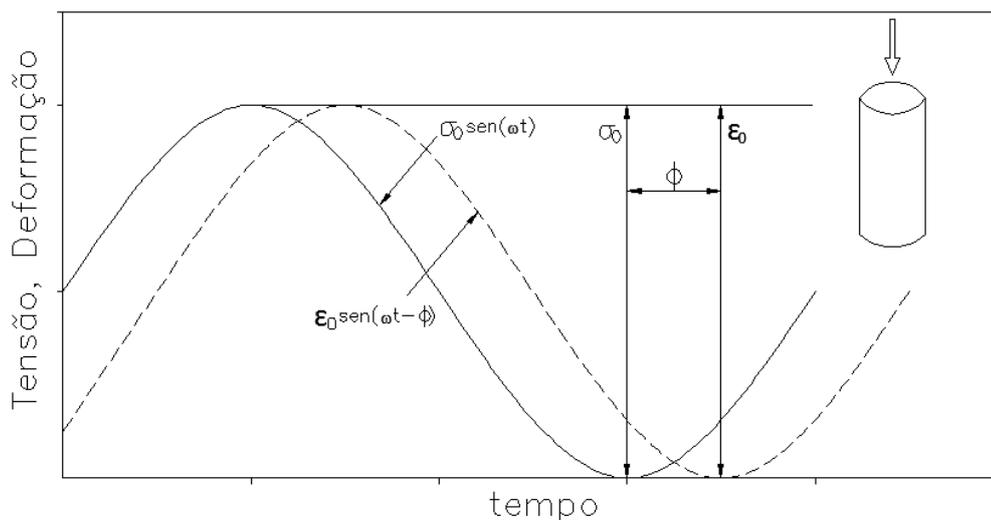
O equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, permitindo ensaios em diversas temperaturas (SPECHEIT, 2004). A amostra sofrerá deformações horizontais, que serão medidas, e o ensaio será realizado em duas direções: após a execução do ensaio a amostra é rotacionada em 90° e o ensaio é novamente conduzido.

O módulo de resiliência das misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral da amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura.

Como uma alternativa ao módulo de resiliência na caracterização de misturas asfálticas, os módulos complexo e dinâmico vêm sendo estudados e determinados através de ensaios cujos corpos de prova estão sujeitos a um carregamento senoidal, e o procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento, para construir uma curva mestra que incorpora os efeitos de duas variáveis, tempo e temperatura. O ensaio deste módulo pode ser utilizado tanto para determinar as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (DANIEL; KIM; LEE, 1998).

O módulo dinâmico é mais atual do que o módulo complexo, e o ensaio para determinação do módulo dinâmico uniaxial segue a norma TP 62-07 (AASHTO, 2009). O ensaio consiste em aplicar uma carga uniaxial compressiva senoidal em um Corpo de prova cilíndrico confinado ou não, conforme Figura 2.3.

Figura 2.3: Esquema do Ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial (NASCIMENTO, 2008)



Segundo Nascimento (2008), a relação tensão-deformação durante o carregamento senoidal contínuo, para materiais viscoelásticos lineares, é definida por um número complexo chamado de “Módulo Complexo” (E^*). O valor absoluto do módulo complexo, $|E^*|$, é definido como “Módulo Dinâmico”. O módulo dinâmico é matematicamente definido como a tensão dinâmica máxima (σ_0) dividida pela deformação axial recuperável máxima (ϵ_0).

Esse módulo vem sendo preferencialmente adotado no exterior, devido à importância de considerar a viscoelasticidade das misturas, e também a possibilidade de contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.3.1.3 Ensaio para Determinação da Vida de Fadiga

Fadiga é um fenômeno definido como um dano progressivo causado a um material, levando-o a ruptura através da exposição com amplitude de estresse menor que a necessária para causar uma ruptura por carga constante (BARRA *et al.*, 2012).

Cargas monotônicas produzem danos e trincas continuamente crescentes nos materiais, já cargas cíclicas produzem danos intermitentes. Durante a fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano permanece constante se desconsiderarmos o fenômeno de “reselagem” das trincas. As cargas cíclicas produzem falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, já que a mesma carga é aplicada várias vezes. Esse fenômeno é chamado fadiga e, segundo Morilha Jr.

(2004) é um processo que ocorre no material quando submetido a condições de carregamento que produzam tensões e deformações repetidas, com mudança estrutural permanente, resultando em trincas ou fratura completa após um número de repetições.

A fadiga de um material é um processo de deterioração estrutural quando este é submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. E o objetivo do ensaio é simular a passagem da roda dos veículos sobre o revestimento dos pavimentos, e a vida de fadiga seria o número total de aplicações de carga necessário à fratura completa da amostra.

O ensaio de vida de fadiga pode ser realizado à tensão controlada ou deformação controlada. No ensaio à tensão controlada, aplica-se uma carga constante obtendo-se deformações que aumentam no decorrer do ensaio. Já no ensaio de deformação controlada, aplica-se cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio. Neste caso deve-se estabelecer um critério de ruptura específico, já que o ensaio é caracterizado por uma redução da carga solicitante, como forma de manter a deformação constante, e, portanto, não existe um momento de ruína completa do CP.

O ensaio laboratorial tradicionalmente realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC). Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido realizado à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas.

Mourão (2003) descreve o procedimento utilizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em que se deve posicionar o CP na base da prensa, apoiando o mesmo no friso inferior e assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o CP diametralmente oposto ao friso inferior. Em seguida aplica-se uma carga previamente determinada, aproximadamente entre 10 e 50% do valor de RT, que induza a tensões de tração horizontais. Aplica-se, então, cargas com frequência de 1 hertz, com tempo de carregamento de 0,1s e 0,9s de descarregamento.

Loureiro (2003) afirma que o intervalo de pausa entre o carregamento representa o tempo de intervalo entre a aplicação de uma roda e outra, e que os CPs ficam sujeitos a um estado bi-axial de tensões. O modelo de fadiga da mistura é determinado pela diferença entre a tensão de compressão (σ_c) e a tensão de tração (σ_t) e o número de aplicações de carga até a ruptura

da amostra. Após a realização do ensaio serão traçados os gráficos $\Delta\sigma \times$ número de golpes em espaço log.

A vantagem do ensaio realizado por compressão diametral é de usar os mesmos CPs usados no projeto de misturas no ensaio Marshall dando assim uma dinâmica maior ao procedimento de dimensionamento de pavimentos. Além disso, segundo Pinto (1991), esse ensaio é o que mais se aproxima das condições de solicitação produzidas na fibra inferior das camadas de revestimento.

No entanto, deve-se destacar que a equipe do laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina concluiu a montagem do equipamento para estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas, similar ao modelo em uso no Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), da França. Este equipamento permitirá um grande salto de qualidade dos trabalhos de pesquisa desenvolvidos pela área de infraestrutura. A máquina de fadiga foi aprimorada de modo a possibilitar a determinação do Módulo Complexo das misturas asfálticas a temperaturas variando de (-)10°C a 40°C e a frequências variando de 1,5 Hz a 30 Hz, empregando técnicas francesas, em conformidade com as normas de fadiga NF EM 12697-24+A1 (AFNOR, 2007) e de módulo complexo NF P 98-260-2 (AFNOR, 1992).

2.3.1.4 Ensaio para Determinação da Deformação Permanente

Deformação permanente é um dos defeitos mais frequentes da pavimentação asfáltica, sendo atribuída ao revestimento ou ainda a uma combinação de efeitos, sendo a principal causa de patologias de pavimento (GAO *et al.*, 2009). Essa patologia pode resultar em insegurança viária, tais como aquaplanagem, acelerar danos causados por umidade e, em alguns casos, problemas na condução de veículos. (AZARI; MOHSENI, 2013).

Segundo Rowe *et al.* (2003) o ligante asfáltico, em relação à deformação permanente, depende diretamente de dois aspectos: viscosidade e dureza, que influenciam diretamente no comportamento da mistura asfáltica e conseqüentemente na tensão e carga da estrutura do pavimento.

As camadas não-asfálticas, abaixo do revestimento, podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao

cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados por uma escolha de materiais e compactação apropriada e limitação das tensões atuantes aos níveis aceitáveis e seguros. Entre os ensaios existentes para estudar a deformação permanente de misturas asfálticas sobressaem os ensaios triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não confinada (*Creep* estático e *Creep* dinâmico), e o ensaio com simuladores de tráfego em laboratório. (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O ensaio *Creep* estático consiste da aplicação ao longo do tempo de uma carga de compressão estática e contínua em um CP Marshall. Essa compressão uniaxial é executada no sentido axial (vertical) e é efetuada, a intervalos determinados de tempo, a medição do deslocamento axial sofrido pela amostra.

O ensaio de *Creep* dinâmico consiste na aplicação de pulsos de carga ao CP, a uma determinada frequência, tempo de aplicação de carga e intervalo entre as aplicações das cargas, a uma temperatura especificada, e tem como objetivo a medição da deformação permanente acumulada. Durante a realização do ensaio, o CP é submetido à aplicação de uma carga de compressão axial transiente.

O ensaio com simuladores de tráfego em laboratório é uma outra forma de determinação da deformação permanente em misturas asfálticas. São equipamentos munidos de rodas pneumáticas que simulam o tráfego de veículos, e permitem uma investigação mais próxima da realidade. Entretanto, necessitam de fatores de correção laboratório-campo para previsões de deformação permanente *in situ* ou do estabelecimento de limites de deformação permanente em laboratório por análises empíricas de resultados em campo.

Além dos aspectos comparativos entre misturas no que diz respeito à resistência à deformação permanente, o ensaio pode ser usado para investigar o efeito de fatores diversos no comportamento mecânico, como o efeito do teor de asfalto no afundamento e o efeito da substituição do asfalto por outro com penetração diferente ou ainda modificados com polímero e por borracha, mantendo-se a mesma graduação e natureza de agregados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A passagem da roda sobre as placas é feita em ciclos de ida e volta do pneu em determinada frequência e as medidas de afundamento são realizadas em pontos distintos da trilha de roda.

O resultado é dado em termos de porcentagem de afundamento de trilha de roda pela média das leituras realizadas.

2.3.2 Ensaios de Campo

Os pavimentos são estruturas que, em geral, não apresentam ruptura súbita, mas deterioração funcional e estrutural acumuladas. A avaliação estrutural do pavimento é fundamental para se determinar sua capacidade de carga desde sua construção e ao longo de sua vida, para determinar o momento adequado para uma intervenção e a técnica a ser empregada. A avaliação estrutural de um pavimento pode ser feita por diversos métodos.

O método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento, permitindo recolher amostras. Com a extração de amostras do pavimento é possível identificar os tipos de materiais das camadas e do subleito, suas espessuras e fazer coleta de amostras para ensaios de laboratório. A retirada de CPs do revestimento asfáltico por sonda rotativa permite avaliar o grau de envelhecimento do ligante, entre outras observações possíveis.

Por ser destrutiva só pode ser empregada em pontos selecionados e representativos do segmento em análise. Busca-se, então, outro método, o semidestrutivo em que se tem aberturas menores no pavimento. Nesse método, pode-se utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga do pavimento, tal como o cone dinâmico de penetração (DCP).

Para realizar avaliação em grandes extensões de pistas utiliza-se o método não-destrutivo, representado por medidas de deflexão. Pode ser utilizado para acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, por permitir inúmeras repetições no mesmo ponto, e tem-se como equipamentos o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), dynaflect, viga Benkelman e ensaios de placa.

Outra maneira de avaliar a estrutura do pavimento é através de simuladores de tráfego. No Brasil há três tipos de simuladores de tráfego. O primeiro instalado foi o simulador circular do Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR)/DNER em 1980 no Rio de Janeiro; o segundo instalado foi o simulador linear da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER)/RS em 1995 em Porto Alegre. O terceiro tipo é um simulador móvel tipo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*) de concepção brasileira.

Os simuladores de tráfego são grandes equipamentos de campo que permitem uma avaliação estrutural de seções de pavimento, para determinação de vida de fadiga. Esse resultado se aproxima mais das condições reais de tráfego e de materiais do pavimento em relação aos ensaios realizados em laboratório, mas de forma acelerada em relação ao desempenho.

Consistem em fazer atuar uma ou duas rodas de caminhão sobre uma curta seção do pavimento a ser testado, por ciclos de carga contínuos durante várias horas por dia. Reproduz-se em curto espaço de tempo o número de passagens de eixos previstos no projeto da estrutura ensaiada.

2.4 QUALIDADE DA MISTURA VERSUS SERVENTIA DO PAVIMENTO

A rapidez da execução e da liberação do tráfego, a boa acomodação das camadas do pavimento, que podem sofrer eventuais recalques, além de uma restauração fácil e rápida, colocam o pavimento asfáltico com grande vantagem com relação aos demais tipos de pavimento. E conhecer as características do tráfego a que será submetido é muito importante para um correto dimensionamento de seu revestimento, uma vez que não conhecer as solicitações acima das previstas em projeto pode ocasionar degradações no mesmo, como deformações permanentes, trincas e perda de material da superfície de rolamento.

A dosagem correta de ligante asfáltico tem grande importância, uma vez que a variação do mesmo na composição da mistura asfáltica poderia ocasionar problemas relevantes. Segundo Bernucci *et al.* (2006), ligante em excesso poderia acarretar deformações plásticas na camada de revestimento, quando submetido à ação do tráfego. Quando em quantidade insuficiente poderia gerar num revestimento permeável, pouco durável, sujeito a fissuração e acentuado desgaste superficial. Tais situações poderão comprometer o pavimento no seu desempenho, de forma a reduzir a vida útil do mesmo.

Devido à falta de correspondência direta entre os parâmetros obtidos nos ensaios e os defeitos que a camada de revestimento asfálticos poderá apresentar no campo, principalmente quanto ao trincamento por fadiga, o método convencional de dosagem nem sempre possibilita a melhor escolha do tipo de mistura para um projeto (CAVALCANTI *et al.*, 2013a). Dessa forma, o método de dimensionamento exige o domínio do conhecimento dos componentes das misturas e posteriormente do comportamento do pavimento, para garantir a otimização do processo executivo e garantia de durabilidade da via.

Com a propagação dos métodos mecanísticos para dimensionamento de pavimentos asfálticos, tem-se que, numa dosagem, a mistura seja projetada para um determinado nível de resistência à tração (RT) e de módulo de resiliência (MR), de maneira que as tensões nas camadas que compõem a estrutura do pavimento não venham a diminuir a sua vida útil. Na Especificação de Serviço ES 031 (DNIT, 2006a), o parâmetro RT já faz parte das exigências a serem atendidas na dosagem, associado à presença do parâmetro estabilidade.

A avaliação do desempenho estrutural de pavimentos asfálticos deve considerar as deformações plásticas e elásticas. As deformações plásticas ou permanentes ocorrem devido à ação combinada de compressão e deformação por cisalhamento dos materiais constituintes das diversas camadas do pavimento, incluindo o subleito. Já as elásticas são ocasionadas pela repetição das cargas, que geram as trincas por fadiga, que é uma diminuição gradual da resistência de um material por efeito de solicitações repetidas.

Cavalcanti *et al.* (2013b) mostraram, após ensaios de vida de fadiga com misturas compostas por diferentes agregados e ligantes, que o tipo de ligante e o teor influenciam diretamente na vida de fadiga, já que tornam a mistura mais flexível, e que os agregados também têm influência no mesmo parâmetro.

Soares *et al.* (2000) observaram que, para uma mesma faixa granulométrica, os CAPs com propriedades semelhantes possuíram o mesmo teor de projeto, enquanto que o CAP menos consistente apresentou o teor menor. As características mecânicas foram maiores para os CAPs mais consistentes.

Quanto menor a porcentagem de agregados finos, maior a diferença entre o volume de vazios de agregados graúdos e o volume total de finos. Isso indica que ocorre grande intertravamento do agregado graúdo. A avaliação da característica morfológica do agregado demonstra que o

contato dos agregados dentro da mistura resulta em maior resistência interna da mesma (CHEN; LIAO, 2002).

Em estudo desenvolvido sobre caracterização mecânica de misturas asfálticas, com diferentes granulometrias e ligantes asfálticos, Vasconcelos *et al.* (2013) observaram que a granulometria foi o fator preponderante na resistência à tração por compressão diametral (RT) e no módulo de resiliência (MR). Os autores ressaltam que o ligante também influenciou nos parâmetros mecânicos, apresentando tendência de menores valores de MR e RT quanto menor sua consistência.

Khan *et al.* (1998) estudaram propriedades de uma mistura com o objetivo de identificar a técnica de compactação em laboratório que seria capaz de produzir misturas com propriedades semelhantes às do campo. Com base na pesquisa conclui-se que o método de compactação dos agregados das misturas asfálticas afeta significativamente as propriedades como vazios de ar, densidade e módulo de resiliência.

Specht *et al.* (2006) verificaram a necessidade da compatibilização de rigidez e resistência entre as camadas que constituem o sistema, afirmando que concretos asfálticos com altos valores de módulo de resiliência e baixa resistência, são menos compatíveis com bases granulares ou camadas severamente trincadas.

Ao longo de sua vida útil, um revestimento asfáltico apresenta degradação devido à fadiga imposta pela repetição de cargas que provocam o aparecimento de trincas e fissuras, por causa da diminuição de sua resistência à flexão. Para aumentar essa vida de fadiga, além da escolha adequada da distribuição granulométrica dos agregados, há necessidade de definir o tipo mais adequado de CAP a ser utilizado na mistura, de modo a aumentar ou diminuir a rigidez da mistura, em função do tipo de solicitação a que estará sendo submetida.

A oxidação do CAP tem grande influência na durabilidade de um revestimento asfáltico, porque provoca alterações na sua composição química, diminuindo-lhe a coesão e elasticidade. Essa oxidação pode ocorrer na produção da mistura asfáltica na usina ou durante a sua vida em serviço (ABCR, 2008).

A oxidação ocorre principalmente durante a produção da mistura asfáltica na usina, devido às temperaturas elevadas empregadas no aquecimento dos agregados, tendo como fatores mais

marcantes o tipo de usina utilizada, a umidade dos agregados e o teor de CAP na mistura. Já durante sua vida em serviço, a velocidade de oxidação é lenta e depende, principalmente, da incidência de raios ultravioleta (ABCR, 2008).

O teor de CAP é um dos fatores importantes no processo de oxidação do material na usinagem, bem como ao longo do tempo de serviço. Teores abaixo do teor ótimo implicam menores espessuras de recobrimento do agregado, acarretando maior severidade no processo de oxidação e diminuindo, com isso, a vida útil do revestimento asfáltico (ABCR, 2004).

Com o objetivo de verificar o impacto do carregamento e da temperatura nas características de afundamento de trilha de rodas das misturas asfálticas a quente, Chen e Xu (2009) realizaram ensaios e concluíram que tanto a temperatura quanto o carregamento tiveram efeitos significativos e diretamente proporcionais no desempenho da mistura asfáltica a quente, obtendo maiores deformações quanto maior a carga e mais alta a temperatura.

Gao *et al.* (2009) verificaram que as características de deformação permanente das misturas asfálticas a quente foram muito afetadas pela temperatura do ensaio, independentemente do ligante asfáltico utilizado. Verificaram ainda que o volume de vazios tem grande efeito sobre as características de deformação do pavimento de mistura asfáltica a quente, ressaltando a importância da compactação para a estabilidade, à alta temperatura, dos pavimentos com mistura asfáltica a quente.

