



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIELL MONTURIL DE SOUSA

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM BORRACHA**

**Palmas (TO)
2021**

MARIELL MONTURIL DE SOUSA

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM BORRACHA**

Monografia elaborada e apresentada como requisito final para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza

Palmas (TO)
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M813c Monturil de Sousa, Mariell.
 Comportamento de misturas asfálticas modificadas com borracha /
 Mariell Monturil de Sousa. – Palmas, TO, 2021.
 112 f.

 Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
 Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2021.
 Orientador: Marcus Vinicius Ribeiro e Souza

 1. Misturas asfálticas modificadas 2. Ligante com borracha 3.
 Metodologia *Marshall*. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

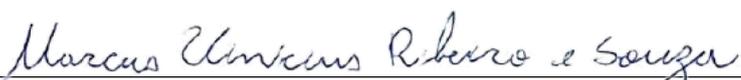
MARIELL MONTURIL DE SOUSA

COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para a obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

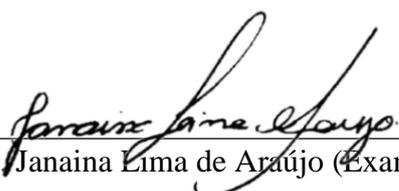
Data de aprovação 07 / 04 / 2021

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza (Orientador)

Universidade Federal do Tocantins



Prof. Me. Janaina Lima de Araújo (Examinador)

Universidade Federal do Tocantins



Prof. Me. Yago Isaias da Silva Borges (Examinador)

Universidade Federal do Tocantins

Palmas, 2021

“Somos feitos de poeira de estrelas. Nós somos uma maneira de o cosmos se autoconhecer.”

Carl Edward Sagan

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Tocantins (UFT), que me proporcionou um espaço para aprender sobre Engenharia Civil, com excelentes professores, servidores e técnicos administrativos. Agradeço ao esforço que cada um fez para que eu aprendesse todos os conteúdos e chegasse até aqui.

Ao meu orientador e Professor Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza, que se dispôs a me orientar com tanta paciência e atenção. Agradeço por todo o tempo que me foi dado, pela preocupação em todas as correções e reuniões, para que eu fizesse um bom trabalho.

Aos meus pais, Adailton e Márcia, e meu irmão Caio que foram fundamentais para todas as conquistas que tive em minha vida e sempre me deram apoio incondicional para minha graduação.

À minha companheira Isabela pelo incentivo e carinho. Ao meu amigo e companheiro de laboratório Filipe que compartilhou comigo todos os momentos desta pesquisa.

Aos meus amigos de graduação, pela diversão, aprendizado e pela convivência. Amigos que durante esses anos de faculdade foram minha segunda família, dividindo sonhos, risadas, festas e lágrimas.

Aos colaboradores que doaram os materiais para a realização desta pesquisa; pedreira Grampata, Teccon engenharia e a Greca Asfaltos.

E a todos que colaboraram direto e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

Embora represente apenas uma pequena parcela em peso das misturas asfálticas, o ligante betuminoso desempenha papel fundamental na ligação entre os agregados e na impermeabilização do revestimento com propriedades fundamentais para o desempenho mecânico da camada de revestimento. As propriedades físicas e mecânicas dos ligantes convencionais podem ser melhoradas com a adição de polímeros, tais como a borracha. Esta pesquisa visa avaliar pela metodologia *Marshall* a influência da borracha atuando como agente modificante no ligante quando usado em misturas asfálticas. Com o objetivo de avaliar a atuação da borracha, foram confeccionadas amostras de CAP 50/70 (controle) e amostras utilizando-se o ligante modificado com borracha Ecoflex B 3G usando-se para a etapa de dosagem a faixa de teor de 4,5% a 6,5%. Optou-se em trabalhar com uma mistura do tipo CA (concreto asfáltico), enquadrada na faixa C (DNIT 031/2006 – ES) para camada de rolamento. Com a caracterização dos agregados realizada, na sequência foram obtidos os parâmetros *Marshall* e houve a definição para o teor de projeto de ambas as misturas. As misturas foram então, submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral e obtidos também os valores para quociente *Marshall* e tenacidade. Observou-se para as misturas com Ecoflex B 3G melhoria na maioria dos parâmetros observados, sobretudo, para estabilidade e tenacidade. Os dados obtidos durante a campanha experimental para as amostras convencionais e modificadas forneceram subsídios para uma avaliação estatística comparando-se ambas as misturas por níveis de significância. Para as condições analisadas, os valores para estabilidade das misturas modificadas com borracha mostraram-se 25,1% superiores em relação as misturas com CAP 50/70 com bom nível de significância. Valores, em média, maiores para as misturas modificadas também foram encontrados para fluência e tenacidade (33,3% e 11,6%, respectivamente), embora sem níveis de significância suficientes. Os resultados para quociente *Marshall* (21% maior para misturas modificadas) mostraram-se inconclusivos sendo necessários ensaios adicionais. Por fim, ambas as misturas apresentaram valores bem próximos para resistência à tração (com valor, em média, 2,7% superior para as modificadas), sendo, portanto, estatisticamente semelhantes.

