

NATALIA ASSUNÇÃO BRASIL SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
BETUMINOSAS A FRIO E A QUENTE MODIFICADAS POR
LIGANTES POLIMÉRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal
de Viçosa - Campus Viçosa**

T Silva, Natália Assunção Brasil, 1990-
 Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a
 frio e a quente modificadas por ligantes poliméricos / Natália Assunção
 Brasil Silva. Viçosa, MG, 2016.
S586e xv, 81f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.
2016

Inclui anexo.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.72-80.

1. Materiais betuminosos Testes. 2. Polímeros. 3. Pavimentos de
asfalto . I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. II.
Título.

CDD 22. ed. 625.85

NATALIA ASSUNÇÃO BRASIL SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
BETUMINOSAS A FRIO E A QUENTE MODIFICADAS POR
LIGANTES POLIMÉRICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 18 de fevereiro de 2016.

Geraldo Luciano de Oliveira Marques
(Coorientador)

Heraldo Nunes Pitanga
(Coorientador)

Giovani Levi Sant Anna

Taciano Oliveira da Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por ter iluminado a minha vida e guiado meus passos, nunca me desamparando, dando força, paciência, perseverança, sabedoria e saúde.

À minha mãe, Marinete, que sempre me acompanhou com paciência, coragem, sendo meu conforto e apoio em todos os momentos da minha vida, sem ela eu não teria chegado até aqui.

À Universidade Federal de Viçosa, sempre linda e tranquilizadora na simplicidade das suas flores e pássaros, e receptível a todos que não têm medo de tentar.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Carlos Alexandre, pela oportunidade e por ter transmitido, de maneira única e de forma sábia, com muita presteza, o conhecimento na linha de pesquisa deste trabalho, tanto como meu professor na graduação e na pós graduação.

Ao Dario, pela disposição em todos os momentos, apresentando-se sempre solícito para solucionar eventuais questionamentos, além de incentivador.

Ao Taciano, pela orientação, saber, oportunidade, alegria, altivez, paciência e amizade.

Ao Heraldo, pela orientação, disponibilidade, conhecimento e, sempre quando solicitado, por se apresentar de forma pontual e exemplar.

Ao Geraldo Luciano e à Universidade Federal de Juiz de Fora, pela orientação e pela realização do ensaio mecânico de módulo de resiliência.

À Cilene sempre presente disposta a ajudar.

Ao Giovani, Julinho, Paulo P3, Leonício (Dedê), Laura, Altair, Bernardo, Eduardo, Guilherme, Paulo Borges e ao Reyner, por ter colaborado de alguma forma com esta pesquisa, seja pela amizade, bom humor, conselho efetivo na produção ou suporte na realização dos ensaios.

À vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificativas	2
1.3 Objetivos da pesquisa.....	3
1.3.1 Objetivo principal.....	3
1.3.2 Objetivos secundários	3
1.4 Organização do trabalho.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Ligantes Asfálticos	5
2.1.1 Cimento asfáltico de petróleo.....	5
2.1.2 Emulsão asfáltica de petróleo.....	6
2.2 Ligantes Asfálticos Modificados.....	8
2.2.1 Considerações iniciais	8
2.2.2 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros	10
2.3 Agregados.....	13
2.4 Misturas Betuminosas	19
2.4.1 Misturas betuminosas a quente	19
2.4.2 Pré misturado a frio	20
2.5 Dosagem Marshall.....	21
2.6 Ensaio Mecânicos	23
2.6.1 Considerações iniciais	23
2.6.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	24
2.6.3 Módulos de Resiliência de Misturas Betuminosas.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Introdução.....	28

3.2 Materiais.....	28
3.2.1 Agregados.....	28
3.2.2 Ligantes Asfálticos.....	28
3.3 Métodos.....	29
3.3.1 Considerações iniciais.....	29
3.3.2 Realização de ensaios para caracterização dos agregados.....	29
3.3.3 Realização de ensaios para caracterização dos ligantes asfálticos.....	30
3.3.4 Composição das faixas granulométricas das misturas a quente e a frio.....	30
3.3.5 Método de dosagem Marshall para misturas betuminosas a quente.....	30
3.3.6 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações para misturas betuminosas a quente.....	34
3.3.7 Método de dosagem Marshall para pré misturados a frio.....	35
3.3.8 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações para pré misturados a frio.....	36
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	38
4.1 Resultados de caracterização dos agregados.....	38
4.2 Resultados da caracterização dos ligantes.....	41
4.2.1 Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS.....	41
4.2.2 Emulsão asfáltica catiônica especial, de ruptura controlada, modificada com polímeros.....	42
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE MODIFICADAS POR LIGANTE POLIMÉRICO.....	43
5.1 Composição das faixas granulométricas.....	43
5.2 Dosagem Marshall.....	45
5.3 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações.....	47
5.4 Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	52
5.5 Resultados do ensaio de determinação do módulo de resiliência.....	54
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PRÉ MISTURADOS A FRIO MODIFICADOS POR LIGANTE POLIMÉRICO.....	56

6.1 Composição das faixas granulométricas	56
6.2 Dosagem Marshall.....	57
6.3 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações.....	61
6.4 Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	66
6.5 Resultados do ensaio de determinação do módulo de resiliência	67
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	69
7.1 Considerações Finais.....	69
7.2 Sugestões	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
ANEXO.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura das emulsões asfálticas em diferentes estágios.	7
Figura 2 - Alternativas de asfalto modificado por polímeros.	12
Figura 3 - Ilustração da análise granulométrica por peneiramento.	14
Figura 4 - Representação convencional de curvas granulométricas.	15
Figura 5 - Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica real. ...	18
Figura 6- Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica aparente	18
Figura 7- Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica efetiva.	19
Figura 8 - Esquema do ensaio de compressão diametral.	25
Figura 9 - Equipamento pra ensaio de compressão diametral de carga repetida.	27
Figura 10 - Equipamento Marshall do Laboratório de Asfalto e Misturas da UFV.	32
Figura 11 - Adesividade do agregado ao cimento asfáltico modificado por polímeros.	40
Figura 12 - Adesividade do agregado ao cimento asfáltico modificado com polímeros por adição de Betudope.	41
Figura 13 - Equipamento e resultado do ensaio de penetração realizado segundo a ME 155 (DNIT, 2010c).	41
Figura 14 - Ensaio peneiração da emulsão asfáltica utilizada na pesquisa.	42
Figura 15 - Apresentação da montagem do ensaio de carga de partícula e o resultado deste realizado no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas da UFV.	42
Figura 16 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica B da ES 385 (DNER, 1999a) e curva granulométrica de projeto.	44
Figura 17 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica C da ES 385 (DNER, 1999a) e curva granulométrica de projeto.	44
Figura 18- Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B em função do teor de ligante asfáltico.	46
Figura 19 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C em função do teor de ligante asfáltico.	47
Figura 20 - Escolha do teor de projeto para mistura asfáltica da faixa granulométrica B.	48
Figura 21 - Escolha do teor de projeto para mistura asfáltica da faixa granulométrica C.	48
Figura 22 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para as misturas da faixa B em função do teor de projeto e suas tolerâncias.	51

Figura 23 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para as misturas da faixa C em função do teor de projeto e suas tolerâncias.	52
Figura 24 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica B da ES 390 (DNER, 1999b) e curva granulométrica de projeto.	57
Figura 25 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica C da ES 390 (DNER, 1999b) e curva granulométrica de projeto.	57
Figura 26 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B em função do teor de ligante asfáltico.	59
Figura 27 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C em função do teor de ligante asfáltico.	60
Figura 28 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para pré misturado a frio da faixa B em função do teor de projeto e suas tolerâncias.	63
Figura 29 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para pré misturado a frio da faixa C em função do teor de projeto e suas tolerâncias.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos.....	9
Tabela 2 - Características do cimento asfáltico modificado por polímero empregado na pesquisa.	29
Tabela 3 – Características da emulsão asfáltica polimérica empregada na pesquisa.	29
Tabela 4 - Ensaio de caracterização dos agregados	30
Tabela 5 - Ensaio de caracterização dos ligantes asfálticos.....	30
Tabela 6 - Limites inferior e superior das faixas granulométricas B e C da ES 385 (DNER, 1999a).	31
Tabela 7 - Limites inferior e superior das faixas granulométricas B e C da ES 390 (DNER, 1999b).	31
Tabela 8 – Limites dos parâmetros Marshall ES 385 (DNER, 1999a).....	34
Tabela 9 - Critérios para verificação de vazios, estabilidade e fluência.....	36
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	38
Tabela 11 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa B da ES 385 (DNER, 1999a).	38
Tabela 12 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa C da ES 385 (DNER, 1999a).	39
Tabela 13- Análise granulométrica dos agregados para a faixa B da ES 390 (DNER, 1999b).	39
Tabela 14 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa C da ES 390 (DNER, 1999b).	39
Tabela 15 - Critérios para verificação da abrasão “Los Angeles” e do Índice de Forma.	39
Tabela 16 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica B.	43
Tabela 17 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica C.	43
Tabela 18 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa B.	45
Tabela 19 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa C.	45
Tabela 20 - Teor de projeto para mistura da faixa B.	49
Tabela 21 - Teor de projeto para mistura da faixa C.	49

Tabela 22 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B no teor de projeto e suas proximidades com BETUFLEX 60/85.	50
Tabela 23 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C no teor de projeto e suas proximidades com BETUFLEX 60/85.	50
Tabela 24 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa B. .	53
Tabela 25 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa C. .	53
Tabela 26 - Comparativo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral entre as respectivas misturas asfálticas investigadas por Amaral (2000) e por essa pesquisa. .	54
Tabela 27 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa B.	54
Tabela 28 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa C.	54
Tabela 29 - Comparativo dos resultados de módulo de resiliência entre as respectivas misturas asfálticas investigadas por Amaral (2000) e por essa pesquisa.	55
Tabela 30- Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica B.	56
Tabela 31 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica C.	56
Tabela 32 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa B.	58
Tabela 33 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa C.	58
Tabela 34 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B no teor de projeto e suas tolerâncias.	62
Tabela 35 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C no teor de projeto e suas tolerâncias.	62
Tabela 36 - Teores de emulsão asfáltica e água para umedecimento.	65
Tabela 37 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa B. .	66
Tabela 38 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa C. .	66
Tabela 39 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa B.	67
Tabela 40 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa C.	67
Tabela 41 - Resultados de estabilidade e fluência dos pré misturados a frio da faixa granulométrica B.	81
Tabela 42 - Resultados de estabilidade e fluência dos pré misturados a frio da faixa granulométrica C.	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	Agregado Graúdo
Am	Agregado Miúdo
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BETUFLEX	Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Polímero do Tipo SBS
BMP	Borracha Moída de Pneus
C	Celsius
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
Cm	Centímetro
CPA	Camada Porosa de Atrito
D	Diâmetro do Corpo de Prova
Da	Densidade Aparente da Mistura
Db	Densidade da Massa do Material Betuminoso
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
Drag	Densidade Real da Massa dos Grãos de Agregado Graúdo
Dram	Densidade Real da Massa dos Grãos de Agregado Miúdo
Drf	Densidade Real da Massa dos Grãos do Fíler
Drm	Densidade Real de Massa Média dos Grãos ou Fragmentos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Dt	Densidade Teórica
E	Estabilidade Marshall
E'	Módulo de Elasticidade
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EM	Especificação do Material
EMULEX	Emulsão Asfáltica Modificada com Polímeros
EUA	Estados Unidos da América

ES	Especificação de Serviço
EVA	Poliacetato de etil vinila
%f	Porcentagem de Fíler
F	Índice de forma
F	Fluência
F ¹	Carga de ruptura
F'	Carga aplicada inferior à carga de ruptura
H	Altura
Kgf	Quilograma força
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
Máx.	Máxima
ME	Método de Ensaio
MEA	Massa Especifica Aparente
MG	Minas Gerais
Mín.	Mínimo
Mm	Milímetro
MR	Módulo de Resiliência
PMF	Pré Misturado a Frio
PMFD	Pré Misturado a Frio Denso
RBV	Relação Betume Vazios
RET	Reactive Elastomeric Terpolymer
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
Rpm	Rotações por Minuto
RT	Resistência à Tração
PVC	Policloreto de vinila
SBR	Borracha de estireno butadieno
SBS	Estireno-butadieno-estireno
S/A	Sociedade Anônima
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Matrix Asphalt
SSF	Saybolt-Furol

T	Temperatura
UFV	Universidade Federal de Viçosa
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VCB	Vazios com Betume
V_v	Volume de vazios
ϵ_t	Deformação Específica Recuperável
σ_c	Máxima Tensão de Compressão
σ_t	Máxima Tensão de tração
μ	Coefficiente de Poisson

RESUMO

SILVA, Natalia Assunção Brasil, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente modificadas por ligantes poliméricos.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Dario Cardoso de Lima, Geraldo Luciano de Oliveira Marques e Heraldo Nunes Pitanga.

Esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico de misturas betuminosas a quente e pré misturadas a frio, ambos modificados por ligantes poliméricos, para aplicações em pavimentação. As misturas foram dosadas nas faixas granulométricas B e C, conforme as especificações ES 385 (DNER, 1999b) e ES 390 (DNER, 1999a). Na produção destas misturas, utilizaram-se, como agregados, a brita 0, a brita 1 e o pó de pedra oriundos da pedreira Ervália, e como ligantes, o cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS (BETUFLEX 60/85 E) e a emulsão asfáltica catiônica especial, de ruptura controlada, modificada por polímeros (EMULEX RC1C-E), além de aditivo melhorador de adesividade. A metodologia utilizada englobou a realização de ensaios de caracterização dos agregados e ligantes, além do emprego do método de dosagem Marshall, com teores de ligante variando de 4,2% a 6,2%, com intervalo de 0,5%, para misturas a quente, e para pré misturadas a frio, teores de ligante variando de 6% a 10%, com intervalo de 1,0%. O teor de projeto de ligante para cada faixa granulométrica resultou em 4,8% e 5,2%, respectivamente, para as faixas B e C das misturas a quente e em 5,9% e 6,0% para as faixas B e C, respectivamente, dos pré misturadas a frio. Posteriormente, os corpos de prova foram moldados no teor ótimo de ligante determinado para cada faixa granulométrica de cada tipo de mistura e com variações de $\pm 0,10\%$, para misturas a quente, e $\pm 0,30\%$, para os pré misturadas a frio. Em seguida, foram ensaiados segundo a metodologia Marshall e submetidos aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência. Os resultados obtidos com as misturas a quente indicaram parâmetros Marshall nos intervalos requeridos na especificação ES 385 (DNER, 1999a), exceto para a fluência dos corpos de prova no teor de projeto da faixa granulométrica B e suas respectivas variações, mas as diferenças não foram significativas. Os ensaios de comportamento mecânico para essas misturas apresentaram valores satisfatórios. Em relação aos resultados dos pré misturadas a frio, foram obtidos valores de estabilidade de baixa magnitude, quando comparados ao mínimo especificado pela ES 390 (DNER, 1999), e os resultados de massa específica aparente foram decrescentes em relação ao aumento do teor de ligante, fato este

contrário ao esperado. Para tais misturas, o ensaio mecânico de módulo de resiliência apresentou valores muito baixos.

ABSTRACT

SILVA, Natalia Assunção Brasil, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February de 2016. **Study of the mechanical behavior of bituminous mixtures cold and hot modified by polymeric binders.** Adviser: Taciano Oliveira da Silva. Co-advisers: Dario Cardoso de Lima, Geraldo Luciano de Oliveira Marques and Heraldo Nunes Pitanga.

This study evaluated the mechanical behavior of hot and pre-mixed cold bituminous mixes, both modified by polymeric binders, for use in paving. Mixtures were designed in the particle size ranges B and C, according to the specifications ES 385 (DNER, 1999b) and ES 390 (DNER, 1999a). In the production of these mixtures, we used as aggregate, crushed stone 0, crushed stone 1 and stone dust coming from Pedreira Ervália, and as binders, petroleum asphalt cement modified by SBS polymer (BETUFLEX 60/85 E) and special cationic asphalt emulsion, with controlled rupture, modified by polymers (EMULEX RC1C-E), besides adhesion improving additive. The methodology included tests for characterization of aggregates and binders, besides the use of the Marshall designing method with binder contents from 4.2% to 6.2%, 0.5% range for hot mixtures, and binder content from 6% to 10%, 1.0% range for pre-mixed cold mixtures. The designed binder content for each range of particle size resulted in 4.8% and 5.2%, respectively, for groups B and C of the hot mixtures and 5.9% and 6.0% for groups B and C, respectively, of pre-mixed cold mixtures. Next, specimens were molded at the optimal content of binder set for each range of particle size of each type of mixture and with variations of $\pm 0.10\%$, for hot mixtures, and $\pm 0.30\%$, for pre-mixed cold mixtures. Afterwards, according to the Marshall method, specimens were tested for tensile strength by diametral compression and resilience module. Regarding hot mixtures, the results showed Marshall parameters within the range required by the specification ES 385 (DNER, 1999a), except for the specimen flow in the design content of the range of particle size B and their variations, but the differences were not significant. Mechanical behavior tests for these mixtures exhibited satisfactory values. Stability values for pre-mixed cold mixtures had low magnitude compared to the minimum set by the ES 390 (DNER, 1999b), and the bulk density results were indirectly proportional to increasing values of binder content, which was not expected. For such mixtures, the mechanical resilience test showed very low values.

1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Generalidades

O pavimento asfáltico ou flexível é uma estrutura formada por várias camadas de espessuras finitas assentes sobre uma fundação, o subleito, destinada a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e ao clima da região (PENZ, 2010). Dentre estas camadas, tem-se o revestimento asfáltico, que pode ser resultante de misturas asfálticas usinadas a quente ou a frio, conforme o tipo de ligante asfáltico empregado na mistura (cimento asfáltico de petróleo e emulsão asfáltica de petróleo, respectivamente).

O desempenho de um pavimento está relacionado à capacidade de suas camadas para suportar as ações do tráfego e do clima. Tratando-se de pavimentos flexíveis, cabe ao revestimento resistir diretamente à ação das cargas. Dessa forma, as características físicas e mecânicas do revestimento possuem forte influência no desempenho do pavimento como um todo (CEZARO, 2008).

Segundo Vieira (2009), na maioria das aplicações em rodovias, os revestimentos constituídos por ligantes asfálticos convencionais apresentam, quando bem dosados, um comportamento satisfatório, atendendo aos requisitos necessários para o adequado desempenho das misturas asfálticas compactadas quando submetidas às cargas de tráfego e às variações climáticas. Porém, o aumento da capacidade de carga, o crescimento vertiginoso do número de veículos em circulação e as extremas condições climáticas encontradas em algumas regiões do país impõem à engenharia de pavimentos a busca por materiais que atendam, de forma mais satisfatória, às necessidades das rodovias brasileiras. Neste sentido, em várias pesquisas, dentre elas Silva (2011) e Negrão (2006), têm-se verificado os benefícios da adição de modificadores aos ligantes asfálticos.

Assim, a possibilidade técnica de emprego de ligantes asfálticos modificados por polímeros apresenta-se como uma forma de melhorar o desempenho destes materiais em campo, sobretudo em um cenário que retrata o incremento, ao longo dos anos, do número de

veículos nas rodovias, das cargas por eixo dos veículos comerciais e das pressões dos pneus (AIREY, 2002).

O uso de misturas asfálticas modificadas por ligantes asfálticos poliméricos pode reduzir os custos de manutenção e diminuir a frequência de reparos de pavimentos flexíveis, aumentando a sua vida de serviço e trazendo benefícios em termos de custos em locais de difícil acesso ou onde o tráfego não pode ser interrompido por considerável período de tempo (VIEIRA, 2009).

Nesse contexto, destaca-se a importância de se estudar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente e a frio, quando estas são constituídas não por ligante convencional, mas por ligante modificado por polímeros, considerando-se a relevância desse estudo tanto para o desenvolvimento científico, quanto para uma dosagem e aplicação mais adequadas dos materiais envolvidos em tais misturas asfálticas, além, obviamente, dos benefícios relacionados ao emprego de tais misturas na prática da engenharia rodoviária, segundo orientações técnico-científicas confiáveis.

De acordo com Cezaro (2008), para que todas as melhorias nas propriedades dos cimentos asfálticos sejam alcançadas e seu uso seja justificado, os modificadores ou materiais a serem acrescentados ao asfalto devem apresentar resistência à temperatura de trabalho, possuir compatibilidade, estabilidade e facilidade de mistura com o ligante durante as etapas de armazenamento e aplicação, além de apresentar uma relação custo-benefício que viabilize seu uso técnico-econômico. Ainda segundo ele, cabe ressaltar que as características físicas e químicas do cimento asfáltico modificado dependerão do tipo de material utilizado como modificador, do tipo de asfalto, do teor de modificador e do processo de fabricação utilizado.

1.2 Justificativas

Um revestimento bem projetado, além de dar conforto e segurança aos usuários, garante uma maior vida útil ao pavimento, protegendo suas camadas subjacentes. Para isto acontecer, é importante analisar os materiais empregados nos revestimentos asfálticos, as suas características tecnológicas e o seu comportamento na mistura (HORTA e SIMÕES, 2013).

Embora seja difícil a tarefa de reproduzir o comportamento dos materiais que compõem o pavimento em laboratório para o estudo das características de deformabilidade, Carvalho (1997) postula que, dependendo do tipo de ensaio e do seu desenvolvimento

tecnológico, é possível reproduzir, de modo apreciável, o comportamento dos materiais do ponto de vista tensão-deformação.

Um estudo comparativo do comportamento mecânico entre misturas com faixas granulométricas abertas e fechadas para pré misturados a frio e misturas betuminosas a quente, ambas com ligantes modificados por polímeros, poderá trazer importantes informações para a utilização de revestimentos betuminosos mais apropriados para a pavimentação de vias.

Misturas betuminosas inadequadas são responsáveis pelo surgimento prematuro de diversos tipos de defeito, destacando-se o trincamento por fadiga e os afundamentos de trilhas-de-roda. Com o surgimento dos defeitos, as camadas inferiores ao revestimento vão ficando desprotegidas, acelerando-se, assim, o processo de degradação do pavimento. Desta forma, o desenvolvimento de pesquisas na área de misturas betuminosas é, sem dúvida, relevante (MONTANARI, 2007).

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente modificadas por ligantes poliméricos, com diferentes teores e faixas granulométricas.

1.3.2 Objetivos secundários

São objetivos secundários deste trabalho:

- a) Caracterizar os agregados e os ligantes asfálticos, a partir de ensaios realizados em laboratório e da análise dos resultados de caracterização fornecidos pela Empresa Stratura Asfaltos S/A;
- b) Analisar os parâmetros Marshall das misturas betuminosas a quente e os pré misturados a frio dosados segundo a Metodologia Marshall com diferentes teores e faixas granulométricas, tendo em vista as especificações de serviço ES 385 (DNER, 1999a) e ES 390 (DNER, 1999b), além de analisar a influência da

variação do teor de ligante asfáltico nos parâmetros de projeto das misturas e identificar qual seria o melhor teor de ligante para as misturas;

- c) Avaliar e comparar os resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo resiliente das misturas betuminosas investigadas com especificações de serviço e outras pesquisas.

1.4 Organização do trabalho

Apresenta-se, neste item, a estrutura geral do trabalho, com uma síntese do que trata cada capítulo. O trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo o Capítulo 1, Introdução Geral, já apresentado.

O Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta uma fundamentação teórica, com abordagem de assuntos pertinentes ao entendimento e desenvolvimento do trabalho, como os ligantes asfálticos modificados e misturas betuminosas, além de conter estudos sobre o comportamento mecânico e os métodos de ensaios empregados.

O Capítulo 3, Materiais e Métodos, apresenta os materiais utilizados na pesquisa e os métodos usados na caracterização dos agregados e na caracterização dos ligantes asfálticos, além da descrição dos ensaios da metodologia Marshall empregada na compactação dos corpos de prova e na obtenção dos parâmetros Marshall e a descrição dos ensaios utilizados para quantificar os parâmetros considerados na avaliação do comportamento mecânico das misturas.

O Capítulo 4, Apresentação e Análise dos Resultados de Caracterização dos Materiais, apresenta os resultados obtidos de ensaios de laboratório para caracterização dos agregados e ligantes, seguidos da análise e discussões sobre os mesmos.

O Capítulo 5, Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas Asfálticas a Quente modificadas por ligante polimérico, apresenta os resultados obtidos dos ensaios de laboratório das misturas betuminosas a quente, seguidos da análise e das discussões sobre os mesmos.

O Capítulo 6, Apresentação e Análise dos Resultados dos Pré Misturados a Frio Modificadas por ligante polimérico, apresenta os resultados obtidos dos ensaios de laboratório dos pré misturados a frio, seguidos da análise e das discussões sobre os mesmos.

O Capítulo 7, Considerações Finais e Sugestões, apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para futuras pesquisas nesta mesma linha.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligantes Asfálticos

2.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O INSTITUTO DE ASFALTO (1999) define cimento asfáltico de petróleo (CAP) como sendo material negro, pegajoso, semi sólido e muito viscoso quando se encontra à temperatura ambiente. Contudo, quando em temperaturas altas, o CAP amolece, e quando em temperaturas baixas, ele endurece. Em virtude desse comportamento, o cimento asfáltico é classificado com um material termoplástico.

O ligante asfáltico é o aglutinante responsável pela ligação entre os agregados. O comportamento mecânico de uma mistura asfáltica depende, dentre outros fatores, da eficiência do ligante utilizado. Como não há argamassa na composição da mistura de agregados, cabe ao ligante promover a coesão necessária. Além disso, o ligante também impermeabiliza o pavimento, garantindo vedação eficaz contra as penetrações oriundas do subleito por ações capilares (SILVA, 1998).

O constituinte predominante do asfalto é o betume que, segundo a NBR 7208 (ABNT, 1998), é uma mistura de hidrocarbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, de origem natural ou pirogênica, completamente solúvel em bissulfeto de carbono (CS_2), frequentemente acompanhada de seus derivados não metálicos.

Além de possuir um comportamento dependente da temperatura (termoplástico), o asfalto também é dependente do tempo de carregamento (frequência), exibindo comportamentos diferentes quando uma mesma carga é aplicada em frequências diferentes. Quando em temperaturas suficientemente elevadas e em tempos de carregamentos longos, o cimento asfáltico puro se comporta quase que completamente como um fluido viscoso (newtoniano). Quando em temperaturas suficientemente baixas e carregamentos de curta duração, o cimento asfáltico puro se comporta quase que completamente como um sólido elástico. Entretanto, quando em temperaturas intermediárias, o cimento asfáltico apresenta

características relativas aos dois comportamentos, isto é, apresenta um comportamento viscoelástico (CEZARO, 2008).

Segundo ANDERSON et al. (1992), um material viscoelástico, como o cimento asfáltico, sob uma taxa de carregamento constante apresenta, ao mesmo tempo, uma resposta elástica e outra viscosa. Esse material, quando carregado, exibe uma deformação imediata correspondente à resposta elástica, seguida de uma deformação gradual dependente do tempo. Esta deformação no tempo pode ser dividida em uma componente puramente viscosa e uma componente elástica atrasada. Quando removido o carregamento, o fluxo viscoso cessa e a deformação não é recuperada, enquanto que a deformação elástica atrasada é recuperada, mas não imediatamente, tal como a deformação puramente elástica.

As características reológicas do cimento asfáltico devem ser, juntamente com outros fatores, avaliadas com muito cuidado. Essas propriedades refletem diretamente no comportamento mecânico da mistura asfáltica e, conseqüentemente, influenciam no desempenho do pavimento. Em outras palavras, ligantes asfálticos com propriedades reológicas adequadas às condições de tráfego e de clima a que serão submetidas produzirão misturas asfálticas com comportamento mecânico mais satisfatório (CEZARO, 2008).

2.1.2 Emulsão asfáltica de petróleo (EAP)

Hunter (1994) afirma que a emulsão asfáltica de petróleo (EAP) é uma dispersão estável de dois líquidos imiscíveis, produzida a partir de quatro componentes essenciais: cimento asfáltico de petróleo (CAP), água, agente emulsificante e energia mecânica de mistura, gerando um produto estabilizado quimicamente.

As formulações químicas das emulsões asfálticas são decisivas na indicação de uso e representam grande impacto nas propriedades físicas e no desempenho das misturas em que estas serão utilizadas. Assim, houve grande avanço nos últimos 20 anos no desenvolvimento de produtos e normas para atender às atuais exigências nas propriedades das emulsões (JAMES, 2006).

Dentre algumas vantagens na utilização de emulsões asfálticas, encontram-se o manuseio e aplicação em temperatura ambiente, fáceis armazenamento e distribuição, redução no risco de oxidação por superaquecimento do ligante, diluição em água, ampliação do tempo de aplicação do material em campo, versatilidade de aplicações, além dos benefícios ambientais (ANTT, 2011).

O asfalto utilizado na produção de emulsões representa entre 55% e 70% das emulsões, sendo utilizados, preferencialmente, os asfaltos mais moles (maior penetração), segundo ABEDA (2001).

Os agentes emulsificantes são formações químicas com capacidade de reduzir a tensão superficial e permitir que os glóbulos de água e asfalto permaneçam em suspensão por um tempo. Os agentes emulsificantes exercem grande influência nas características das emulsões, sendo responsáveis por facilitar a dispersão e manter a estabilidade, impedindo a aglomeração dos glóbulos de asfalto, conforme se verifica na Figura 1. As emulsões podem ser dos tipos direta ou indireta, porém essa formação não influencia no seu desempenho (CLERMAN, 2004).

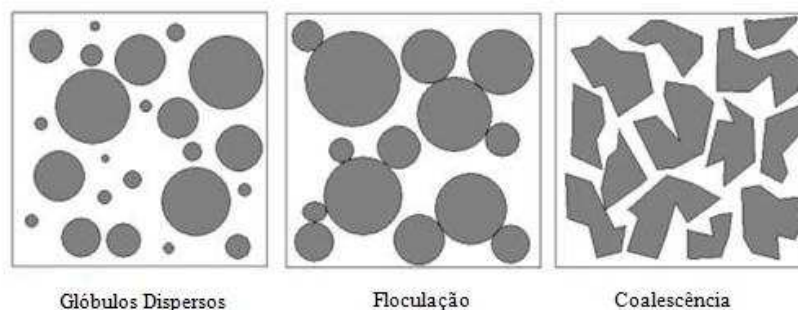


Figura 1 - Estrutura das emulsões asfálticas em diferentes estágios.

Fonte: (Modificado a partir de Clerman, 2004).

As emulsões são ainda categorizadas em função do tempo de ruptura, processo onde ocorre desestabilização nas reações químicas e nos processos físicos envolvidos, no qual a emulsão sofre ionização pelo agregado mineral, gerando o fenômeno de separação das fases. Neste período, ocorre a formação do filme asfáltico contínuo sobre os agregados. A ruptura pode ser rápida (RR), Média (RM) e Lenta (RL), ainda que essa ruptura possa variar em função das condições climáticas, e está relacionada à superfície específica dos agregados, de forma que a emulsão de ruptura rápida tem pouca função no uso com agregados e a de ruptura média é utilizada com agregados graúdos (CLERMAN, 2004).

Emulsões catiônicas de ruptura lenta são especialmente utilizadas em misturas com granulometria densa ou alto teor de finos. O tempo de ruptura mais lento permite trabalhabilidade por períodos mais longos, o que implica diretamente no tempo de cura e na susceptibilidade a chuvas (JAMES, 2006).

O tempo de ruptura é determinante em cada aplicação, uma vez que a ruptura precoce pode afetar o desempenho da mistura. A emulsão deve permanecer estável durante o serviço a ser realizado (SILVA, 2011).

A emulsão possui, ainda, vantagens quanto ao transporte e armazenamento, pois sua utilização não precisa ser imediata com a espuma. Seu fornecimento em obras se dá através de caminhões tanque (SILVA, 2011).

A cura é o processo de perda de água, quando o betume residual da emulsão e os aditivos alcançam suas propriedades. De acordo com Salomon (2008), os principais fatores que interferem nos processos de ruptura e cura das emulsões são: superfície específica, carga elétrica e características químicas do agregado, química dos aditivos (cimento e cal), temperatura, umidade relativa, características do agente emulsificante, viscosidade do asfalto ou, ainda, fatores de aplicação como compactação e técnica executiva. O processo pode levar meses para ser finalizado, conforme mencionado por Bernucci et al. (2008).

Testes com emulsões são realizados com os seguintes objetivos: (i) verificar a trabalhabilidade (teor de betume, viscosidade, peneiração), (ii) identificar condições de ruptura (desemulsabilidade, cimento teste, destilação) e (iii) testes com resíduo (penetração, ductibilidade). As principais características das emulsões, entretanto, referem-se à capacidade destas em recobrir os agregados com um filme uniforme (ensaio de viscosidade) e também sua estabilidade durante a aplicação (ensaio de peneiramento) para evitar problemas de aglutinação de partículas e perda de homogeneidade (KADRMAS, 2006).

2.2 Ligantes Asfálticos Modificados

2.2.1 Considerações iniciais

Muito embora os cimentos asfálticos convencionais apresentem desempenho satisfatório na maioria das condições de tráfego e de clima no Brasil, o aumento da capacidade de carga, do número de veículos em circulação e as extremas condições climáticas encontradas em algumas regiões do país impõem à engenharia de pavimentos a busca por materiais que atendam de forma mais satisfatória as necessidades de nossas rodovias (CEZARO, 2008).

Essa busca fez com que muitas pesquisas, como apresentadas a seguir, fossem realizadas nas últimas décadas com o objetivo de se produzir cimentos asfálticos mais flexíveis, menos suscetíveis ao clima, mais resistentes às ações de tráfego e, conseqüentemente, mais duráveis.

BAHIA et al. (2001) realizaram projeto com o objetivo de avaliar a aplicabilidade das especificações AASHTO MPI – Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, para ligantes asfálticos modificados. Baseados em revisão bibliográfica e coleta de dados, os autores listam os materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos. Os materiais, juntamente com a resposta esperada em termos de redução de defeitos, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos.

Tipo de Modificador	Classe	Aplicação				
		DP ^(a)	TF ^(b)	TBT ^(c)	DU ^(d)	EO ^(e)
Polímeros Elastômeros	eStireno-Butadieno (SB)	x		x	x	
	eStireno-Butadieno-eStireno (SBS)	x	x	x		
	eStireno-Butadieno-Rubber (SBR)	x		x		
Polímeros Plastômeros	Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	x	x			
Borracha moída de Pneus	Diferentes tamanhos, tratamentos e processos	x	x	x		
Agentes Antidescolantes	Amidoaminas				x	
	Poliamidas				x	
	Cal Hidratada				x	
Hidrocarbonetos	Asfalto Natural	x	x	x	x	
Fibras	Celulose	x				
	Polipropileno	x	x	x		
	Poliéster	x		x		
	Mineral	x				
Fíler Mineral	Cal Hidratada	x	x	x	x	x
Antioxidantes	Cal Hidratada				x	x
Extensores	Enxofre	x	x	x		

^(a) Deformação Permanente

^(b) Trincamento por Fadiga

^(c) Trincamento em Baixas Temperaturas

^(d) Danos por Umidade

^(e) Envelhecimento Oxidativo

Fonte: adaptado de BAHIA et al. (2001)

Na tentativa de melhorar as propriedades dos cimentos asfálticos, muitos materiais foram e vêm sendo utilizados. Dentre eles, destacam-se os polímeros que, quando usados como agentes modificadores, conferem ao cimento asfáltico modificado uma provável melhora no seu comportamento, quando comparado com cimentos asfálticos convencionais (BERNUCCI et al, 2008).

ZANZOTTO e KENNEPOHL (1996) ressaltam que a razão para se fazer a combinação entre o asfalto e determinados polímeros é a prevenção de defeitos prematuros nos pavimentos e, dessa forma, a expectativa de aumento da vida de serviço dos mesmos.

Segundo Cezaro (2008), um dos fatores limitantes do uso de polímeros como modificadores de asfalto são os altos custos. Para diminuir esses custos, mantendo a qualidade dos cimentos asfálticos modificados, uma alternativa plausível é o uso da borracha moída de pneus (BMP), seja na modificação do cimento asfáltico ou como parte dos agregados em misturas asfálticas. Além das questões técnicas e econômicas envolvidas, o uso da borracha moída de pneus se mostra ambientalmente engajado, dando destino a milhões de pneus inservíveis.

A FHWA (1994) relata alguns dos possíveis benefícios relativos à modificação do asfalto pela BMP. A modificação com borracha reduz a suscetibilidade térmica do CAP, consequentemente, aumentando a resistência às deformações permanentes e a resistência à fadiga e reduzindo o trincamento térmico. Além disso, a mesma instituição resalta a maior resistência ao envelhecimento oxidativo dos cimentos asfálticos conferida pela modificação por BMP.

2.2.2 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros

O termo polímero foi criado por Berzelius em 1832 para diferenciar os compostos de pesos moleculares múltiplos dos compostos de mesmo peso molecular chamados de isômeros. Atualmente, são considerados polímeros as moléculas relativamente grandes, em cuja estrutura se encontram repetidas unidades (DNER, 1998a).

Na literatura, são encontradas diversas formas de classificação de polímeros. Através delas, pode-se classificar os polímeros quanto à ocorrência, ao método de preparação, à estrutura e a sua aplicação. Entretanto, segundo o DNER (1998a), algumas classificações se mostram mais direcionadas ao meio rodoviário, sendo a mais utilizada a de Disnmem, que classifica os polímeros em quatro grupos:

- a) Termorrígidos são aqueles que, depois de formados, não se fundem pela ação do calor, ou seja, quando aquecidos a uma determinada temperatura, não amolecem, impossibilitando que sejam remoldados;
- b) Termoplásticos são aqueles que, quando aquecidos, modificam o seu comportamento, adquirindo características plásticas, permitindo que sejam

remoldados. Normalmente, consistem de cadeias lineares, mas podem ser ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;

- c) Elastômeros são aqueles que, quando aquecidos, decompõem-se antes de amolecer, com propriedades elásticas que lembram a borracha. Por exemplo: SBR.
- d) Elastômeros termoplásticos são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém, quando a temperatura aumenta, passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS, EVA e RET.

Dentro do grande número de polímeros existentes, são poucos os que possuem as características adequadas para serem usados como modificadores. Para que o cimento asfáltico modificado alcance a resposta satisfatória, é imprescindível que o polímero seja compatível química e termicamente com o ligante base (LING et al., 1997). Esta compatibilidade é determinante nas etapas de transporte, estocagem e aplicação do ligante modificado.

Em relação aos mecanismos de modificação, BRÛLÉ (1996) relata que três diferentes casos devem ser considerados, a partir das duas fases distintas que consistem o ligante modificado. São eles:

- a) Baixo teor de polímero (menor que 4%): neste caso, o asfalto é a fase contínua do sistema e o polímero se encontra disperso nele. A fase polimérica é dispersa dentro da matriz asfáltica. Como resultado, tem-se a melhora da coesão e da elasticidade. Em altas temperaturas de serviço (maiores que 60°C), o módulo de rigidez da fase polimérica é maior que o da matriz. Em baixas temperaturas, o módulo de rigidez da fase dispersa é menor que o da matriz, reduzindo sua fragilidade. Pode-se observar, entretanto, que a fase polimérica melhora as propriedades mecânicas do ligante em altas e baixas temperaturas de serviço. Neste caso, o fator determinante nas propriedades da mistura é a escolha do asfalto;
- b) Teor de polímero suficientemente alto (no geral, maior que 7% se a escolha do polímero e do betume foi correta): neste caso, a fase polimérica é a matriz do sistema. A fração de asfalto é dispersa no polímero, que absorve os óleos do asfalto. As propriedades do sistema são fundamentalmente diferentes do asfalto e dependem essencialmente do polímero;
- c) Teor de polímero em torno de 5%: neste caso, podem ser formadas microestruturas, nas quais as duas fases são contínuas e entrelaçadas. Tal sistema é

difícil de controlar e possui problemas de estabilidade (sua micromorfologia e suas propriedades dependerão da sua história de temperatura).

Quanto à incorporação, os polímeros podem ser adicionados ao asfalto basicamente de três maneiras: (a) em fábrica separada e, posteriormente, transportado até a usina de asfalto, (b) em misturadores auxiliares na usina de asfalto e (c) diretamente na mistura asfáltica (CEZARO, 2008).

Segundo LEITE (1999), a escolha da tecnologia para a incorporação do polímero no asfalto dependerá das condições locais e do tipo do polímero empregado. Polímeros difíceis de compatibilizar e termicamente instáveis devem ser misturados imediatamente antes da aplicação do asfalto modificado, evitando a decomposição e/ou a separação de fases. A produção em fábrica separada do local de usinagem significa melhor controle de qualidade e melhor dispersão do polímero no asfalto. A alternativa (b) garante melhor incorporação do polímero no asfalto do que a alternativa (c). A Figura 2 mostra de forma esquemática as alternativas de produção de asfalto modificado por polímeros.



Figura 2 - Alternativas de asfalto modificado por polímeros.

Fonte:ZENKE, 1979 apud LEITE, 1999.

Geralmente, os polímeros são adicionados ao asfalto em forma de pó ou diluídos. No processo de mistura, uma agitação eficiente é necessária para garantir que não haja separação de fases. O uso de partículas menores de polímeros poderá diminuir o tempo de mistura e

melhorar a qualidade do produto final. Entretanto, o tempo de mistura dependerá, dentre outros fatores, dos equipamentos e das matérias primas utilizadas (CEZARO, 2008).

2.3 Agregados

De acordo com a norma técnica NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concretos.

De acordo com Bernucci et al. (2008) os agregados utilizados em pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos:

i) Quanto à natureza

- Agregados naturais: são constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areias, etc. Os agregados provenientes de rochas naturais pertencem a um de quatro tipos principais, que são ígneos, sedimentares, metamórficos ou areias e pedregulhos;

- Agregados artificiais: são aqueles em que os grãos são provenientes de subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material natural: escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida, etc. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço. Elas podem apresentar problemas de expansibilidade e heterogeneidade, requerendo tratamento adequado para utilização, porém podem apresentar alta resistência por atrito;

- Agregados Reciclados: nessa categoria, estão os agregados provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e, em alguns países, já é a fonte principal de agregados. A possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em interesse por restrições ambientais na exploração de agregados naturais e pelo desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais dentro de determinadas especificações existentes para utilização. Destaca-se, também, a utilização crescente de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição destes resíduos (FERNANDES, 2004).

ii) Quanto ao tamanho

Nesse aspecto, os agregados podem ser classificados como agregado graúdo, miúdo ou material de enchimento ou fíler, de acordo com a especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006):

- Agregado graúdo: é o material com dimensões maiores do que 2,0 mm, ou seja, retido na peneira nº 10. São as britas, cascalhos, seixos, etc.;

- Agregado miúdo: é o material com dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2,0 mm. É o material que é retido na peneira de nº 200, mas que passa na peneira de nº 10. São as areias, o pó de pedra, etc.;

- Material de enchimento (fíler): é o material onde pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075 mm, correspondente à peneira de nº200. Exemplo: cal hidratada, cimento Portland, etc.

iii) Quanto à distribuição dos grãos

A distribuição dos grãos é uma das mais importantes propriedades físicas dos agregados, pois influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Ao ser misturado com um ligante, formando as misturas asfálticas, a distribuição granulométrica do agregado influencia na rigidez, na estabilidade, na durabilidade, na trabalhabilidade, na permeabilidade, na resistência à fadiga e na deformação permanente da mistura.

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada, usualmente, por meio de uma análise por peneiramento, conforme ilustrado na Figura 3.

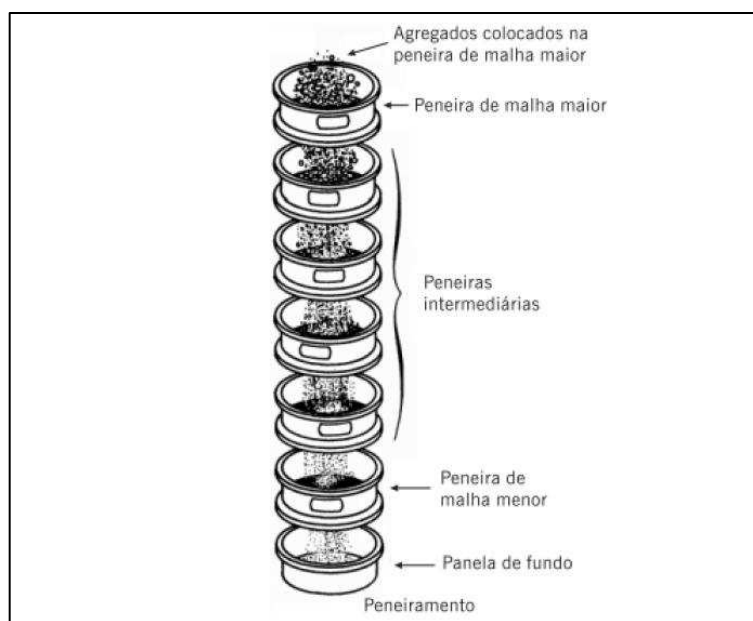


Figura 3 - Ilustração da análise granulométrica por peneiramento.

Fonte: BERNUCCI et al., 2008.

As descrições das principais graduações apresentadas para os agregados, segundo Bernucci et al (2008), são:

- agregado de graduação densa ou bem graduado é aquele que apresenta distribuição granulométrica bem distribuída. Neste tipo de graduação, verifica-se um melhor entrosamento das partículas do agregado, de tal forma que os grãos menores preenchem os vazios deixados pelos maiores, conferindo ao mesmo um arcabouço mais sólido;

- agregado de graduação aberta é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios;

- agregado de graduação uniforme é aquele que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;

- agregado com graduação com degrau ou descontínua é aquele que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias. São agregados que devem ser adequadamente trabalhados quando em misturas asfálticas, pois são muito sensíveis à segregação.

Curvas granulométricas representativas dessas principais graduações de agregados são apresentadas na Figura 4.