Em situações em que o revestimento asfáltico estará submetido à temperatura elevada e tempo de carregamento longo, para que a camada de revestimento asfáltico apresente bom desempenho há necessidade de que o material apresente maior rigidez, maior resistência mecânica e menor deformação permanente. ABCR (2008) considera que esses condicionantes são, sem dúvida, funções da escolha adequada da distribuição granulométrica dos agregados, como também do tipo de CAP a ser utilizado na mistura asfáltica.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, o que possibilita obter resultados e uma posterior análise dos mesmos. Foi realizada a caracterização dos agregados e dos ligantes, dosagens de diferentes misturas e ensaios de desempenho das mesmas, focando nas condições de tráfego e clima do estado de Goiás.

Para a pesquisa foram realizados ensaios no Laboratório de Asfalto, que compõe o Laboratório de Geotecnia, da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/ UFG) com resultados que foram tabelados e apresentados em gráficos e que serviram para a análise dos parâmetros de dosagem. Os ensaios de desempenho das misturas em estudo foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.1 PLANEJAMENTO DA FASE EXPERIMENTAL

O planejamento dos experimentos contempla a caracterização dos materiais que compõem uma mistura asfáltica a quente, a dosagem de três projetos de misturas e o desempenho das misturas no teor de projeto determinado.

A dosagem foi realizada através da metodologia Marshall com compactação manual utilizando-se as Faixas B e C da especificação ES 031 do DNIT (2006a) para a composição granulométrica dos agregados do concreto betuminoso usinado a quente. A Faixa C foi escolhida por ser a mais utilizada na região de estudo, conforme observado por Coelho Jr. e Rocha (2013). Já a Faixa B, apesar de ser utilizada com maior frequência para camadas de ligação, tem sido amplamente proposta para aplicação em camadas de rolamento, devido a bons resultados de estudos anteriormente realizados, como resultados de módulo resiliente (MR), resistência à tração por compressão diametral (RT) e vida de fadiga maiores do que misturas com Faixa C, segundo Soares *et al.* (2000).

Também foram estudados três diferentes tipos de ligantes asfálticos: ligante convencional (CAP 30/45), ligante convencional (CAP 50/70) e asfalto modificado com polímero, do tipo

estireno-butadieno-estireno, com aproximadamente 3% do polímero (AMP SBS 60/85E), para a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall e avaliação das propriedades mecânicas. Os ligantes convencionais CAP 50/70 e CAP 30/45, respectivamente, foram escolhidos por serem mais utilizados na região, segundo Coelho Jr. e Rocha (2013). O AMP foi escolhido para servir de parâmetro de comparação com os ligantes convencionais, uma vez que se espera um melhor comportamento da mistura com esse ligante em termos de deformação permanente. Entretanto, segundo Coelho Jr. e Rocha (2013), apesar de já estar disponível para comercialização, o ligante foi pouco utilizado pelas usinas de asfalto da região, sendo aplicado em apenas em uma obra.

Após a determinação dos parâmetros de dosagem Marshall, com o teor de asfalto definido, foram moldadas amostras de cada mistura para a verificação do comportamento mecânico (ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência) e para a verificação dos parâmetros de desempenho em termos de deformação permanente).

Na Tabela 3.1, estão apresentados, resumidamente, os números de amostras que foram preparadas para a realização de todos os ensaios.

Tabela 3.1: Quantidade de amostras preparadas para os ensaios

Ligante		Procedimentos									
Tipo	Teor (%)	Estabilidade Marshall		Resistência à tração		Módulo de resiliência		Deformação permanente		Cantabro	
		Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C	Faixa B	Faixa C
CAP 30/45	4,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ótimo	-	-	3	3	4	4	-	2	3	3
CAP 50/70	4,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ótimo	-	-	3	3	4	4	2	2	3	3
AMP	4,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	5,5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,0	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ótimo	-	-	3	3	-	4	-	2	3	3
Total		45	45	9	9	4	12	2	6	9	9
Total geral		150 amostras									

A mistura asfáltica foi projetada seguindo as recomendações da ME 043 (DNER, 1995b). Todos os materiais utilizados nesta pesquisa são representativos da realidade regional, ou seja, são aqueles disponíveis para execução de obras na região de estudo.

Para este estudo foram obtidos dados de projeto junto à AGETOP, com características intrínsecas das rodovias do estado, próximas à região metropolitana da capital, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Volume Médio Diário de Tráfego (AGETOP, 2014)

Ano	Carro de Passeio	Ônibus	Caminhões					VMD comercial	VMD total
			2C	3C	2S3	3S3	2C3		
2013	540	12	60	60	36	36	36	240	780
%	69%	5%	25%	25%	15%	15%	15%	100%	169%

Obs.: 2C = caminhão simples com 2 eixos; 3C = caminhão simples com 3 eixos; 2S3 = caminhão trator (cavalo mecânico) com 2 eixos + semi-reboque com 3 eixos; 3S3 = caminhão trator (cavalo mecânico) com 3 eixos + semi-reboque com 3 eixos; 2C3 = caminhão simples com 2 eixos + semi-reboque com 3 eixos.

O estudo de tráfego permitiu a determinação da quantidade de veículos que utiliza diariamente uma rodovia em projeto e a composição do tráfego, possibilitando estimar o tráfego futuro que utilizará a rodovia durante o período de projeto. A taxa de crescimento adotada foi de 3,0% ao ano e o período de projeto adotado foi de 10 anos.

O número N, número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf, foi obtido através do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, desenvolvido em 1996 pelo Eng^o Murillo Lopes de Souza para o DNER, calculado pela Equação (3.1).

$$N_i = 365 \times \sum VMD_i \times FP \times FR \times FV \quad (3.1)$$

Onde:

N = Número de repetições do eixo padrão;

VMD = Volume Médio Diário;

FV = Fator de veículos da frota comercial;

FP = Fator de pista (1,0 para pista simples);

FR = Fator Climático Regional;

Segundo o Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006b), o fator de veículos para cada categoria relaciona um fator de equivalência por eixo e sua pesagem, e o fator de veículos de frota comercial calculado para o estudo, através das fórmulas da USACE, foi de 6,2.

O fator climático relaciona a precipitação pluviométrica sobre os materiais que compõem o pavimento e para o projeto foi utilizado o fator de 1,0, por se tratar de região que é normalmente bem regada por chuvas, com precipitações que não se distribuem igualmente durante o ano, num regime que tem característica tropical, com máxima no verão e mínima no inverno.

O Número “N” obtido para a região em estudo, para o período de projeto de 10 anos, foi de $7,0 \times 10^6$.

3.2 AGREGADOS

O material pétreo utilizado na pesquisa foi fornecido pela pedreira que possui sua unidade industrial no município de Aparecida de Goiânia/GO, coordenadas 690.437 E e 8.145.328 S, conforme apresentado na Figura 3.1. O material pétreo é uma rocha metamórfica xistosa do complexo gnáissico-granitóide de médio grau (escudos). Esse material foi escolhido por ser o mais comum para ser utilizado nas obras de pavimentação realizadas na região de estudo.

Figura 3.1: Localização da Pedreira (GOOGLE EARTH, 2013)



As rochas metamórficas são derivadas de outras preexistentes e que sofreram variações mineralógicas, químicas e estruturais durante os processos geológicos. Segundo ABGE (1998), o metamorfismo regional está ligado aos cinturões orogênicos e devido à atuação

tanto da temperatura como da pressão se desenvolve acompanhado de movimento, quase sempre. É um grupo que se caracteriza pela presença de materiais micáceos e foliação bem desenvolvida, produtos do metamorfismo de rochas sedimentares pelíticas, tendo os xistos como tipo rochoso mais abundante. Os xistos são rochas com excelente arranjo preferencial planar, ou linear, e granulação média a grossa, quase sempre visível a olho nu. Compostos de filossilicatos e quartzo acompanhados, geralmente, de minerais metamórficos, característicos das faixas de pressão e temperatura nas quais se formaram. Com essa descrição, verifica-se a importância de avaliar as características dos agregados oriundos dessa rocha e analisar a sua aplicação em camadas de rolamento, principalmente na questão de quebra desses agregados.

As amostras foram coletadas aleatoriamente *in loco* (Figura 3.2), conforme especificações da PRO 120 (DNER, 1997c). Após extração de 360 kg de agregados, as amostras foram separadas, armazenadas em sacos impermeáveis, identificadas através de etiquetas e transportadas até o local de armazenagem final (Laboratório de Asfalto da Escola de Engenharia Civil – UFG). Os tipos de agregados coletados foram brita 1, brita 0, pedrisco, areia, pó de pedra e filer, com amostras de aproximadamente 100 kg cada material.

Figura 3.2: Pedreira onde foram coletados os agregados



No laboratório, as amostras foram reduzidas de acordo com a PRO 199 (DNER,1996) e a NBR NM 27 (ABNT, 2001d) para a realização dos ensaios de granulometria, e o restante foi armazenado. Em seguida, foram realizados os ensaios relacionados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Ensaios de laboratório realizados com os agregados

Ensaios	Normas	Observações
Granulometria	ME 083 (DNER, 1998a)	-
Determinação da absorção e da densidade aparente dos agregados graúdos	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)	-
Densidade real dos agregados miúdos	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	-
Densidade do material finamente pulverizado	NBR NM 23 (ABNT, 2001e)	Utilizou-se querosene dentro do frasco Le Chatelier
Equivalente de Areia	ME 054 (DNER, 1997a)	Recomenda-se que esse valor seja superior a 55%
Ensaio de abrasão “Los Angeles”	ME 035 (DNER, 1998c)	-
Índice de forma	ME 086 (DNER, 1994a)	Os agregados foram submetidos às peneiras com crivos de abertura circular e enquadrados na graduação C
Adesividade	ME 078 (DNER, 1994b)	Foram ensaiadas três amostras com 500 g de material passante na peneira 19mm e retido na peneira 12,7mm

3.2.1 Granulometria

A granulometria de cada material foi realizada através de peneiramento dos agregados, de acordo com o ME 083 (DNER, 1998a). As amostras foram repartidas (Figura 3.3), até obter a quantidade estabelecida na norma, e então foram pesadas as massas úmidas. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa, aquecida à $110 \pm 5^\circ\text{C}$, onde permaneceram por 24 horas. Após serem retiradas e resfriadas, foram pesadas as massas secas (Figura 3.4).

As peneiras utilizadas no ensaio foram: 25mm; 19mm; 12,5mm; 9,5mm; 4,75mm (n.4); 2mm (n.10); 0,425mm (n.40); 0,177mm (n.80) e 0,075mm (n.200), encaixadas da maior abertura para a menor, e as amostras secas foram peneiradas no conjunto montado. Anotou-se as massas de material retido em cada peneira e realizou-se os cálculos e construção do gráfico da curva granulométrica.

Com as curvas obtidas para cada agregado, preparou-se duas composições granulométricas para misturas asfálticas a quente, de forma a atender as faixas especificadas pela ES 031 (DNIT, 2006a) para camada de rolamento. Nesse caso, foram estudadas a Faixa C, escolhida

por ser a mais utilizada na região, segundo Coelho Jr. e Rocha (2013), e a Faixa B, mais utilizada em outras regiões do Brasil.

Figura 3.3: Preparação da Amostra: (a) Quarteamento; (b) Redução



Figura 3.4: Secagem e pesagem da amostra: (a) Secagem em estufa; (b) Pesagem



A composição da mistura de agregados foi realizada pelo método das tentativas, chegando às proporções de cada agregado e à granulometria final da mistura, conforme a norma ME 083 (DNER, 1998a). Definiu-se também o tamanho nominal máximo dos agregados que é a abertura da primeira peneira acima da que retém mais de 10% de material.

3.2.2 Absorção e Densidade Aparente dos Agregados Graúdos

O ensaio foi realizado nas britas 1 e 0 e seguiu as recomendações da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009b). Foram separadas amostras de 3 kg de agregado, que foi lavado sobre a peneira nº 4 e levado estufa para secar à $110 \pm 5^\circ\text{C}$, por 24 horas. A amostra foi, então, resfriada à temperatura ambiente e imersa em água também à temperatura ambiente, durante um período de $24 \pm 4\text{h}$.

Após o período de imersão, a amostra foi espalhada sobre um pano absorvente até que as películas visíveis de água fossem eliminadas (Figura 3.5). Em seguida, a amostra foi pesada, obtendo-se sua massa na condição saturada superfície seca (M_s). Depois, a amostra foi colocada em um cesto com uma haste pendurada numa balança e o conjunto foi imerso em água à temperatura de $24 \pm 2^\circ\text{C}$, obtendo-se sua massa imersa em água (M_a), conforme Figura 3.6. Para a obtenção da massa do agregado seco (M), a amostra foi levada à estufa para secar à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ e obteve-se sua massa após o esfriamento para manipulação.

Figura 3.5: Massa do agregado: (a) Condição saturada superfície seca; (b) Condição seca



Figura 3.6: Balança hidrostática para obtenção da massa imersa em água



Através das Equações (3.2) e (3.3), calculou-se a densidade aparente (G_{sb}) do agregado e sua absorção (A), respectivamente.

$$Gsb = \frac{M}{Ms - Ma} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{Ms - M}{M} \quad (3.3)$$

Onde:

Gsb = Densidade aparente do agregado;

Ms = Massa na condição saturada superfície seca;

M = Massa do agregado seco;

Ma = Massa imersa em água;

A = Absorção.

3.2.3 Densidade Real dos Agregados Miúdos

O ensaio foi realizado nos demais agregados e seguiu as recomendações da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a). Foram separadas amostras homogêneas de cada agregado que foram passadas na peneira nº 4 e retidas na peneira nº 200. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa para secar à $110 \pm 5^\circ\text{C}$, por 24 horas.

Após a secagem das amostras, pesou-se um picnômetro vazio (M_{ps}), colocou-se uma quantidade de uma amostra (Figura 3.7) e, então, pesou-se o conjunto (M_c). Em seguida, foi acrescentada uma quantidade de água ao picnômetro, suficiente para encobrir o agregado, e levou-se o conjunto ao fogo para eliminar a presença de ar. Quando não apareceram mais bolhas, considerou-se que o ar da amostra já havia sido eliminado, e, então, completou-se o picnômetro com água até a marca de volume conhecido, e pesou-se o conjunto (M_a).

Para a conclusão do ensaio, esvaziou-se o picnômetro, e anotou-se o peso obtido do picnômetro preenchido apenas com água até o volume conhecido (M_{pa}). Repetiu-se o ensaio para cada agregado miúdo.

Figura 3.7: Picnômetros com amostras



Todos os ensaios foram realizados com a água a 25°C e, por isso, através da Equação (3.4), calculou-se a densidade real (G_{sa}) do agregado miúdo.

$$G_{sa}(25) = \frac{M_c - M_{ps}}{(M_{pa} - M_{ps}) - (M_a - M_c)} \quad (3.4)$$

Onde:

G_{sa} = Densidade real do agregado miúdo;

M_{ps} = Massa do picnômetro vazio;

M_c = Massa do conjunto picnômetro e agregado;

M_a = Massa do conjunto picnômetro e agregado acrescido de água, sem bolhas;

M_{pa} = Massa do conjunto picnômetro e água.

3.2.4 Densidade do Material Finamente Pulverizado

Para a densidade do material finamente pulverizado, utilizou-se a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001e). Colocou-se querosene dentro do frasco Le Chatelier, com o auxílio de um funil para não permitir líquido nas paredes do frasco, até que o líquido estivesse entre 0 e 1 ml. Em seguida, o frasco foi colocado em banho maria, para garantir a temperatura de 25°C no líquido. Pesou-se o conjunto (M_1) e anotou-se o volume inicial de querosene (V_1).

Colocou-se no frasco com querosene uma quantidade de filer, sem ultrapassar a faixa superior da graduação do frasco. Para expulsar o ar da amostra, fechou-se o frasco e fez-se

movimentos giratórios (Figura 3.8). Levou-se o frasco para o banho e, assim que a temperatura foi garantida, pesou-se o conjunto (M2) e anotou-se o volume final (V2).

Figura 3.8: Frasco Le Chatelier com querosene e amostra: (a) com agregado sem ultrapassar a faixa superior da graduação do frasco; (b) movimentos giratórios para expulsar o ar.



(a)



(b)

Através da Equação (3.5), calculou-se a densidade do material finamente pulverizado.

$$Gf(25) = \frac{M2 - M1}{(V2 - V1)} \quad (3.5)$$

Onde:

Gf = Densidade do material finamente pulverizado;

M1 = Massa do conjunto frasco e querosene;

V1 = Volume do conjunto frasco e querosene;

M2 = Massa do conjunto frasco e querosene acrescido de agregado;

V2 = Volume do conjunto frasco e querosene acrescido de agregado.

3.2.5 Equivalente de Areia

Adotando as instruções da norma ME 54 (DNER, 1997a), fez-se o peneiramento do material úmido, na peneira nº 4. Em seguida, foi necessário sifonar a solução (descrita na norma) para a proveta até atingir o traço de 10cm da base. Então, transferiu-se a amostra para a proveta

com o auxílio de um funil, e para expulsar as bolhas de ar, foi necessário bater no fundo do recipiente.

Figura 3.9: Ensaio de Equivalente de areia



Após um repouso de 10 minutos, a amostra foi agitada satisfatoriamente com os antebraços. Em seguida lavou-se as paredes com um tubo lavador e o mesmo foi usado para levantar qualquer material argiloso eventualmente existente, até atingir a marca de 38cm, e então a amostra foi deixada em repouso (Figura 3.9). Após 20 minutos sem perturbação foi verificado o nível superior da suspensão argilosa. Introduziu-se, então, um pistão na proveta, de forma cuidadosa, e realizou-se as medidas necessárias para a análise dos resultados do ensaio. Foram realizados ensaios em duas amostras de cada agregado e calculada a média entre os valores encontrados, através da Equação (3.6).

$$EA = 100 \times \frac{L2}{L1} \quad (3.6)$$

Onde:

EA = Equivalente de Areia (%);

L1 = leitura no topo da areia;

L2 = leitura no topo da argila.

3.2.6 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

Nesse ensaio, baseando-se na norma ME 035 (DNER, 1998c), mediu-se o desgaste sofrido pelo agregado quando submetido à carga abrasiva, através da porcentagem, em massa, do material que passa, após o ensaio, pela peneira nº 12.

De acordo com a composição granulométrica proposta para as misturas, faixas B e C, foi direcionada a graduação para execução do ensaio. A amostra selecionada teve a massa indicada, dentre as graduações A, B, C, D, E, F e G, de acordo com a tabela da norma ME 035 (DNER, 1998c). Para este ensaio a graduação escolhida foi a B, porque foi a que mais se aproximou da granulometria proposta, e portanto, utilizou-se a carga abrasiva de 11 esferas.

Após a escolha da graduação, a amostra foi lavada e colocada em estufa com a temperatura de 110°C. Depois de seca, a amostra foi pesada, obtendo-se a massa da amostra seca antes do ensaio (M_s). Em seguida as esferas e a amostra foram colocadas no tambor (Figura 3.10a), que foi girado com velocidade de 30 a 33rpm até completar 500 rotações. O material foi retirado do tambor (Figura 3.10b) e passado pela peneira de abertura 1,7mm, rejeitando-se o material passante. O material retido na peneira foi lavado e em seguida seco em estufa à temperatura de 110°C durante 3 horas.