Palavras-chave: Misturas asfálticas modificadas. Ligante com borracha. Metodologia *Marshall*.

ABSTRACT

Although it represents only a small portion by weight of asphalt mixtures, the bituminous binder plays a fundamental role in the connection between the aggregates and in the waterproofing of the coating with fundamental properties for the mechanical performance of the coating layer. The physical and mechanical properties of conventional binders can be improved with the addition of polymers, such as rubber. This research aims to evaluate by the Marshall methodology the influence of rubber acting as a modifying agent in the binder when used in asphalt mixtures. In order to evaluate the performance of the rubber, samples of CAP 50/70 (control) and samples were made using the binder modified with rubber Ecoflex B 3G using the content range of 4.5 % to 6.5%. Opted to work with a mixture of the type CA (asphalt concrete), framed in the C range (DNIT 031/2006 - ES) for the bearing layer. With the characterization of the aggregates performed, the Marshall parameters were obtained in sequence and there was a definition for the design content of both mixtures. The mixtures were then submitted to the tensile strength test by diametrical compression and the values for Marshall quotient and tenacity were also obtained. It was observed for the mixtures with Ecoflex B 3G an improvement in most of the observed parameters, mainly for stability, and tenacity. The data obtained during the experimental campaign for conventional and modified samples provided subsidies for a statistical evaluation comparing both mixtures by levels of significance. For the conditions analyzed, the values for stability of the rubber-modified mixtures were 25,1% higher than those with CAP 50/70 with a good level of significance. Higher values, on average, for the modified mixtures were also found for fluency and tenacity (33,3% and 11,6%, respectively), although without sufficient levels of significance. The results for the Marshall quotient (21% higher for modified mixtures) proved to be inconclusive and additional tests are needed. Finally, both mixtures showed very close values for tensile strength (with a value, on average, 2,7% higher for the modified ones), being, therefore, statistically similar.