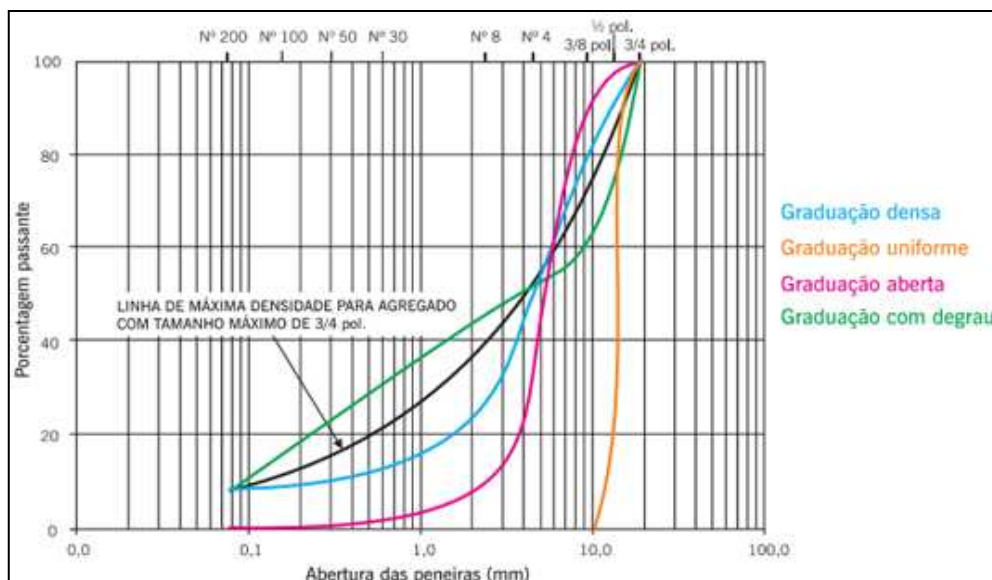


Figura 4 - Representação convencional de curvas granulométricas.

Fonte: BERNUCCI et al, 2008.

Os agregados devem apresentar propriedades físico-mecânicas satisfatórias para fins de projeto. Segundo Roberts et al. (1996), a sua adequação para o uso em misturas asfálticas é determinada, principalmente, pelas propriedades físicas dos agregados e, em menor extensão, pelas propriedades químicas. Dentre algumas propriedades físicas, podem ser citadas a porosidade, absorção de água, massa específica unitária e massa específica dos grãos, as quais devem ser analisadas, pois interferem na qualidade e dosagem da mistura. Já as propriedades químicas dos agregados interferem menos, salvo quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado.

Segue, resumidamente, cada propriedade citada dos agregados, baseado em Bernucci et al (2008):

i) 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.

ii) Limpeza

Os agregados podem conter certos materiais (matéria orgânica, conchas, vegetais, grumos de argila, etc.) que, dependendo da quantidade, prejudicam o seu desempenho em serviço. A limpeza de um agregado pode ser verificada visualmente, mas uma granulometria com lavagem é mais eficaz. A limpeza é uma condição de grande importância, principalmente para agregados que serão usados em misturas a frio (que não passam no secador).

O ensaio de equivalente de areia, descrito na norma ME 054 (DNER, 1997a), possibilita obter a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Por exemplo, para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de, pelo menos, 55%.

iii) Adesividade ao ligante asfáltico

A causa de defeitos como a desagregação e o deslocamento em revestimentos asfálticos, normalmente, é atribuída a problemas na ligação adesiva desenvolvida na interface agregado-asfalto que, juntamente com as ações do tráfego e da água, contribuem para a progressão destes danos, propiciando o aparecimento de buracos e panelas (FURLAN, 2006). Quando a água tem o efeito de deslocar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado, denomina-se este de hidrófilo. Já hidrofóbico possui alta adesividade na presença da água.

Segundo AKSOY et al. (2005), pode-se melhorar a adesividade e reduzir a sensibilidade à água em misturas asfálticas de duas formas. A primeira sugere que a superfície

do agregado seja revestida por um agente que inverta a carga elétrica predominante na superfície e, dessa forma, reduza a energia superficial do agregado. A segunda forma é reduzir a energia superficial do ligante e gerar uma carga elétrica oposta na superfície do agregado. Os autores ainda relatam que, além do uso de agentes melhoradores de adesividade, alguns aditivos vêm ganhando aceitação entre os engenheiros. Alguns desses aditivos são: cal hidratada, enxofre, anti-oxidantes, borracha, negro de fumo e uma variedade de polímeros.

iv) Resistência à abrasão

Durante o processo de manuseio, execução e na própria ação do tráfego, os agregados devem resistir à quebra e abrasão, principalmente os agregados que se encontram na camada superior do revestimento. Avalia-se o agregado segundo essa característica por meio do ensaio de abrasão Los Angeles, prescrito no método de ensaio ME 035 (DNER, 1998b).

Para revestimentos asfálticos, é desejável uma resistência ao desgaste relativamente alta, logo uma baixa abrasão no ensaio de abrasão Los Angeles. No Brasil, o valor limite da abrasão Los Angeles, segundo o método de ensaio supracitado, deve estar entre 40 a 55%.

Agregados de algumas regiões do Brasil, como, por exemplo, a região do município do Rio de Janeiro, apresentam o valor da abrasão Los Angeles muito acima de 55%, em alguns casos, chegando a 65% (MARQUES et al, 2001). Devido à impossibilidade de se encontrar agregados com esse parâmetro atendido nas proximidades da obra, muitas rodovias foram pavimentadas usando-se os agregados da região, embora estivessem em desacordo com a especificação técnica vigente, mas com a autorização do DNER (atual DNIT) ou órgão regional competente para tal procedimento (MARQUES et al, 2001).

v) Forma das partículas

Partículas irregulares ou de forma angular, tais como pedra britada, cascalhos e algumas areias de brita, tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados. Portanto, a forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade (BERNUCCI et al, 2008).

O método de ensaio ME 086 (DNER, 1994a) caracteriza a forma das partículas pela determinação do índice de forma (f). Ainda segundo esse método de ensaio, o índice “f” varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. É adotado o limite mínimo de $f = 0,5$ para aceitação de agregados quanto à forma.

vi) Absorção

A absorção, segundo a norma ME 081 (DNER, 1998c), é o aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso como porcentagem de sua massa seca.

De acordo com Bernucci et al(2008) na mistura asfáltica, a quantidade de ligante utilizada está relacionada à porosidade do agregado. Quando um agregado é poroso, ele irá absorver parte do ligante asfáltico necessário para dar coesão à mistura. Logo, um agregado com alto índice de absorção não tem sua utilização recomendada em misturas betuminosas, pois além de consumir maior quantidade de ligante asfáltico, a porosidade pode variar conforme a amostragem. Dessa forma, seria muito difícil estabelecer um teor fixo de ligante.

vii) Massa específica

Para estudo de agregados, têm-se três designações de massa específica: real, aparente e efetiva (BERNUCCI et al, 2008).

- Massa específica real

Determinada pela relação entre a massa seca e o volume real. Esse volume é constituído pelo volume dos sólidos excluindo os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos, como mostra a Figura 5.



Figura 5 - Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica real.

Fonte: BERNUCCI et al,2008.

- Massa específica aparente

É a relação entre a massa seca e o volume aparente, ou seja, incluindo no volume os poros permeáveis e impermeáveis, e excluindo os vazios entre os grãos, como mostra a Figura 6.



Figura 6- Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica aparente.

Fonte: BERNUCCI et al,2008.

- Massa específica efetiva

A massa específica efetiva é determinada quando se trabalha com misturas asfálticas cujo teor de ligante asfáltico seja conhecido. É calculada através da relação entre a massa seca da amostra e o volume efetivo do agregado. O volume efetivo é constituído pelo volume do agregado sólido e o volume dos poros permeáveis à água que não foram preenchidos pelo asfalto, como mostra a Figura 7.



Figura 7- Esquema da partícula do agregado para determinação da massa específica efetiva.

Fonte: BERNUCCI et al,2008.

2.4 Misturas Betuminosas

2.4.1 Misturas betuminosas a quente

As misturas asfálticas a quente se classificam em três categorias em função de sua granulometria, ainda segundo Bernucci et al (2008):

- Graduação Densa: caracterizada por ter uma curva granulométrica contínua e bem graduada e possuir poucos vazios. Isto se deve ao fato de os agregados de dimensões menores preencherem a maioria dos vazios existentes entre os maiores. Exemplo: concreto asfáltico;

- Graduação Aberta: trata-se de uma mistura com alta percentagem de vazios, visto que os agregados são basicamente do mesmo tamanho e há insuficiência de material fino, passante na peneira 0,075mm, para preenchê-los. Possui curva granulométrica uniforme e é conhecida por ser uma mistura drenante, possibilitando a percolação de água. Exemplo: camada porosa de atrito (CPA);

- Graduação Descontínua: sua curva granulométrica é descontínua, o que se deve ao fato de possuir predominância de grãos com dimensões maiores quando comparados com grãos intermediários, completando a composição da mistura com grãos finos. Esta disposição resulta em um esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente, com maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: SMA (Stone Matrix Asphalt) e gap-graded.

O concreto asfáltico (CA) é um dos tipos de pré misturados a quente mais empregados no Brasil, conhecido também como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). De acordo com Bernucci et al (2008), o concreto asfáltico é proveniente da mistura composta de agregados de diferentes tamanhos e cimento asfáltico de petróleo. Os componentes devem ser previamente aquecidos em temperatura especificada pelo tipo de dosagem e de acordo com as características de viscosidade e temperatura do ligante.

2.4.2 Pré misturado a frio

Pré misturados a frio (PMFs) são misturas compostas de agregado(s) e ligante betuminoso, realizadas em usinas. No pré misturado a frio, nunca se aquecem os agregados. O ligante betuminoso, dependendo do seu tipo, poderá sofrer um ligeiro aquecimento. O pré misturado a frio é espalhado e comprimido à temperatura ambiente (SANTANA, 1993).

Os materiais constituintes do pré misturado a frio (agregado mineral, emulsão asfáltica ou asfalto diluído) devem satisfazer às especificações de serviço aprovadas pelo DNER. Para dosagem desse tipo de mistura, são vários os indicadores de desempenho utilizados, como, por exemplo: índice de vazios da mistura, estabilidade Marshall, relação betume vazios, fluência, entre outros (SANTOS, 2002).

Segundo Santos (2002), são inúmeras as vantagens de se trabalhar com os PMFs, como por exemplo:

- utilização de equipamentos de custo inferior aos das misturas a quente;
- utilização do agregado úmido, o que facilita o envolvimento do agregado pelo ligante;
- como não há necessidade de aquecer os agregados, evitam-se a poluição do ambiente e os riscos de incêndio, explosões e acidentes de trabalho;
- facilidade para preparação da massa e sua execução;
- dependendo do tipo de asfalto emulsionado, são facilmente estocáveis, o que facilita a sua utilização para os diversos tipos de serviço.

A classificação dos PMFs envolve dois aspectos, de acordo com Santos (2002):

- granulometria: informando a quantidade de argamassa e de masticque, que é de fundamental importância para os aspectos de fadiga e de estabilidade;
- porcentagem de vazios: informando sobre as permeabilidades ao ar (envelhecimento do ligante) e à água (comportamento hidráulico), assim como sobre a mecânica do funcionamento da mistura, a sensibilidade ao teor de asfalto e a adesividade.

De acordo com Santos (2002), enquanto a granulometria é praticamente invariável (a despeito de pequenas degradações com o uso), a porcentagem de vazios é altamente sensível às porcentagens de asfalto, de água e de solvente na emulsão e, também, à energia de compactação. Esta porcentagem de vazios poderá ainda sofrer alterações, para mais ou menos, devido ao efeito do processo de cura em função das condições climáticas e das ações do tráfego.

O agregado ou mistura de agregados deverá ter uma granulometria contínua e, no que diz respeito à graduação, os pré misturados podem ser classificados da seguinte maneira, segundo SANTANA (1993):

- pré misturado de graduação densa: é aquele no qual o agregado ou mistura de agregados possui granulometria contínua e com uma quantidade de material fino suficiente para encher os vazios entre as partículas maiores;

- pré misturado de graduação aberta: é aquele no qual o agregado ou mistura de agregados possui granulometria contínua e com uma quantidade de material fino insuficiente para encher os vazios entre as partículas maiores;

- pré misturado do tipo macadame: é aquele no qual o agregado ou mistura de agregados possui uma granulometria contínua e onde o diâmetro máximo é aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo.

Dentre os vários tipos de pré misturados, destaca-se o pré misturado a frio denso (PMFD) que apresenta uma quantidade apreciável de agregado miúdo, podendo ou não conter alto teor de “filer”, ficando, após a compactação, com teor de vazios relativamente baixo. Este tipo de pré misturado não necessita de capa selante (CHAVES, 2010).

Segundo SANTO (1991), as principais aplicações do pré misturado a frio são as seguintes:

- camadas de regularização, sub-base e base;
- camadas de revestimento asfáltico;
- tapa buracos;
- conservação;
- recapeamentos.

2.5 Dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall foi concebido por Bruce G. Marshall, em 1930, com o intuito de permitir a determinação da quantidade ótima de ligante para a composição de misturas asfálticas preparadas a quente, para fins de pavimentação rodoviária. Em 1980, o

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) oficializou o método de ensaio Marshall modificado para pré misturados a frio, proposto por J. Lopes e Kasuga, com algumas modificações, sob o número ME 107 (DNER, 1994b) (SILVA, 1998). Para misturas betuminosas a quente, este ensaio está normalizado pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), sob a designação ME 043 (DNER, 1995).

Segundo Roberts et al. (2002), a metodologia de dosagem Marshall consiste num procedimento empírico baseado em parâmetros que melhor se relacionam com o desempenho em campo quanto ao afundamento em trilha de roda e ao trincamento de revestimentos asfálticos. Devido ao fato de necessitar de equipamentos simples, de baixo custo e demandar relativamente menor tempo que outros métodos, o procedimento Marshall se difundiu rapidamente para a maioria dos Estados Americanos e para outros países. Com a grande experiência prática adquirida com seu emprego, tornou-se um dos métodos mais utilizados para avaliar o desempenho de misturas asfálticas, tanto a quente como a frio.

Ao longo dos anos, foi modificado para adaptar-se à realidade do aumento de carga e da pressão dos pneus dos veículos e, dentre as modificações, foram sugeridos novos critérios para a determinação da quantidade ótima de ligante que deveria ser a mais próxima dos valores correspondentes à estabilidade e densidade aparente máxima, além dos outros parâmetros, como porcentagem de vazios, relação betume vazios, estabilidade e fluência, terem tido seus valores modificados para a nova realidade (AMARAL, 2000).

Segundo AMARAL⁽¹⁾ (2000), uma das propriedades mais importantes de uma mistura asfáltica é a sua estabilidade, ou seja, sua habilidade em resistir à deformação permanente quando sujeita à passagem de veículos ou mesmo quando sujeita aos veículos estacionados. Entretanto, testes laboratoriais, como, por exemplo, o ensaio de Estabilidade Marshall, para concretos asfálticos, idealizados para medir a estabilidade dessas misturas, são empíricos em sua essência. Assim, a sua utilização para prever o desempenho de revestimentos betuminosos de pavimentos rodoviários em serviço possui limitações, devendo o mesmo ser mais investigado para a finalidade pretendida.

⁽¹⁾ Citado por HILLS (1973).

Durante a década de 80, várias rodovias americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante nas misturas. Muitos engenheiros acreditavam que o impacto na compactação das misturas durante a dosagem Marshall produzia corpos de prova com densidades que não condiziam

com as densidades dos pavimentos em campo. Esse assunto foi abordado no estudo nos EUA sobre materiais asfálticos, denominado Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem denominado Superpave (VASCONCELOS, 2004).

Coelho (1992) apresenta várias considerações sobre o método Marshall, e uma delas reporta-se sobre a sua natureza empírica. Há necessidade de o mesmo ser continuamente alimentado pelos resultados de laboratório, a fim de que sejam atualizadas as correlações entre os resultados de laboratório e os desempenhos das misturas nas pistas, sobretudo porque as cargas do tráfego e as modalidades dos veículos se alteram de acordo com o crescimento sócio econômico das regiões.

O método é caracterizado pela seleção do ligante asfáltico e do agregado de modo a atender a determinadas especificações de projeto. A compactação é realizada por impacto de um soquete padrão para obtenção de corpos de prova cilíndricos e que devem atender a certos limites quanto ao volume de vazios, aos vazios no agregado mineral e, em alguns casos, também à relação betume-vazios. Além disso, algumas agências estabelecem limites também quanto aos valores de estabilidade e de fluência (NCHRP, 2001).

O Asphalt Institute (1997) recomenda o número de golpes do soquete padrão, por face, em função do tráfego, sendo 35 golpes para tráfego leve ($N < 10^4$), 50 golpes para tráfego médio ($10^4 \leq N \leq 10^6$) e 75 golpes para tráfego pesado ($N > 10^6$), sendo N o número de passadas do eixo padrão de 8,2t, de acordo com a AASHTO.

As misturas asfálticas devem conter certo volume de ar após a compactação, devido ao pequeno aumento da densificação da camada por ação do tráfego e da expansão térmica dos agregados e ligante asfáltico, causado pelas elevações de temperatura das camadas, além de se evitar a exsudação do ligante para a superfície das mesmas.

2.6 Ensaios Mecânicos

2.6.1 Considerações iniciais

O dimensionamento de um pavimento por um método mecanístico deve, dentre outros fatores, considerar parâmetros de entrada (parâmetros de deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, tráfego, dentre outros) e critérios de aceitação (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda). Dessa forma, a caracterização mecânica dos materiais é indispensável para que o pavimento tenha o desempenho desejado ao longo da sua vida de

serviço. Neste contexto, os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que procuram simular as condições reais de tráfego, mostram-se como ferramentas importantes na caracterização dos materiais de pavimentação (CEZARO, 2008).

A seguir, serão apresentados alguns ensaios comumente empregados no Brasil, para avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas.

2.6.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Dentre os principais defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros, o trincamento resultante do fenômeno de fadiga tem sido apontado como o predominante (PINTO, 1991). Um dos parâmetros mecânicos que procura limitar este dano é a resistência à tração no revestimento, ou seja, procura-se obter, computacionalmente, uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento que seja suficientemente menor do que a resistência à tração do corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral. O ensaio de fadiga por compressão diametral também é realizado com solicitações que são função desta resistência (FALCÃO e SOARES, 2002).

A compressão diametral ou ensaio de tração indireta, concebido por Lobo Carneiro, conhecido por “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido com a finalidade de determinar a resistência à tração dos corpos de prova de misturas asfálticas, através de uma solicitação estática (PINTO e PREUSSLER, 1980). Segundo Santos (2002) o referido ensaio baseia-se na aplicação de uma carga de ruptura verticalmente em dois frisos metálicos dispostos na direção longitudinal do corpo de prova (Figura 8).

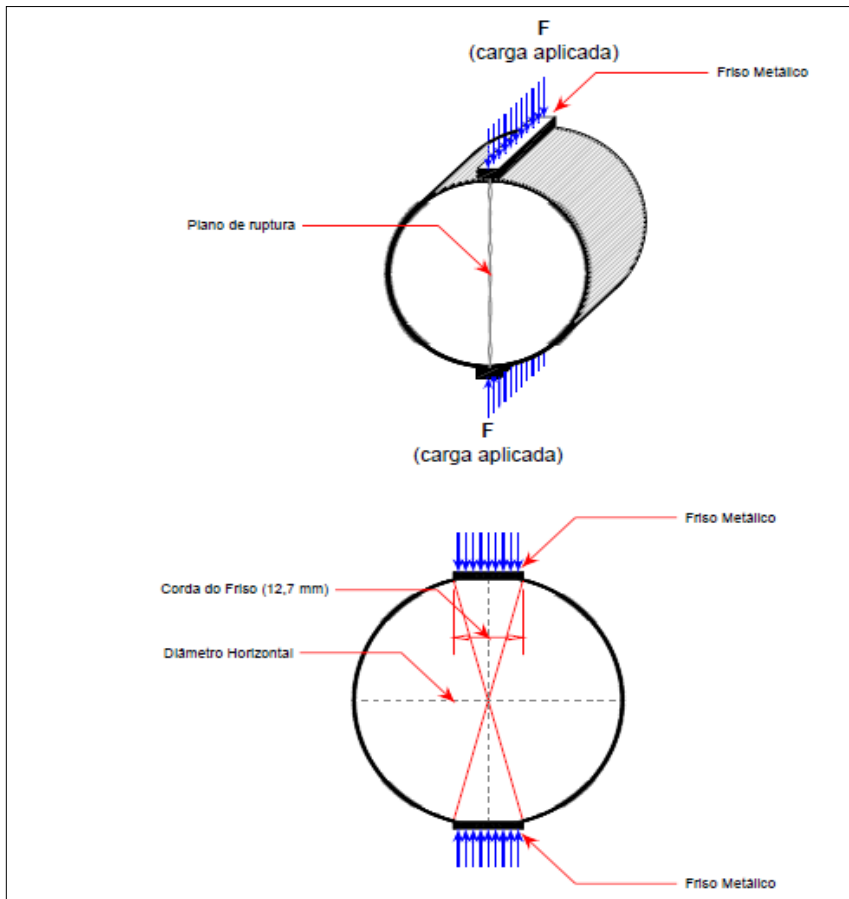


Figura 8 - Esquema do ensaio de compressão diametral.

Fonte: SANTOS, 2002.

Este ensaio encontra-se normatizado pelo DNIT, sob a designação ME 136 (DNIT, 2010a). A partir deste esforço de compressão, o corpo de prova rompe por tração no plano diametral vertical. A equação para cálculo da resistência à tração é a seguinte:

$$RT = \frac{2F^1}{\pi DH} \quad (1)$$

Em que:

RT: resistência à tração por compressão diametral (kgf/cm^2);

F^1 : carga de ruptura (kgf);

D: diâmetro do corpo de prova (cm);

H: altura do corpo de prova (cm).

Quando a carga aplicada (F') for inferior à carga de ruptura, a máxima tensão de tração (σ_t) e a máxima de compressão (σ_c) verificadas na amostra são respectivamente:

$$\sigma_t = \frac{2F'}{\pi DH} \quad (2)$$

$$\sigma_c = -\frac{6F'}{\pi DH} \quad (3)$$

2.6.3 Módulos de Resiliência de Misturas Betuminosas

Para se efetuar a análise de deformabilidade da estrutura de um pavimento flexível, precisam-se conhecer as relações tensão-deformação ou os módulos de deformabilidade dos materiais que compõem suas camadas constituintes (MOTTA, 1991). Um parâmetro importante para o conhecimento do comportamento tensão-deformação de uma estrutura de pavimento é o Módulo de Resiliência.

Segundo Barksdale et al. (1997), o Módulo de Resiliência (M_R) é análogo ao Módulo de Elasticidade (E'), sendo ambos definidos pela teoria da elasticidade. O Módulo de Resiliência é determinado em ensaios de cargas repetidas, diferentemente do Módulo de Elasticidade que é determinado sob condição de carregamento estático. Valores de pico das tensões e deformações recuperáveis que ocorrem nos ensaios de determinação do Módulo de Resiliência são usados para calcular a constante elástica resiliente, mesmo que a tensão de pico e a deformação recuperável não ocorram ao mesmo tempo em um teste dinâmico deste tipo.

O Módulo de Resiliência de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração σ_t , aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de uma mistura betuminosa, e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T) (MONTANARI, 2007). O método de ensaio ME 135 (DNIT, 2010b) contém os procedimentos normativos para a determinação do Módulo de Resiliência de misturas betuminosas, empregando-se a seguinte equação:

$$M_R = \frac{F_v}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (4)$$

Onde:

M_R : Módulo de Resiliência (kgf/cm^2);

F_v : carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (kgf);

Δ : deformação elástica ou resiliente registrada, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F_v);

H: altura do corpo de prova (cm);

μ : coeficiente de Poisson.

A Figura 9 ilustra uma amostra cilíndrica, solicitada repetidamente por uma carga F_v de compressão, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas. A deformação resiliente é medida através de LVDTs (linear variable differential transformer) posicionados horizontalmente ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga F_v .