Retirou-se o material da estufa, deixou-o esfriar e pesou-o, determinando a massa da amostra lavada e seca. Em seguida, foram realizados os cálculos necessários para encontrar a abrasão, mostrados na Equação (3.7).

$$Ab = 100 \times \frac{Mb - M'b}{Mb} \quad (3.7)$$

Onde:

Ab = Abrasão “Los Angeles” (%);

Mb = Massa total da amostra seca, colocada na máquina;

$M'b$ = Massa na amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira 1,7mm).

Figura 3.10: Ensaio Abrasão “Los Angeles”: (a) agregados colocados no tambor; (b) agregados e esferas após a realização do ensaio.



(a)



(b)

3.2.7 Índice de Forma

A norma ME 086 (DNER, 1994a) fixa o método pelo qual se determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado. Assim como o ensaio de abrasão, a composição granulométrica proposta para as misturas, faixas B e C, direcionou a graduação para execução do ensaio, de acordo com a tabela da norma. Para esse ensaio a graduação escolhida foi a C, porque foi a que mais se aproximou da granulometria proposta. Com a graduação escolhida, definiram-se as frações de quantidades usando-se as peneiras com crivos de abertura circular (Figura 3.11a).

De cada fração separou-se as partículas retidas no crivo redutor de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente, e anotou-se o peso (M1 – crivo I). O material que passou no primeiro crivo redutor (Figura 3.11b) foi testado em um segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz da fração, e anotou-se o peso do material retido neste crivo (M2 – crivo II). Esse processo foi realizado para todas as frações. Após o ensaio, determinou-se a porcentagem retida em cada crivo, em relação a seu peso inicial. Em seguida calculou-se o índice de forma através da Equação (3.8).

$$f = \frac{P1 + 0,5P2}{100n} \quad (3.8)$$

Onde:

f = Índice de forma;

P_1 = Soma das porcentagens retidas nos crivos I, de todas as frações da graduação;

P_2 = Soma das porcentagens retidas nos crivos II, de todas as frações da graduação;

n = Número de frações da graduação.

Figura 3.11: Ensaio de Índice de forma: (a) peneiras circulares; (b) crivo redutor.



(a)



(b)

3.2.8 Adesividade

A norma ME 078 (DNER, 1994b) fixa o método pelo qual se verifica a adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico, e é verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida à ação de água destilada à 40°C por 72 horas.

A amostra de agregado foi de 500 g de material passando na peneira 19mm e retido na 12,5mm. A amostra foi lavada e colocada durante 1 minuto dentro de água destilada. Em seguida foi levada para a estufa por duas horas, à 120°C. A amostra previamente preparada foi aquecida a 100°C e o CAP foi aquecido a 120°C. Colocou-se, então, uma quantidade de ligante (aproximadamente 17,5g) sobre a amostra de agregado, e com espátula procedeu-se o completo envolvimento do agregado.

O agregado envolvido foi colocado sobre superfície lisa e esperou-se que o ligante esfriasse. Assim, colocou-se o agregado envolvido em um frasco de vidro totalmente recoberto com água destilada e levou-se o conjunto à estufa aquecida a 40°C, e deixou-se em repouso por 72 horas. Após esse período, o resultado é anotado como satisfatório quando não há deslocamento da película betuminosa, e não satisfatório, quando há total ou parcial deslocamento da película.

3.3 LIGANTES ASFÁLTICOS

Nesta pesquisa, foram utilizados três diferentes tipos de cimentos asfálticos: ligante convencional CAP 30/45, ligante convencional CAP 50/70 e asfalto modificado por polímero, aproximadamente 3% de polímero do tipo estireno-butadieno-estireno-SBS 60/85E (AMP), sendo que todos foram fornecidos por uma distribuidora de asfalto localizada no município de Aparecida de Goiânia-GO. A escolha dos ligantes foi embasada por observações realizadas por Coelho Jr. e Rocha (2013), que identificaram que os ligantes convencionais CAP 50/70 e CAP 30/45 são os mais utilizados na região, nessa ordem. O AMP foi escolhido para verificar o seu potencial de utilização na região, por meio de comparação com os ligantes convencionais já utilizados.

Os cimentos asfálticos foram fornecidos pela distribuidora e foram armazenados em galões, em local seco e arejado. A caracterização dos cimentos asfálticos realizadas, respectivamente, pela Petrobrás e pela distribuidora estão apresentadas no Anexo A desta dissertação. No entanto, alguns ensaios foram realizados novamente, e estão relacionados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Ensaios de laboratório realizados com os ligantes.

Ensaios	Normas
Penetração	NBR 6576 (ABNT, 2007)
Viscosidade Brookfield	NBR 15184 (ABNT, 2004)
Ponto de Amolecimento	NBR 6560 (ABNT, 2008a)
Ponto de Fulgor	NBR 11341 (ABNT, 2008b)
Densidade e Massa Específica	NBR 6296 (ABNT, 2012a)

3.3.1 Penetração

A penetração é obtida pela medição da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. A norma brasileira para esse ensaio é a NBR 6576 (ABNT, 2007).

Para a realização do ensaio, a amostra foi aquecida, e colocada em um recipiente de metal, cilíndrico e de fundo plano, com dimensões de 33 a 55mm de diâmetro interno e de 8 a 35mm de altura. Depois foi levada para o equipamento e em cada ensaio foram obtidas três medidas individuais de penetração (Figura 3.12). A penetração definida para cada ligante corresponde à média dos valores obtidos.

Figura 3.12: Ensaio de Penetração (a) Preparação do ensaio; (b) Três medidas obtidas no ensaio, (c) Amostra preparada para ser ensaiada.



(a)



(b)



(c)

3.3.2 Viscosidade Rotacional

A viscosidade rotacional é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. A relação entre a tensão de cisalhamento aplicada (t) e a velocidade de deformação (de/dt) é chamada de coeficiente de viscosidade, com unidade poise ($g/[cm.s]$). A norma brasileira para esse ensaio é a NBR 15184 (ABNT, 2004).

Este ensaio permite obter o gráfico de temperatura-viscosidade para o projeto de misturas asfálticas, por meio de medida do comportamento do fluido a diferentes taxas e tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficaram mergulhados na amostra em teste.

Figura 3.13: Ensaio de Viscosidade Brookfield



O ensaio foi realizado com as amostras, de 8g, dos ligantes nas temperaturas de 135, 150 e 177°C, no equipamento DVIII (Figura 3.13). Com os dados obtidos no ensaio foi traçado o gráfico de viscosidade x temperatura, para obtenção das temperaturas de aquecimento dos ligantes e dos agregados para usinagem e temperatura de compactação das misturas.

3.3.3 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é a medida que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. A norma brasileira para este ensaio é a NBR 6560 (ABNT, 2008a).

Montou-se um conjunto com uma bola de aço de dimensões e peso padronizados posicionada no centro de um anel metálico também padronizado preenchido com amostra de asfalto. O conjunto foi colocado dentro de um banho de água, em um copo de Bécker, aquecido a uma taxa de 5° C/minuto. Registrou-se a temperatura do momento que a mistura amolecida tocou na placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. O ensaio foi realizado em duas amostras do mesmo material conforme ilustrado na Figura 3.14.

Figura 3.14: Ponto de amolecimento, momento do registro da temperatura



3.3.4 Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor é um ensaio ligado a segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Os valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C. A NBR 11341 (ABNT, 2008b) é a norma brasileira para esse ensaio (Figura 3.15).

Figura 3.15: Ponto de Fulgor, temperatura 340°C e sem chama.



3.3.5 Massa Específica e Densidade Relativa

A densidade relativa e a massa específica do ligante asfáltico são obtidas através de medidas de massa e volume usando o picnômetro. O ensaio é realizado de acordo com a norma NBR 6296 (ABNT, 2012a), e os resultados foram posteriormente utilizados na dosagem das misturas asfálticas.

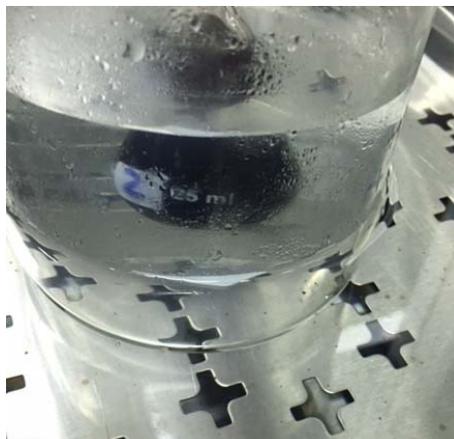
Pesou-se o picnômetro calibrado vazio (A) e encheu-se o mesmo com água destilada e colocou-se a tampa. Em seguida, posicionou-se o picnômetro com água no Becker e levou-se o conjunto ao banho maria, à temperatura de 25°C, por 30 minutos (Figura 3.16). Removeu-se o picnômetro do Becker, secou-se sua superfície externa e pesou-se o conjunto picnômetro mais água (B).

Após a calibração do picnômetro, selecionou-se uma amostra de ligante asfáltico e a colocou no picnômetro limpo, seco e aquecido, até preencher 3/4 de sua capacidade. Deixou-se o conjunto esfriar em temperatura ambiente por 40 minutos e pesou-se o conjunto amostra e picnômetro com tampa (C).

Removeu-se o Becker do banho e preencheu-se o volume restante do picnômetro com água destilada e colocou-se a tampa, voltando-se o conjunto para o banho. Passados 30 minutos,

removeu-se o picnômetro do banho, secou-se sua superfície externa e pesou-se o conjunto picnômetro, amostra e água (D).

Figura 3.16: Ensaio de Massa específica



Em seguida calculou-se a Densidade Relativa e a Massa Específica através das Equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$\text{Densidade Relativa} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.9)$$

Onde:

A = Massa do picnômetro com tampa;

B = Massa do picnômetro cheio com água;

C = Massa do picnômetro parcialmente cheio com ligante asfáltico;

D = Massa do picnômetro acrescido de ligante e acrescido de água.

$$\text{Massa Específica} = \text{densidade relativa} \times \rho \quad (3.10)$$

Onde:

ρ = Massa específica da água à temperatura do ensaio (a 25°C $\rho = 0,997 \text{ g/cm}^3$).

3.4 DOSAGEM MARSHALL

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas ainda são feitos quase que exclusivamente em acordo com a metodologia Marshall.

Este trabalho contemplou a dosagem, em laboratório, de três projetos de misturas asfálticas a quente, através da metodologia Marshall – utilizando-se as faixas B e C do DNIT para a composição granulométrica dos agregados e três diferentes tipos de ligantes asfálticos: os CAPs 30/45, 50/70 e AMP.

As misturas foram dosadas em laboratório segundo a metodologia Marshall descrita na norma ME 043 (DNER, 1995b), e submetidas aos ensaios convencionais de estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral estática.

Segundo a metodologia, para cada estudo de dosagem foram propostos cinco teores de mistura, variando de 0,5%. Conforme relatado por Coelho Jr. e Rocha (2013), o teor ideal se aproxima de 5% de ligante. Al-Sugair e Almudaiheem (1992) realizaram uma pesquisa com misturas asfálticas com CAP 60/70 e agregados de 19mm, na realização dos testes Marshall, utilizou-se diferentes teores: 3, 3.5, 4, 4.5 e 5%.

Portanto, para este trabalho, foram realizados cinco traços de dosagem para as misturas com teores de 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 e 6,0% de ligante, para cada estudo de dosagem. O teor de ligante ideal foi aquele que propiciou o enquadramento dos parâmetros de estabilidade e fluência para a mistura. O teor adotado foi utilizado nos ensaios de desempenho.

Inicialmente, com as curvas granulométricas obtidas, foram escolhidas taxas de agregados, através do método de tentativas, que foram combinadas de forma a atingir o centro das faixas de trabalho estabelecidas pelo DNIT. Cada agregado que compõe a mistura foi quarteado, secado e ajustado nas exatas proporções para cada teor de CAP ensaiado. Visando um corpo de prova (CP) com 1200g, foram definidas as massas de cada componente da mistura (Figura 3.17). Foram preparados 3 CPs para cada teor estudado.

Para a moldagem dos corpos de prova, os materiais foram aquecidos e o processo da mistura se passou em uma chapa aquecida, e as temperaturas de mistura e compactação foram determinadas a partir das curvas viscosidade x temperatura dos ligantes.

A temperatura do ligante durante a mistura ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade seja de 170 ± 20 cP, com os limites inferior e superior de 107 e 177°C, respectivamente. Os agregados devem estar aquecidos de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, sem ultrapassar 177°C. Para a compactação, a temperatura deve ser tal que o ligante apresente viscosidade de 280 ± 30 cP.

Figura 3.17: Preparação do Corpo de Prova Marshall, pesagem



Após homogeneizar bem a mistura e garantir a temperatura ideal, a mistura foi levada até o molde, onde foi compactado o corpo de prova. A mistura foi depositada e homogeneizada, com o auxílio de uma espátula, no molde (Figura 3.18) e então foi compactada com um soquete, batendo 75 vezes em cada face. O CP moldado ficou em repouso por 24 horas, até ser extraído do molde e ter suas dimensões obtidas. Também foram obtidas suas massas seca (MS) e submersa (MS_{sub}) para determinação dos parâmetros volumétricos. A determinação da Densidade Máxima Teórica (DMT) foi realizada segundo a Equação (3.11).

Figura 3.18: Moldagem do Corpo de Prova Marshall



$$DMT = \frac{100}{\frac{\%Asf}{GAsf} + \frac{\%AgG}{GAgG} + \frac{\%AgM}{GAgM} + \frac{\%F}{GF}} \quad (3.11)$$

Onde:

$\%Asf$, AgG , AgM , F = Porcentagens de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e fíler, respectivamente, em relação a massa total da mistura;

$GAsf$, $GAgG$, $GAgM$, F = Massas específicas de ligante, agregados graúdos, agregados miúdos e fíler.

Em seguida, foram calculados os demais parâmetros, conforme as Equações (3.12 a 3.17).

Volume total do Corpo de Prova (V_t).

$$V_t = MS - MS_{sub} \quad (3.12)$$

Massa específica aparente da mistura (G_{mb}).

$$G_{mb} = \frac{MS}{V_t} \quad (3.13)$$

Porcentagem de Volume de vazios (V_v).

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \times 100 \quad (3.14)$$

Vazios cheios com betume (VCB).

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%Asf}{GAsf} \quad (3.15)$$

Volume do Agregado Mineral (VAM).

$$VAM = V_v + VCB \quad (3.16)$$

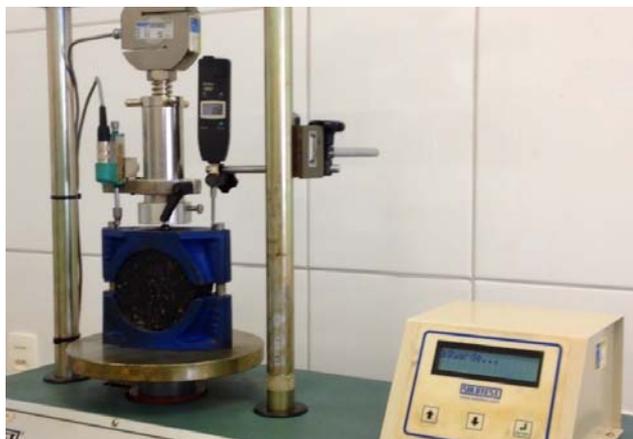
Relação betume/vazios (RBV).

$$RBV\% = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \quad (3.17)$$

Em seguida, o CP foi levado a banho-maria, por 30 a 40 minutos, à temperatura de 60°C. Depois o CP foi colocado no suporte e levado para a prensa onde foi realizado o ensaio

Marshall (Figura 3.19). Esse ensaio visa a obtenção das características volumétricas, a estabilidade e a fluência, e a partir dessas informações foi determinado o teor de projeto de ligante.

Figura 3.19: Prensa Marshall



Com todos os parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, foram construídas seis curvas em função do teor de ligante que foram usadas para a definição do teor de projeto. Para a escolha do teor de projeto para camadas de rolamento, foi utilizada a metodologia mais comum no país, baseada somente no volume de vazios (V_v), correspondente a 4%, e a partir do V_v , buscou-se atender aos demais parâmetros apresentados na ES 031 (DNIT, 2006a).

No entanto, o fenômeno de absorção, desconsiderado no cálculo da DMT, pode levar a erros significativos. Procedimentos que levem em conta o volume real do ligante asfáltico absorvido pelo agregado, permitindo a medição da DMT efetiva, tem ganhado a preferência de utilização.

Para observar a interferência dessas considerações nos dados desta pesquisa, determinou-se a massa específica máxima medida (G_{mm}) das misturas asfálticas ensaiadas no teor ótimo. A G_{mm} é dada pela razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com ligante asfáltico e total de ligante asfáltico, e foi determinado em laboratório segundo a norma D 2041 (ASTM, 2011). O valor da G_{mm} é dado pela Equação (3.18), a seguir.

$$G_{mm} = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \times 0,9971 \quad (3.18)$$

Onde:

A = Massa do kitasato, seco e limpo na temperatura de 25°C;

B = Massa do kitasato + amostra;

C = Massa do kitasato + amostra + água destilada (completo);

D = Massa do kitasato + água destilada (completo) na temperatura de 25°C.

A Gmm foi usada no cálculo do volume de ar no projeto de misturas asfálticas compactadas por meio da Equação (3.19).

$$Gmm = \frac{MS}{Vt - Var} \times 0,9971 \quad (3.19)$$

Onde:

Gmm = Massa específica máxima medida;

MS = Massa total do CP;

Vt = Volume total do CP;

Var = Volume de ar, vazios intergranulares não preenchidos com ligante asfáltico, no CP.

Conhecido o volume ocupado pelo ar na mistura, calculou-se a porcentagem de vazios da mistura (Vv).

3.5 ANÁLISE DOS AGREGADOS PELA METODOLOGIA SUPERPAVE

As universidades e departamentos de transportes norte-americanos, desde os anos 90, vêm utilizando a metodologia *Superpave* para a dosagem de misturas. Essa metodologia, ainda em fase de testes no Brasil, consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados.

Nesta pesquisa, não foi realizada a metodologia de dosagem *Superpave*, no entanto, com os dados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais e na dosagem Marshall, foi realizada uma análise comparativa dos parâmetros obtidos verificando se os mesmos poderiam atender também a metodologia *Superpave*, para o Nível 1.

Para atender o Nível 1, é requerido o projeto volumétrico, exigindo a compactação giratória dos CPs, para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL – *Equivalent Single Axle Loads*) abaixo de 10^6 . A compactação dos CPs foi realizada de forma manual pela metodologia Marshall, logo a metodologia *Superpave* não foi atendida, mas buscou-se atender outros parâmetros, como propriedades dos materiais e curva granulométrica dos agregados.

Durante o desenvolvimento da metodologia *Superpave*, foi definido que não haveria nenhum procedimento novo para avaliação dos agregados, apenas um refinamento dos procedimentos usuais, dividindo duas categorias de propriedade, as de Consenso e de Origem. Assim, nesta pesquisa, para as propriedades de Consenso analisou-se o resultado do ensaio de equivalente de areia, com relação aos ensaios das propriedades de Origem analisou-se somente o resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles”.

Com relação à curva granulométrica, para atender aos requisitos *Superpave*, a curva foi plotada num gráfico cujo eixo das abscissas foi representado pelo tamanho das peneiras em mm elevado à potência de 0,45 e o eixo das ordenadas representou a porcentagem passante nessas peneiras. Em seguida, foram plotados a linha de densidade máxima e os pontos de controle e zona de restrição.