Keywords: Modified asphalt mixtures. Rubber binder. Marshall methodology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do estado geral das rodovias nacionais (2009 – 2019).....	16
Figura 2 – Evolução do estado geral das rodovias nacionais por satisfação	17
Figura 3 – Evolução do estado geral das rodovias no estado do Tocantins (2009 – 2019).....	18
Figura 4 – Evolução do estado geral das rodovias no estado do Tocantins por satisfação	18
Figura 5 – Camadas do pavimento rígido.....	23
Figura 6 – Camadas do pavimento flexível	23
Figura 7 – Trecho executado com asfalto borracha (A)	28
Figura 8 – Trecho executado com asfalto borracha (B)	29
Figura 9 – Modificação do CAP por borracha	30
Figura 10 – Formação do agregado-borracha.....	31
Figura 11 – Processo seco de incorporação de borracha em misturas asfálticas.....	31
Figura 12 – Aplicação como tratamento superficial.....	33
Figura 13 – Aplicação como camada de reforço	34
Figura 14 – Diagrama de execução da metodologia da pesquisa.....	40
Figura 15 – Laboratório de geotecnia e infraestrutura da UFT	42
Figura 16 – Agregados usados na pesquisa	43
Figura 17 – (a) jogo de peneiras (b) agitador mecânico	44
Figura 18 – Aferição de medidas (a) e pesagem das britas (b).....	45
Figura 19 – Procedimentos para determinação da densidade.....	47
Figura 20 – Densidade do agregado miúdo por meio do frasco de <i>Chapman</i>	48
Figura 21 – Esquema do ensaio de adesividade	49
Figura 22 – Ligante CAP 50/70.....	50
Figura 23 – CAP Ecoflex B 3G da Greca Asfaltos	51
Figura 24 – Separação e acomodação em estufa dos agregados	56
Figura 25 – Processo de mistura e incorporamento	56
Figura 26 – Compactação dos corpos de prova pela metodologia <i>Marshall</i>	57
Figura 27 – Aferimento de medidas e pesagem dos corpos de prova	58
Figura 28 – (a) destilador pilsen (b) CP's no banho-maria (c) execução do ensaio.....	62
Figura 29 – Execução do <i>Rice Test</i>	64
Figura 30 – Execução do ensaio <i>RT</i>	65
Figura 31 – Curvas granulométricas dos agregados e fíler	69
Figura 32 – Ensaio de adesividade para CAP 50/70 (a) e Ecoflex B 3G (b).....	72
Figura 33 – Curva de projeto enquadrada na faixa C do DNIT	74
Figura 34 – Comparativo entre densidades obtidas via <i>DMT</i> e <i>Rice Test</i> para misturas convencionais	78
Figura 35 – Comparativo entre densidades obtidas via <i>DMT</i> e <i>Rice Test</i> para misturas modificadas.....	78
Figura 36 – Gráficos dos parâmetros <i>Marshall</i> para misturas convencionais.....	79
Figura 37 – Estabilidade versus fluência para misturas convencionais.....	80
Figura 38 – Gráficos dos parâmetros <i>Marshall</i> para misturas modificadas	82
Figura 39 – Estabilidade versus fluência para misturas modificadas	83
Figura 40 – Definição do teor ótimo de CAP 50/70.....	85
Figura 41 – Definição do teor ótimo de Ecoflex B 3G.....	85
Figura 42 – Resultados para tenacidade para misturas convencionais.....	89
Figura 43 – Resultados para tenacidade para misturas modificadas	89
Figura 44 – <i>Boxplot</i> para densidades (CAP 50/70)	89
Figura 45 – <i>Boxplot</i> para densidades (Ecoflex B 3G)	89

Figura 46 – <i>Boxplot</i> para estabilidade geral	92
Figura 47 – <i>Boxplot</i> para estabilidade nos teores ótimos	93
Figura 48 – <i>Boxplot</i> para fluência geral.....	94
Figura 49 – <i>Boxplot</i> para fluência nos teores ótimos.....	95
Figura 50 – <i>Boxplot</i> para resistência à tração (<i>RT</i>).....	96
Figura 51 – <i>Boxplot</i> para tenacidade	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento geral da pesquisa	41
Tabela 2 – Especificações do CAP 50/70.....	50
Tabela 3 – Especificações do CAP Ecoflex B 3G da Greca Asfaltos	51
Tabela 4 – Quantitativo de corpos de prova moldados na pesquisa.....	53
Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos agregados e filer	68
Tabela 6 – Porcentagens passantes para cálculo do índice de forma	70
Tabela 7 – Quantidade de unidades aferidas por granulometria	70
Tabela 8 – Valor individual e geral para o índice de forma	70
Tabela 9 – Resultados para densidade e absorção do agregado graúdo	71
Tabela 10 – Resultados para densidade do agregado miúdo e filer.....	71
Tabela 11 – Composição granulométrica das misturas asfálticas	73
Tabela 12 – Determinação da curva de projeto e das porcentagens retidas	73
Tabela 13 – Densidade individual e densidade média ponderada dos agregados	75
Tabela 14 – Resultados dos parâmetros para definição da faixa ótima de teor de ligante	75
Tabela 15 – Quantidade em massa para dosagem das misturas convencionais e modificadas	76
Tabela 16 – Quantitativo dos agregados (%) para misturas convencionais e modificadas	76
Tabela 17 – Densidade máxima teórica (<i>DMT</i>) para misturas com CAP 50/70	77
Tabela 18 – Densidade máxima teórica (<i>DMT</i>) para misturas com Ecoflex B 3G	77
Tabela 19 – Cálculo do quociente <i>Marshall</i> para misturas convencionais	81
Tabela 20 – Cálculo do quociente <i>Marshall</i> para misturas modificadas.....	84
Tabela 21 – Cálculo do teor ótimo de CAP 50/70.....	84
Tabela 22 – Cálculo do teor ótimo de Ecoflex B 3G.....	85
Tabela 23 – Composição granulométrica para teor ótimo das misturas.....	86
Tabela 24 – Estabilidade e fluência <i>Marshall</i> para teor ótimo das misturas convencionais	86
Tabela 25 – Estabilidade e fluência <i>Marshall</i> para teor ótimo das misturas modificadas	87
Tabela 26 – Resultados para <i>RT</i> em misturas não modificadas	87
Tabela 27 – Resultados para <i>RT</i> em misturas modificadas	87
Tabela 28 – Médias do ensaio <i>RT</i>	87
Tabela 29 – Média para tenacidade das misturas	88
Tabela 30 – T-student para densidades das misturas (CAP 50/70)	90
Tabela 31 – T-student para densidades das misturas (Ecoflex B 3G)	91
Tabela 32 – T-student para estabilidade geral das misturas convencionais e modificadas	92
Tabela 33 – T-student para estabilidade das misturas convencionais e modificadas nos teores ótimos	93
Tabela 34 – Mann-Whitney para fluência geral das misturas convencionais e modificadas	94
Tabela 35 – T-student para fluência das misturas convencionais e modificadas nos teores ótimos	95
Tabela 36 – T-student para resistência à tração das misturas convencionais e modificadas.....	95
Tabela 37 – T-student para tenacidade das misturas convencionais e modificadas	96