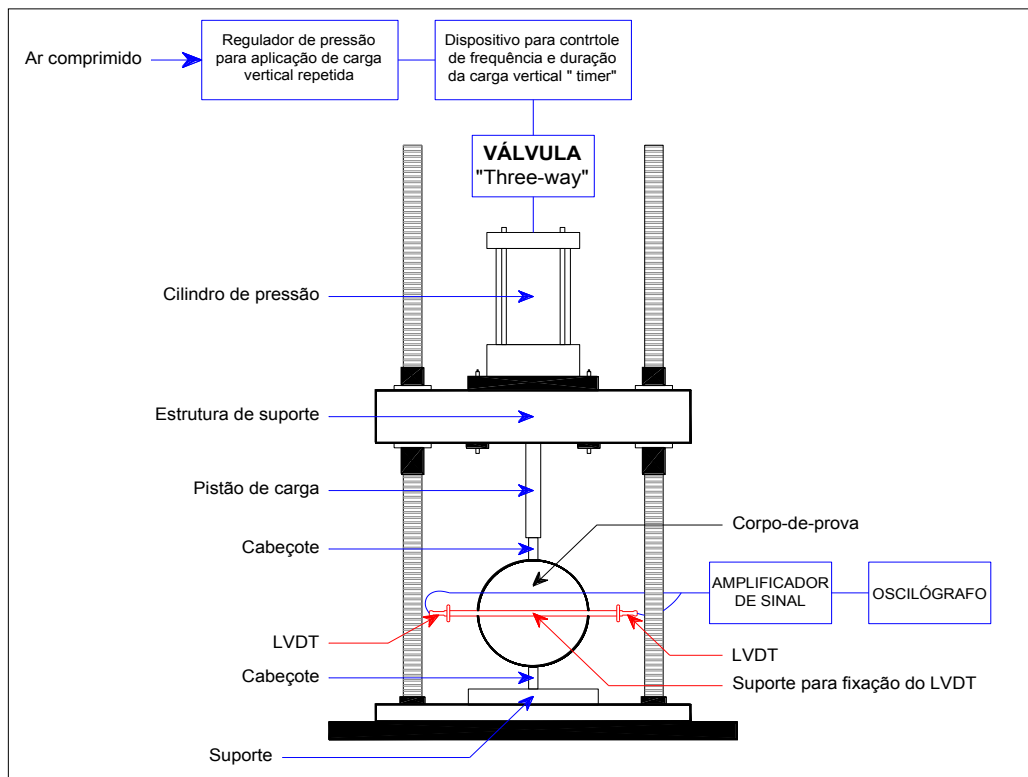


Figura 9 - Equipamento para ensaio de compressão diametral de carga repetida.

Fonte: ME 135 (DNIT, 2010b).

3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se uma abordagem sobre os materiais utilizados nesta pesquisa, suas caracterizações, além dos métodos e equipamentos empregados no desenvolvimento deste trabalho, para atendimento dos seus objetivos.

3.2 Materiais

3.2.1 Agregados

Neste estudo, foram utilizados agregados graúdo e miúdo de natureza mineral gnáissica, provenientes da Pedreira Ervália, localizada no município de Ervália, em Minas Gerais. Segundo Montanari (2007), a preferência por esses agregados se deve ao elevado emprego dos mesmos em obras de engenharia na cidade de Viçosa-MG e microrregião, tanto na construção civil, quanto na pavimentação de vias.

3.2.2 Ligantes Asfálticos

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram considerados dois tipos de ligantes asfálticos: cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS (BETUFLEX 60/85) e emulsão asfáltica catiônica especial, de ruptura controlada, modificada com polímeros (EMULEX RC1C-E), sendo ambos provenientes da empresa Stratura Asfaltos S/A, localizada na cidade de Betim-MG.

As Tabela 2 e 3 contêm as características físicas e reológicas do cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero e da emulsão asfáltica catiônica especial modificada por polímeros, respectivamente, segundo a empresa fornecedora desses materiais.

Tabela 2 - Características do cimento asfáltico modificado por polímero empregado na pesquisa.

Características	Unidade	60/85-E		Método de Ensaio		RESULTADO STRATURA
		Limites da Especificação	ABNT/ NBR	DNIT-ME		
Penetração 25°C, 5s, 100g	0,1 mm	40-70	-	155/2010		57
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	60	-	131/2010		75
Ponto de Fulgor, mín.	°C	235	11341	-		220
Viscosidade Brokfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx.	cP	3000	15184	-		1120
Viscosidade Brokfield a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	2000	15184	-		620
Viscosidade Brokfield a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx.	cP	1000	15184	-		235
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	15166	-		2,8
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín.	%	85	-			93
Efeito do calor e do ar - RTFOT, 163°C, 85 minutos						
Variação de massa, máx.	% massa	1	15235	-		0,89
Variação do PA, máx.	°C	(-5) a 7	-	131/2010		0,5
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	60	-	155/2010		73,5
Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C	%	80	-	130/2010		99,8

Fonte: STRATURA Asfaltos S/A (2014a).

Tabela 3 – Características da emulsão asfáltica polimérica empregada na pesquisa.

Ensaio	Unidade	EMULEX RC1C-E		Método de Ensaio		RESULTADO STRATURA
		Limites da Especificação	ABNT/ NBR	DNIT-ME		
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C	segundos	70 máx.		NBR 14491		32
Sedimentação, 5 dias	% massa	5 máx.		NBR 6570		0,5
Peneiração, 0,84mm	% massa	0,1máx.		NBR 14393		0
Carga da partícula	-	Positiva		NBR 6567		Positiva
Resíduo seco	% massa	62 mín		NBR 14376		63,2
pH	-	6,5máx.		NBR 62999		3,66
Ensaio sobre o resíduo seco						
Resíduo seco por evaporação	% massa	62 mín		NBR 14896		64
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	45-100		NBR 6567		53
Ponto de Amolecimento	°C	55 mín.		NBR 6560		64
Viscosidade Brokfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx.	cP	600 mín.		NBR 15184		1375
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín.	%	70 mín.		NBR 15086		77,5

Fonte: STRATURA Asfaltos S/A (2014b).

3.3 Métodos

3.3.1 Considerações iniciais

Os métodos utilizados no desenvolvimento deste estudo abrangeram a realização de ensaios que possibilitaram completar a caracterização dos materiais e analisar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Em resumo, as atividades empregadas compreenderam as fases expostas a seguir.

3.3.2 Realização de ensaios para caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados e os seus respectivos métodos são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Ensaios de caracterização dos agregados

ENSAIOS	NORMAS
Determinação da adesividade ao ligante betuminoso	ME 078 (DNER, 1994c)
Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo	ME 081 (DNER, 1998c)
Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	ME 194 (DNER, 1994c)
Determinação do índice de forma de agregado	ME 086 (DNER, 1994a)
Análise granulométrica de agregados	ME 083 (DNER, 1998e)

3.3.3 Realização de ensaios para caracterização dos ligantes asfálticos

Os ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos e os seus respectivos métodos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos

ENSAIOS	NORMAS
Determinação da massa específica e da densidade relativa de materiais betuminosos	NBR 6296 (ABNT, 2012a)
Determinação da penetração de materiais asfálticos	ME 155 (DNIT, 2010c)
Determinação do pH da emulsão asfáltica	NBR 6299 (ABNT, 2012b)
Determinação da peneiração da emulsão asfáltica	NBR 14393 (ABNT, 2012c)
Determinação da carga de partícula	ME 156 (DNIT, 2011a)

3.3.4 Composição das faixas granulométricas das misturas a quente e a frio

Para obter misturas com composições granulométricas que atendessem as faixas B e C da especificação de serviço ES 385 (DNER, 1999a), para misturas betuminosas a quente (Tabela 6), e as faixas B e C da especificação de serviço ES 390 (DNER, 1999b), para pré misturados a frio (Tabela 7), foram utilizadas as respectivas análises granulométricas da brita 1, brita 0 e pó de pedra. A partir destas, foram realizadas inúmeras combinações das porcentagens de cada agregado, para assim definir uma mistura final com composição granulométrica que se enquadrasse dentro de cada faixa, cujos limites inferior e superior são estabelecidos pelas suas respectivas especificações de serviço.

Tabela 6 - Limites inferior e superior das faixas granulométricas B e C da ES 385 (DNER, 1999a).

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso (faixas)		Tolerância na
ABNT	Abertura mm	B	C	curva de projeto
1"	25,4	-	100	-
3/4"	19,1	100	95 - 100	± 7
1/2"	12,7	75 - 100	-	± 7
3/8"	9,5	35 - 70	40 - 70	± 7
Nº 4	4,8	15 - 40	20 - 40	± 5
Nº 10	2,0	10 - 24	10 - 25	± 5
Nº 200	0,075	0 - 5	0 - 8	± 2

Tabela 7 - Limites inferior e superior das faixas granulométricas B e C da ES 390 (DNER, 1999b).

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso (faixas)		Tolerância na
ABNT	Abertura mm	B	C	curva de projeto
1 1/2"	38,1	100	-	± 7
1"	25	95 - 100	-	± 7
3/4"	19,1	80 - 100	100	± 7
1/2"	12,7	-	85 - 100	± 7
3/8"	9,5	45 - 80	75 - 100	± 7
Nº 4	4,8	28 - 60	50 - 85	± 5
Nº 10	2	20 - 45	30 - 75	± 5
Nº 40	0,42	10 - 32	15 - 40	± 5
Nº 80	0,18	8 - 20	8 - 30	± 3
Nº 200	0,075	3 - 8	5 - 10	± 2

3.3.5 Método de dosagem Marshall para misturas betuminosas a quente

Na análise do desempenho das misturas betuminosas a quente através do método Marshall, foram utilizados cinco teores, três amostras por teor, para cada faixa granulométrica, totalizando 30 corpos de prova.

Mesmo sabendo que esta pesquisa é constituída por faixas granulométricas distintas e que para tal seus teores de projeto seriam diferentes, teve-se o cuidado de utilizar os mesmos teores de BETUFLEX nas faixas B e C, sejam eles 4,2%, 4,7%, 5,2%, 5,7% e 6,2%, para que houvesse uma comparação dos parâmetros Marshall entre as faixas com mesmos teores de ligante. A escolha desses teores foi justificada com base em diversos trabalhos, como, por exemplo, Senço (2001), o qual comenta que teores de betume na faixa de 4% a 6% conferem às misturas betuminosas maiores condições de estabilidade, resistência e pequena porcentagem de vazios. Maiores porcentagens de vazios evitam o fenômeno da exsudação com a passagem do tráfego. Nessa faixa, os vazios no agregado mineral atingem valores mínimos, em torno dos quais deverá estar o teor ótimo de betume.

A mistura de agregados para todos os corpos de prova foi definida como aquela necessária para obter um corpo de prova com aproximadamente 6,3 cm de altura, 10,0cm de diâmetro e 1200 g, incluindo o ligante, conforme os métodos de ensaio ME 043 (DNER,1995) para misturas a quente. A energia de compactação correspondeu a 75 golpes por face dos corpos de prova.

No método de ensaio ME 043 (DNER,1995) para misturas a quente, define-se que a temperatura com que o ligante deve ser aquecido, para ser misturado aos agregados, é aquela na qual ele apresenta uma viscosidade Saybolt-Furol de 85 ± 10 SSF, e para a compactação, é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade de 140 ± 15 SSF. Assim, as misturas a quente, empregando o BETUFLEX 60/85 nesta pesquisa, foram efetuadas com o ligante a 165°C e compactadas com temperatura a 135°C . Os agregados foram aquecidos a temperaturas de, aproximadamente, 10°C a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, de acordo com o método de ensaio supracitado.

Para a determinação da massa específica aparente, volume de vazios, relação betume-vazios, densidade máxima teórica, vazios cheios com betume e vazios no agregado mineral, faz-se necessário a pesagem do corpo de prova ao ar, e a pesagem hidrostática do mesmo, para isto adota-se os critérios descritos na norma ME 117 (DNER, 1994d), porém parafinaram-se todos os corpos de prova.

A Figura 10 representa o equipamento Marshall utilizado neste trabalho, pertencente ao Laboratório de Asfalto e Misturas do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Viçosa (UFV).



Figura 10 - Equipamento Marshall do Laboratório de Asfalto e Misturas da UFV.

Fonte: SILVA, 2015.

Os parâmetros de dosagem Marshall de uma mistura asfáltica empregados no método Marshall são os que seguem:

$$Dt = \frac{100}{\frac{\%b}{Db} + \frac{\%a}{Drm}} \quad (5)$$

$$Drm = \frac{100}{\frac{\%ag}{Drag} + \frac{\%am}{Dram} + \frac{\%f}{Drf}} \quad (6)$$

$$Vv(\%) = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dt} \right)$$

(7)

$$VCB = \frac{Da * \%b}{Db} \quad (4)$$

$$VAM = Vv + VCB \quad (5)$$

$$RBV = 100 \frac{VCB}{VAM} \quad (6)$$

Em que:

Da: densidade aparente da mistura;

Dt: densidade teórica;

Vv : volume de vazios;

Drm: densidade real de massa média dos grãos ou fragmentos;

%ag, %am, %f : porcentagens de agregado graúdo, miúdo e filer, respectivamente, de acordo com a granulometria adotada e as definições de agregados da NBR 7225 (ABNT, 1993);

Drg, Dram, Drf: densidade real da massa dos grãos de agregado graúdo, agregado miúdo e filer, respectivamente;

VAM: volume de vazios no agregado mineral;

VCB: vazios com betume;

%b: porcentagem de material betuminoso empregado, expressa em relação à massa total da mistura;

Db: densidade da massa do material betuminoso empregado;

RBV: relação betume vazios;

% a: porcentagem de agregado empregado, expressa em relação à massa total da mistura.

3.3.6 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações para misturas betuminosas a quente

Para selecionar o teor de projeto, utilizaram-se dois parâmetros de dosagem Marshall, a saber, porcentagem de volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV), segundo o seguinte protocolo básico contido em Bernucci et al. (2008):

- Com os cinco valores médios de Vv e RBV obtidos nos grupos de corpos de prova, é possível traçar um gráfico do teor de asfalto (no eixo “x”) versus o Vv (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”);
- Adicionam-se, então, linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros. O gráfico deve conter ainda os limites específicos das duas variáveis;
- A partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RBV como os limites respectivos de cada um destes parâmetros, apresentados na Tabela 8 são determinados quatro teores de ligante asfáltico ($X_1 < X_2 < X_3 < X_4$);

Tabela 8 – Limites dos parâmetros Marshall ES 385 (DNER, 1999a).

CARACTERÍSTICAS	CAMADA DE ROLAMENTO
Porcentagem de vazios	3 a 5
Relação betume vazios	75 a 82
Estabilidade, mínima	500 kgf (75 golpes)
Fluência, mm	2,0 a 4,5
Resistência à tração por compressão diametral a 25°, kgf/cm ²	7,0 a 12,0

- O teor de projeto é selecionado, tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, o teor de projeto corresponde a $(X_2 + X_3) / 2$.

Para a escolha da variação dos teores de projeto, analisaram-se os parâmetros Marshall nas aproximações deste teor, tendo em vista os limites dos parâmetros Marshall contidos na ES 385 (DNER, 1999a) e a consideração apresentada na especificação de serviço ES 313

(DNER, 1997b), em que a variação de ligante permitida em um concreto betuminoso usinado a quente é de $\pm 0,30\%$.

Em seguida, fez-se a compactação dos corpos de prova pelo método Marshall, empregando o teor de projeto e suas aproximações, na energia de compactação de 75 golpes por face do corpo de prova, para fins de análise de novos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas betuminosas a quente. Para cada faixa, foram pesquisados mais três teores, ou seja, o teor de projeto e suas duas tolerâncias e três corpos de prova por traço. Assim, para este ensaio, foram totalizados 9 corpos de prova para cada mistura.

3.3.7 Método de dosagem Marshall para pré misturados a frio

Para a análise do desempenho dos pré misturados a frio através do método Marshall, foram utilizados cinco teores, três amostras por teor, para cada faixa granulométrica, totalizando 30 corpos de prova.

Mesmo sabendo que esta pesquisa é constituída por faixas granulométricas distintas e que para tal seus teores de projeto seriam diferentes, teve-se o cuidado de utilizar os mesmos teores de EMULEX nas faixas B e C, sejam eles 6,0%, 7,0%, 8,0%, 9,0% e 10,0%, para que houvesse uma comparação dos parâmetros Marshall entre as faixas com mesmos teores de ligante. A escolha desses teores foi justificada por diversos trabalhos, como, por exemplo, Pinto e Preussler (1980), os quais comentam que, numa investigação sobre módulos de resiliência de concretos asfálticos de diversos trechos de rodovias brasileiras, foram encontrados teores de betume variando na faixa de 4,3% a 6,5%. Logo, tendo em vista que o teor de betume no ligante utilizado é de 64% (Tabela 3), ao utilizar os teores de emulsão asfáltica supracitados, as porcentagens de betume corresponderão ao intervalo mencionado.

A mistura de agregados para todos os corpos de prova foi definida como aquela necessária para obter um corpo de prova com aproximadamente 6,35 cm de altura, 10,0 cm de diâmetro e 1200 g, incluindo o ligante, conforme o método de ensaio ME 107 (DNER,1994b) para pré misturados a frio. A energia de compactação correspondeu a 75 golpes por face dos corpos de prova.

Seguindo os procedimentos do método de ensaio supracitado, inicialmente, misturou-se o ligante aos agregados, até alcançar o melhor recobrimento possível dos agregados pelo ligante, e, em seguida, deixou-se a mistura em repouso para a ruptura da emulsão por um período de seis horas, para depois promover a compactação dos corpos de prova.

Após a compactação, os corpos de prova foram conduzidos, juntamente com o molde, à estufa a 60°C, por um período de vinte e quatro horas, visando à evaporação do solvente e da água. Concluído o período de cura, retiraram-se os corpos de prova da estufa e colocou-os para esfriar por cerca de duas horas à temperatura ambiente para depois ocorrer à extração dos corpos de prova.

Para a determinação da massa específica aparente, volume de vazios, relação betume-vazios, densidade máxima teórica, vazios cheios com betume e vazios no agregado mineral, faz-se necessário a pesagem do corpo de prova ao ar, e a pesagem hidrostática do mesmo, para isto adota-se os adotaram-se os critérios descritos na norma ME 117 (DNER, 1994d), porém parafinaram-se todos os corpos de prova.

3.3.8 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações para pré misturados a frio

Segundo a especificação de serviço ES 390 (DNER,1999b), o ensaio Marshall Modificado para misturas a frio deve ser utilizado para verificação das condições de vazios, estabilidade e fluência, de acordo com os valores contidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Critérios para verificação de vazios, estabilidade e fluência.

Características	Camada de pré misturado
Porcentagem de vazios	5 a 25
Estabilidade, mínima	250kgf (75 golpes)
Fluência,mm	2,0 a 4,5

Fonte: ES 390 (DNER, 1999b).

A escolha do teor de projeto ocorreu a partir da análise do gráfico destes três parâmetros em função do aumento do teor de ligante, com o objetivo de obter um teor que atendesse às verificações citadas na especificação de serviço supracitada.

Para a definição da variação dos teores de projeto, analisaram-se os parâmetros Marshall nas aproximações dos teores ótimos, tendo em vista os limites dos respectivos parâmetros contidos na ES 390 (DNER, 1999b) e a consideração apresentada na mesma, em que a porcentagem de ligante pode variar, no máximo, $\pm 0,30\%$ da fixada no projeto.

Em seguida, fez-se a compactação dos corpos-de-prova pelo método Marshall, empregando o teor de projeto e suas aproximações, na energia de compactação de 75 golpes por face do corpo de prova, para fins de análise de novos resultados dos parâmetros de

dosagem Marshall dos pré misturados a frio. Para cada faixa, foram pesquisados mais três teores, ou seja, o teor de projeto e suas duas aproximações $\pm 0,30\%$, sendo três corpos de prova por traço. Assim, para este ensaio, foram totalizados 9 corpos de prova por mistura.

3.3.9 Realização do ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral das misturas betuminosa à quente e pré misturados a frio

O ensaio de resistência à tração (RT) foi realizado através de compressão diametral estática, em conformidade com a norma ME 136 (DNIT, 2010a). Os corpos de prova foram moldados de acordo com os mesmos procedimentos utilizados no ensaio Marshall, e, antes de serem ensaiados, foram mantidos a uma temperatura de 25°C por um período mínimo de 2 horas.

3.3.10 Realização do ensaio para a determinação do módulo de resiliência das misturas betuminosas à quente e pré misturados a frio

O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado em conformidade com os procedimentos da norma ME 135 (DNIT, 2010b).

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1 Resultados de caracterização dos agregados

A Tabela 10 contém os métodos de ensaios referentes à algumas caracterizações dos agregados referidas na e os respectivos resultados obtidos.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

Ensaio de caracterização dos agregados	Norma	Resultado
Determinação da abrasão “Los Angeles” para agregado graúdo	ME 035 (DNER/1998a)	44,92%
Determinação da adesividade aos ligantes betuminosos	ME 078(DNER/1994c)	Insatisfatória
Determinação do Índice de forma – Brita 0	ME 086(DNER/1994a)	0,59
Determinação do Índice de forma – Brita 1	ME 086(DNER/1994a)	0,68
Determinação da absorção – Brita 0	ME 194(DNER/1998c)	0,68%
Determinação da absorção – Brita 1	ME 194(DNER/1998c)	0,65%
Determinação da massa específica agregado miúdo	ME 194(DNER/1998c)	2,782 g/cm ³
Determinação da massa específica real – Brita 0	ME 081 (DNER/1998c)	2,791 g/cm ³
Determinação da massa específica real – Brita 1	ME 081(DNER/1998c)	2,796 g/cm ³
Análise granulométrica	ME 083(DNER/1998d)	(1)
(1) Resultados detalhados nas Tabelas 11, 12, 13 e 14.		

Tabela 11 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa B da ES 385 (DNER, 1999a).

ABNT	Peneiras (mm)	Porcentagem passante em massa (%)		
		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	79,66	100,00	100,00
3/8"	9,5	0,18	90,51	100,00
N°4	4,8	0,10	13,52	99,69
N°10	2	0,09	1,50	79,30
N°40	0,42	0,09	1,18	51,33
N°80	0,18	0,08	1,00	34,36
N°200	0,075	0,04	0,66	14,68

Tabela 12 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa C da ES 385 (DNER, 1999a).

Peneiras		Porcentagem passante em massa (%)		
ABNT	(mm)	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
3/4"	19,1	72,47	100,00	100,00
1/2"	12,7	2,85	99,88	100,00
3/8"	9,5	0,13	92,27	100,00
Nº4	4,8	0,12	17,02	99,79
Nº10	2	0,11	1,72	79,39
Nº40	0,42	0,10	1,42	50,75
Nº80	0,18	0,09	0,97	34,80
Nº200	0,075	0,05	0,26	12,71

Tabela 13- Análise granulométrica dos agregados para a faixa B da ES 390 (DNER, 1999b).

Peneiras		Porcentagem passante em massa (%)		
ABNT	(mm)	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
3/4"	19,1	87,93	100,00	100,00
1/2"	12,7	17,30	99,91	100,00
3/8"	9,5	3,03	98,70	100,00
Nº4	4,8	0,19	18,29	99,00
Nº10	2,0	0,18	1,26	74,17
Nº200	0,075	0,00	0,44	14,04

Tabela 14 - Análise granulométrica dos agregados para a faixa C da ES 390 (DNER, 1999b).