3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO

A seguir são descritos os ensaios que foram realizados em laboratório para determinação das propriedades mecânicas e de desempenho das misturas asfálticas em estudo. Para a realização dos ensaios mecânicos, foram selecionadas as misturas com as duas faixas granulométricas, B e C, misturadas com os três tipos de ligantes e dosadas com o teor ótimo.

Para os ensaios de desempenho foi proposta uma comparação diferenciada para as misturas, visando maior objetividade dos resultados. Foi realizada a comparação de resultados entre as misturas com as faixas B e C, dosadas no teor ótimo para o ligante mais comum, CAP 50/70, verificando qual apresentou melhor comportamento. Posteriormente, foi realizada a comparação de resultados entre as misturas com a Faixa C (amplamente utilizada na região em estudo), dosadas no teor ótimo para os três ligantes propostos, CAP 30/45, CAP 50/70 e AMP, visando identificar qual mistura teria melhor comportamento, em relação ao ligante.

3.6.1 Avaliação do Desgaste

O ensaio de avaliação do desgaste foi realizado através do ensaio Cantabro que tem o objetivo de determinar o desgaste, por abrasão, de uma mistura betuminosa, com emprego da máquina de abrasão Los Angeles e segue a norma ME 383 (DNER, 1999). Foram moldados três CPs de cada mistura (Faixas B e C para os 3 ligantes), obtidos através da compactação Marshall no teor ótimo para cada ligante. Os CPs foram extraídos dos moldes após 24 h e suas massas foram obtidas. Em seguida, os CPs foram colocados em um tambor da máquina Los Angeles, previamente limpo e foram realizadas 300 revoluções no tambor (Figura 3.20).

Figura 3.20: Ensaio de Perda de Massa por Desgaste: (a) CP colocado no tambor; (b) CP após ensaio.



Os CPs foram retirados e suas massas foram novamente anotadas. Com os valores das massas obteve-se, através da Equação (3.20), a perda de massa por desgaste.

$$Pd = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100 \quad (3.20)$$

Onde:

Pd = Perda de massa por desgaste;

M1 = Massa inicial;

M2 = Massa após o ensaio.

3.6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (Método Brasileiro)

O ensaio de compressão diametral é utilizado para a determinação indireta da resistência à tração (RT) e segue as normas ME 136 (DNIT, 2010b) e NBR 15087 (ABNT, 2012b). A configuração desse ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão, através de frisos de carga no CP cilíndrico Marshall (Figura 3.21).

Foram moldados três CPs de cada mistura (Faixas B e C para os 3 ligantes), obtidos através da compactação Marshall no teor ótimo para cada ligante. Os CPs foram extraídos dos moldes após 24 h e suas dimensões e massa seca foram obtidas. Em seguida, os CPs foram colocados em um sistema de refrigeração, por um período de 2 horas, até atingir a temperatura requerida para o ensaio, 25°C (Figura 3.22).

Figura 3.21: Corpo de Prova Marshall no molde com frisos



Figura 3.22: Molde preparado para RT, com termômetro para calibração



O CP foi posicionado no dispositivo centralizador com frisos e levado à prensa. Ajustaram-se os pratos da prensa e aplicou-se uma carga progressivamente, com velocidade de deslocamento de 0,8mm/s, até que se deu a ruptura, que aconteceu de forma indireta (Figura 3.23).

Figura 3.23: Ruptura no CP – Resistência à tração



Com o valor da carga de ruptura obteve-se, através da Equação (3.21), a resistência à tração estática.

$$RT = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3.21)$$

Onde:

RT = Resistência à tração, em MPa;

F = Cara de ruptura, em N;

D = Diâmetro do CP, em cm;

H = Altura do CP, em cm.

3.6.3 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência é a relação entre a tensão de tração (σ), aplicada repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica, e a deformação específica recuperável (ϵ) correspondente à tensão aplicada, a uma determinada temperatura (T), e segue as especificações da ME 133 (DNER, 1994c). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

O equipamento para realização do ensaio é composto por uma estrutura metálica e um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante aplicando a carga no plano diametral vertical de um CP.

Os CPs de cada mistura proposta (CAP 50/70 - Faixa B e Faixa C para os 3 ligantes) foram moldados conforme a Metodologia Marshall, com 10cm de diâmetro e altura de 6,5cm. Posteriormente os CPs foram extraídos do molde e suas dimensões e massa seca (MS) foram obtidas. Antes de colocar o CP na câmara de pressão, ele foi colocado em membrana fina protegendo a amostra.

Posicionou-se o CP no interior do suporte para fixação dos transdutores e o colocou na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos. O CP foi, então, fixado e os transdutores ajustados. A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofreu deformações horizontais, que foram medidas através dos transdutores, ligados a um microcomputador. Os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C, em uma direção e posteriormente a amostra foi rotacionada em 90° e o ensaio foi realizado novamente (Figura 3.24).

Figura 3.24: Corpo de prova em ensaio



Esse carregamento gerou uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mediu-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, a 25°C. O módulo é a relação entre a tensão de tração (σ) e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada.

3.6.4 Deformação Permanente

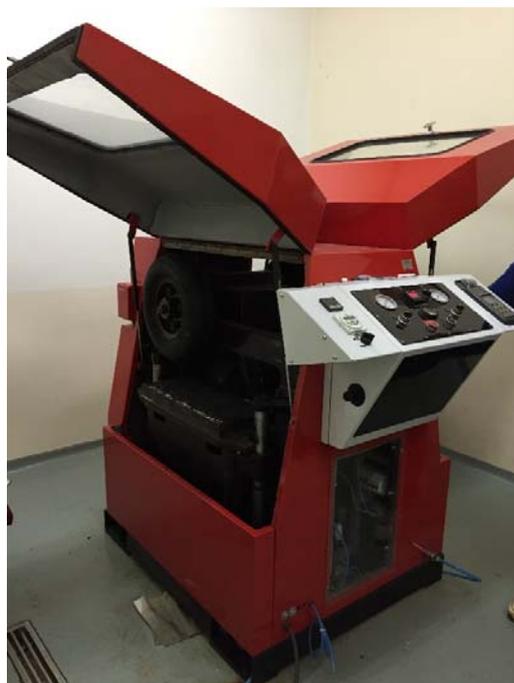
Para o desenvolvimento da pesquisa foram preparadas, para cada uma das quatro misturas em análise (Faixa B - CAP 50/70, Faixa C - CAP 50/70, 30/45 e AMP), 2 placas retangulares com 50cm de comprimento, 18cm de largura e 5cm de espessura. Essas placas foram compactadas por amassamento, na mesa compactadora desenvolvida no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC – que virou *Institut Français des Sciences et Technologies des Transport, de l'Aménagement et des Réseaux* - IFSTTAR), conforme especificação francesa NF P 98-250-2 (AFNOR, 1997), apresentada na (Figura 3.25).

Figura 3.25: Mesa Compactadora desenvolvida no LCPC



As amostras foram deixadas a temperatura ambiente para, então, serem levadas ao simulador de tráfego, também desenvolvido no LCPC, do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP, onde foram realizados os ensaios de deformação permanente, conforme especificação francesa NF P 98-253-1 (AFNOR, 1993). O ensaio foi realizado segundo as especificações da norma, na temperatura de 60°C, com aplicação de carga correspondente a um eixo de 100 kN (50k N sobre cada placa), e 30.000 ciclos (Figura 3.26).

Figura 3.26: Ensaio de Deformação Permanente



A passagem da roda sobre as placas é feita em ciclos de ida e volta do pneu em determinada frequência e as medidas de afundamento são realizadas em pontos distintos da trilha de roda. O resultado é dado em termos de porcentagem de afundamento de trilha de roda pela média das leituras realizadas.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para caracterização de materiais e para avaliação comparativa das misturas asfálticas propostas, através de comportamento mecânico e desempenho.

4.1 AGREGADOS

O material pétreo utilizado na pesquisa foi identificado como uma rocha metamórfica xistosa (micaxisto), muito comum na região de estudo. Conforme já descrito no Capítulo 3, as amostras foram coletadas da pedreira seguindo a especificação PRO 120 (DNER, 1997c) e foram levadas para o laboratório, onde foram separadas e cadastradas, e os ensaios foram realizados. Foi verificado que os resultados obtidos atenderam aos parâmetros especificados em normas e validaram sua utilização para compor misturas asfálticas a quente, conforme apresentado a seguir.

4.1.1 Caracterização dos Agregados

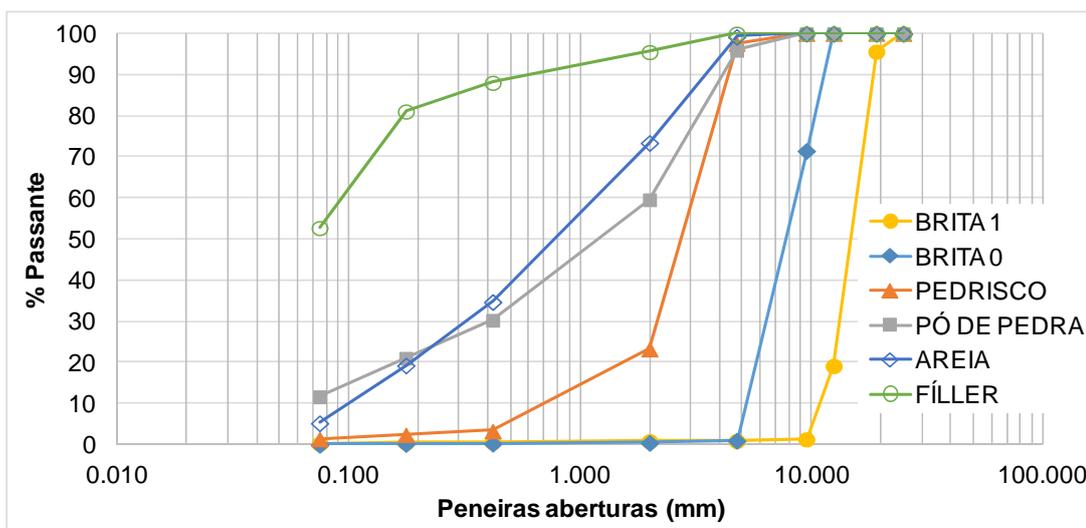
A granulometria de cada material foi realizada através de peneiramento dos agregados, de acordo com o ME 083 (DNER, 1998a), e as curvas granulométricas obtidas estão apresentadas na Figura 4.1.

Observa-se que os agregados apresentaram graduação aberta, as curvas granulométricas se mostraram uniformes, com agregados quase que exclusivamente de um mesmo tamanho, com pequena variação do pó de pedra e da areia, que apresentaram graduação um pouco mais densa, com curvas contínuas e melhor graduadas. Além da curva granulométrica, definiu-se também o tamanho nominal máximo de cada agregado, que é a abertura da primeira peneira acima da que retém mais de 10% de material, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tamanho Nominal Máximo (TNM) dos agregados

Agregados	Brita 1	Brita 0	Pedrisco	Pó de Pedra	Areia
TNM	19,0	12,5	4,8	4,8	4,8

Figura 4.1: Composição Granulométrica de cada agregado



Foram realizados ensaios de caracterização com os agregados e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

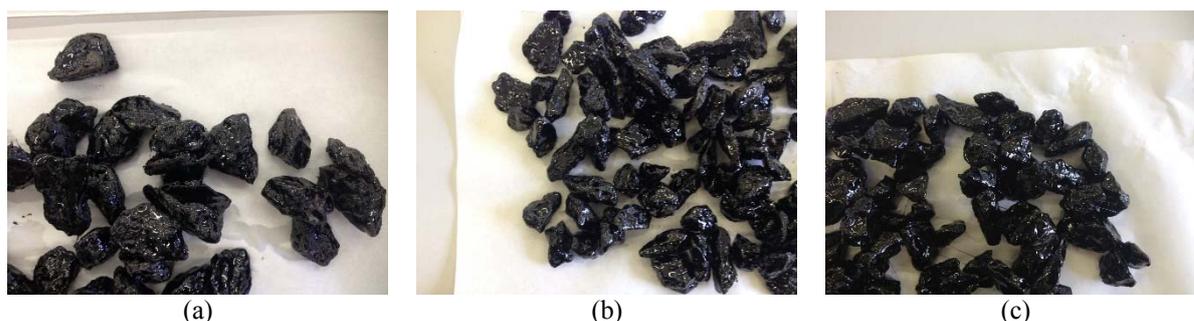
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Propriedade	Brita 1	Brita 0	Pedrisco	Areia	Pó de Pedra	Filer
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,701	2,665				
Absorção (%)	0,54	1,14				
Densidade Real (g/cm ³)			2,786	2,787	2,801	
Dens. pulverizado (g/cm ³)						2,822
Equivalente de Areia (%)				75,7	69,3	
Abrasão "Los Angeles" (%)	29,6					
Índice de Forma	1,0					

Os dados de massa específica obtidos para os agregados apresentaram valores numericamente próximos, e isso aconteceu porque eles possuem a mesma rocha de origem, que é o micaxisto. O material utilizado nesta pesquisa não apresentou valor médio de absorção, que ficou abaixo de 1,0%. Apesar de não estabelecer um valor limite, a norma não recomenda agregados com alta absorção, acima de 2%, pois consomem maior quantidade de ligante asfáltico e variam a porosidade conforme a amostragem, dificultando a definição do teor de ligante, podendo este ser maior ou menor que o ideal (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O desgaste Los Angeles de 29,6%, o índice de forma de 1,0 e o equivalente de areia acima de 69% atenderam aos valores determinados na ES 031 (DNIT, 2006a), sendo inferior a 50%, superior a 0,5 e superior a 55%, respectivamente. No ensaio de adesividade, obteve-se resultado satisfatório para as misturas com os três ligantes, conforme ilustrado na Figura 4.2, onde não foi observada perda de cobertura de ligante.

Figura 4.2: Ensaio de Adesividade: (a) CAP 30/45; (b) CAP 50/70; (c) AMP



4.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos estudados foram realizados de acordo com especificações e normas existentes e os resultados estão apresentados na Tabela 4.3. Os resultados para o ensaio de penetração atenderam às especificações, que estabelecem intervalos de valores aceitáveis para os CAPs 30/45, 50/70 e AMP, sendo, respectivamente, de 30 a 45, de 50 a 70 e de 40 a 70 décimos de milímetros.

Tabela 4.3: Resultados dos Ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos

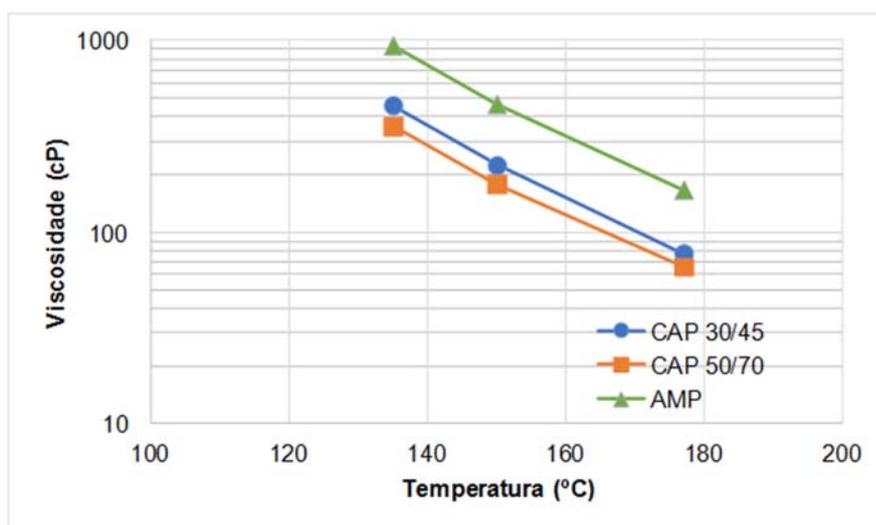
Propriedade	CAP 30/45		CAP 50/70		AMP	
	Resultado	Limites	Resultado	Limites	Resultado	Limite
Penetração (0,1mm)	35	30 a 45	58	50 a 70	66	40 a 70
Viscosidade Rotacional - 135°C (cP)	459	> 374	357	> 274	941	< 3000
Viscosidade Rotacional - 150°C (cP)	224	> 203	179	> 112	466	< 2000
Viscosidade Rotacional - 177°C (cP)	78	76 a 285	66	57 a 285	167	< 1000
Ponto de Amolecimento (°C)	54	> 52	51	> 46	64	> 60
Ponto de Fulgor (°C)	> 320	> 235	> 320	> 235	> 320	> 235
Densidade (g/cm ³)	1,009	-	1,004	-	1,020	-
Massa Específica (g/cm ³)	1,006	-	1,000	-	1,017	-

Os resultados para o ensaio de ponto de amolecimento também atenderam às especificações, que estabelecem os valores mínimos aceitáveis para os CAPs 30/45, 50/70 e AMP, sendo,

respectivamente, 52, 46 e 60°C. Para ponto de fulgor todos os resultados deram acima da temperatura mínima aceitável de 235°C.

Os valores de viscosidade rotacional atenderam às especificações da ANP e com os dados do ensaio foi possível obter as curvas viscosidade x temperatura para cada ligante utilizado (Figura 4.3). Observa-se que o AMP é mais viscoso que o CAP 30/45, que é mais viscoso que o CAP 50/70.

Figura 4.3: Gráfico Viscosidade x Temperatura.



Analisando comparativamente dados obtidos com os apresentados em outros estudos de ligantes asfálticos de outros locais (Tabela 4.4), os resultados mostram que os ligantes possuem propriedades semelhantes, independente da origem.

Tabela 4.4: Parâmetros obtidos para ligantes asfálticos de diferentes origens

Autores	Ligante	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade Rotacional 135°C (cP)
De Moraes <i>et al.</i> (2010)	30/45	35	54	629
Pasadín e Pérez (2013)	50/70	52	55	-

4.3 DOSAGEM MARSHALL

Para o presente estudo, as curvas granulométricas foram obtidas através do método de tentativas, e as taxas escolhidas para cada agregado foram combinadas de forma a atender as faixas de trabalho estabelecidas pelo DNIT para camada de rolamento (Faixas B e C), conforme apresentado nas Figura 4.4 e Figura 4.5. O tamanho Nominal Máximo para as duas faixas granulométricas foi de 19,0mm (peneira máxima de 25,0mm).