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

AB	Asfalto Borracha
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos diluídos de petróleo
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ARE	Agentes rejuvenescedores
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CNT	Confederação Nacional dos transportes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPA	Camada porosa de atrito
CP's	Corpos de prova
D _a	Densidade aparente
DMT	Densidade Máxima Teórica
DMCA	Dimensão máxima característica do agregado
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Estabilidade <i>Marshall</i>
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
ES	Especificação de serviço
F	Fluência <i>Marshall</i>
G _{mb}	Massa específica aparente
G _{mm}	Massa específica máxima medida
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
ME	Método de ensaio
MQ	Quociente <i>Marshall</i>
PMF	Pré-mistura a frio
PMQ	Pré-mistura a quente
RBV	Relação Betume/Vazios
RT	Resistência à tração
SAM	<i>Stress Absorbing Membrane</i>
SMA	<i>Stone matrix asphalt</i>
SAMI	<i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
UV	Ultravioleta
UFT	Universidade Federal do Tocantins
VAM	Volume do agregado mineral
VCB	Vazios com Betume
V _v	Volume de Vazios
A _a	Absorção do agregado
C _c	Coefficiente de curvatura
cm	Centímetro
cP	Centipoise
cSt	Centistokes
Cu	Coefficiente de uniformidade

d_{am}	Densidade média dos agregados
df	Grau de liberdade
g	Gramas
h	Altura (espessura)
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-Força
N	Newtons
m	Módulo de riqueza
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
M_s	Massa seca
M_{sat}	Massa com superfície saturada
M_{sub}	Massa submersa
p	Parâmetro para significância
P_{ca}	Porcentagem de asfalto em relação à mistura
S	Superfície específica
t	Parâmetro “t crítico” do t-student
U	Parâmetro “U” do teste de Mann-Whitney
T_{ca}	Teor provável de ligante em relação à massa do agregado
T_{ca}'	Teor provável de ligante em relação à massa do agregado corrigido
W	Tenacidade
x	Média <i>boxplot</i>
α	Nível de significância
μm	micrometro (10^{-6})
#	Abertura (peneiras)
°	<i>Outliers boxplot</i>
°C	Grau Celsius
Φ	Diâmetro
—	Quartil <i>boxplot</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	20
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivo específico	21
1.3 Estrutura do trabalho	21