Peneiras		Porcentagem passante em massa (%)		
ABNT	(mm)	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	85,77	100,00	100,00
3/8"	9,5	1,94	99,10	99,72
Nº 4	4,8	0,10	18,63	98,87
Nº 10	2,0	0,09	1,38	78,70
Nº 200	0,075	0,04	0,16	15,85

As especificações de serviço ES 385 (DNER, 1999a), para mistura betuminosa a quente, e ES 390 (DNER, 1999b), para pré misturado a frio, fazem referência às seguintes características, como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Critérios para verificação da abrasão “Los Angeles” e do Índice de Forma.

Ensaio de caracterização dos agregados	Resultados	
	ES 385 (DNER, 1999a)	ES 390 (DNER, 1999b)
Determinação da abrasão "Los Angeles" para agregado graúdo	Igual ou inferior a 55%	Igual ou inferior a 40%
Determinação do Índice de Forma	Superior a 0,5	Superior a 0,5

Nota-se que o resultado do ensaio da Abrasão “*Los Angeles*” segundo a ME 035 (DNER, 1998b) indicou que o agregado atende a especificação de serviço ES 385 (DNER, 1999a) para concreto asfáltico com asfalto polímero. Entretanto, o valor apresentado pelo agregado não se encontra no intervalo estabelecido pela especificação de serviço ES 390 (DNER, 1999b). Porém, na referida especificação, admite-se o uso do agregado no caso de empregos anteriores terem apresentado resultado satisfatório. Assim, pelo alto emprego desse agregado em Viçosa-MG e microrregião de forma aceitável e o seu uso na pesquisa de Horta e Simões (2013), optou-se por sua utilização no desenvolvimento desta pesquisa. Os resultados de índice de forma atenderam a ambas especificações de serviço.

Também foram realizados ensaios de adesividade do agregado graúdo ao cimento asfáltico modificado por polímero (Figura 11) e à emulsão asfáltica modificada por polímero, e nos dois ensaios os resultados foram não satisfatórios. Assim, para a melhoria da adesividade, utilizou-se, em ambos ligantes, 0,1%, em massa do ligante, de aditivo Betudope. Com a adição do Betudope, os agregados apresentaram adesividade satisfatória aos ligantes asfálticos supracitados, pois não ocorreu deslocamento total ou parcial ao fim de 72 horas. A Figura 12 mostra o resultado da adesividade do agregado ao cimento asfáltico modificado por polímeros com o uso do Betudope.



Figura 11 - Adesividade do agregado ao cimento asfáltico modificado por polímeros.



Figura 12 - Adesividade do agregado ao cimento asfáltico modificado com polímeros por adição de Betudope.

4.2 Resultados da caracterização dos ligantes

4.2.1 Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero do tipo SBS

Foram realizados alguns ensaios de caracterização do BETUFLEX 60/85 no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. O primeiro ensaio realizado foi o de determinação da massa específica e da densidade relativa de acordo com a NBR 6296 (ABNT, 2012a), e os resultados encontrados foram 1,0088 para a densidade relativa e 1,0058 g/cm³ para a massa específica.

Outro ensaio foi o de penetração segundo a ME 155 (DNIT, 2010c), apresentado na Figura 13, e o resultado encontrado foi de 53 décimos de milímetros, resultado satisfatório, pois se encontra dentro do limite de 40 a 70 décimos de milímetros estabelecido pelo EM 129 (DNIT,2011b).



Figura 13 - Equipamento e resultado do ensaio de penetração realizado segundo a ME 155 (DNIT, 2010c).

4.2.2 Emulsão asfáltica catiônica especial, de ruptura controlada, modificada com polímeros

Assim como para o cimento asfáltico, foram realizados alguns ensaios de caracterização do EMULEX RC 1C-E no Laboratório de Misturas Asfálticas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. Dentre eles, foi realizado o ensaio para a determinação pH de acordo com a NBR 6299 (ABNT, 2012b), e o resultado encontrado foi de 3,89 à temperatura de 25°C, o qual está de acordo com o estabelecido no especificação do material EM 128 (DNIT, 2010d).

Outro ensaio foi o de peneiração segundo a NBR 14393 (ABNT, 2012c), representado na Figura 14. O método de ensaio supracitado estabelece que a porcentagem máxima em massa deve ser de 0,1%, e o resultado foi de 0,06%, satisfazendo a especificação.



Figura 14 - Ensaio peneiração da emulsão asfáltica utilizada na pesquisa.

No ensaio de carga de partícula segundo a ME 156 (DNIT, 2011a), Figura 15, foi percebido que a emulsão é catiônica, pois ocorre o depósito desta sobre o catodo (eletrodo negativo), enquanto o anodo (eletrodo positivo) fica praticamente limpo quando comparado ao outro eletrodo.



Figura 15 - Apresentação da montagem do ensaio de carga de partícula e o resultado deste realizado no Laboratório de Materiais Asfálticos e Misturas da UFV.

5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE MODIFICADAS POR LIGANTE POLIMÉRICO

5.1 Composição das faixas granulométricas

Nas Tabelas 16 e 17 são apresentadas a análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdo, os quantitativos de agregados que enquadram as misturas nas faixas de projeto B, 32% de pó de pedra, 41% de brita 0 e 27% de brita 1, e na faixa C, 53% de pó de pedra, 35% de brita 0 e 12% de brita 1 bem como os limites inferiores e superiores e as suas respectivas tolerâncias das faixas B e C.

Tabela 16 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica B.

Peneira de malha quadrada		Granulometria dos agregados			Faixa de Projeto	Limites Faixa Granulométrica B ES 385 (DNER, 1999)			
		Brita 1	Brita 0	Pó- de- pedra		Tolerância	% MIN.	% MAX.	Tolerância
ABNT	Abertura mm	27%	41%	32%	% Alvo				
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	93		100	107
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	88	95	100	107
3/4"	19,1	79,66	100,00	100,00	94,51	73	80	100	107
3/8"	9,5	0,18	90,51	100,00	69,16	38	45	80	87
N °4	4,8	0,10	13,52	99,69	37,47	23	28	60	65
N °10	2	0,09	1,50	79,30	26,02	15	20	45	50
N °40	0,42	0,09	1,18	51,33	16,93	5	10	32	37
N °80	0,18	0,08	1,00	34,36	11,43	3	8	20	25
N °200	0,075	0,04	0,66	14,68	4,98	1	3	8	10

Tabela 17 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica C.

Peneira de malha quadrada		Granulometria dos agregados			Faixa de Projeto	Limites Faixa Granulométrica C ES 385 (DNER, 1999)			
		Brita 1	Brita 0	Pó- de- pedra		Tolerância	% MIN.	% MAX.	Tolerância
ABNT	Abertura mm	12%	35%	53%	% Alvo				
3/4"	19,4	72,47	100,00	100,00	96,70	93		100	100
1/2"	12,7	2,85	99,88	100,00	88,30	78	85	100	100
3/8"	9,5	0,13	92,27	100,00	85,31	68	75	100	100
N °4	4,8	0,12	17,02	99,79	58,86	45	5	85	90
N °10	2	0,11	1,72	79,39	42,69	25	30	75	80
N °40	0,42	0,10	1,42	50,75	27,41	10	15	40	45
N °80	0,18	0,09	0,97	34,08	18,41	5	8	30	33
N °200	0,075	0,05	0,26	12,71	6,84	3	5	10	12

A faixa de projeto e os limites inferior e superior com as tolerâncias das faixas granulométricas B e C, respectivamente são representadas nas Figuras 16 e 17.

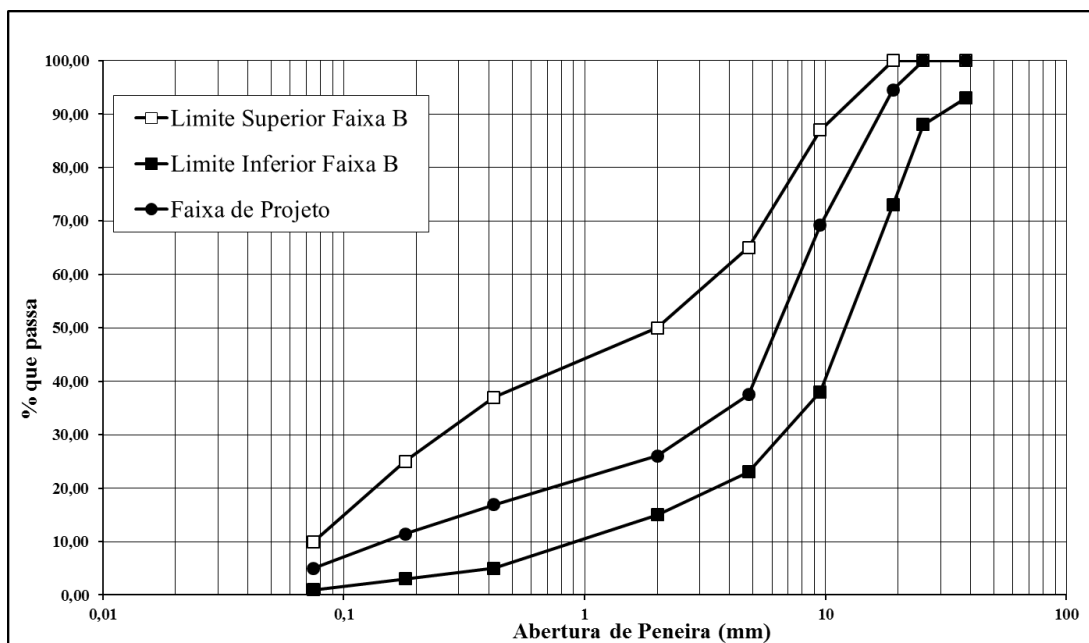


Figura 16 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica B da ES 385 (DNER, 1999a) e curva granulométrica de projeto.

Ao analisar a composição granulométrica das misturas de agregados, tem-se que as faixas B e C apresentam curvas granulométricas contínuas e bem-graduadas, que tendem, teoricamente, a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores.

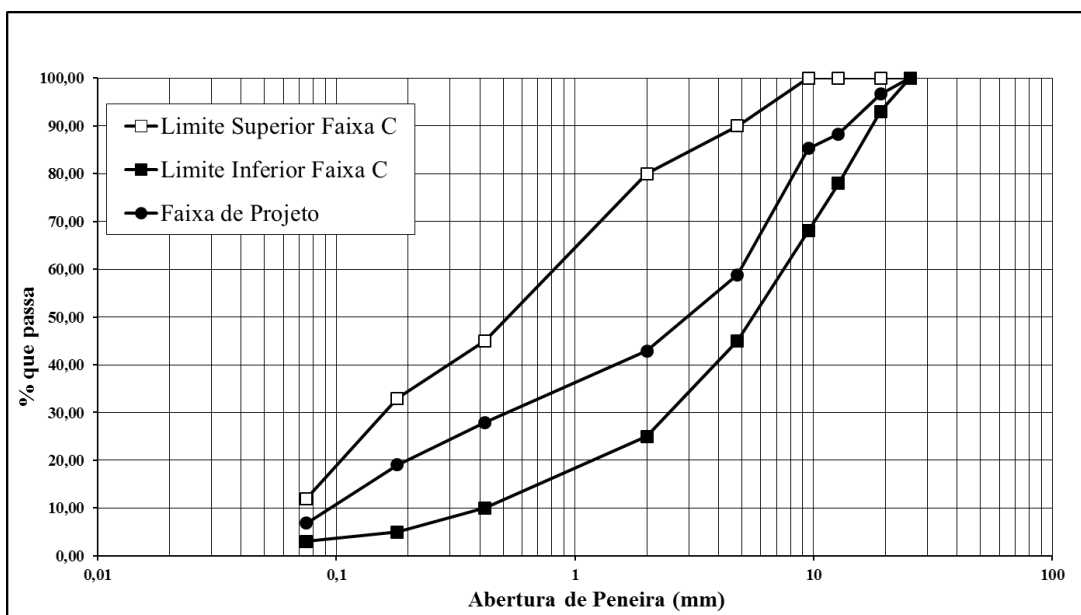


Figura 17 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica C da ES 385 (DNER, 1999a) e curva granulométrica de projeto.

5.2 Dosagem Marshall

Para as faixas granulométricas B e C, foram compactados três corpos de prova por teor de ligante. As Tabela 18 e 19 contêm as médias dos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas asfálticas das faixas B e C de projeto, respectivamente.

Tabela 18 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa B.

% LIGANTE	MEA (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
4,2	2,446	2,585	5,36	10,21	15,57	65,64	601,33	2,44
4,7	2,468	2,564	3,71	11,53	15,25	75,71	618,33	3,38
5,2	2,498	2,543	1,77	12,91	14,68	87,98	817,00	5,01
5,7	2,495	2,523	1,09	14,14	15,23	92,86	694,33	5,91
6,2	2,498	2,503	0,19	15,4	15,58	98,82	694,00	5,64

Observação: MEA: massa específica aparente; DMT: densidade máxima teórica; Vv: volume de vazios; VCB: vazios cheios com betume; VAM: vazios no agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade Marshall; F: fluência.

Tabela 19 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa C.

% LIGANTE	MEA (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
4,2	2,426	2,586	6,20	10,13	16,33	62,08	633,50	3,48
4,7	2,446	2,565	4,64	11,43	16,07	71,28	668,50	4,19
5,2	2,451	2,544	3,65	12,67	16,33	77,65	895,00	4,13
5,7	2,489	2,524	1,40	14,10	15,50	91,00	922,67	5,17
6,2	2,477	2,504	1,09	15,27	16,36	93,33	1151,00	6,20

A partir da análise dos resultados, percebe-se que a relação betume-vazios é crescente com o aumento do teor de ligante e a porcentagem do volume de vazios de ambas as faixas granulométricas diminui com o aumento do teor de ligante, devido ao preenchimento dos vazios existentes nas misturas pelo ligante.

Ao comparar os valores da porcentagem de vazios da faixa granulométrica B com os da faixa granulométrica C, tem-se que, para os mesmos teores de ligante, aquela faixa apresenta menores porcentagens de vazios, mesmo tendo um arranjo de partículas com maiores diâmetros quando comparado com esta.

As Figuras 18 e 19 ilustram as variações dos parâmetros de dosagem Marshall apresentados nas tabelas, respectivamente, em função do teor de ligante, de acordo com as respectivas faixas granulométricas.

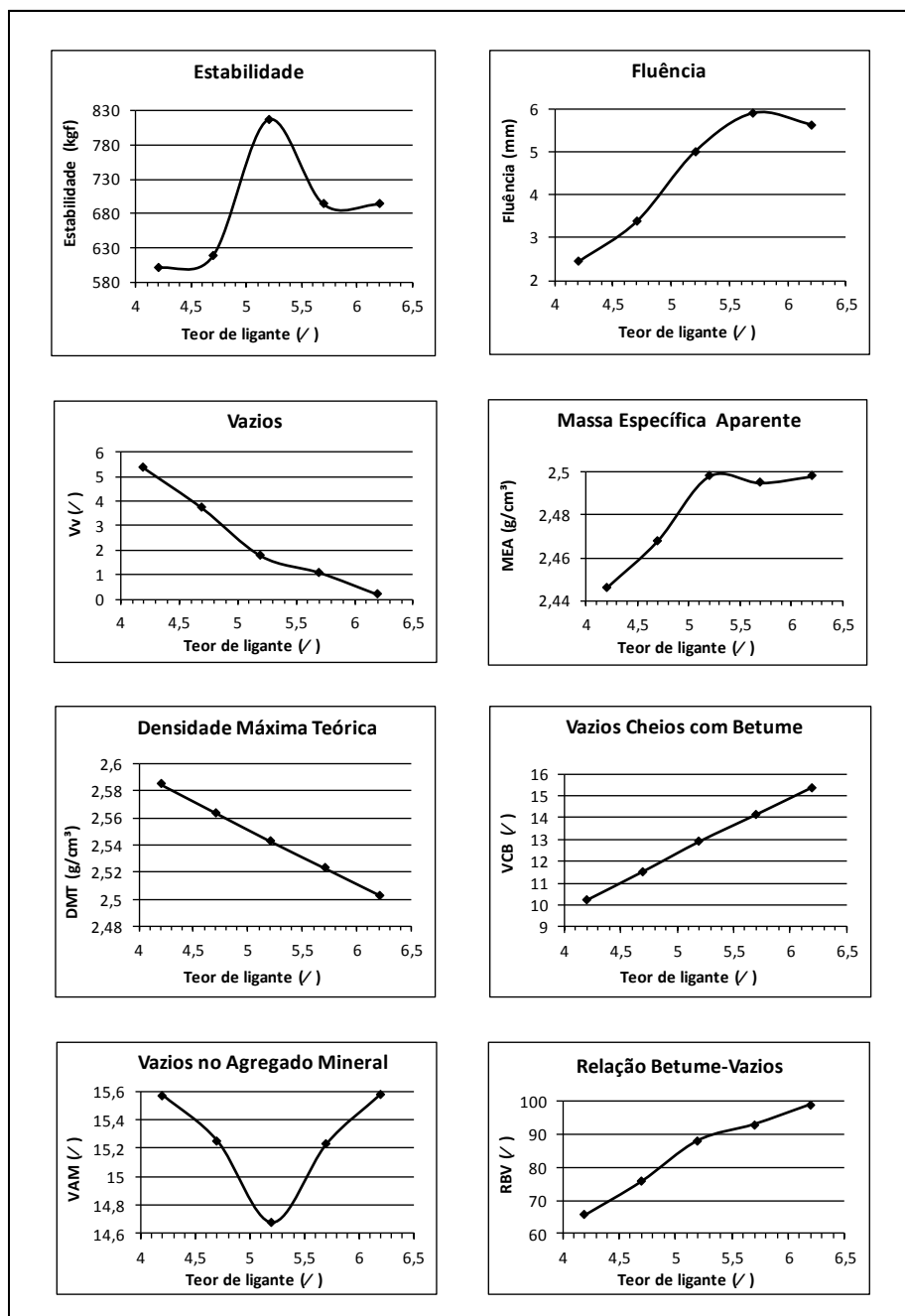


Figura 18- Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B em função do teor de ligante asfáltico.

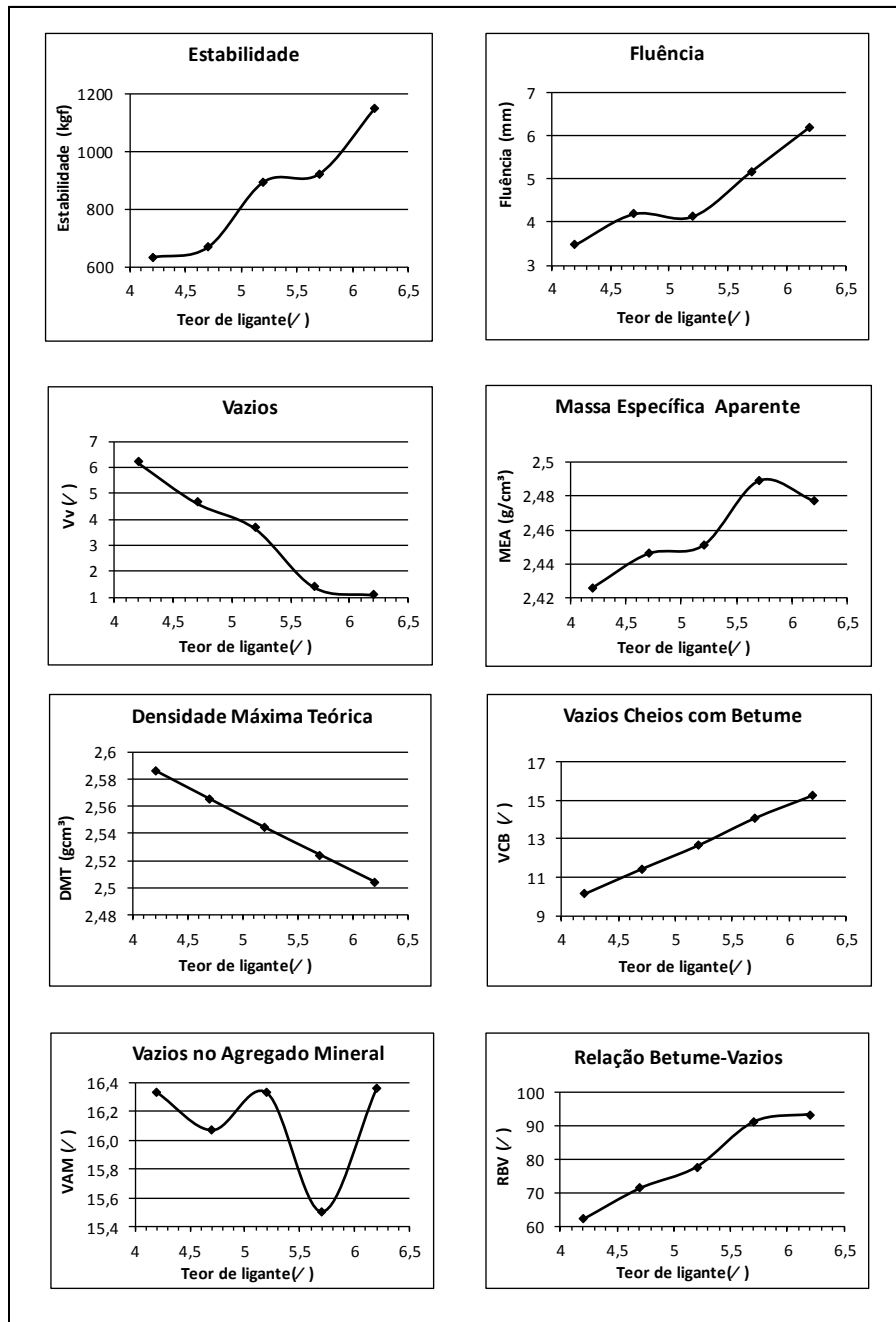


Figura 19 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C em função do teor de ligante asfáltico.

Observa-se que as variações da massa específica aparente para ambas as faixas em função do teor de cimento asfáltico foram muito discretas.

5.3 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações

Tendo em vista os resultados dos parâmetros porcentagem de volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV), em relação aos teores de ligante, e dos limites destes parâmetros estabelecidos na especificação de serviço ES 385 (DNER, 1999a), foram plotados os gráficos apresentados nas Figuras 20 e 21.

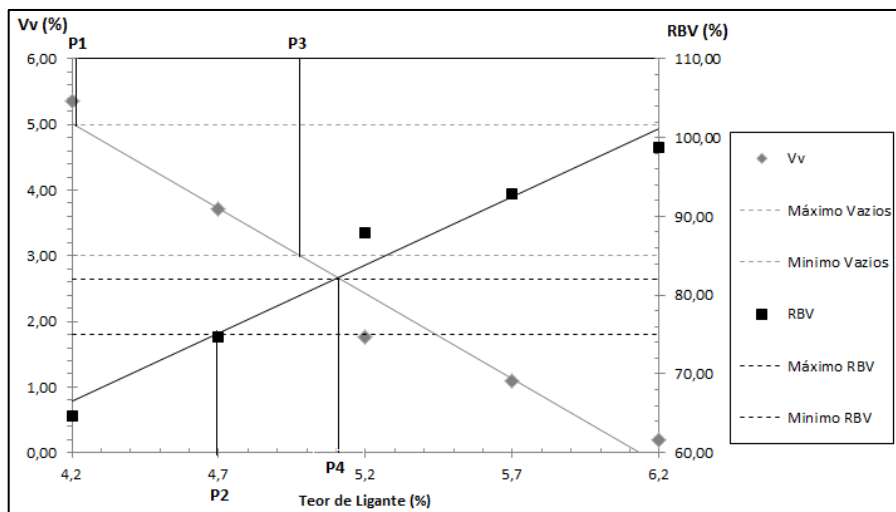


Figura 20 - Escolha do teor de projeto para mistura asfáltica da faixa granulométrica B.