Tabela 4.5: Composição Granulométrica – Faixa B

Abertura das Peneiras		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Areia	Fíler	Faixa de Projeto			Faixa B (norma)	
N	mm	27%	26%	35%	10%	2%	Inf (%)	Comp (%)	Sup (%)	Inf (%)	Sup (%)
1"	25,0	27,00	26,00	35,00	10,00	2,00	95,0	100,0	100,0	95	100
3/4"	19,1	25,82	26,00	35,00	10,00	2,00	91,8	98,8	100,0	80	100
1/2"	12,5	5,19	26,00	35,00	10,00	2,00	71,2	78,2	85,2	56	87
3/8"	9,52	0,37	18,59	33,59	10,00	2,00	59,0	66,0	73,0	45	80
4	4,76	0,27	0,27	20,87	9,93	2,00	41,1	46,1	51,1	28	60
10	2,00	0,25	0,14	10,62	7,34	1,91	25,5	30,5	35,5	20	45
40	0,420	0,19	0,08	7,39	3,48	1,76	11,1	16,1	21,1	10	32
80	0,177	0,16	0,06	4,11	1,93	1,62	8,2	11,2	14,2	8	20
200	0,075	0,08	0,02	0,10	0,53	1,06	3,8	5,8	7,8	3	8

Tabela 4.6: Composição Granulométrica – Faixa C

Abertura das Peneiras		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Areia	Fíler	Faixa de Projeto			Faixa C (norma)	
N	mm	23%	24%	34%	17%	2%	Inf (%)	Comp (%)	Sup (%)	Inf (%)	Sup (%)
1"	25,0	23,00	24,00	34,00	17,00	2,00	100,0	100,0	100,0	100	100
3/4"	19,1	22,00	24,00	34,00	17,00	2,00	100,0	99,0	100,0	100	100
1/2"	12,5	4,42	24,00	34,00	17,00	2,00	80,0	81,4	88,4	80	100
3/8"	9,52	0,32	17,16	34,00	17,00	2,00	70,0	70,5	77,5	70	90
4	4,76	0,23	0,25	32,63	16,87	2,00	47,0	52,0	57,0	44	72
10	2,00	0,21	0,13	20,28	12,48	1,91	30,0	35,0	40,0	22	50
40	0,420	0,16	0,08	10,31	5,91	1,76	13,2	18,2	23,2	8	26
80	0,177	0,13	0,06	7,18	3,29	1,62	9,3	12,3	15,3	4	16
200	0,075	0,07	0,02	3,99	0,90	1,06	4,0	6,0	8,0	2	10

Figura 4.4: Composição granulométrica da mistura para Faixa B

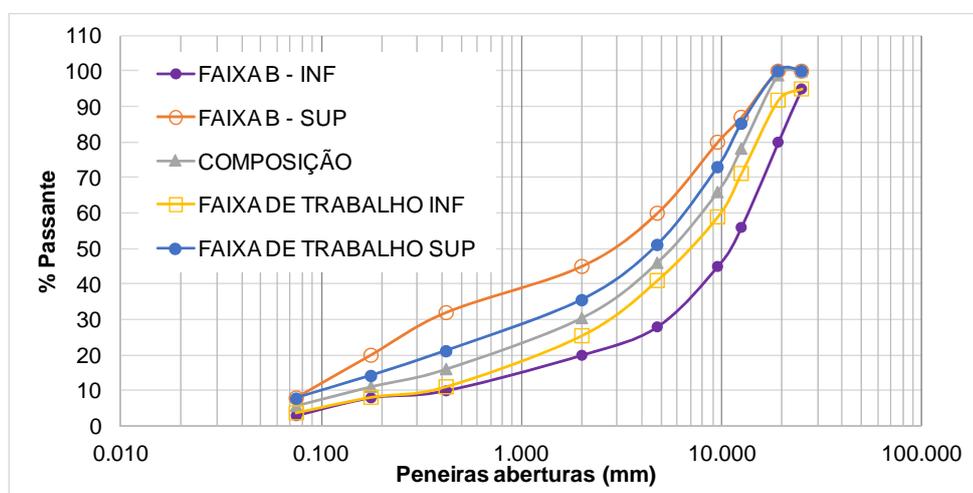
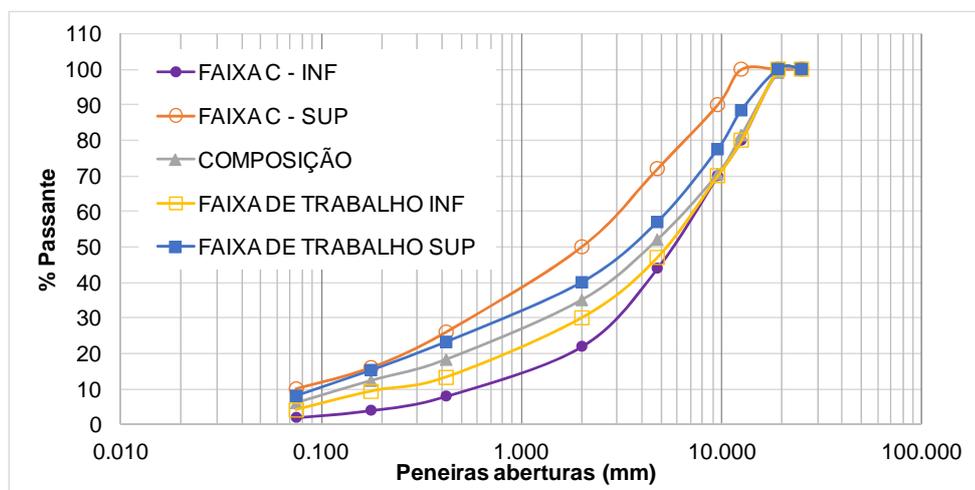


Figura 4.5: Composição granulométrica da mistura para Faixa C



Este trabalho contemplou a dosagem, em laboratório, de seis projetos de misturas asfálticas a quente, combinando a composição granulométrica dos agregados para as Faixas B e C do DNIT, conforme apresentado nas Tabela 4.5 e Tabela 4.6, com três diferentes tipos de ligantes asfálticos: os CAPs 30/45, 50/70 e AMP. Para a preparação dos CPs, os materiais foram combinados em diferentes teores de ligante, com as massas variando de acordo com os teores, conforme Tabela 4.8 e Tabela 4.9. Os materiais devem ser misturados numa temperatura na qual a viscosidade do ligante seja de 170 ± 20 cP. Para a compactação, a temperatura deve ser tal que o ligante apresente viscosidade de 280 ± 30 cP. As temperaturas obtidas a partir das curvas apresentadas na Figura 4.3 estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Temperaturas de mistura e de compactação dos CPs

Temperatura	CAP 30/45	CAP 50/70	AMP
Usinagem	157°C	152°C	175°C
Compactação	146°C	140°C	163°C

Após a extração dos CPs, foram obtidas suas dimensões e massas seca (MS) e submersa (MSsub) para determinação dos parâmetros volumétricos apresentados nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11, para as Faixas B e C, respectivamente.

Tabela 4.8: Composição dos CPs – Faixa B

Teor de ligante (%)	Brita 1 (%)	Brita 0 (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Fíler (%)
4,0	25,92	24,96	33,60	9,60	1,92
4,5	25,79	24,83	33,43	9,55	1,91
5,0	25,65	24,70	33,25	9,50	1,90
5,5	25,52	24,57	33,08	9,45	1,89
6,0	25,38	24,44	32,90	9,40	1,88

Tabela 4.9: Composição dos CPs – Faixa C

Teor de ligante (%)	Brita 1 (%)	Brita 0 (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Filer (%)
4,0	22,08	23,04	32,64	16,32	1,92
4,5	21,97	22,92	32,47	16,24	1,91
5,0	21,85	22,80	32,30	16,15	1,90
5,5	21,74	22,68	32,13	16,07	1,89
6,0	21,62	22,56	31,96	15,98	1,88

Tabela 4.10: Parâmetros volumétricos para a mistura Faixa B

Propriedade	FAIXA B				
	CAP 30/45				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,754	2,754	2,754	2,754	2,754
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019
DMT (g/cm ³)	2,592	2,571	2,551	2,531	2,511
Gmb média (g/cm ³)	2,388	2,417	2,438	2,444	2,440
Vv (%)	7,85	5,99	4,42	3,43	2,83
VCB (%)	9,37	10,67	11,96	13,19	14,36
VAM (%)	17,22	16,66	16,38	16,62	17,19
RBV (%)	54,42	64,04	73,02	79,38	83,55
Propriedade	CAP 50/70				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,754	2,754	2,754	2,754	2,754
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
DMT (g/cm ³)	2,592	2,571	2,551	2,531	2,511
Gmb média (g/cm ³)	2,428	2,460	2,466	2,457	2,461
Vv (%)	6,31	4,31	3,35	2,93	2,01
VCB (%)	9,52	10,85	12,09	13,25	14,48
VAM (%)	15,83	15,17	15,44	16,17	16,48
RBV (%)	60,14	71,56	78,30	81,91	87,83
Propriedade	AMP				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,754	2,754	2,754	2,754	2,754
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,023	1,023	1,023	1,023	1,023
DMT (g/cm ³)	2,593	2,572	2,552	2,532	2,512
Gmb média (g/cm ³)	2,419	2,445	2,441	2,447	2,450
Vv (%)	6,68	4,93	4,35	3,34	2,49
VCB (%)	9,46	10,76	11,94	13,16	14,37
VAM (%)	16,15	15,69	16,28	16,51	16,87
RBV (%)	58,62	68,56	73,30	79,75	85,21

Obs.: CAP = cimento asfáltico de petróleo; AMP = asfalto modificado por polímero; DMT = densidade máxima teórica; Gmn = massa específica máxima medida; Vv = volume de vazios; VCB = volume de vazios preenchido com betume; VAM = volume de vazios do agregado mineral; RBV = relação betume vazio.

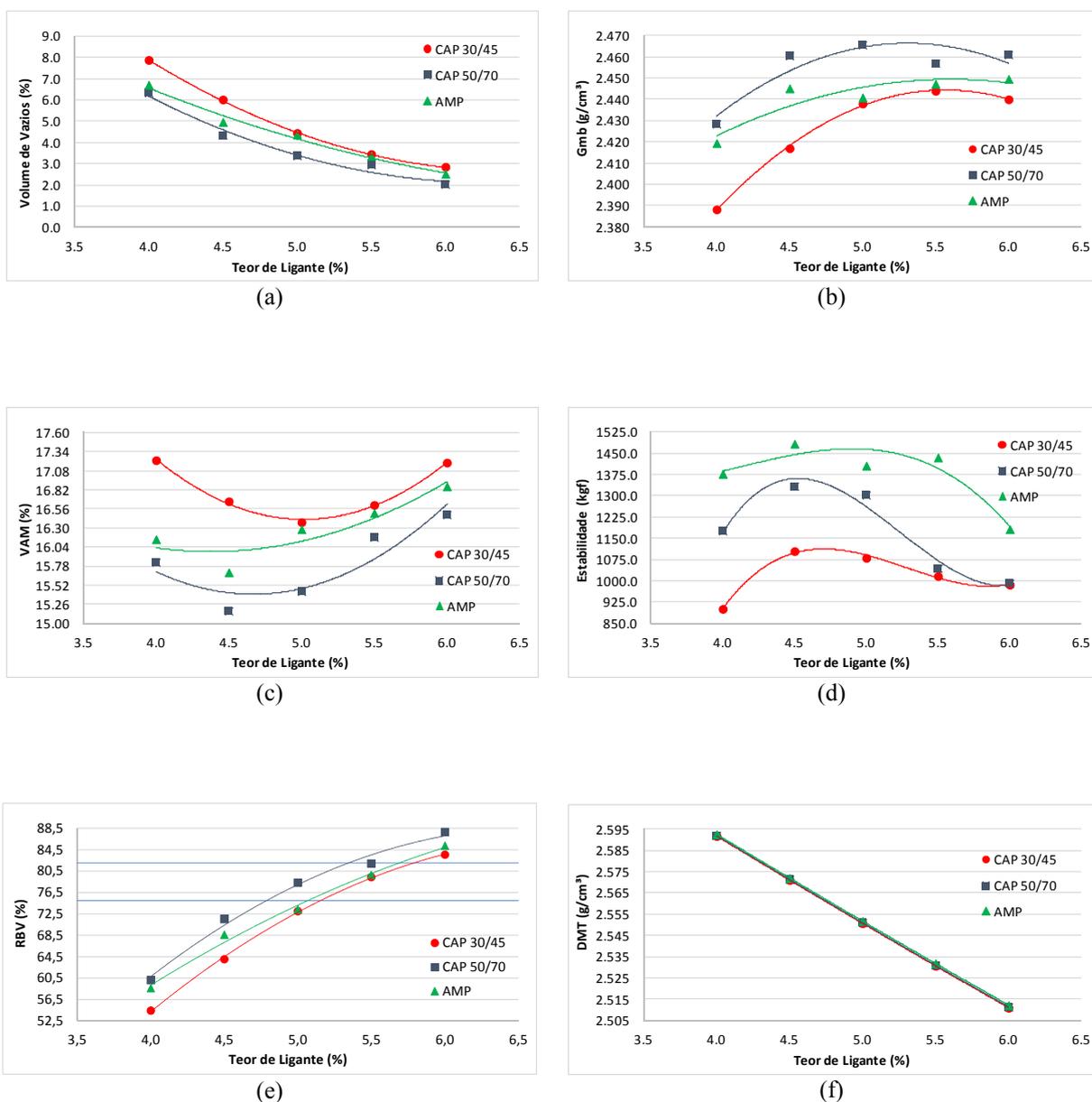
Tabela 4.11: Parâmetros volumétricos para a mistura Faixa C

Propriedade	FAIXA C				
	CAP 30/45				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,757	2,757	2,757	2,757	2,757
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019
DMT (g/cm ³)	2,594	2,573	2,553	2,533	2,513
Gmb média (g/cm ³)	2,407	2,429	2,447	2,456	2,447
Vv (%)	7,22	5,60	4,15	3,03	2,63
VCB (%)	9,45	10,72	12,00	13,25	14,41
VAM (%)	16,66	16,33	16,15	16,28	17,03
RBV (%)	56,69	65,68	74,33	81,39	84,57
Propriedade	CAP 50/70				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,757	2,757	2,757	2,757	2,757
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
DMT (g/cm ³)	2,594	2,573	2,553	2,533	2,513
Gmb média (g/cm ³)	2,432	2,412	2,438	2,447	2,462
Vv (%)	6,23	6,28	4,51	3,40	2,04
VCB (%)	9,54	10,64	11,95	13,19	14,48
VAM (%)	15,77	16,92	16,46	16,59	16,52
RBV (%)	60,48	62,87	72,61	79,53	87,64
Propriedade	AMP				
% Ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Densidade dos Agregados (g/cm ³)	2,757	2,757	2,757	2,757	2,757
Densidade do Ligante (g/cm ³)	1,023	1,023	1,023	1,023	1,023
DMT (g/cm ³)	2,595	2,574	2,554	2,534	2,514
Gmb média (g/cm ³)	2,400	2,396	2,424	2,406	2,438
Vv (%)	7,50	6,90	5,10	5,06	3,04
VCB (%)	9,39	10,55	11,85	12,94	14,31
VAM (%)	16,89	17,45	16,95	18,00	17,34
RBV (%)	55,59	60,43	69,91	71,88	82,49

Obs.: CAP = cimento asfáltico de petróleo; AMP = asfalto modificado por polímero; DMT = densidade máxima teórica; Gmb = massa específica máxima medida; Vv = volume de vazios; VCB = volume de vazios preenchido com betume; VAM = volume de vazios do agregado mineral; RBV = relação betume vazio.

Foram plotados gráficos relacionando os parâmetros obtidos em função do teor de ligante, em busca do teor de projeto (Figura 4.6 e Figura 4.7). Para a escolha do teor de projeto para camadas de rolamento, para cada um dos projetos em estudo, foi utilizada a metodologia mais comum no país, baseada somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%, e a partir do Vv, buscou-se atender aos demais parâmetros apresentados na ES 031 (DNIT, 2006a).

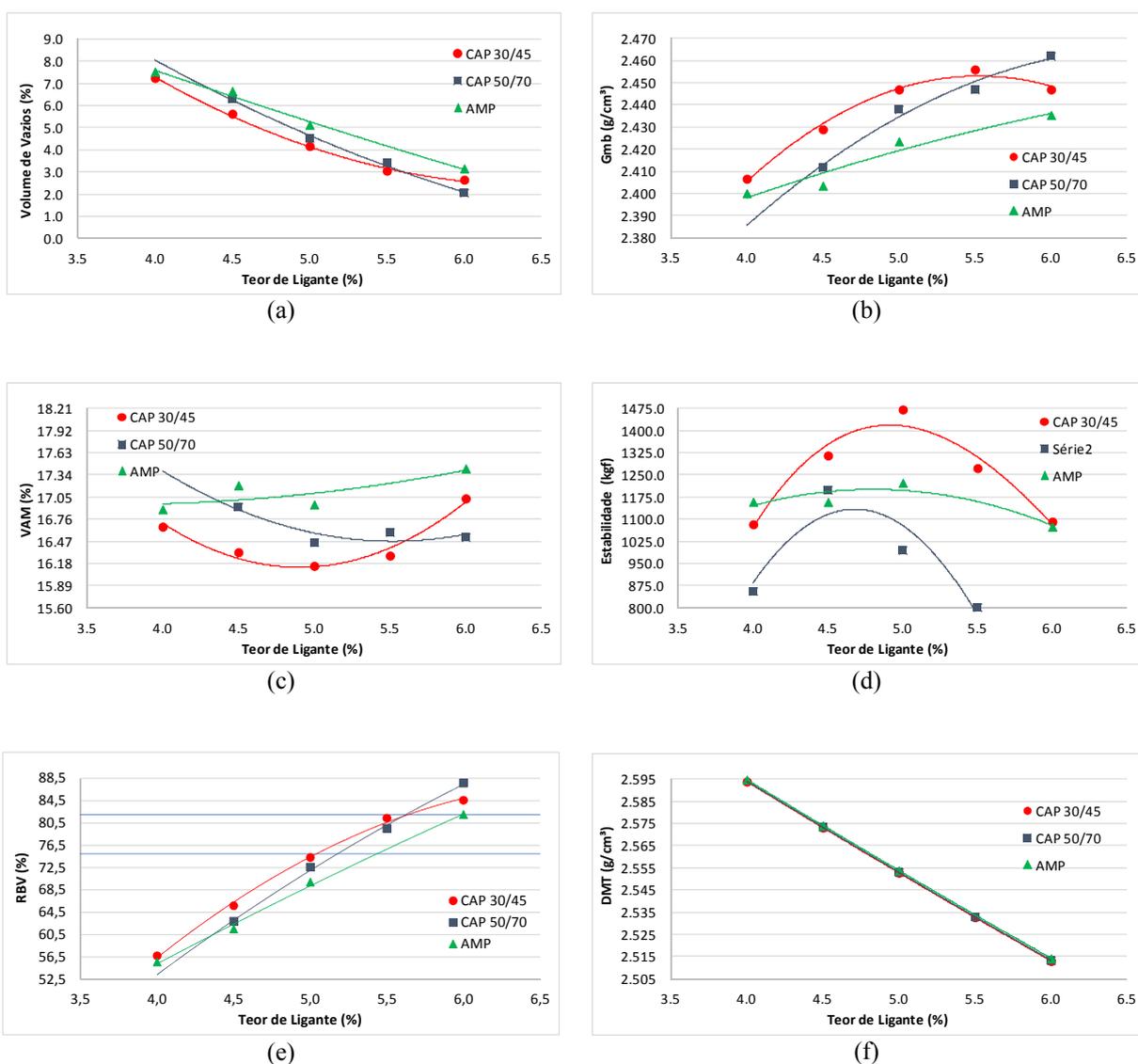
Figura 4.6: FAIXA B - Teor de Ligante *versus*: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) Estabilidade; (e) RBV; (f) DMT.



Para as misturas confeccionadas na Faixa B (Figura 4.6), observou-se que com o CAP 50/70 foram obtidos os menores valores de volume de vazios (V_v), os maiores valores de massa específica (Gmb), os menores valores de volume de vazios do agregado mineral (VAM) e os maiores valores de relação betume-vazios (RBV). Para esses parâmetros, as misturas compostas de CAP 30/45 apresentaram comportamento oposto ao do CAP 50/70 e aquelas compostas com AMP apresentaram comportamento intermediário. Já para a estabilidade

(Figura 4.6d), ocorreu uma inversão de comportamento entre o CAP 50/70 e o AMP, sendo que as misturas confeccionadas com AMP apresentaram os maiores valores. Em termos de densidade máxima teórica (Figura 4.6f), os resultados foram semelhantes. Baseando-se apenas nos resultados de dosagem Marshall, pode-se entender que para a Faixa B o CAP 50/70 seria o mais indicado de ser utilizado. No entanto, ressalta-se a limitação dessa metodologia pela compactação por impacto dos corpos de prova ao invés do amassamento (compactador giratório) e pela não realização de ensaios para determinação de parâmetros mecânicos e de desempenho.