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Pavimentos	22
2.2 Agregados.....	24
2.3 Materiais asfálticos	24
2.3.1 Cimento asfáltico do petróleo (CAP)	25
2.4 Misturas asfálticas	25
2.4.1 Concreto asfáltico (CA).....	27
2.5 Misturas asfálticas modificadas com borracha	27
2.5.1 História do asfalto borracha.....	27
2.5.2 Obtenção da borracha do pneu	29
2.5.3 Processo de adição e impregnação de borracha de pneus no asfalto.....	30
2.5.3.1 Processo úmido.....	30
2.5.3.2 Processo seco.....	30
2.5.4 Asfalto borracha da Greca Asfaltos.....	32
2.5.5 Aplicações e trabalhos com asfalto borracha	33
2.5.6 Vantagens e desvantagens do uso de borracha em misturas asfálticas.....	36
2.6 Dosagem <i>Marshall</i>	37

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA.....	40
3.1 Programação laboratorial.....	40
3.2 Materiais utilizados	42

3.2.1 Agregados minerais	42
3.2.1.1 Granulometria dos agregados	43
3.2.1.2 Índice de forma.....	44
3.2.1.3 Densidade e absorção do agregado graúdo.....	46
3.2.1.4 Densidade do agregado miúdo	47
3.2.1.5 Adesividade	48
3.2.2 Ligante CAP 50/70	49
3.2.3 Ligante CAP Ecoflex B 3G	51
3.3 Dosagem e execução da mistura asfáltica.....	52
3.3.1 Definição da composição granulométrica das misturas	53
3.3.2 Definição da faixa ótima de teor de ligante.....	53
3.3.3 Dosagem <i>Marshall</i> em massa, mistura e temperaturas de moldagem	55
3.3.3.1 Temperaturas de mistura e compactação.....	57
3.3.4 Parâmetros <i>Marshall</i>	58
3.3.4.1 Densidade aparente (D_a).....	59
3.3.4.2 Densidade máxima teórica (<i>DMT</i>)	59
3.3.4.3 Volume de vazios (V_v)	60
3.3.4.4 Vazios com betume (<i>VCB</i>)	60
3.3.4.5 Vazios do agregado mineral (<i>VAM</i>)	61
3.3.4.6 Relação betume/vazios (<i>RBV</i>)	61
3.3.4.7 Estabilidade e fluência <i>Marshall</i>	61
3.3.5 <i>Rice test</i>	62
3.3.6 Definição do teor ótimo de ligante	64
3.3.7 Resistência à tração por compressão diametral	64
3.4 Análise estatística e teste de hipóteses	66

CAPÍTULO 4

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1 Caracterização dos agregados	68
4.1.1 Granulometria dos agregados	68
4.1.2 Resultados do índice de forma	69
4.1.3 Ensaio de densidade e absorção	70
4.1.4 Ensaio de adesividade	71
4.2 Dosagem das misturas asfálticas	72