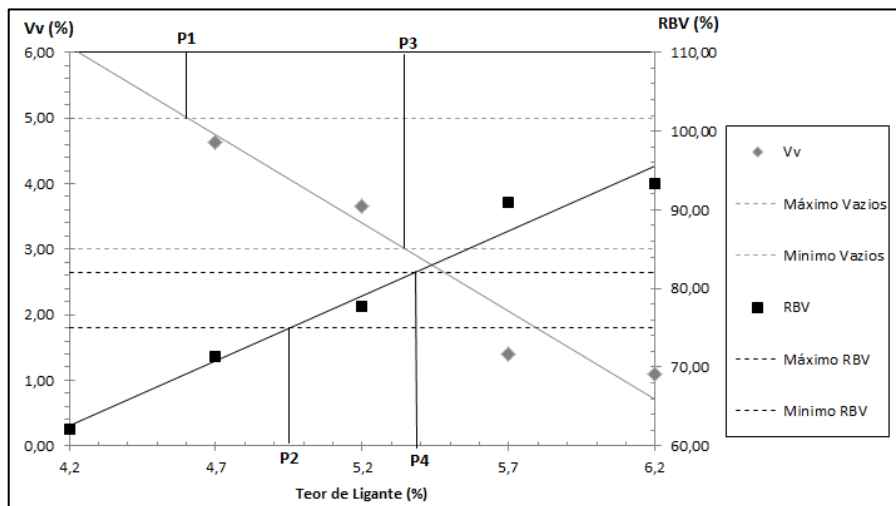


Figura 21 - Escolha do teor de projeto para mistura asfáltica da faixa granulométrica C.

A partir da análise dos gráficos apresentados, determinam-se os pontos P1, P2, P3 e P4 e os respectivos valores do volume de vazios e da relação betume vazios apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Teor de projeto para mistura da faixa B.

PONTOS	Volume de vazios (%)	RBV (%)	% ligante
P1	5,40	64,60	4,20
P2	3,71	74,70	4,65
P3	3,00	80,00	5,00
P4	2,30	82,00	5,10
	X2		4,65
	X3		5,00
TEOR DE PROJETO (%)			4,8

Tabela 21 - Teor de projeto para mistura da faixa C.

PONTOS	Volume de vazios (%)	RBV (%)	% ligante
P1	5,0	66,0	4,60
P2	4,1	75,0	4,95
P3	3,0	85,0	5,35
P4	2,9	82,0	5,40
	X2		4,95
	X3		5,35
TEOR DE PROJETO (%)			5,2

Logo, estes teores de projeto encontrados confirmam o que foi comentado nos resultados de porcentagem de volume de vazios: como a faixa granulométrica B é composta por maior porcentagem de agregados graúdos em relação à faixa granulométrica C que possui maior porcentagem de agregado miúdo, pode-se afirmar que as misturas daquela faixa necessitam de menos ligante, pois têm menor superfície específica de agregados para cobrir.

Segundo a especificação de serviço ES 313 (DNER,1997b), a variação da porcentagem de ligante permitida em um concreto betuminoso usinado a quente é, no máximo, de $\pm 0,3\%$, na mistura coletada na usina. Logo, tendo como referência este limite, nesta pesquisa, foram consideradas variações de $\pm 0,1\%$ em relação ao teor de projeto, pois, de acordo com os resultados apresentados, para variações maiores do que a escolhida, os parâmetros obtidos não estarão nos intervalos da norma de especificação ES 385 (DNER, 1999a).

Ressalta-se que os critérios convencionais volumétricos não garantem que o teor de projeto dito “ótimo” corresponda, necessariamente, ao melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma mistura asfáltica.

Nas Tabela 22 e 23, apresentam-se as médias dos resultados dos parâmetros de dosagem Marshall de misturas com cimento asfáltico modificado por polímero (BETUFLEX 60/85), para os teores de projeto e suas variações, respectivamente, para as faixas B e C, empregando-se, na moldagem, 75 golpes em cada face do corpo de prova.

Tabela 22 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B no teor de projeto e suas proximidades com BETUFLEX 60/85.

% LIGANTE	MEA (g/cm³)	DMT (g/cm³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
4,7	2,462	2,564	3,99	11,50	15,49	75,04	862,50	4,51
4,8	2,472	2,559	3,42	11,80	15,21	77,54	904,50	4,85
4,9	2,471	2,555	3,29	12,08	15,33	78,53	797,00	5,56

Observação: MEA: massa específica aparente; DMT: densidade máxima teórica; Vv: volume de vazios; VCB: vazios cheios com betume; VAM: vazios no agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade Marshall; F: fluência.

Tabela 23 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C no teor de projeto e suas proximidades com BETUFLEX 60/85.

% LIGANTE	MEA (g/cm³)	DMT (g/cm³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
5,1	2,447	2,548	3,99	12,41	16,39	75,69	712,00	3,25
5,2	2,468	2,544	3,20	12,76	15,77	80,87	815,00	4,00
5,3	2,453	2,54	3,44	12,93	16,37	79,08	770,00	3,87

Os parâmetros Marshall, de acordo com a norma ES 385 (DNER, 1999a), devem estar entre os seguintes valores: porcentagem de vazios (3% a 5%), relação betume-vazios (75% a 82%), estabilidade mínima de 500 kgf e fluência entre 2,0 mm e 4,5 mm.

Observa-se que a relação betume vazios e a estabilidade dos teores 4,7%, 4,8% e 4,9% da faixa granulométrica B apresentaram resultados satisfatórios, pois atenderam à especificação citada acima. Destaca-se que a fluência relativa ao teor de 4,8% não se distanciou significativamente do limite máximo estabelecido pela norma, no entanto deve-se ressaltar que este parâmetro não é representativo e está em desuso, tanto que na especificação de serviço ES 031 (DNIT, 2006), mais recente do que a referida acima, não se faz referência à fluência.

Para a faixa granulométrica C, tanto no teor de projeto quanto nas suas aproximações, foram obtidos resultados dos parâmetros nos intervalos especificados. Os parâmetros Marshall de cada faixa encontram-se representados nas Figuras 22 e 23.

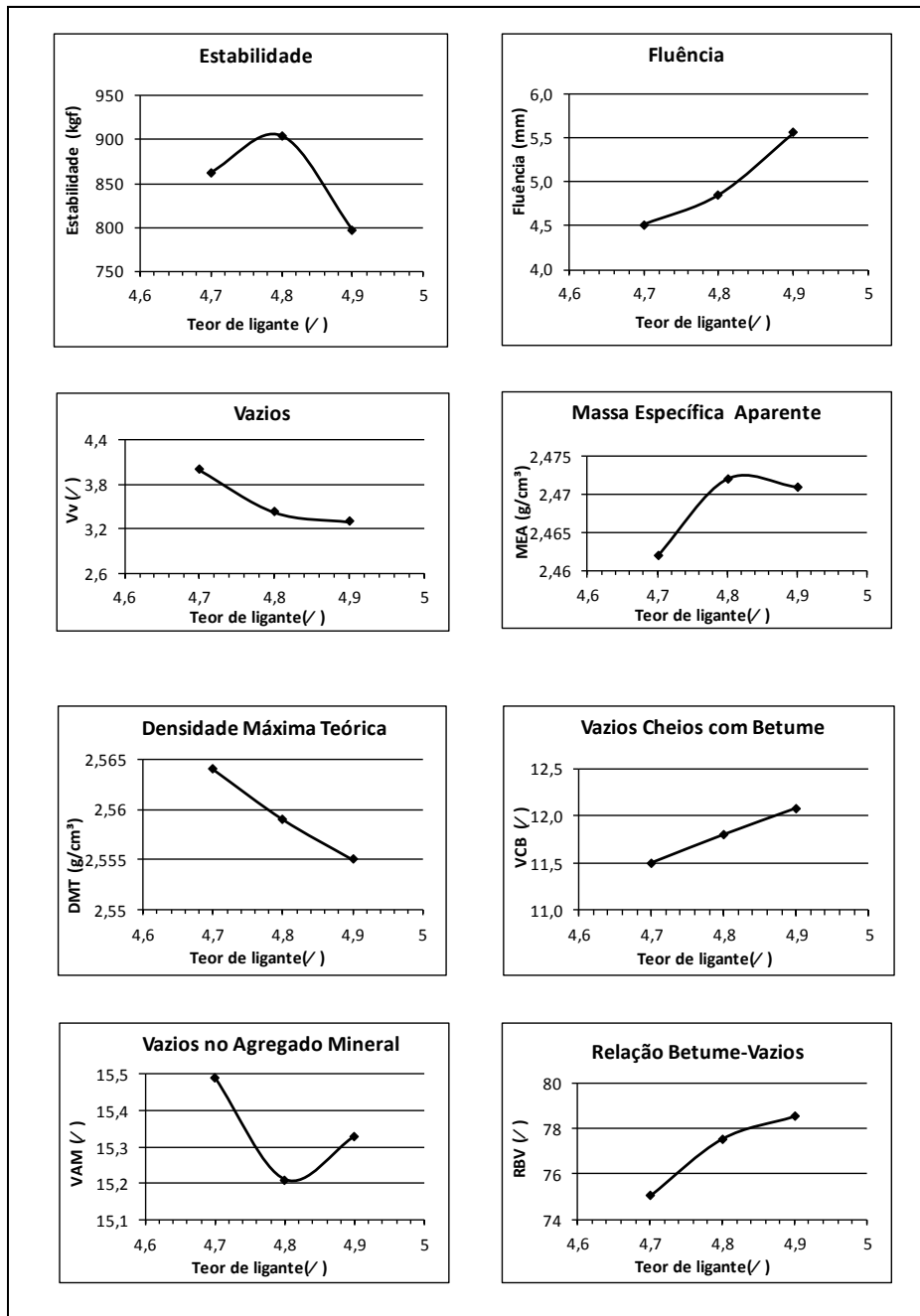


Figura 22 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para as misturas da faixa B em função do teor de projeto e suas tolerâncias.

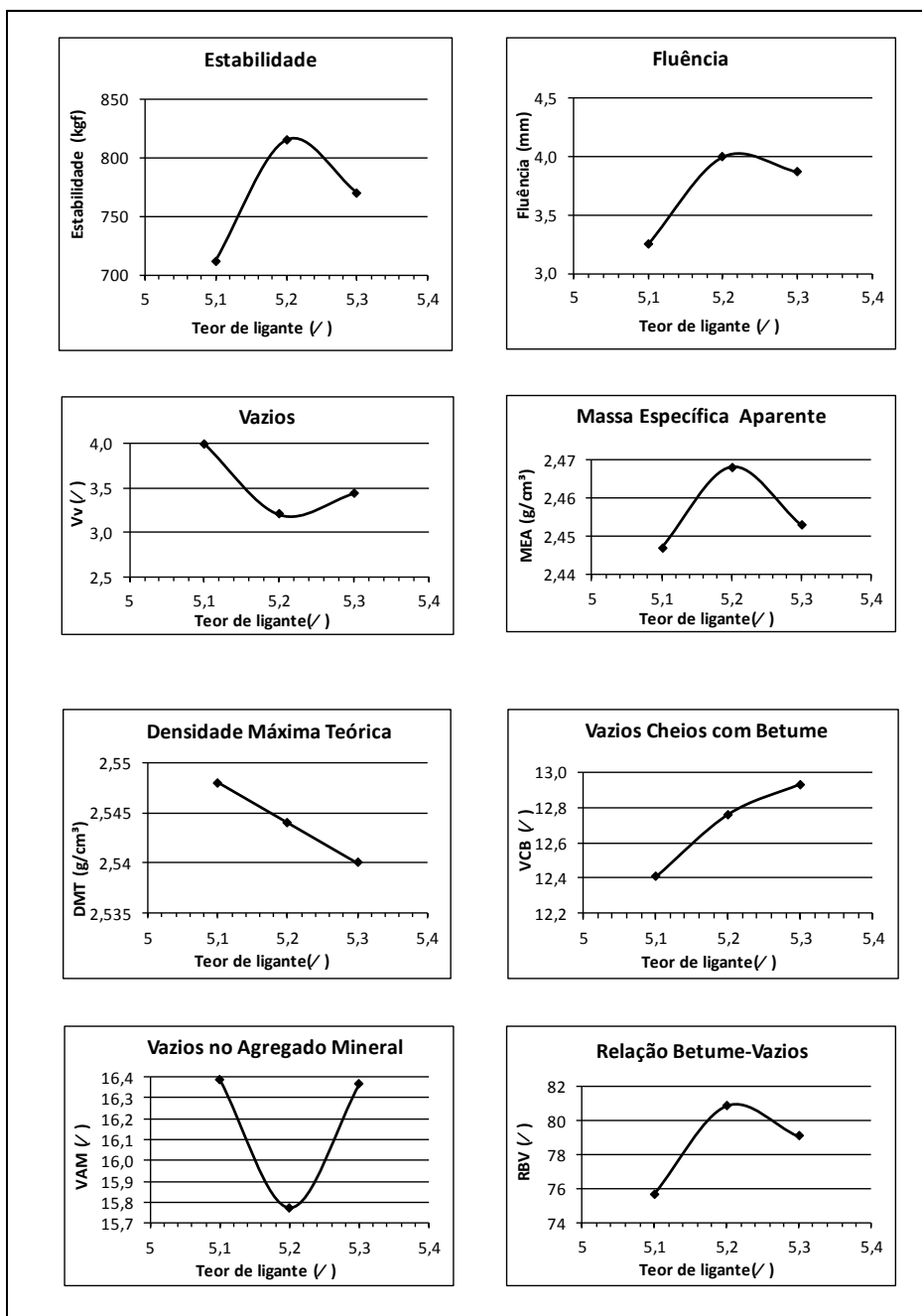


Figura 23 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para as misturas da faixa C em função do teor de projeto e suas tolerâncias.

Observa-se que a relação betume vazios e a estabilidade e fluência dos teores 5,1%, 5,2% e 5,3% da faixa granulométrica C apresentaram resultados satisfatórios pois atenderam à especificação ES 385 (DNER, 1999a).

5.4 Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral

As Tabela 2524 e 25 contêm as médias dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral (RTCD) para as misturas com BETUFLEX 60/85, para as faixas B e C, respectivamente.

Tabela 24 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa B.

TEOR LIGANTE (%)	RTCD (kgf/cm ²)
4,7	12,06
4,8	12,71
4,9	12,06

Tabela 25 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa C.

TEOR LIGANTE (%)	RTCD (kgf/cm ²)
5,1	8,22
5,2	10,04
5,3	9,02

Segundo a especificação de serviço ES 385 (DNER, 1999a), a resistência à tração por compressão diametral para a camada de rolamento, na temperatura de 25 °C, deve estar entre 7 kgf/cm² e 12 kgf/cm². Assim, a partir da análise dos resultados, nota-se que os valores obtidos com os corpos de prova da faixa C (Tabela 25), no teor de projeto e suas tolerâncias estão no intervalo referido, enquanto que aqueles oriundos dos corpos de prova da faixa B (Tabela 24) ultrapassam o limite superior previsto pela norma, porém com resultados próximos ao limite máximo estabelecido. Observa-se, também, que tanto para as misturas asfálticas da faixa B quanto para as da faixa C, os maiores valores de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos nos teores de projeto, isto é, 4,8% e 5,2% de ligante betuminoso, respectivamente.

Ao comparar resultados de resistência a tração por compressão diametral de pesquisas distintas, encontram-se algumas diferenças, visto que, para se avaliar a magnitude dos resultados, a classificação, a granulometria dos agregados e o tipo de ligante empregados devem ser os mesmos. No entanto, podem ser realizadas algumas considerações com relação ao trabalho desenvolvido por Amaral (2000) e o trabalho desenvolvido nesta pesquisa, apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Comparativo dos resultados de resistência à tração por compressão diametral entre as respectivas misturas asfálticas investigadas por Amaral (2000) e por essa pesquisa.

Autor	Tipo de Ligante	Faixa ES 385 (DNER, 1999)	Teor de Ligante (%)	Resistência a tração (kgf/cm²)
Amaral (2000)	BETUFLEX 65/60	C	5,0	8,98
			5,5	7,72
Presente Pesquisa	BETUFLEX 60/85	C	5,1	8,22
			5,2	10,04
			5,3	9,02

Dentre os pontos em comum das pesquisas, tem-se a temperatura dos corpos de prova na realização do ensaio, 25°C, os ligantes modificados por polímero, o uso do BETUDOPE como aditivo melhorador de adesividade e a faixa granulométrica. As misturas ensaiadas em cada pesquisa tinham diferentes teores, porém os teores deste trabalho estão compreendidos no intervalo dos teores utilizados por Amaral (2000). Percebe-se que os resultados desta pesquisa são próximos do referido trabalho. Logo, com esta comparação, pode-se afirmar que os resultados deste ensaio foram consistentes.

5.5 Resultados do ensaio de determinação do módulo de resiliência

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência para as faixas B e C encontram-se, respectivamente, nas Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 27 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa B.

TEOR LIGANTE (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
4,7	4195
4,8	4190
4,9	4105

Tabela 28 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa C.

TEOR LIGANTE (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
5,1	3870
5,2	3819
5,3	4052

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que os módulos de resiliência das misturas asfálticas da faixa granulométrica B resultaram em maiores valores do que aqueles relativos à faixa C, provavelmente, devido às diferenças nas granulometrias e nos teores de projeto de ligante de ambas as misturas.

Como não existe uma norma que especifique os valores de módulo de resiliência, houve uma comparação entre os resultados deste trabalho com os da pesquisa de Amaral (2000). A partir do que é apresentado na Tabela 299, tem-se que os módulos de resiliência neste trabalho foram maiores do que no outro com BETUFLEX B 65/60 e esta diferença é significativa, pois ao compararmos o teor de ligante 5,0% do trabalho de Amaral (2000) com o teor de ligante 5,1 % desta pesquisa nota-se que aquela é aproximadamente 62% menor que esta. Tal fato pode ser justificado pela diferença na origem dos agregados e do tipo de ligante.

Tabela 29 - Comparativo dos resultados de módulo de resiliência entre as respectivas misturas asfálticas investigadas por Amaral (2000) e por essa pesquisa.

Autor	Tipo de Ligante	Faixa ES 385 (DNER, 1999)	Teor de Ligante (%)	Módulo de resiliência (MPa)
Amaral (2000)	BETUFLEX 65/60	C	5,0	1444
			5,5	1195
Presente Pesquisa	BETUFLEX 60/85	C	5,1	3870
			5,2	3819
			5,3	4052

6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS PRÉ MISTURADOS A FRIO MODIFICADOS POR LIGANTE POLIMÉRICO

6.1 Composição das faixas granulométricas

Nas Tabelas 30 e 31 são apresentados a análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdo, os quantitativos de agregados que enquadram as misturas nas faixas de projeto B, 20% de pó de pedra, 50% de brita 0 e 30% de brita 1, e na faixa C, 26% de pó de pedra, 39% de brita 0 e 35% de brita 1 bem como os limites inferiores e superiores e as suas respectivas tolerâncias das faixas B e C.

Tabela 30- Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica B.

Peneira de malha quadrada		Granulometria dos agregados			Faixa de Projeto	Limites Faixa Granulométrica B ES 390 (DNER, 1999b)			
ABNT	Abertura mm	Pó-de-pedra	Brita 0	Brita 1		Tolerância	% MIN.	% MAX.	Tolerância
3/4"	19,1	100,00	100,00	87,93	96,38	93	100	100	100
1/2"	12,5	100,00	99,91	17,30	75,15	68	75	100	100
3/8"	9,5	100,00	98,87	3,03	70,34	28	35	70	77
N° 4	4,8	99,00	18,29	0,19	29,01	10	15	40	45
N° 10	2,0	74,17	1,26	0,18	15,52	5	10	24	29
N° 200	0,075	14,04	0,44	0,00	3,03	0	0	5	7

Tabela 31 - Granulometria dos agregados, da mistura e seus limites máximos e mínimos com as respectivas tolerâncias da faixa granulométrica C.

Peneira de malha quadrada		Granulometria dos agregados			Faixa de Projeto	Limites Faixa Granulométrica C ES 390 (DNER, 1999b)			
ABNT	Abertura mm	Pó-de-pedra	Brita 0	Brita 1		Tolerância	% MIN.	% MAX.	Tolerância
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100	100	100
3/4"	19,1	100,00	100,00	85,77	95,02	88	95	100	100
3/8"	9,5	99,72	99,10	1,94	65,26	33	40	70	77
N° 4	4,8	98,87	18,63	0,10	33,00	15	20	40	45
N° 10	2	78,70	1,38	0,09	21,03	5	10	25	30
N° 200	0,075	15,85	0,16	0,04	4,20	0	0	8	10

A faixa de projeto e os limites inferior e superior com as tolerâncias das faixas granulométricas B e C, respectivamente são representadas nas Figuras 24 e 25.

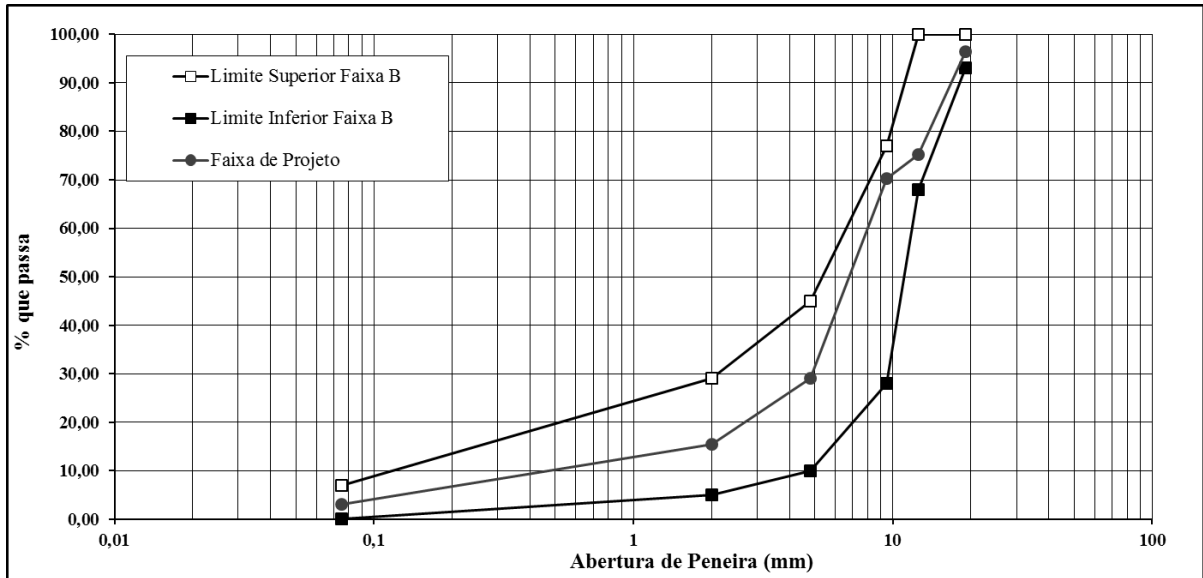


Figura 24 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica B da ES 390 (DNER, 1999b) e curva granulométrica de projeto.