Figura 4.7: FAIXA C - Teor de Ligante *versus*: (a) Volume de Vazios; (b) Gmb; (c) VAM; (d) Estabilidade; (e) RBV; (f) DMT.



Já para a Faixa C (Figura 4.7), as misturas confeccionadas com o CAP 30/45 apresentaram os melhores resultados, contrariando o que foi observado para a Faixa B. Mesmo com as limitações já citadas sobre a dosagem Marshall, os resultados obtidos podem indicar que, para misturas asfálticas executadas com o agregado da região de estudo (micaxisto), em função da faixa granulométrica adotada, o CAP ideal a ser utilizado pode mudar e que, talvez, a mistura mais comum de ser utilizada na região para camada de rolamento, Faixa C com o CAP 50/70, não seja a melhor opção. Para comprovar essa hipótese, deve-se dar continuidade aos estudos, investindo na realização de ensaios de desempenho e na dosagem *Superpave*.

Com relação ao AMP, verifica-se que a dosagem Marshall não seria a mais indicada para avaliação dos parâmetros das misturas. Os resultados obtidos não foram capazes de demonstrar onde que esse tipo de ligante pode gerar melhoria de comportamento numa mistura asfáltica.

Os gráficos apresentados mostraram que a massa específica aparente (G_{mb}) aumenta com o aumento do teor de ligante, apresentando um pico próximo ao teor ótimo. Esse comportamento se repete nas duas faixas granulométricas, com pequenas variações. Em relação ao DMT, todas as misturas se comportaram de maneira análoga, reduzindo o valor com o aumento do teor de ligante. As misturas para a Faixa B apresentaram valores menores do que para as misturas para a Faixa C, independentemente do CAP utilizado, sendo numericamente próximos. O RBV apresentou padrão de curva semelhante, aumentando seu valor com o aumento do teor de CAP.

Quanto ao VAM, pode-se considerar que o comportamento tende a ser semelhante, com exceção das misturas da Faixa C com CAP 50/70 e AMP, que apresentaram comportamentos diferentes, apesar de apresentar a tendência. O VAM apresenta redução de seu valor com o aumento do teor até um ponto na qual o VAM começa a aumentar. Para todas as misturas no teor ótimo, o VAM foi maior do que 15%.

Com relação ao V_v , pode-se observar que o valor diminui com o aumento do teor de ligante, padrão que se repete para todas as misturas. Para determinação do teor de projeto do ligante asfáltico, foi usado o procedimento mais comum no Brasil (BERNUCCI *et al.*, 2006), que é baseado na escolha do teor correspondente a um volume de vazios (V_v) de 4,0%.

A Tabela 4.12 apresenta o teor de asfalto ideal resultante da dosagem Marshall realizada para as misturas estudadas, bem como parâmetros obtidos em outros estudos para comparação. Soares *et al.* (1999), Soares *et al.* (2000) e Vasconcelos, Soares e Leite (2003) trabalharam com agregados naturais, obtidos no Ceará, nas Faixas B e C com CAP 30/45 e 50/60, respectivamente. É importante ressaltar nesses trabalhos, por causa da data em que os estudos foram realizados, a classificação utilizada para os ligantes era a Resolução nº 5 da ANP, que foi revogada e substituída pela atual Resolução nº 19 (ANP, 2005). Pasadín e Pérez (2013) trabalharam com CAP 50/70 e misturas com agregados naturais (*hornfels* - rochas metamórficas bastante resistentes) e com acréscimo de agregado reciclado, que seguiram normatização espanhola para a composição granulométrica.

Nesta pesquisa, os teores de asfalto variaram entre 4,8 e 5,7, sendo que os maiores valores foram obtidos para a Faixa C. Esses resultados estão dentro da variação dos teores de ligante apresentados na Tabela 4.12 para outros estudos. Destaca-se teores de ligante superiores a 6,0% para algumas misturas na Faixa C com o CAP 50/60 obtidas por Vasconcelos, Soares e Leite (2003), bem como valores próximos a 4,0% para misturas onde foi utilizado agregado reciclado (PASADÍN; PÉREZ, 2013).

Tabela 4.12: Resultados de dosagem Marshall

Autores	CAP	Faixa	Teor de ligante (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)
Esta pesquisa	30/45	B	5,2	4,00	16,30	78,5	1072
	50/70	B	4,8	4,00	15,40	78,3	1361
	AMP	B	5,2	4,00	16,20	72,5	1302
	30/45	C	5,0	4,00	16,15	74,3	1464
	50/70	C	5,3	4,00	16,50	76,7	1247
	AMP	C	5,7	4,00	17,05	76,5	1187
Soares <i>et al.</i> (1999)	30/45	C	5,8	3,60	16,90	79,0	1139
	50/60	C	5,9	3,70	17,20	78,3	1178
Soares <i>et al.</i> (2000)	30/45	B	5,2	3,60	15,60	77,2	-
	50/60	B	5,3	3,70	16,00	77,3	-
Vasconcelos, Soares e Leite (2003)	50/60	C	5,2	6,30	-	65,0	-
	50/60	C	5,7	5,00	-	72,1	-
	50/60	C	6,2	3,8	-	78,8	-
	50/60	C	6,7	3,3	-	82,2	-
Pasadín e Pérez (2013)	50/70	0% RCA	4,0	7,25	16,8	56,8	1766
	50/70	5% RCA	3,8	7,57	16,6	53,9	1980
	50/70	30% RCA	4,3	7,71	17,7	56,4	1801

Obs.: CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo; AMP = Asfalto Modificado com Polímero; Vv = Volume de Vazios; VAM = Vazios do Agregado Mineral; RBV = Relação Betume-Vazios; RCA = Agregado de Concreto Reciclado.

Segundo a norma ES 031 (DNIT, 2006a), para camadas de rolamento (Faixas B e C) os valores de RBV devem atender o intervalo de 75-82%. Nesta pesquisa, as misturas confeccionadas com o AMP na Faixa B e com o CAP 30/45 na Faixa C apresentaram valores abaixo dessa faixa. Os valores de VAM para as amostras estudadas ficaram acima de 15%, para TNM de 19mm, atendendo as especificações da norma ES 031 (DNIT, 2006a).

Em estudo realizado na região Nordeste, Soares *et al.* (1999) encontraram para a Faixa C os teores de projeto de ligante de 5,8% para o CAP 30/45 e 5,9% para o CAP 50/60. Segundo os autores, quando são usados CAPs com densidades similares e não são modificadas as outras variáveis da mistura, é esperado que os teores sejam parecidos. Em Soares *et al.* (2000), foram estudadas misturas na Faixa B, combinadas com CAP 30/45 e 50/60, em que os teores ligantes também resultaram em valores próximos, de 5,2 e 5,3%. Para esta pesquisa essa tendência não se repetiu, com teores de 5,2 e 4,8% para Faixa B e 5,0 e 5,3% para Faixa C para os ligantes 30/45 e 50/70, respectivamente.

Pode-se observar uma tendência no comportamento das misturas apresentadas nesta pesquisa e por Soares *et al.* (1999), com relação à estabilidade. As oito misturas trabalham em um mesmo intervalo de valores, com exceção das misturas de CAP 30/45 Faixas B e C desta pesquisa, que apresentaram valores abaixo e acima do intervalo mencionado. Já Pasadín e Pérez (2013) verificaram a estabilidade de misturas de CAP 50/70 com agregado natural e com acréscimo de reciclado, e os valores obtidos foram altos, maiores do que os valores do intervalo mencionado anteriormente.

Após a determinação dos parâmetros volumétricos das misturas estudadas, foram realizados os ensaios com o Rice test para determinação da massa específica máxima medida (Gmm) das misturas asfálticas ensaiadas no teor ótimo, e conhecido o volume ocupado pelo ar na mistura, calculou-se a porcentagem de vazios para cada mistura ensaiada (Vv). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.13, onde se observa que os valores da massa específica máxima medida foram menores ou iguais aos calculados, com exceção dos CAPs 30/45 para Faixa B e AMP para as Faixas B e C. Com isso, os valores de volume de vazios também foram alterados, sendo que as misturas na Faixa B com CAP 30/45 e com AMP e na Faixa C com CAP 30/45 apresentaram valores de Vv superiores a 4%. As demais apresentaram valores de Vv inferiores a 4%.

Como a escolha do teor ótimo está relacionada ao volume de vazios de 4%, essa variação do volume de vazios real, obtido através do Rice Test, causa alteração no teor ótimo, levando a comportamento diferenciado dos parâmetros mecânicos e de desempenho.

Tabela 4.13: Massa específica máxima medida - Gmm e Volume de vazios – Vv

Parâmetro	FAIXA B			FAIXA C		
	30/45	50/70	AMP	30/45	50/70	AMP
Tipo de CAP	30/45	50/70	AMP	30/45	50/70	AMP
Gmm (g/cm ³)	2,546	2,560	2,551	2,550	2,524	2,527
Vv (%)	5,30	3,92	4,24	4,06	3,31	2,95

Obs.: CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo; AMP = Asfalto Modificado com Polímero; Gmm = Massa Específica Máxima Medida; Vv = Volume de Vazios.

4.4 ANÁLISE DOS AGREGADOS PELA METODOLOGIA SUPERPAVE

Após a análise dos parâmetros segundo a metodologia Marshall, fez-se um comparativo de alguns parâmetros sob a ótica da metodologia *Superpave*. Para atender a esses requisitos, a curva granulométrica dos agregados foi plotada num gráfico cujo eixo das abscissas foi representado pelo tamanho das peneiras em mm elevado à potência de 0,45 e o eixo das ordenadas representou a porcentagem passante nessas peneiras. Em seguida, foi plotada a linha de densidade máxima e os pontos de controle e zona de restrição, conforme apresentado na Figura 4.8 para a Faixa B e na Figura 4.9 para a Faixa C.

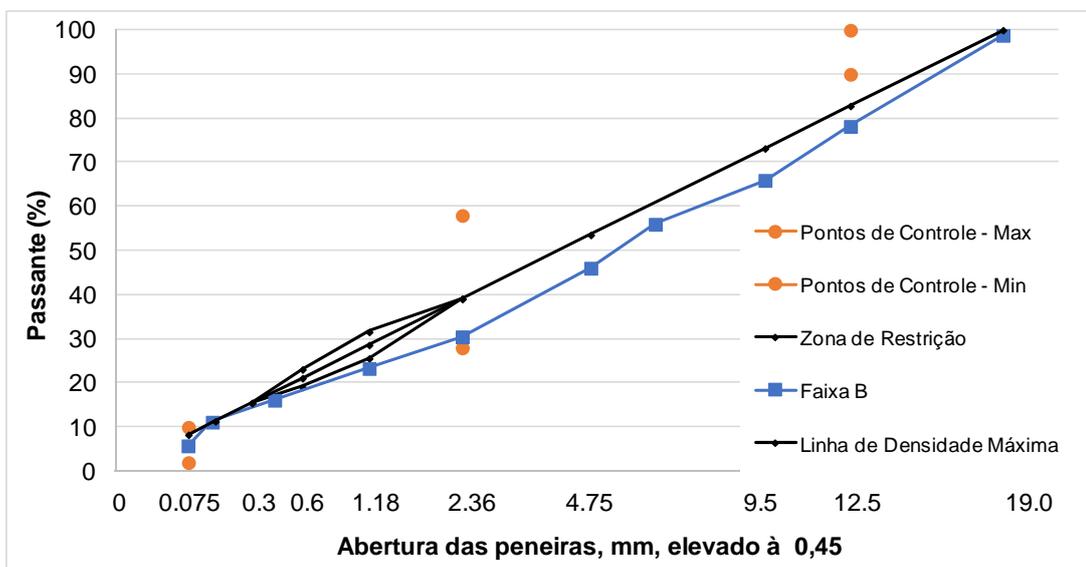
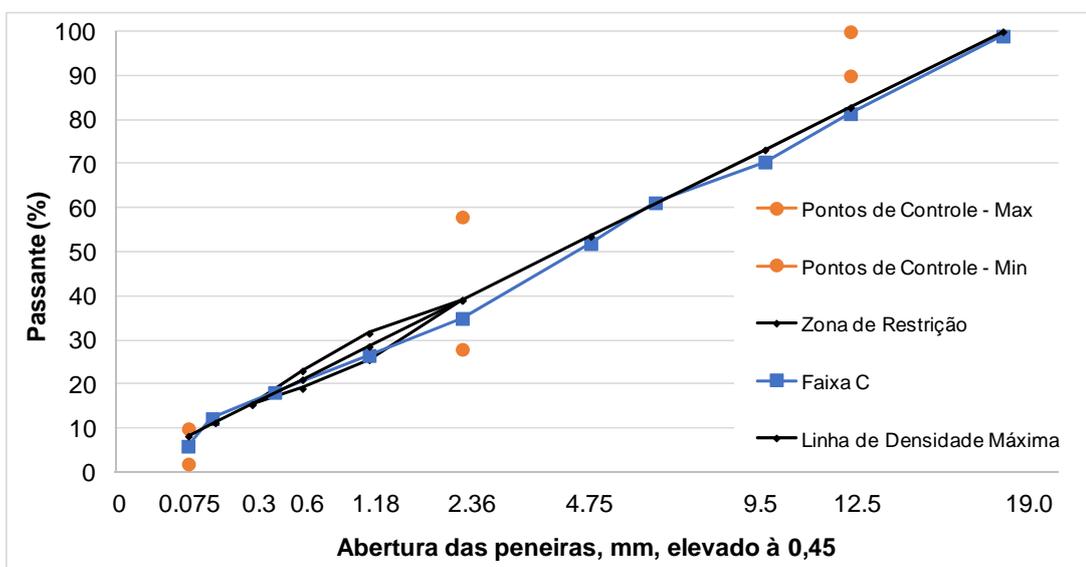
Figura 4.8: Curva Granulométrica da Mistura para Faixa B - *Superpave*

Figura 4.9: Curva Granulométrica da Mistura para Faixa C - *Superpave*

A linha de densidade máxima representa a granulometria em que os agregados se encaixam da forma mais compacta possível. Segundo o projeto *Superpave*, essa granulometria deve ser evitada, pois a distância entre os grãos seria tão pequena que não haveria espaço suficiente para formar um filme resistente de asfalto. Nesta pesquisa, as duas faixas estudadas atenderam a esse requisito.

As granulometrias propostas, para as duas faixas do DNIT, se localizaram fora dos pontos de controle da peneira 12,5. A Faixa B escapou da zona de restrição, se localizando abaixo da mesma, como recomendado pela metodologia *Superpave*, segundo Bernucci *et al.* (2006).

Já a Faixa C não escapou da zona de restrição e granulometrias que violam a zona de restrição possuem esqueleto pétreo frágil, o que gera grande dependência do ligante para obterem resistência ao cisalhamento. Dessa forma, o teor de ligante interfere de maneira significativa nessas misturas, que podem deformar facilmente (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo Gouveia (2002) a curva granulométrica deve evitar a zona restrita, para evitar um frágil comportamento de sua estrutura, devido a alta porcentagem de areia fina com relação à total, que geralmente apresenta baixo volume de agregados mineral (VAM), podendo comprometer sua vida útil.

Nesse caso, também possuem esqueleto pétreo frágil, sendo dependentes da rigidez do ligante para terem resistência ao cisalhamento. Misturas obtidas dessa forma apresentam muita

sensibilidade ao teor de ligante, podendo facilmente se deformar. No entanto, existem estudos mostrando que quando se utiliza pó de pedra, essa zona de restrição não se aplica (MOTTA *et al.*, 1996).

Segundo Medeiros (2009), diante de vários estudos realizados sobre a influência da ZR na característica das misturas, observou que a ZR é um fator que não apresenta muito efeito sobre o desempenho das misturas asfálticas. Ao passo que as características dos materiais utilizados, em especial os agregados, se constituem num fator preponderante no desempenho dessas misturas.

Além da análise da curva granulométrica, foram realizadas análises comparativas dos parâmetros obtidos verificando se os mesmos poderiam atender também a metodologia *Superpave*, para o Nível 1.

Com relação aos ensaios de propriedade de Consenso, de acordo com o equivalente de areia, observou-se que o teor de argila está dentro do aceitável para as especificações. Com relação aos ensaios das propriedades de Origem o resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles” também atendeu às especificações da metodologia *Superpave*.

Quanto aos requisitos volumétricos da mistura, foram especificados na norma MP2 (AASHTO, 2001) e constituem-se de:

- Vazios na Mistura (V_v): No *Superpave*, o teor de vazios de projeto na mistura é de 4%, valor que, com base nos dados obtidos na Tabela 4.13, foi atendido nas misturas com CAP 50/70 Faixa B e CAP 30/45 Faixa C, com desvio padrão de 0,1%. As demais misturas não atenderam a especificação;
- Vazios no Agregado Mineral (VAM): Para um projeto com 4% de V_v , o VAM é especificado em função do tamanho nominal máximo do agregado, conforme Tabela 4.14 (AASHTO, 2001), atendido para todas as misturas;
- Vazios Preenchidos com Asfalto (VFA ou RBV): Para um projeto com 4% de V_v , o RBV é especificado em função do volume de tráfego, que para este projeto foi de $7,0 \times 10^6$, conforme Tabela 4.15 (AASHTO, 2001). Todas as misturas apresentaram RBV acima do limite superior especificado.

Tabela 4.14: Recomendações *Superpave* para VAM (AASHTO, 2001)

Tamanho Nominal Máximo do Agregado (mm)	VAM mínimo (%)
38,1	13
25,4	14
19,1	15
12,7	16
9,5	18

Tabela 4.15: Recomendações *Superpave* para RBV (AASHTO, 2001)

Tráfego, ESALs	RBV de Projeto (%)
$< 3 \times 10^5$	70 – 80
$3 \times 10^5 < \text{ESAL} < 3 \times 10^6$	65 – 78
$> 3 \times 10^6$	65 – 75

4.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios que foram realizados em laboratório para determinação das propriedades mecânicas e de desempenho das misturas asfálticas em estudo.

4.5.1 Avaliação do Desgaste

Foram realizados, para as misturas no teor ótimo, análises de perda de massa por desgaste, no Ensaio Cantabro, segundo a norma ME 383 (DNER, 1999) e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.16. Foi possível observar uma tendência de diminuição da perda de massa com o aumento da porcentagem de ligante, com exceção da mistura com CAP 30/45 para a Faixa B. Esse comportamento se justifica uma vez que uma maior quantidade de ligante na mistura proporciona um maior recobrimento dos agregados. Pode-se observar também que as misturas mais rígidas sofreram maior desgaste, e que o uso de asfalto modificado favorece a adesividade em comparação aos ligantes convencionais. O desgaste máximo admitido é de 25%.

Tabela 4.16: Perda de massa por desgaste (P_d)

Faixa B				
CAP	Teor de Ligante (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	P _d (%)
30/45	5,2	1187,20	1046,20	11,88
50/70	4,8	1194,80	1082,50	9,41
AMP	5,2	1194,9	1115,00	6,68
Faixa C				
CAP	Teor de Ligante (%)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	P _d (%)
30/45	5,0	1189,90	1049,50	11,80
50/70	5,3	1193,40	1119,10	6,22
AMP	5,7	1192,10	1154,50	3,16

Obs.: CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo; M₁ = Massa da Amostra antes do ensaio; M₂ = Massa da Amostra após o ensaio; P_d = Perda de Massa por Desgaste.