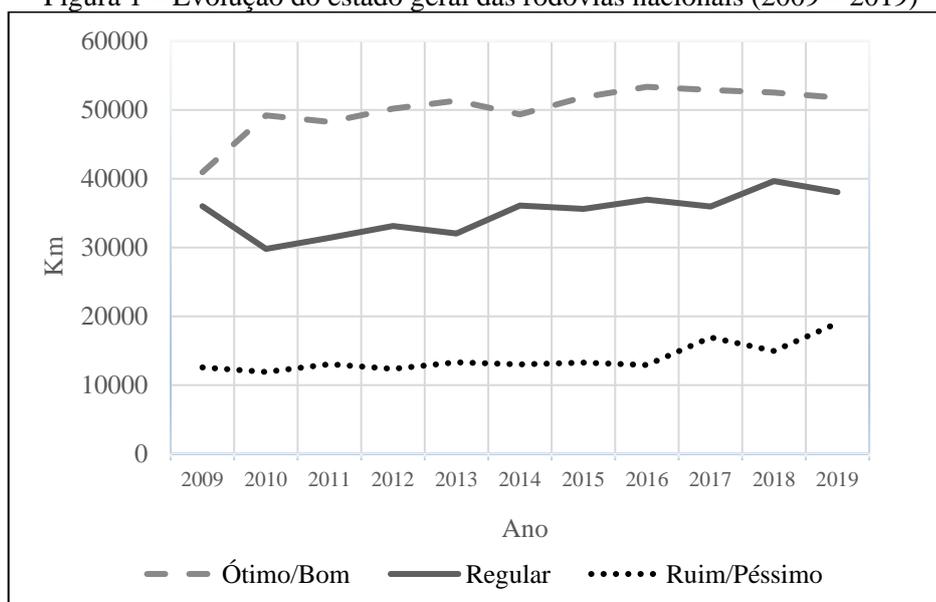
4.2.1 Composição granulométrica	72
4.2.2 Resultados para faixa de teor ótimo de ligante.....	74
4.2.3 Tabela quantitativa da dosagem <i>Marshall</i> em massa	75
4.2.4 Densidade máxima medida obtida pelo <i>rice test</i> (D_{mm}).....	77
4.2.5 Resultados e análises dos parâmetros <i>Marshall</i> para misturas convencionais.....	78
4.2.6 Resultados e análises dos parâmetros <i>Marshall</i> para misturas modificadas	81
4.2.7 Teor ótimo de ligante para misturas convencionais e modificadas	84
4.2.8 Estabilidade e fluência <i>Marshall</i> para teor ótimo de ligante	86
4.3 Resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT).....	87
4.3.1 Resultado para a tenacidade das misturas.....	88
4.4 Resultados para a análise estatística e teste de hipóteses.....	90
4.4.1 Resultados para densidade das misturas (CAP 50/70)	90
4.4.2 Resultados para densidade das misturas (Ecoflex B 3G)	91
4.4.3 Resultados para estabilidade <i>Marshall</i>	92
4.4.4 Resultados para fluência <i>Marshall</i>	94
4.4.5 Resultados para resistência à tração (RT) e tenacidade	95
 CAPÍTULO 5	
5 CONCLUSÃO.....	98
5.1 Conclusões gerais.....	98
5.1.1 Quanto aos agregados.....	98
5.1.2 Quanto aos ensaios físicos e análises estatísticas	99
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICES	104
ANEXOS	109

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da estrutura do pavimento está diretamente ligada a capacidade de prover um meio seguro, confortável, eficaz e econômico para o deslocamento de pessoas e cargas, tornando-se fator fundamental para o desenvolvimento e consolidação de qualquer economia. O Brasil, nesse âmbito, ainda possui diversas problemáticas relacionadas à qualidade do pavimento (sobretudo por razões relacionadas a incapacidade da máquina estatal de se realizar as obras programadas, sejam elas de construção ou manutenção). Afim de melhorar um quadro atual com expressivas dificuldades operacionais, a busca por novas tecnologias e investigações de novos materiais aplicados ao pavimento torna-se essencial em um país com matriz modal majoritariamente rodoviária.

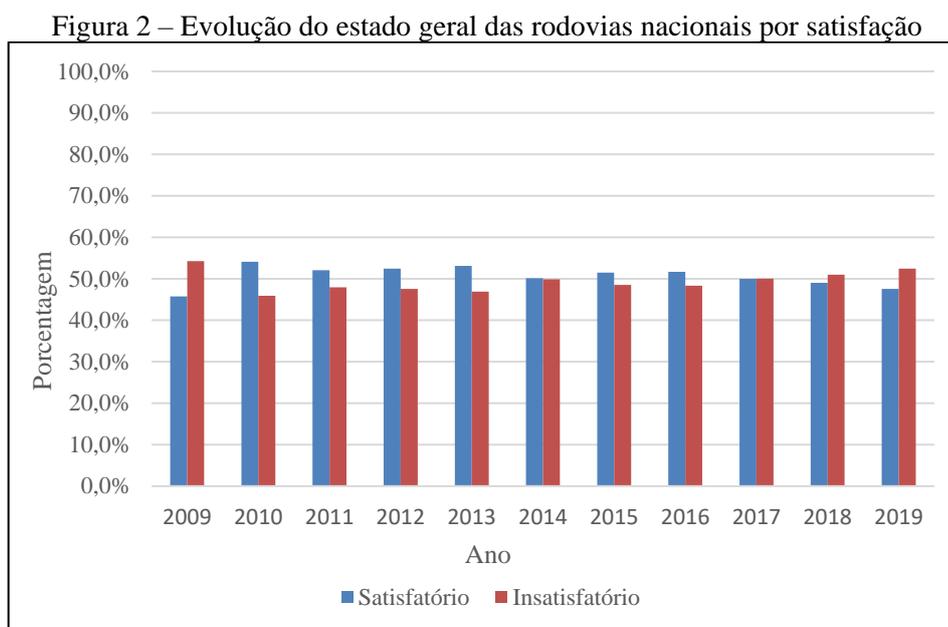
De acordo com dados obtidos no relatório alusivo ao ano de 2020 da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2020), aproximadamente 47,6% das rodovias Brasileiras apresentam condições de pavimentação classificadas em ótimas/boas, 35,0% classificadas em regulares e 17,5% em ruins/péssimas. Quando o gráfico da evolução do estado geral das rodovias nacionais é analisado percebe-se que ao longo da última década o perfil de classificação não sofreu alterações significativas. Observa-se até mesmo que nos últimos quatro anos (2016-2019), a classificação ruim/péssima quase que dobrou, contrariando assim, as características almejadas para um pavimento (ver Figura 1).