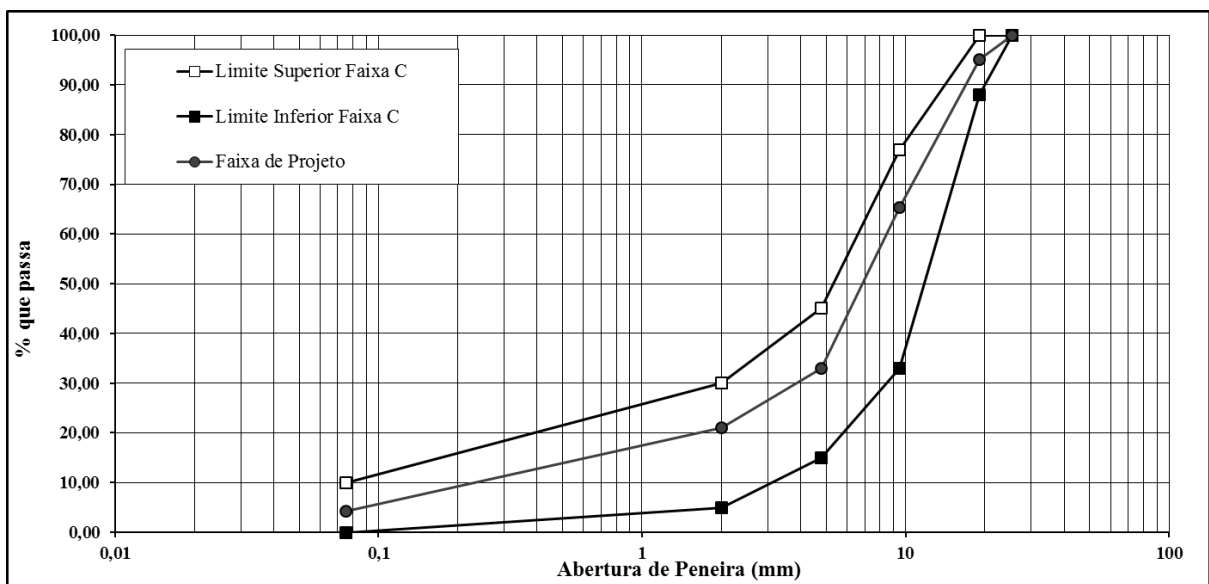


Figura 25 - Limites inferior e superior da faixa granulométrica C da ES 390 (DNER, 1999b) e curva granulométrica de projeto.

6.2 Dosagem Marshall

Para as faixas granulométricas B e C, foram compactados três corpos de prova por teor de ligante. As Tabela 32 e 33 contêm as médias dos resultados dos parâmetros de dosagem

Marshall das misturas asfálticas, para agregados atendendo, respectivamente, às faixas B e C de projeto. Devido aos baixos resultados de estabilidade, foram apresentados, no anexo, os valores da estabilidade e de fluência de cada corpo de prova.

Tabela 32 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa B.

% LIGANTE	MEA (g/cm³)	DMT (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
6	2,149	2,594	17,18	8,42	25,6	32,90	229	4,34
7	2,172	2,566	15,36	9,96	25,32	39,35	207	4,33
8	2,169	2,538	14,51	11,41	25,93	44,06	174	4,28
9	2,151	2,51	14,32	12,78	27,1	47,17	136	4,86
10	2,133	2,483	14,10	14,13	28,23	50,06	124	4,62

Observação: MEA: massa específica aparente; DMT: densidade máxima teórica; V_v: volume de vazios; VCB: vazios cheios com betume; VAM: vazios no agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade Marshall; F: fluência.

Tabela 33 - Parâmetros da dosagem Marshall para a faixa C.

% LIGANTE	MEA (g/cm³)	DMT (g/cm³)	V_v (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
6	2,236	2,595	13,72	8,77	22,49	39,00	289,0	4,27
7	2,313	2,567	9,87	10,61	20,48	51,82	149,5	2,02
8	2,327	2,538	8,33	12,24	20,58	59,90	76,0	2,24
9	2,337	2,511	6,90	13,89	20,79	66,84	109,5	3,24
10	2,315	2,483	6,79	15,34	22,13	69,31	73,0	2,45

A partir da análise dos resultados da porcentagem de volume de vazios das faixas granulométricas, pode-se classificar os pré misturados a frio da faixa B e da faixa C como semi-denso e denso, respectivamente, de acordo com a ES-P 23 (DER/PR, 2005), uma vez que as misturas da faixa B apresentaram porcentagens de vazios de 10 a 20% e as misturas da faixa C apresentaram porcentagem de vazios menores que 10%. As Figura 26 e 27 ilustram as variações dos parâmetros de dosagem Marshall apresentados nas Tabelas 32 e 33 em função do teor de ligante, de acordo com as suas faixas granulométricas.

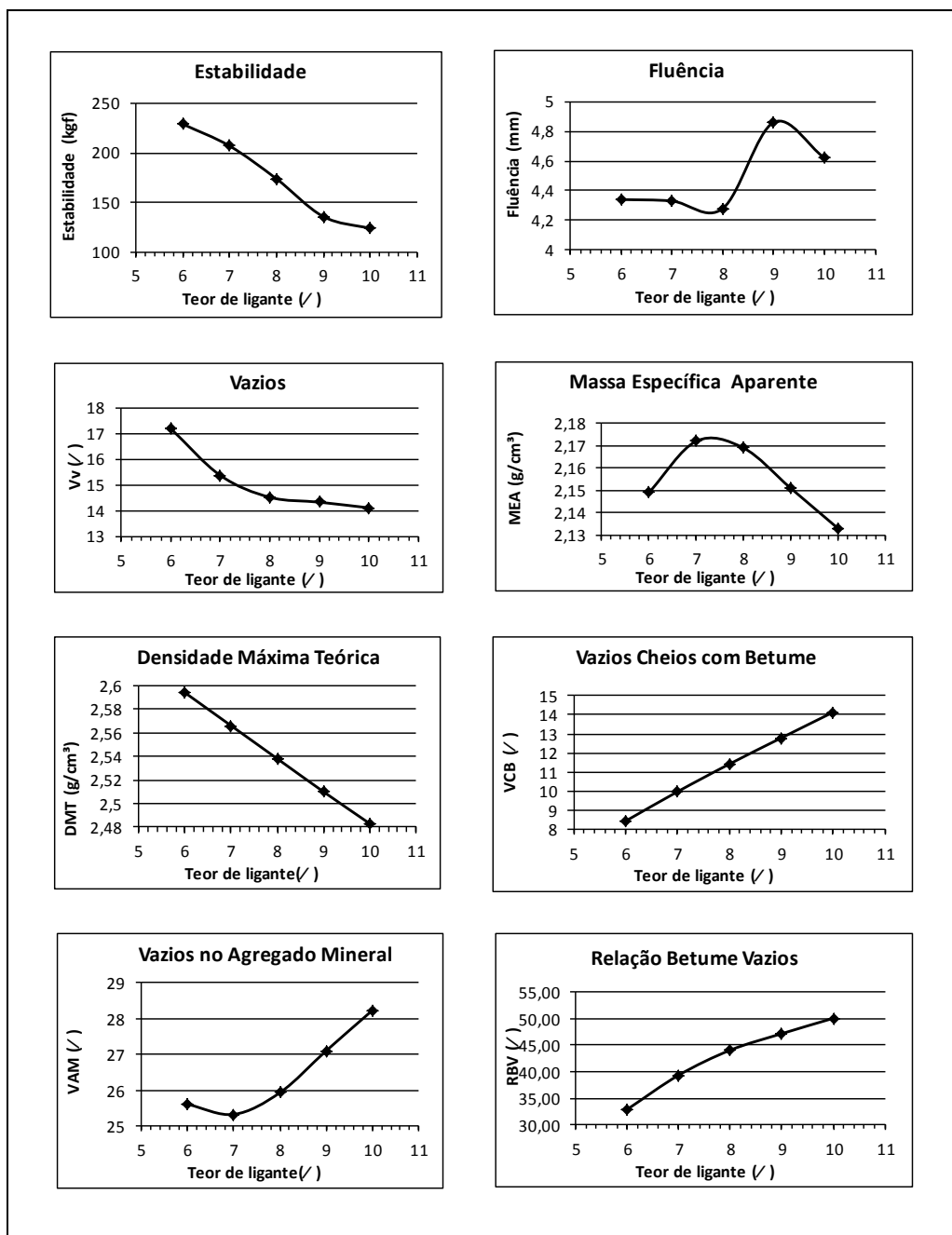


Figura 26 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B em função do teor de ligante asfáltico.

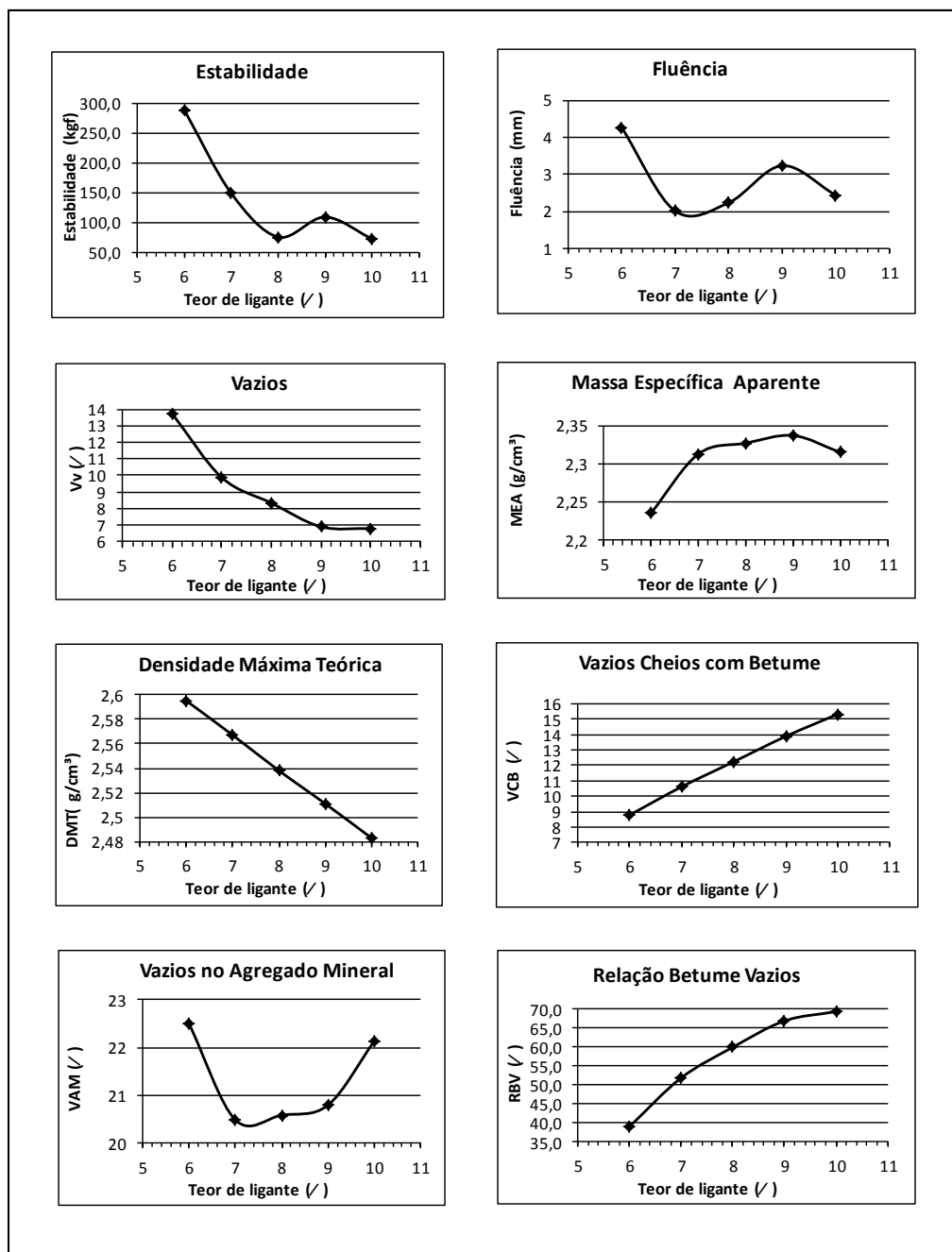


Figura 27 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C em função do teor de ligante asfáltico.

Analisando-se os resultados de ambas as faixas granulométricas, percebe-se que os valores de estabilidade encontrados são em geral inferiores ao mínimo estabelecido pela ES 390 (DNER, 1999b) e são reflexos do comportamento dos corpos de prova no ensaio, uma vez que, iniciado o ensaio, em 14 dos 15 corpos de prova, a prensa não indicou rompimento dos mesmos, isto é, a aplicação da carga se manteve até o encontro dos moldes.

Tendo em vista que este encontro pode danificar a prensa, apenas no primeiro ensaio foi permitido tal acontecimento, por isto o equipamento nos demais ensaios foi desligado

quando a distância entre os moldes era pequena. Ao término dos ensaios, pôde-se verificar que o comportamento da mistura ao ser pressionada com os dedos equiparava-se ao da borracha, característica de material elástico.

Para determinar a carga em que ocorreu a ruptura (estabilidade) e, em consequência, a fluência dos corpos de prova, foi plotado um gráfico da fluência (no eixo “x”) versus a estabilidade (no eixo “y”), com os valores salvos no computador conectado a prensa de compressão. Determinaram-se estes parâmetros como sendo o ponto no gráfico no qual ocorre a mudança na inclinação da reta, ou seja, mudança de comportamento do corpo de prova.

Conforme os parâmetros citados na especificação de serviço ES 390 (DNER,1999b), apresentados na Tabela 9, e os resultados da Tabela 32, pôde-se inferir que os pré misturados a frio da faixa granulométrica B, com os teores de ligante utilizados, não obtiveram valores de estabilidade maior ou igual ao mínimo (250 kgf). No entanto, os valores de porcentagem de vazios estão no intervalo estabelecido, e a fluência apresentou resultados maiores que o limite estabelecido em dois teores de ligantes, mas como esses não se distanciaram significativamente do limite máximo e por este parâmetro estar sendo cada vez mais desconsiderado no meio científico, concluiu-se que os resultados de fluência são aceitáveis.

Em relação às misturas da faixa granulométrica C, nota-se que todos os teores de ligante tiveram resultados de porcentagem de vazios e fluência de acordo com o estabelecido na norma supracitada, enquanto que apenas o teor de 6% de EMULEX obteve estabilidade maior do que a mínima requerida.

Os resultados da massa específica aparente em relação aos teores de emulsão apresentados nos gráficos de ambas às faixas foram discretos. Segundo Silva (2011), este comportamento está associado à composição da emulsão, por água e cimento asfáltico de petróleo, que após a cura tem teores de ligantes residuais relativamente próximos, apesar da variação nos teores de emulsão.

6.3 Escolha do teor de projeto e ensaio Marshall com os teores de projeto e suas aproximações

Tendo em vista a análise dos três parâmetros Marshall de ambas as faixas granulométricas, observou-se que o parâmetro crítico das misturas foi a estabilidade, devido ao seu baixo valor em todos os teores de ligante. Assim, a escolha do teor de projeto foi realizada a partir da estabilidade.

Ao observar que, dentre as misturas da faixa granulométrica B, as com teor de 6% obtiveram valores de estabilidade mais próximos do mínimo, cogitou-se a hipótese de ensaiar

corpos de prova com teor de 5% de ligante, para verificar se, com esta porcentagem, a estabilidade atingiria valor igual ou maior a 250 kgf. Porém, devido às dificuldades de manuseio das misturas com 6% de ligante, pois, por serem muito secas, apresentavam facilidade de perda de material nos vários procedimentos realizados no ensaio Marshall, como, por exemplo, na extração do corpo de prova do molde de compressão, optou-se por não trabalhar com o teor de ligante igual a 5%.

Então, para definir o teor de projeto, pensou-se em um valor abaixo de 6%, cujo objetivo era verificar se os valores da estabilidade Marshall seriam satisfatórios, atentando-se para as características da mistura para que esta não se tornasse inviável de ensaiar devido aos problemas já apresentados.

Assim, optou-se para o teor de projeto igual a 5,9% e aproximações de $\pm 0,30\%$, máxima variação permitida para pré misturados a frio, pois, com estes valores (5,6%, 5,9% e 6,2%), ter-se-ia uma mistura viável para os procedimentos relativos ao ensaio e melhor perspectiva do comportamento da estabilidade em relação a variação do teor de ligante. Os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 34.

Realizando a mesma análise, definiu-se o valor de 6,0 % como teor de projeto e aproximações de $\pm 0,30\%$ para misturas da faixa granulométrica C, uma vez que, para este teor, a estabilidade, fluência e porcentagem de vazios obtiveram resultados dentro do estabelecido pela norma supracitada. Os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 35.

Tabela 34 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa B no teor de projeto e suas tolerâncias.

% LIGANTE	MEA (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
5,6	2,114	2,606	18,86	7,72	26,58	29,04	246	5,42
5,9	2,124	2,597	18,22	8,18	26,4	30,98	212	4,42
6,2	2,155	2,589	16,76	8,73	25,49	34,24	180	4,23

Observação: MEA: massa específica aparente; DMT: densidade máxima teórica; Vv: volume de vazios; VCB: vazios cheios com betume; VAM: vazios no agregado mineral; RBV: relação betume-vazios; E: estabilidade Marshall; F: fluência.

Tabela 35 - Parâmetros de dosagem Marshall das misturas da faixa C no teor de projeto e suas tolerâncias.

% LIGANTE	MEA (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	% vazios	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	E (kgf)	F (mm)
5,7	2,225	2,604	14,55	8,27	22,82	36,23	363	4,60
6,0	2,266	2,595	12,70	8,87	21,57	41,14	293	4,30
6,3	2,300	2,586	11,08	9,47	20,55	46,11	255	4,10

Observou-se que, no teor de projeto e suas variações para a faixa granulométrica B, não foi possível obter a estabilidade mínima. Para a faixa granulométrica C, tanto no teor de projeto quanto nas suas aproximações, foram obtidos resultados dos parâmetros dentro dos intervalos especificados. Destaca-se, porém, que a fluência relativa ao teor de 5,7% não se distanciou significativamente do limite máximo estabelecido pela norma. Os parâmetros Marshall de cada faixa encontram-se representados nas Figura 298 e 29.

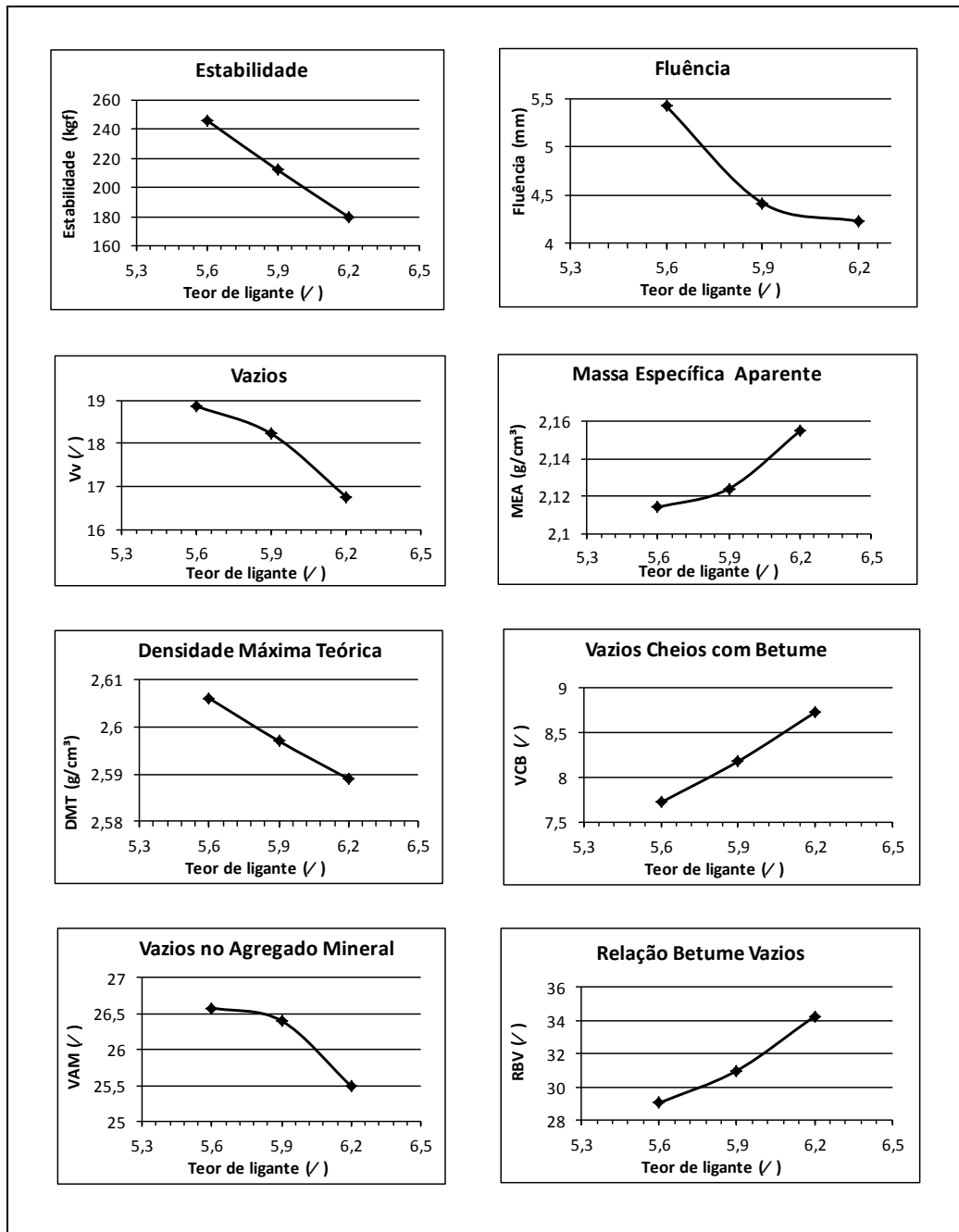


Figura 28 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para pré misturado a frio da faixa B em função do teor de projeto e suas tolerâncias.