4.5.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Com o teor de projeto definido para as seis misturas, sendo duas faixas granulométricas, B e C, misturadas com os três tipos de ligantes (CAP 30/45, 50/70 e AMP), foram moldados mais três corpos de prova para cada mistura proposta, que foram usados para o ensaio para determinação da resistência à tração (RT). Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabela 4.17 onde se constata melhor resultado para o CAP 30/45 para as duas faixas estudadas. No entanto, todas as misturas atenderam aos requisitos especificados pela norma ES 031 (DNIT, 2006a), com resistência à tração superior 0,65 MPa.

Tabela 4.17: Resistência à tração

FAIXA B					
CAP	D (mm)	H (mm)	F (kgf)	RT (MPa)	Desvio
30/45	61,86	101,94	14867,06	1,50	0,03
50/70	61,95	101,55	10697,81	1,09	0,03
AMP	61,32	101,57	9088,97	0,93	0,02
FAIXA C					
CAP	D (mm)	H (mm)	F (kgf)	RT (MPa)	Desvio
30/45	61,65	101,55	12252,69	1,25	0,09
50/70	61,77	101,41	10403,51	1,06	0,07
AMP	61,20	101,37	10653,66	1,09	0,03

Obs.: CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo; D = Diâmetro; H = Altura; F = Força Aplicada na Prensa Marshall; RT = Resistência à Tração.

Como um dos objetivos do estudo é apresentar o ligante mais apropriado a ser utilizado nos projetos, faz-se necessário pesquisar estudos relacionados ao tema, que seguem apresentados na Tabela 4.18. Constatou-se que os resultados apresentados nesta pesquisa seguem a

tendência apresentada em pesquisas anteriores, onde se tem que a mistura mais rígida apresenta melhores resultados de RT.

Tabela 4.18: Comparação de resultados de resistência à tração

Autores	CAP	Faixa	Teor de ligante (%)	RT (MPa)	Desvio
Soares <i>et al.</i> (1999)	30/45	C	5,8	1,09	0,07
	50/60	C	5,9	0,89	0,06
Soares <i>et al.</i> (2000)	30/45	B	5,2	0,82	0,03
	50/60	B	5,3	0,73	0,12
Vasconcelos, Soares e Leite (2003)	50/60	C	6,3	0,91	0,06
Aldigueri e Bernucci (2002)	30/45	C - AAUQ	9,0	1,39	-
	50/60		9,0	1,20	-
	AMP		9,0	0,98	-
ABCR (2008)	30/45	Faixa IV-b (Asphalt Institute)	5,0	1,77	-
	50/70		5,2	1,53	-
Ferreira, Bernucci e Moura (2004)	20	SMA	6,8	1,82	0,06
	AMP	SMA	6,6	1,10	0,05
Mourão (2003)	50/60	SMA	6,5	0,79	-
	AMP	SMA	6,5	0,90	-

Obs.: CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo; AMP = Asfalto Modificado com Polímero; Vv = Volume de Vazios; VAM = Vazios do Agregado Mineral; RBV = Relação Betume-Vazios; RCA = Agregado de Concreto Reciclado; SMA = *Stone Mastic Asphalt*.

4.5.3 Módulo de Resiliência

Para os ensaios de desempenho foi proposta uma comparação diferenciada para as misturas, visando maior objetividade dos resultados. Foi realizada a comparação de resultados entre as misturas com as Faixas B e C, dosadas no teor ótimo para o ligante mais comum, CAP 50/70, verificando qual apresentou melhor comportamento. E, posteriormente, foi realizada a comparação de resultados entre as misturas com a Faixa C (amplamente utilizada na região em estudo), dosadas no teor ótimo para os três ligantes propostos, CAP 30/45, CAP 50/70 e AMP, visando identificar qual mistura teria melhor comportamento, em relação ao ligante.

A Tabela 4.19 apresenta os valores de Módulo de Resiliência (MR), assim como RT e a razão MR/RT realizada para as misturas estudadas, bem como parâmetros obtidos em outros estudos para comparação. Bernucci *et al.* (2006) indicam a faixa de 2.000 a 8.000 MPa para valores típicos de MR encontrados para concretos asfálticos ensaiados na temperatura de 25°C, sendo que menores valores são obtidos para misturas com AMP e maiores valores para misturas com CAP mais consistentes, conforme resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 4.19: Resultados do ensaio de módulo de resiliência

Autores	CAP	Faixa	Teor de ligante (%)	H (mm)	D (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)	MR/RT
Esta Pesquisa	50/70	B	4,8	61,28	101,68	1,09	5113	4691
	30/45	C	5,0	60,88	101,68	1,25	8605	6884
	50/70	C	5,3	61,06	101,66	1,06	5723	5399
	AMP	C	5,7	60,85	101,57	1,09	4968	4557
Mourão (2003)	50/60	SMA	6,5%			0,79	2220	2810
	AMP	SMA	6,5%			0,90	2034	2260
Preussler (1983)	50/60	B	5,1%			0,70	3400	4857
	50/60	C	5,1%			0,86	3900	4535
ABCR (2008)	30/45	Faixa IV-b	5,0%			1,77	10250	5791
	50/70	(Asphalt Institute)	5,2%			1,53	7260	4745
Aldigueri e Bernucci (2002)	30/45		9,0%			1,39	2400	1727
	50/60	C - AAUQ	9,0%			1,20	2250	2708
	AMP		9,0%			0,98	2050	2092

Obs.: H = Altura; D = Diâmetro; RT = Resistência à Tração; MR = Módulo de Resiliência; SMA = *Stone Mastic Asphalt*.

Já com a relação MR/RT pode-se realizar uma avaliação preliminar da vida de fadiga, analisando rigidez e resistência em conjunto. Quanto menor o valor obtido para essa razão, melhor seria o comportamento da mistura (BOCK *et al.*, 2009). Nesta pesquisa, a menor relação MR/RT foi obtida para a mistura com AMP na Faixa C, seguida pelo CAP 50/70 Faixa B, CAP 50/70 Faixa C e CAP 30/45 Faixa C. Conclui-se que o CAP 30/45 para a Faixa C resultou em módulo resiliente muito alto, enrijecendo a mistura e podendo levar ao trincamento, fato que deve ser verificado em ensaios posteriores de vida de fadiga. A adição de polímeros ao ligante proporcionou melhor resultado para a mistura, favorecendo seu comportamento resiliente.

4.5.4 Deformação Permanente

Foram preparadas duas placas retangulares para cada uma das quatro misturas avaliadas, e o resultado foi a média entre os valores obtidos em cada placa. As misturas foram usinadas e compactadas, por amassamento, nas temperaturas estabelecidas anteriormente, e foram posteriormente, deixadas a temperatura ambiente para, então, serem levadas ao simulador de

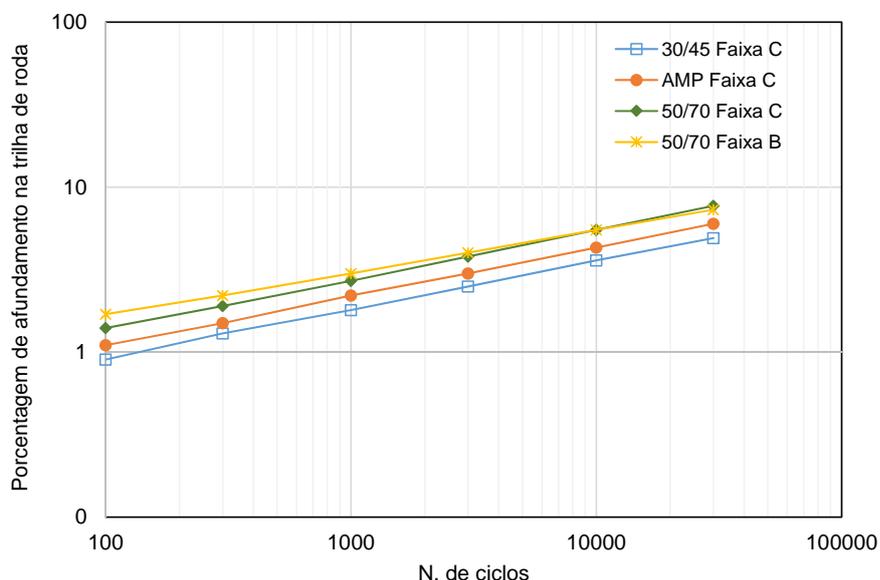
tráfego. Os ensaios foram realizados a 60°C e os resultados são apresentados na Tabela 4.20 e na Figura 4.10.

Verifica-se que, para esse parâmetro, a mistura executada com o CAP 30/45 na Faixa C apresentou o melhor resultado, seguida da mistura com AMP na mesma faixa. Nesse caso, esperar-se-ia melhor desempenho da mistura com AMP, mas isso provavelmente não ocorreu pelo maior teor de asfalto adotado na dosagem Marshall para o AMP. Já a mistura confeccionada com o CAP 50/70 nas duas faixas apresentou os maiores valores de deformação permanente. Assim, verifica-se que, para esse parâmetro, a mistura mais comum de ser usada a região de estudo para camada de rolamento (Faixa C com CAP 50/70) é a de pior desempenho.

Tabela 4.20: Deformação Permanente

Faixa	Misturas		Teor de Ligante (%)	Deformação Permanente (%)
	Ligante			
B	CAP 50/70		4,8	6,59
C	CAP 50/70		5,3	7,54
C	CAP 30/45		5,0	4,55
C	AMP		5,7	6,35

Figura 4.10: Deformação Permanente (%)



As diretrizes europeias, NF P 98-253-1 (AFNOR, 1993), que é a metodologia adotada pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP, limitam as deformações permanentes em 5% no simulador de tráfego francês tipo LCPC após 30.000 ciclos. Essa situação representa o caso de misturas asfálticas utilizadas como revestimento

para tráfego pesado, acima de 2000 veículos comerciais diários, com eixo traseiro carregado de no mínimo 5 toneladas. Ou seja, a norma europeia considera uma situação extrema.

As deformações obtidas para as misturas propostas neste trabalho não atenderam à especificação francesa, com exceção do CAP 30/45 para a Faixa C. Esse fato não precisa ser considerado relevante devido à condição padrão de projeto considerado neste estudo que estabelece um número de 240 veículos comerciais diários, número aquém do especificado na metodologia francesa.

ABCR (2008) apresentou resultados de deformação permanente para misturas com CAP 30/45 e 50/70, para a faixa IV-b, do *Asphalt Institute*. Os resultados também mostraram o padrão esperado de que as amostras com ligante mais rígido apresentam menor deformação permanente ao longo de sua vida útil (Tabela 4.21). Observa-se, ainda, que os valores de deformação permanente apresentados para essas misturas (4,61% e 7,41%) são semelhantes aos obtidos para as misturas com mesmo CAP na mesma faixa (4,55% e 7,54%) apresentados nesta pesquisa (Tabela 4.20). Esse fato induz ao pensamento de que mesmo que os agregados utilizados nos dois estudos sejam de origens diferentes, as misturas apresentaram o mesmo nível de deformação.

Motter, Miranda e Bernucci (2015) desenvolveram um trabalho com agregados reciclados misturados com CAP 50/70 na Faixa C, que apontaram que com o aumento da porcentagem de reciclados na mistura houve o aumento do teor de ligante, e os resultados de deformação permanente também segue essa tendência, conforme apresentado na Tabela 4.21. Verifica-se que os resultados de deformação permanente para misturas com RCA são muito bons, abaixo de 5% de deformação, mas tratam de amostras com propriedades de agregados diferentes.

Tabela 4.21: Resultados de deformação permanente para outros estudos

Autor	Mistura	Teor de Ligante (%)	Deformação Permanente (%)
ABCR (2008)	30/45 (Faixa IV-b)	5,0	4,61
	50/70 (Faixa IV-b)	5,2	7,41
Motter, Miranda e Bernucci (2015)	0% RCA (Faixa C)	4,9	5,20
	25% RCA (Faixa C)	6,0	4,30
	50% RCA (Faixa C)	6,2	4,60
	75% RCA (Faixa C)	6,4	4,60
	100% RCA (Faixa C)	6,9	9,20

Após a conclusão dos ensaios de deformação permanente em trilha de roda, as seções das placas que sofreram a ação do pneu do simulador foram cortadas e submetidas novamente à pesagem hidrostática para a determinação do volume de vazios. Os resultados dos volumes de vazios relacionados com as deformações permanentes de cada placa estão apresentados na Tabela 4.22, onde verifica-se a redução desse parâmetro.

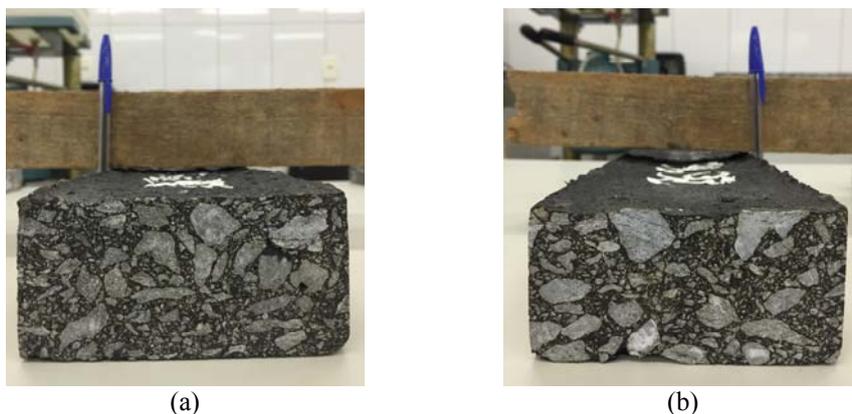
Tabela 4.22: Volume de vazios após o ensaio de deformação permanente

Misturas		Teor de Ligante (%)	Vv pré DP (%)	Vv pós DP (%)
Faixa	Ligante			
B	CAP 50/70	4,8	3,92	2,9
C	CAP 50/70	5,3	3,31	2,3
C	CAP 30/45	5,0	4,06	3,2
C	AMP	5,7	2,95	1,3

Obs.: Vv pré DP (%) = são os valores obtidos no RICE Test, ensaio para obtenção da Massa Específica Máxima Medida.

Nesse caso, se a redução de vazios corresponde à redução do volume, o afundamento é única e exclusivamente por consolidação (Figura 4.11a). Pode ocorrer também o afundamento por fluência, quando o afundamento é compensado por massa que se desloca e acumula nas bordas das placas, conforme Figura 4.11b. Para as misturas desta pesquisa, a deformação permanente ocorreu por consolidação nas misturas com CAP 30/45 Faixa C e CAP 50/70 Faixas B e C, e por fluência nas misturas com AMP Faixa C. Esse processo pode ter acontecido devido ao teor de ligante das misturas.

Figura 4.11: Placas ensaiadas na deformação permanente: (a) consolidação; (b) fluência.



Dessa forma, verifica-se que o tipo de ligante asfáltico CAP 50/70 apresentou resultados semelhantes para as Faixas B e C, sendo maior deformação para a Faixa C, que apresenta o maior teor de ligante entre essas misturas. Quanto ao comportamento das misturas da Faixa C,

o CAP 30/45 apresentou menor deformação, sendo inclusive inferior ao valor especificado pela metodologia francesa para tráfego pesado.

O AMP teve um comportamento diferente do esperado para deformação permanente, com resultado maior do que o obtido para o CAP 30/45, mesmo sendo aditivado com polímero. Provavelmente essa alteração de comportamento se deu por causa do alto teor de ligante, 5,7%, devido a presença de finos na mistura. Já o CAP 50/70 apresentou o pior resultado para deformação das misturas na Faixa C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo são apresentadas as conclusões e considerações para essa pesquisa, cujo objetivo foi a avaliação de misturas asfálticas a quente mais utilizadas no estado de Goiás. São também apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras que complementem este projeto.

5.1 CONCLUSÕES

Ao analisar as características dos agregados e dos ligantes selecionados para o estudo, verificou-se que os materiais atenderam as especificações brasileiras para serem usados na confecção de concretos asfálticos. No entanto, numa análise preliminar dos agregados sob a ótica da metodologia *Superpave*, verificou-se que a mistura dosada na Faixa C pode apresentar algum tipo de limitação em termos de deformação permanente.

Após a realização da dosagem Marshall para definição do teor ideal de ligante a ser acrescentado em cada mistura, constatou-se que para a Faixa B o CAP 50/70 seria o mais indicado de ser utilizado. Já para a Faixa C, as misturas confeccionadas com o CAP 30/45 apresentaram os melhores resultados. Ressalta-se a limitação dessa metodologia pela compactação por impacto dos corpos de prova ao invés do amassamento (compactador giratório) e pela não realização de ensaios para determinação de parâmetros mecânicos e de desempenho. Mesmo assim, os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que, para misturas asfálticas executadas com o micaxisto, em função da faixa granulométrica adotada, o CAP ideal a ser utilizado pode variar. No caso, ainda, da mistura produzida com agregado de micaxisto na Faixa C e com o CAP 50/70, comum de ser utilizada na região para camada de rolamento, os resultados obtidos nessa fase indicam que essa não seria a melhor escolha para ser utilizada na prática.

Outra questão que deve ser discutida nas práticas de dosagem na região, refere-se à determinação da densidade das misturas asfálticas. Os resultados obtidos comprovaram as diferenças entre a densidade máxima teórica estimada por meio de cálculos e a média por meio do ensaio de *Rice test*. Essas variações causam impacto no volume de vazios realmente existentes nas misturas e, conseqüentemente, geram erros na escolha dos teores ligante

asfáltico a serem utilizados no projeto. Dessa forma, obtêm-se concretos asfálticos dosados de forma errada, fato que poderá causar degradação prematura dos revestimentos.

Ao avaliar o desgaste das misturas asfálticas, observou-se, no geral, tendência da redução da perda de massa com o aumento da porcentagem de ligante. Esse comportamento é justificado pelo maior recobrimento dos agregados. Verificou-se, também, que as misturas mais rígidas apresentaram maior desgaste e que o uso de asfalto modificado favorece a adesividade em comparação aos ligantes convencionais.

Nesta pesquisa, como foi realizada uma análise comparativa entre os diversos tipos de ligante selecionados para o estudo, utilizou-se a relação entre o módulo resiliente e a resistência à tração por compressão diametral para ter um indicativo da vida de fadiga. Com os resultados obtidos, a melhor relação foi obtida para a mistura com AMP na Faixa C, seguida pelo CAP 50/70 na Faixa B, CAP 50/70 na Faixa C e CAP 30/45 na Faixa C. Conclui-se que o CAP 30/45 para a Faixa C resultou em módulo resiliente elevado, enrijecendo a mistura, o que pode causar trincamento. Esse fato deve ser verificado em ensaios específicos para determinação de vida de fadiga. Já a adição de polímeros ao ligante proporcionou melhor resultado para a mistura, favorecendo seu comportamento resiliente.