Figura 1 – Evolução do estado geral das rodovias nacionais (2009 – 2019)



Fonte: Adaptado CNT (2020)

Compilando-se os dados ano a ano (a partir de 2009) e fazendo-se uma divisão em satisfatório (para classificação ótimo e bom) e insatisfatório (para classificação regular, ruim e péssimo) percebe-se que a malha rodoviária sofreu poucas alterações ao longo dos anos em termos de qualidade e que na média quase sempre alcança somente metade dos níveis desejados de desempenho (ver Figura 2).



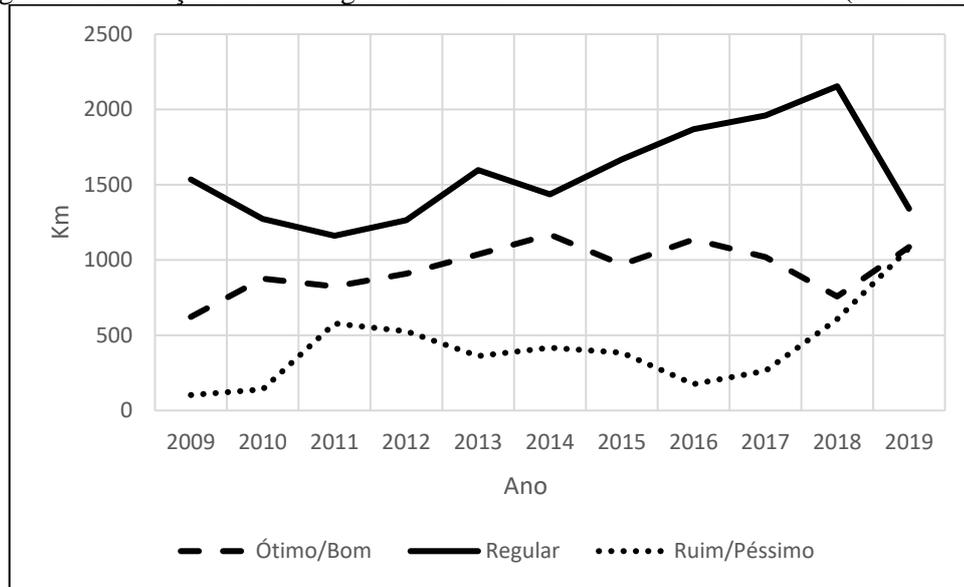
Fonte: Adaptado CNT (2020)

Em uma realidade regional, o estado do Tocantins encontra-se abaixo da média nacional com 31,0% de suas rodovias classificadas em ótimas/boas, 38,2% em regulares e 30,8% em ruins/péssimas. O perfil mostra evolução positiva no período compreendido entre 2011 e 2015 com regressão nos últimos quatro anos (2016-2019) análoga a situação nacional (ver Figura 3).