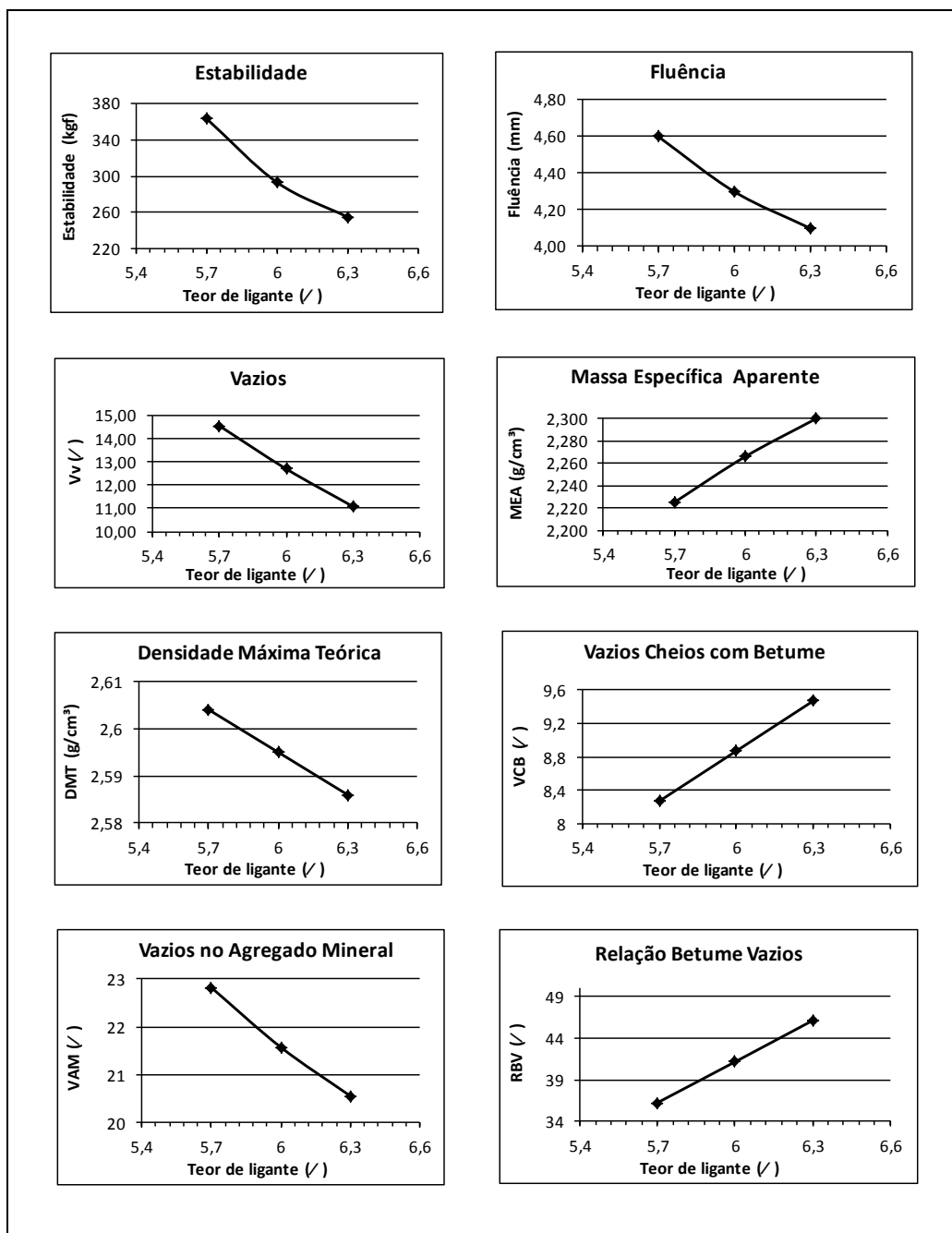


Figura 29 - Variações dos parâmetros de dosagem Marshall para pré misturado a frio da faixa C em função do teor de projeto e suas tolerâncias.

Após ter-se uma visão geral sobre o comportamento dos pré misturados a frio modificados por polímero em relação aos cinco teores de emulsão e aos resultados dos parâmetros Marshall, surgiram alguns questionamentos. Primeiro, sobre a trabalhabilidade da mistura em teores de emulsão menores do que 6% admite-se, como alternativa, a consideração de Silva (2011), segundo a qual é importante lembrar que a emulsão asfáltica é composta por uma parcela de água, e que na moldagem dos corpos de prova devem ser adicionados teores de água de molhagem antes da emulsão, de tal forma que, no contato da emulsão com o

agregado, este não extraia umidade da emulsão, iniciando precocemente o processo de ruptura. Assim, Santana (1993) indica procedimentos experimentais para a definição do teor de umidade antes do processo de dosagem, que identifique visualmente a trabalhabilidade e o envolvimento do material. FHWA (2002), entretanto, indica a realização de dosagem preliminar para esta determinação.

Outro ponto questionável foram os cinco teores de emulsão utilizados, devendo-se lembrar de que a escolha dos mesmos, como já citado, foi baseada em trabalhos como o de PINTO E PREUSSLER (1980), SENÇO (2001), SANTOS (2002) e MONTANARI (2007). Porém, a especificação de serviço rodoviário ES-P 23 (DER/PR, 2005) indica, como apresentado na Tabela 36, os teores de emulsão asfáltica e água usualmente utilizados nas misturas a frio.

Tabela 36 - Teores de emulsão asfáltica e água para umedecimento.

Tipo de PMF	Teor de emulsão asfáltica (%)	Teor de água para umedecimento (%)
PMFA	3,5 - 5,5	0 - 1,0
PMFSD	4,5 - 6,5	0,5 - 1,5
PMFD	7,0 - 10,0	1,0 - 2,5

PMFA - Pré misturado a frio aberto; PMFSD – Pré misturado a frio semi denso; PMFD – Pré misturado a frio denso.

Observa-se que esta especificação de serviço faz referência á utilização de teores de emulsão asfáltica menores do que a utilizada nesta pesquisa. Também se percebe que os pré misturados a frio são classificados de acordo com a faixas granulométricas, em que são determinados pré misturados a frio abertos aqueles referentes a faixa granulométrica A e B, pré misturados a frio semi densos os referentes as faixas granulométricas C e D e pré misturados a frio densos os referentes á faixa granulométrica E. A especificação supracitada estabelece as condições de vazios, estabilidade e fluência de acordo com a classificação das misturas.

Logo, encontra-se, a partir do que foi apresentado, possíveis fatores que ocasionaram o comportamento das misturas e percebem-se, também, algumas diferenças entre as especificações de serviço, sejam elas ES 390 (DNER, 1999b) e ES-P 23 (DER/PR, 2005), pois mesmo aquela sendo específica para pré misturado a frio com emulsão modificada por polímero, não classifica as misturas, não estabelece valores dos parâmetros Marshall para cada tipo de mistura e não faz referência aos possíveis teores de ligante.

6.4 Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral

As Tabela 37 e 38 contêm as médias dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral para as misturas com EMULEX RC1C-E, nas faixas B e C, respectivamente, na temperatura de 25°C.

Tabela 37 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa B.

TEOR DE LIGANTE (%)	RTCD (kgf/cm ²)
5,6	0,95
5,9	1,00
6,2	0,77

Tabela 38 - Resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova da faixa C.

TEOR DE LIGANTE (%)	RTCD (kgf/cm ²)
5,7	1,17
6,0	1,02
6,3	1,19

A partir da análise dos resultados, nota-se que os valores obtidos com os corpos de prova da faixa C, no teor de projeto e suas tolerâncias, são superiores àqueles oriundos dos corpos de prova da faixa B. Entretanto, os resultados de ambas faixas granulométricas para os três teores ensaiados foram próximos.

Atualmente, há poucas referências para comparação dos resultados de resistência a tração por compressão diametral, visto que, para se avaliar a magnitude deste resultado, a classificação, a granulometria dos agregados e o tipo de ligante empregados devem ser os mesmos. No entanto, podem ser realizadas algumas considerações com relação ao trabalho desenvolvido por Santos (2002), Silva (2011) e o trabalho desenvolvido nesta pesquisa.

Santos (2002) ensaiou corpos de prova com teores de 5% e 6% de emulsão asfáltica a uma temperatura igual a 42,2°C, e os resultados obtidos foram 2,47 kgf/cm² e 1,65kgf/cm², respectivamente. Silva (2011) realizou sua pesquisa a luz da especificação de serviço do Departamento de Estradas e Rodagem (DER) do estado do Paraná, o que justifica os teores de

emulsão utilizados. Os ensaios de resistência à tração foram realizados à temperatura de 25°C e o resultado obtido para o teor de 3,5% de emulsão foi 0,35 kgf/cm².

Correlacionando os resultados de Santos (2002) com os desta pesquisa, percebe-se que, mesmo com a temperatura superior à utilizada neste trabalho, ele obteve maiores valores de resistência. Ao comparar os resultados da pesquisa de Silva (2011), com teor de ligante inferior e mesma temperatura de ensaio, foram encontrados, nesta pesquisa, valores maiores.

6.5 Resultados do ensaio de determinação do módulo de resiliência

Os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência para as faixas B e C encontram-se, respectivamente, nas Tabela 39 e 40.

Tabela 39 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa B.

% LIGANTE	Módulo Resiliente (MPa)
5,6	577
5,9	555
6,2	425

Tabela 40 - Módulo de Resiliência das misturas da faixa C.

% LIGANTE	Módulo Resiliente (MPa)
5,7	656
6,0	526
6,3	455

Assim, de acordo com os resultados apresentados anteriormente, observa-se que os módulos de resiliência das misturas asfálticas da faixa granulométrica C com teores $\pm 0,30\%$ do teor de projeto resultaram em maiores valores do que aqueles relativos à faixa B, provavelmente, devido às diferenças nas granulometrias e nos teores de projeto de ligante de ambas as misturas.

Roso (2007) ensaiou misturas com composição granulométrica na faixa C da especificação de serviço ES 390 (DNER, 1999b) e emulsão asfáltica RL-C modificada flex,

com teor de ligante igual a 9%, e o resultado do módulo de resiliência foi igual a 2757,36 MPa. Mesmo sabendo que os ligantes utilizados são diferentes, mas ambos modificados por polímero, e que o teor das misturas nas pesquisas não são iguais, ao correlacionar os valores, percebe-se a baixa magnitude dos resultados encontrados neste trabalho.

Ao contactar os péssimos resultados de estabilidade, os baixos os resultados do módulo de resiliência e o comportamento dos corpos de prova ao serem ensaiados percebe-se as falhas existentes na metodologia ensaiada. Dentre elas a ausência do umedecimento dos agregados antes da mistura com ligante e o pouco tempo, considerado de maneira equivocada, para a cura do ligante.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

7.1 Considerações Finais

Partindo-se da análise e interpretação dos resultados apresentados neste trabalho, foram formuladas as seguintes conclusões:

1. O teor de projeto de ligante para cada faixa granulométrica resultou em 4,8% e 5,2% respectivamente, para as faixas B e C das misturas a quente e em 5,9% e 6,0% para as faixas B e C, respectivamente, dos pré misturados a frio. Observa-se que para os dois tipos de misturas o teor de projeto de ligante da faixa granulométrica B foi menor quando comparado com os da faixa C, lembrando que esta possui maior porcentagem de finos em sua composição. Tais resultados são devidos, possivelmente, à quantidade finos existente na composição granulométrica, quanto maior a quantidade de finos maior a superfície aparente para ser coberta por ligante;
2. A estabilidade das misturas a quente apresentou resultados satisfatórios uma vez que os valores de estabilidade para as faixas granulométricas B e C obtiveram valores maiores do que o mínimo estabelecido de 500 kgf pela ES 385 (DNER, 1999a) e a fluência em alguns teores de ligante não atendeu o intervalo de variação compreendido entre 2,0 a 4,5 mm estabelecido pela especificação de serviço já citada tendo em vista que a fluência é um parâmetro em desuso, pois normas mais recentes como a especificação de serviço, Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico, ES 031 (DNIT, 2006) não faz referência a fluência, este parâmetro não foi considerado como relevante.
3. Ao analisar o comportamento mecânico (resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência) das misturas a quente, percebe-se que as misturas da faixa granulométrica B apresentam maiores valores quando comparados com as misturas da faixa granulométrica C, este resultado difere do

esperado, pois tem-se que as misturas granulométricas fechadas tendem a apresentar comportamento mecânico melhor quando comparado com misturas granulométricas abertas. A partir desta análise, pode-se inferir quão importante é a composição granulométrica no comportamento mecânico das misturas, uma vez que única diferença entre estas misturas foi a composição granulométrica, (faixa de projeto B com 32% de pó de pedra, 41% de brita 0 e 27% de brita 1 e faixa de projeto C com 53% de pó de pedra, 35% de brita 0 e 12% de brita 1);

4. A especificação de serviço ES 385 (DNER, 1999) estabelece que a resistência à tração por compressão diametral para camada de rolamento, na temperatura de 25°C, deve estar entre 7kgf/cm² e 12kgf/cm². As misturas a quente ensaiadas nos teores de projeto e suas tolerâncias apresentaram valores satisfatórios, mesmo sendo que os resultados dos corpos de prova da faixa B tenham ultrapassado o limite superior previsto pela norma, pois tais resultados foram próximos do limite máximo estabelecido;
5. Tendo em vista os resultados de porcentagem de vazios dos pré misturados a frio, pôde-se classificar as misturas da faixa B como semi denso e as da faixa C como denso, segundo a ES-P 23 (DER/PR, 2005);
6. Os resultados da estabilidade nos pré misturados a frio de ambas as faixas granulométricas foram de baixa magnitude, em comparação com o mínimo especificado na ES 390 (DNER, 1999b), 250 kgf. Tal fato pode ser relacionado ao tempo de cura, ao não umedecimento dos agregados antes da mistura com emulsão, ao tempo de cura e ao agregado utilizado na pesquisa que apresentou adesividade insatisfatória;
7. Ao compararmos a metodologia e as considerações contidas na especificação de serviço utilizada na pesquisa, ES 390 (DNER, 1999b), e com a ES-P 23 (DER/PR, 2005), percebe-se as falhas existentes naquela, pois não define os diferentes tipos de pré misturados a frio, não menciona o teor de água para umedecimento, e nem o tempo de cura do ligante após a mistura com o agregado. Logo, é nítido através

dos resultados do pré misturado a frio como a ausência de informações na norma do DNIT influenciou no comportamento das misturas.

7.2 Sugestões

1. Realizar um estudo do comportamento mecânico de pré misturados a frio, compostos por brita 1, brita 0, pó de pedra e EMULEX RC1C-E, utilizando-se agregados que resultem numa melhor adesividade ao ligante betuminoso, de modo a não ser necessário a utilização do aditivo melhorador de adesividade;
2. Realizar procedimento de estudo similar ao aplicado a este trabalho para misturas a frio, porém, após a execução das misturas com os vários teores de emulsão, aumentar o tempo de cura a temperatura ambiente;
3. Realizar procedimento de estudo similar ao aplicado a este trabalho para misturas a frio, porém testar teores de umidade a serem utilizados para umedecer os agregados antes da mistura com emulsão;
4. Realizar procedimento de estudo similar ao aplicado a este trabalho para misturas a frio, porém, para realizar pesagem hidrostática, selar os corpos de prova com fita adesiva e filme plástico;
5. Realizar procedimento de estudo similar ao aplicado a este trabalho para misturas a quente e a frio, porém os ensaios de resistência a tração por compressão diametral devem ocorrer em corpos de prova com diferentes temperaturas;
6. Realizar procedimento de dosagem similar ao aplicado a este trabalho para misturas a frio, porém com teores de ligante recomendados pela ES-P 23 (DER/PR, 2005).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas – Soluções pra pavimentar sua cidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001. 136p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993. 04 p.

_____. **NBR 7208**: Materiais Betuminosos para Pavimentação. Rio de Janeiro, 1998. 2 p.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.

_____. **NBR 6296**: Produtos betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012a. 5 p.

_____. **NBR 6299**: Emulsões asfálticas - determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012b. 2 p.

_____. **NBR 14393**: Emulsões asfálticas - determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012c. 3 p.

ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Avaliação de Misturas a Frio como Solução para Camadas de Revestimento**. Rio de Janeiro: ANTT, 2011.

AIREY, G. D. **Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens**. Construction and Building Materials. Elsevier, v. 16, issue 8, p. 473-487. 2002.

AKSOY, A.; SAMLIOGLU, K.; TAYFUR, S.; OZEN, H. **Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures**. Construction and Building Materials. V. 19p.11-18. 2005.

AMARAL, S. C. **Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP 40) e asfalto modificado com polímero SBS**

(BETUFLEX B 65/60). Dissertação (Mestrado). 147p. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2000.

ANDERSON, D. A.; BAHIA, H. U.; DONDRE, R. **Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and Its Importance to Pavement Performance**. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance: ASTM STP 1147. American Society and Materials. Philadelphia. 1992.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types (MS-2)**, 6. Ed. USA, 1997. 141p.

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A.; ANDERSON, R. M. **Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2001.

BARKSDALE, R. D.; J. ALBA; N. P. KHOSLA; R. KIM E M. S. RAHMAN. **Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design**. In: Project 1-28, Final Report, Georgia Tech Project E20-634, USA, 1997.

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, 2008.

BRÛLÉ, B. **Polymer Modified Asphalt Cements Used in the Road Construction Industry: Basic Principles**. Transportation Research Record. N° 1535o. 48-53. 1996.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação de Trilhas-de-Roda num Pavimento Flexível**. 1997. 290p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

CHAVES, F. J. **Estudo de Misturas de areia de asfalto a frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará – Contribuição ao Método de Dosagem**. 2010.

338p. Tese (Doutorado). Programa de Engenharia. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CLERMAN, D. D. S. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. 2004. 125p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

COELHO, V. **Considerações sobre o Método Marshall**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26^a, Aracaju-SE, p.233 a 298.1992.

CEZARO, T. J. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008. 130p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ - DER/PR. **Pavimentação: Pré misturado a frio. Especificações de Serviços Rodoviários**. Curitiba, PR. 2005. 18p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros – Relatório Final**. Ministério dos Transportes. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomos I, II e III. Brasília, 1998a.

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

_____. **DNER – ME 035**: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998b. 6p.

_____. **DNER – ME 086**: Determinação do Índice de Forma: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994a. 5p.

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

_____. **DNER – ME 107:** Misturas Betuminosas a Frio, com Emulsão Asfáltica – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994b. 9p.

_____. **DNER – ME 043:** Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11p.

_____. **DNER – ME 078:** Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994c. 3p.

_____. **DNER – ME 194:** Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998d. 6p.

_____. **DNER – ME 083:** Agregados – análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998d. 5p.

_____. **DNER – ES 385:** Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999a. 15p.

_____. **DNER – ES 390:** Pavimentação – pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 1999b. 14p.

_____. **DNER – ME 117:** Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994d. 4p.

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

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.
ES 031. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico: especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2006. 14p.

_____. **DNIT – ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a, 6p.

_____. **DNIT – ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b, 7p.

_____. **DNIT – ME 155:** Material Asfáltico – Determinação da penetração - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010c, 7p.

_____. **DNIT – ME 156:** Emulsão asfáltica – Determinação da carga de partícula – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2011a, 7p.

_____. **DNIT – EM 129:** Cimento asfáltico petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011b, 4p.

_____. **DNIT – EM 128:** Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010c, 5p.

FERNANDES, C. G. Caracterização mecanística de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação. 109p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FHWA. Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods. FHWA-AS-94-069. 1994.

FHWA/IN/JTRP-2002/6. Final Report. Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) Under Superpave Specifications., 2002.

FALCÃO, M.F.B.; SOARES, J.B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET) – anais, v.1, 2002.

FURLAN, A. P. Considerações a cerca da Adesão e da Suscetibilidade à Umidade de misturas asfálticas densas à Luz de Algumas Propriedades Mecânicas. 2006. Dissertação

(Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HORTA, E. A., SIMÕES, F. A. **Comportamento mecânico de misturas betuminosas a quente**. Trabalho de conclusão de curso, DEC/UFV. N° 72. Viçosa, MG. 2013. 49p.

HUNTER, R. N. **Bituminous mixtures in road construction**. London: 1994.

INSTITUTO DE ASFALTO, **Tradução do Manual de Asfalto**. Série do Manual n°4(MS-4). Rio de Janeiro, 1999.

JAMES, A. **Overview of asphalt emulsions**. Transportation Research Circular, 2006.

KADRMAS, A. **Emulsion test methods: do we need them?** Transportation Research Circular, 2006.

LEITE, L.F.M., Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros. (Tese de Doutorado) COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 1999.

LING, M.; CURTIS, C. W.; HANSON, D. I.; HOOL, J. N. **Quantitative -Analysis of p. polymers and Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt**. Transportation Research Record. N° 1586 p. 57-67. 1997.

MARQUES, G. L. O., MOTTA, L.M.G., LEITE, L.M., et al. **“Exemplos de Dosagem Superpave no Brasil”**. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Florianópolis-SC, 2001.

MONTANARI, R. M. **Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente para fins de pavimentação de vias**. 2007. 97p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais. 2007.

MOTTA, L.M.G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e ensaios de Cargas Repetidas**. 1991. 366f. (Tese de Doutorado). Programa

de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio e Janeiro, 1991.

NCHRP – NACTIONAL COOPERATIVE HIGWAY RESEARCH PROGRAM: **A manual for desing of hot mix asphalt with commentary.** Washington, D. C.: 2001. 285p. (NCHRP Report 673).

NEGRÃO, D. P.. Estudo de asfaltos modificadas por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos. 160p. 2006 – Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade De São Paulo. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2006.

PENZ, G. **Propriedade mecânica de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas.** 59p. 2010 - (Trabalho Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.

PINTO, S.; PREUSSLER, E.S. **Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos.** Rio de Janeiro: IPR, 1980, 51p.

PINTO, S.; **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.**1991. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

ROBERTS, F.L. KANDHAL, P., BROWN, E., LEE, D., and KENNEDY. T.. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.**2.ed.Lanham, Maryland: Napa research and Education Foundation, 1996.

ROBERTS, F. L.; MOHAMMAD, L. N.; WANG, L. B. **History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, v.14, n.4, p.279 - 293.

ROSO, J. A. **Análise do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Densas usinadas a Frio.** 2007 143f. Tese de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2007.

SALOMON, D.A **green technology comes of age. LTRC Emulsion: Design, Construction, and Performance Conference.** Baton Rouge, Louisiana 2008.

SANTANA, H. **Manual de Pré misturados a frio.** 298p. Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

SANTO, N. R. E. **Pré misturado a frio.** Ipiranga Asfalto, Belo Horizonte – MG, 1991. 39p.

SANTOS, M. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio via ensaios de laboratório.** 84p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2002.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume II. Editora PINI Ltda, São Paulo-SP, 2001. 671p.

SILVA, W. R. **Comportamento Mecânico de Pré-Misturado a Frio Denso Reforçado com Fibras Sintéticas.** 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 1998.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do Comportamento de Pavimentos com Camada Reciclada de Revestimentos Asfálticos a Frio com Emulsão Asfáltica Modificada por Polímero.** 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

SILVA, T. K. **Estudos Mecânicos de Misturas Asfálticas Baseados em Análise Comparativa de Determinação de Massa Específica Máxima.** 93p. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG. 2015.

SOARES et al. **Método de Previsão do Teor ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas do Tipo CBUQ.** In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Volume I, Brasília-DF, 2000. P. 148 a 162.

STRATURA ASFALTOS. Características do cimento asfáltico modificado por polímero empregado na pesquisa. Betim. Minas Gerais. 2014a.

STRATURA ASFALTOS Características da emulsão asfáltica polimérica empregada na pesquisa. Betim. Minas Gerais. 2014b.

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

VIEIRA, B. C. Análise da viabilidade do uso de pré misturados a frio em aeródromos. 106p. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Paulo, 2009.

ZANZOTTO, L. KENNEPOHL, G. J. Development of Rubber and Asphalt Binders by Depolymerization and Devulcanization of Scrap Tires in Asphalt.TransportationResearchRecors. N° 1530 p. 51-58. 1996.

ANEXO

Tabela 41 - Resultados de estabilidade e fluência dos pré misturados a frio da faixa granulométrica B.

% LIGANTE	ESTABILIDADE (kgf)	FLUÊNCIA (mm)
6	249	4,54
	215	4,37
	223	4,10
7	197	3,98
	209	4,38
	215	4,62
8	159	4,22
	190	4,78
	173	3,85
9	126	4,59
	149	4,97
	134	5,01
10	126	4,30
	116	4,98
	130	4,57

Tabela 42 - Resultados de estabilidade e fluência dos pré misturados a frio da faixa granulométrica C.

% LIGANTE	ESTABILIDADE (kgf)	FLUÊNCIA (mm)
6	353	4,71
	254	3,90
	260	4,16
7	155	2,18
	143	1,83
	150	2,06
8	63	2,17
	87	2,10
	78	2,50
9	129	3,50
	111	2,43
	89	3,78
10	72	2,45
	62	2,23
	85	2,66