Com relação à deformação permanente, ao comparar as misturas com CAP 50/70, a confeccionada na Faixa B apresentou menor deformação para 30.000 ciclos, conforme o esperado. Analisando o comportamento dos ligantes para a Faixa C, tem-se que os CAPs 30/45 e 50/70 apresentaram a menor e maior deformação, respectivamente, resultados esperados devido à rigidez do ligante. O resultado obtido para a mistura com AMP não foi o esperado, já que apresentou resultado pior do que para a mistura com o CAP 30/45. Esse comportamento se deve ao fato do teor definido para essa mistura pela dosagem Marshall ser alto (5,7%). Isso pode ter ocorrido devido a limitações da metodologia de dosagem utilizada e pela presença de finos na granulometria. Seria interessante propor uma correção no teor de ligante para verificar a variação desse comportamento.

Verificou-se, também, que valores de deformação não atenderem a especificação da norma francesa, de 5% de deformação aos 30.000 ciclos. Essa constatação não invalida a utilização dessas misturas, uma vez que a norma europeia considera uma condição extrema de tráfego e que o equipamento utilizado para acelerar o processo de simulação de tráfego impõe

condições severas, o que pode gerar valores de deformação maiores do que as passíveis de acontecer em campo.

Por fim, ao comparar o comportamento das duas faixas granulométricas estudadas, conclui-se que revestimentos asfálticos dosados na Faixa B terão melhores desempenhos que aqueles dosados na Faixa C. Assim, a prática da região de se utilizar a Faixa C como camada de rolamento, principalmente, para vias de alto volume de tráfego, deve ser repensada.

Quanto aos ligantes asfálticos, se for usada a Faixa B, a incorporação do CAP 50/70 pode gerar misturas com desempenho satisfatório tanto em termos de fadiga como de deformação permanente. Já na Faixa C, o uso do CAP 50/70 apresentou limitações tanto para a fadiga como para a deformação permanente, podendo ser indicada, nesse caso, a utilização de AMP.

Assim, o estudo laboratorial realizado nesta dissertação apresenta fortes indícios de que a prática existente na região com relação à escolha da faixa granulométrica e do tipo de ligante asfáltico, bem como a metodologia de dosagem dessas misturas, deve ser revista para que se possa garantir a durabilidade dos concretos asfálticos utilizados nas obras de pavimentação.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

- Realizar ensaios laboratoriais para corrigir os teores ideais de ligante asfálticos a serem incorporados nas misturas, baseado nos dados obtidos no Rice Test;
- Realizar ensaios laboratoriais que contemplem a metodologia *Superpave*;
- Confeccionar corpos de prova com compactação giratória para verificar o impacto no comportamento;
- Realizar ensaios específicos para análise de fadiga;

- Desenvolver análises numéricas que considerem seções usuais de pavimentos executados na região e que suportem a carga proposta, para verificar o comportamento das misturas asfálticas;
- Coletar amostras de misturas asfálticas em obras de rodovias ou em pavimentos urbanos para a realização de ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T 104:** *Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.* EUA, 1993a.

AASHTO _____. **T 112:** *Standard Method of Test for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregate.* EUA, 1993b.

AASHTO _____. **T 96:** *Standard Method of Test for Los Angeles Abrasion.* EUA, 1994.

AASHTO _____. **MP 2:** *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design.* EUA, 2001.

AASHTO _____. **T 304:** *Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate.* EUA, 2008.

AASHTO _____. **TP 62-07:** *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA).* EUA, 2009.

ABCR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS.

Relatório Técnico: Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação. Imperpav Engenharia S/C Ltda. São Paulo, 2004. 144p.

ABCR _____. **Relatório Técnico:** CAP 30-45 e CAP 50-70 sua utilização em revestimentos asfálticos - Estudo comparativo. Imperpav Projetos e Consultoria. São Paulo, 2008. 160p.

ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia:** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998. 534p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001a. 6p.

ABNT _____. **NBR 14756:** Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro, 2001b, 11p.

ABNT _____. **NBR 6293:** Materiais betuminosos – Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2001c, 6p.

ABNT _____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001d, 7p.

ABNT _____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001e, 5p.

ABNT _____. **NBR 15184:** Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004, 4p.

ABNT _____. **NBR 15086:** Misturas asfálticas – Determinação da recuperação elástica pelo dutilômetro. Rio de Janeiro, 2006, 4p.

ABNT _____. **NBR 6576:** Materiais asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007, 7p.

ABNT _____. **NBR 6560:** Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Versão Corrigida. Rio de Janeiro, 2008a 6p.

ABNT _____. **NBR 11341:** Derivados de Petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2008b, 15p.

ABNT _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009a, 6p.

ABNT _____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b, 8p.

ABNT _____. **NBR 6296:** Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012a, 6p.

ABNT _____. **NBR 15087:** Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012b, 5p.

AFNOR - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. NF P 98-260-2: Essais Relatifs aux Chaussés – Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale. França, 1992.

AFNOR _____. NF P 98-253-1: Essais Relatifs aux Chaussés – Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d’Orniérage. França, 1993.

AFNOR _____. NF P 98-250-2: Essais Relatifs aux Chaussés – Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques. França, 1997.

AFNOR _____. NF EN 12697-24+A1: Mélanges Bitumineux – Méthodes d’essai pour Mélange Hydrocarboné à Chaud,, Partie 24: Résistance à la Fatigue. França, 2007.

AGETOP - AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. **Relatório Técnico - Projeto Executivo da Rodovia GO-409:** Estudo de Tráfego. Goiás, 2014.

ALDIGUERI, D. R.; BERNUCCI, L. B. Desempenho de misturas de areia asfalto usinadas à quente com o uso de ligantes mais consistentes. **Transportes.** Brasil, 2002. 17p.

AL-SUGAIR, F. H.; ALMUDAIHEEM, J. A. *Variations in Measured Resilient Modulus of Asphalt Mixes.* **Journal of Materials in Civil Engineering.** 1992.

AMARAL, S. C. **Estudos de Misturas asfálticas densas com agregados do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS**

(**BETUFLEX B65/60**). Dissertação (Mestrado em Transportes): Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP – nº 19 de 11/07/2005. Anexo 1: Regulamento Técnico nº3/2005**: Retificada Diário Oficial da União. Brasília, 2005.

ANP _____. **Resolução ANP – nº 31 de 09/10/2007. Anexo 1, Regulamento Técnico nº3/2007**: Diário Oficial da União 2007. Brasília, 2007.

ARAUJO, M. F. A. S.; LEITE, L. F. M.; PASA, V. M. D.; LINS, V. F. C. *Rheological and thermal behavior of weathering-aged polymer modified bitumen*. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**. Brazil, v.7, n.4, 2014.

ASPHALT INSTITUTE. **Series nº 2 (SP-2): Asphalt Institute Superpave Series. The Superpave Mix Design**. USA, 1996.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate**. EUA, 2002.

ASTM _____. **D 3497: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures**. EUA, 2003.

ASTM _____. **D 4791: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate**. EUA, 2005.

ASTM _____. **D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. EUA, 2011.

AZARI, H.; MOHSENI, A. *Effect of short-term conditioning and long-term ageing on permanent deformation characteristics of asphalt mixtures*. **Road Materials and Pavement Design**, 2013. v.14, n. 2, p. 79-91.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. *Fatigue behavior of dense asphalt mixes in dry and environmental-conditioning states*. **Construction and Building Materials**: 2012 7p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**: Petrobrás: ABEDA, Rio de Janeiro, 2006. 475p.

BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. *Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations*. **Construction and Building Materials**, 2012.

BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; NOGUEIRO NETO, J.A. *Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2014.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. n. 14, p. 56-69. 2009.

CAVALCANTI, L. S.; FARIA, V. C.; ODA, S.; BARELLA, R. M. Determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes asfálticos e agregados. *In: 8ª CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS & CONCESSÕES - BRASVIAS*. São Paulo. Santos, 2013a. 13p.

CAVALCANTI, L. S.; FARIA, V. C.; ODA, S.; BARELLA, R. M.; ARAO, M.; KLINSKY, L. M. G. Determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas empregando dois métodos de ensaios: ruptura com velocidade controlada e viga apoiada em quatro pontos. *In: 42ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 16º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA*. 2013, Rio Grande do Sul. Gramado. 2013b. 12p.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico. São Paulo: **Oficina de Textos**; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011. 106p.

CHEN, J.; LIAO, M. *Evaluation of internal resistance in hot-mix asphalt (HMA) concrete, Construction and Building Materials*. 2002. 7p.

CHEN, X.; XU, Z. *Effects of Load and Temperature on Permanent Deformation Properties of HMA*. *ASCE. Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation*, 2009. p. 49-55.

CHENG, D.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R.L.; HOLSTE, J.C. *Surface Energy Measurements of Asphalt and its Application to Predicting Fatigue and Healing in Asphalt Mixtures*. *In: 81ST ANNUAL MEETING, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, Washington, D.C. 2002.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2014**, CNT, SEST, SENAT. Brasília, 2014. 388p.

COELHO Jr., M. L. P.; ROCHA, P. H. T. **Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia**. 2013. 83p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2013.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R.; LEE, H. J. *Effects of aging on viscoelastic properties of asphalt-aggregate mixtures*. *Transportation Research Record*. Washington, 1998. n 1630, p. 21-7.

DE MORAES, M. B.; PEREIRA, R. B.; SIMÃO, R. A.; LEITE, L. F. M. *High temperature AFM study of CAP 30/45 pen grade bitumen*. *Journal of Microscopy*. 2010. 239. 1. p. 46-53.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 086: Agregado – Determinação do Índice de Forma**. Rio de Janeiro, 1994a. 5p.

DNER _____ **ME 078:** Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994b. 3p.

DNER _____ **ME 133:** Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 1994c 5p.

DNER _____ **ME 084:** Agregado Miúdo – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995a, 3p.

DNER _____ **ME 043:** Misturas Betuminosas à quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995b, 11p.

DNER _____ **PRO 199:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio em laboratório. Rio de Janeiro. 1996.

DNER _____ **ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997a, 10p.

DNER _____ **ES 313:** Pavimentação – Concreto Betuminoso. Rio de Janeiro, 1997b, 16p.

DNER _____ **PRO 120:** Coleta de amostras de agregados. Rio de Janeiro. 1997c.

DNER _____ **ME 083:** Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a, 5p.

DNER _____ **ME 081:** Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b, 6p.

DNER _____ **ME 035:** Índice de forma. Rio de Janeiro, 1998c, 10p.

DNER _____ **ME 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999, 02p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
ES 031 – Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

DNIT _____ **Manual de Estudos de Tráfego.** Rio de Janeiro. 2006b.

DNIT _____ **Manual de Projeto e Práticas Operacionais para segurança nas rodovias.** Rio de Janeiro, 2010a.

DNIT _____ **ME 136:** Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas. Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2010b.

FERREIRA, P. N; BERNUCI, L. L. B; MOURA, E. – Avaliação da Deformação Permanente e redução da Macrotextura de revestimentos asfálticos Delgados Tipo SMA 0/5. *In: XVIII ANPET CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES.* 2004. Florianópolis, SC. v.1 p. 210-220.

GAO, Y.; HUANG, X.; QI, Z.; ZHANG, J. *Characteristics and Prediction of Permanent Deformation in HMA. ASCE. Performance Modeling and Evaluation of Pavement Systems and Materials,* 2009. p. 136-142.

GOUVEIA, L. T. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação Superpave.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. 165 fl.

GUSMÃO, M. **Restauração rodoviária usando asfalto modificado por polímero.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009. 189 fl.

HARMAN, T.; BUKOWSKI, J.R.; MOUTIER, F.; HUBER, G.; MCGENNIS, R. *The history and future challenges of gyratory compaction 1939 to 2001. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, 81. Washington, 2002.

KHAN, Z. A.; WAHAB, H. I. A.; ASI, I. RAMADHAN, R. *Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. Construction and Building Materials*: 1998. 11p.

LOPES, M. M. **Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010. 176 fl.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003. 113 fl.

LUCENA, M. C. C.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. Efeito da adição de SBS nas propriedades químicas e reológicas de asfalto oriundo de petróleo brasileiro. *In: 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS*. 2005. 6p.

MEDEIROS, D. F. **Influência da granulometria nas características mecânicas de misturas asfálticas para aeródromos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Engenharia Civil, Campina Grande, 2009. 78 fl.

MORILHA, Jr. A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. 165 p.

MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. M.; CONSTANTINO, R. S. Princípios do Projeto e Análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas. Tradução comentada. **Instituto Brasileiro de Petróleo - IBP**, 1996.

MOTTER, J. S.; MIRANDA, L. F. R.; BERNUCCI, L. L. B. *Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003. 151 p.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação (Mestrado) –

Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008. 227 p.

PASADÍN, A.R.; PÉREZ, I. *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containig construction and demolition waste. Construction and Building Materials*. 2013. p. 497-505.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à fadiga de misturas betuminosas e Aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2000.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1983

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

ROWE, G. M.; PELLINEN, T. K. *Consideration of elastic and viscous componentes of rheology relating to the permanente deformation of hot mix asphalt pavement. Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems ASCE*, 2003. p. 65-82.

SCHWAB, K. SALA-I-MARTÍN, X. BRENDE, B. **The Global Competitiveness Report 2013–2014: Full Data Edition. World Economic Forum within the framework of The Global Competitiveness and Benchmarking Network**. Geneva, 2014.

SILVA, P. B. **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 158 p.

SILVEIRA, M. A. **Estudo sobre adição de polímero em areia-asfalto a frio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999. 98 p.

SOARES, J. B.; LEITE, L. M.; MOTTA, L. M.; BRANCO, J. V. C. Efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. *In: XIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, ANPET*. São Carlos. v. 1, 115-125. 1999.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G.; PAIVA, J. A.; BRANCO, J. V. C. Propriedades mecânicas de misturas asfálticas com variação de granulometria e de CAP. **Anais do 15º Encontro de Asfalto**. 2000. 10p.

SOUZA, F. V.; SOARES, J.B. **Previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas a partir dos resultados do ensaio de creep estático**. Brasília, 2003.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. 280p.

SPECHT, L. P.; HIRSCH, F.; ROZEK, T. M.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial da adesividade de misturas asfálticas preparadas com ligante convencional e modificado considerando o teor de filler e a forma do agregado. *In: 37ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*. Goiânia, 2006.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas. *In: XVII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, ANPET*. 2003. P. 5-17.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E.; SANBONSUGE, K.; CHAVES, J. M. Caracterização mecânica de misturas asfálticas contínuas e descontínuas com diferentes ligantes asfálticos. *In: 8ª CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS & CONCESSÕES - BRASVIAS*. 2013, Santos, São Paulo, 2013. 13p.

ANEXO A – CERTIFICADOS DE QUALIDADE

Nas Tabelas A.1 a A.3 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos cimentos asfálticos realizados pela Petrobrás e pela distribuidora.

Tabela A.1: Dados de Ensaio – CAP 30/45

BR PETROBRAS	Número: 1778-14 G
CÓPIA	
CERTIFICADO DE ENSAIO	
Produto: CIMENTO ASFALTICO 30/45	Código: 71J
Local de Amostragem: TQ 2704906	Laboratório UN-REPLAN/OT/QP
Data/ hora Amostragem: 16/06/14 09:00	Endereço: Rod SP 332 Km 132
Data/ hora Recebimento: 16/06/14 10:11	Paulínia - SP
	Telefone: (19) 2116-6868 Fax: (19) 2116-6816

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	30 a 45	36	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	52 min	54,0	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	374 min	475	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	203 min	228	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	76 a 285	80	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	60 min	64	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	3,9	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	10 min	>140	cm
RTFOT VARIAÇÃO EM % MASSA	D 2872	0,5 max	-0,071	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>140	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	342	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,0	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,009	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A

Notas:
 (1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.
 (2) NESP = Nao espuma
 - Este certificado foi originalmente gerado em formato digital e assinado eletronicamente pelo responsável.

Data de Emissão: 16/06/2014 22:39:33	Página: 1 de 1
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.	

Certificado assinado eletronicamente pelo responsável: Moacir Táparo CRQ: 04.359.306

Tabela A.2: Dados de Ensaio – CAP 50/70

BR PETROBRAS		Número: 3105-14 G		
		CÓPIA		
CERTIFICADO DE ENSAIO				
Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70		Código: 71K		
Local de Amostragem: TQ 25096E		Laboratório: REGAP/OT/QP		
Data/ hora Amostragem: 26/10/14 18:50		Endereço: Rodovia Fernão Dias Km 427		
Data/ hora Recebimento: 26/10/14 20:21		Betim/MG		
		Telefone:(0XX31) 3529-4420 Fax: (0XX31) 3529-4151		
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	55	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	49,8	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min	318	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	162	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	61	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min	66	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	4,0	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,038	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>150	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	338	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,0	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,004	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A
Notas:				
(1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.				
(2) NESP = Nao espuma				
Data de Emissão: 27/10/2014 02:38:43		Página: 1 de 1		
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.				
Original Assinado Por:				
Responsável:				
Elisa Mara Silva Moraes de Oliveira				
CRQ: N° 02202821				

Tabela A.3: Dados de Ensaio - AMP



Rua São Judas Tadeu, 288 - Distrito Industrial
 CEP 32.450-000 - Sarzedo (MG)
 Fone: (31) 3577-0450 e Fax: (31) 3577-0451
 Autorização ANP nº 374 de 04/10/2005
 industria.sarzedo@disbral.com.br
 www.disbral.com.br

CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº 1691-2014

Versão: 01/08/2011

Dados do Carregamento	
Tipo de Produto:	CAP 60/85-E
Peso Líquido (kg):	29,440
Placa Cavalos/Veículo:	OGI-0763
Placa Carreta:	NGV-3371
Numeração da Fiscal:	44,251
Numeração da Contra Prova:	6,409
Numeração Lacres:	23046-23043-23060
Cliente:	CONSORCIO CCM/EHL/FERFRANCO/FRANCA SIMOES
Responsável Químico:	AFRANIO DA MATA FERREIRA JUNIOR
Destino:	MORAES DE ALMEIDA - PA
Observações:	
Data do Ensaio: 29/10/2014	

Expressão dos Resultados dos Ensaios				
Característica (Tipo de Ensaio)	Método Ensaio	Unidade Medida	Resultado Ensaio	Limite Especificado
Pontragação (100g, 5s, 25°C)	ABNT NBR 06576	mm	66	40 - 70
Ponto de Amolecimento, mín.	ABNT NBR 06560	°C	65	60
Viscosidade Brookfield 135°C, Spindle 21, 20rpm, máx.	ABNT NBR 15184	cP	1,896	3,000
Viscosidade Brookfield 150°C, Spindle 21, 50rpm, máx.	ABNT NBR 15184	cP	828	2,000
Viscosidade Brookfield 177°C, Spindle 21, 100rpm, máx.	ABNT NBR 15184	cP	268	1,000
Ponto de Fulgor, mín.	ABNT NBR 11341	°C	308	235
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín.	ABNT NBR 15086	%	87.00	85

Recomendações Gerais
<p>1) A especificação do Cimento Asfáltico Modificado por Polímero, foi estabelecida pelo Regulamento Técnico ANP nº 04/2010, aprovado pela RESOLUÇÃO ANP nº 32, de 21/09/2010.</p> <p>2) A temperatura limite de aquecimento do Cimento Asfáltico Modificado por Polímero é de 175°C;</p> <p>3) A temperatura ideal do Cimento Asfáltico Modificado por Polímero na usinagem do CAUQ é de 160°C (+/- 5°C);</p> <p>4) A temperatura de descarga deve estar entre 140 e 170°C;</p> <p>5) No recebimento do produto, fazer a conferência dos lacres da Carreta Tanque.</p>

Químico Responsável	LABORATORISTA
Afranio da Mata F. Junior CRQ nº 02102813 - 2ª Região	DJALMA XAVIER DURÃES CRQ IV Nº 004450218