Ademais, em termos de satisfação, o estado do Tocantins também possui números piores do que a média nacional. A compilação de dados mostrou que o estado nunca ultrapassou a faixa dos 40% (para satisfatório) no período analisado e que atualmente possui quase 70% de sua malha rodoviária classificada como insatisfatória (ver Figura 4).

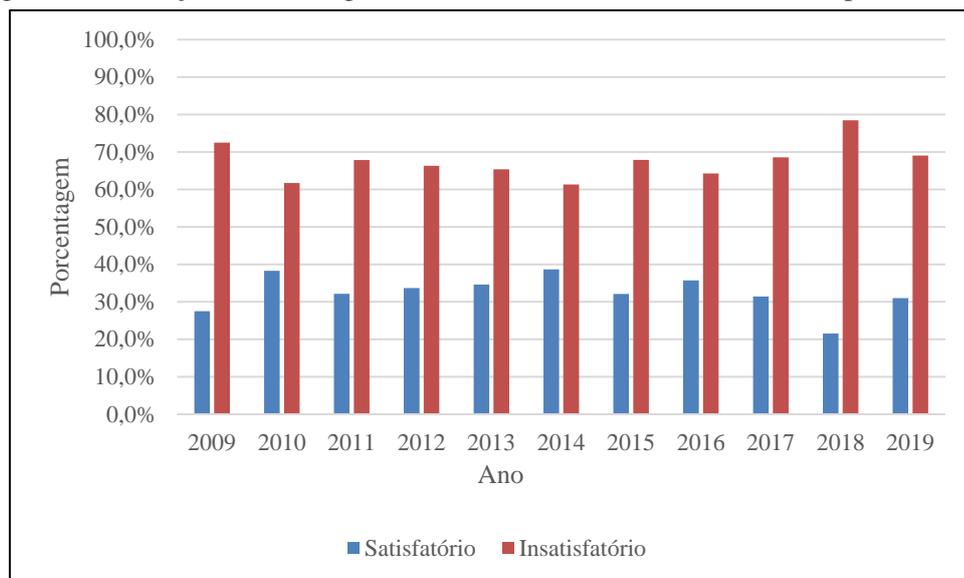
O último anuário de dados consolidados (CNT, 2020) mostra crescimento proporcional pouco significativo no período (2009-2019) na ordem de 0,5%. Da malha total, somente 12,4% é pavimentada sendo que em 2019 cerca de 59,2% das rodovias avaliadas apresentaram algum tipo de problema no estado geral. Diante deste quadro, faz-se necessário um melhor aprofundamento no estudo das causas e possíveis soluções (sejam elas tradicionais ou alternativas).

Figura 3 – Evolução do estado geral das rodovias no estado do Tocantins (2009 – 2019)



Fonte: Adaptado CNT (2020)

Figura 4 – Evolução do estado geral das rodovias no estado do Tocantins por satisfação



Fonte: Adaptado CNT (2020)

Dantas Neto (2004) aponta que as principais causas do comportamento abaixo do esperado nas camadas de revestimento passam principalmente pela fadiga das misturas betuminosas e o acúmulo de deformações permanentes com afundamentos demasiados nas trilhas de roda. Além disso, a escassez de manutenções preventivas, níveis de carregamento cada vez mais agressivos, subdimensionamento (de carga e material) e a especificações de ligantes não adequados para uma dada região (sobretudo por variações climáticas) tornam-se fatores preponderantes para o surgimento de patologias e baixo desempenho do pavimento.

Perante o exposto, tem-se notado cada vez mais o crescente número de pesquisas que buscam o desenvolvimento de novas tecnologias com a inserção de novos materiais nas misturas asfálticas de forma a contribuir para o aumento da vida útil da camada de revestimento e conseqüentemente diminuir custos de manutenção. Dentre a bibliografia disponível é relativamente fácil e simples se comprovar a melhoria das propriedades das misturas asfálticas densas quando submetidas a agentes modificadores (usadas no ligante ou no agregado). Bernucci *et al.* (2008), apontam que o uso de modificadores se tornou significativo ao longo dos anos, destacando-se o uso de polímeros (polipropileno, aramida, etc.), fíleres especiais e borracha.

A borracha oriunda de pneus inservíveis tem-se mostrado com grande potencial para uso em misturas asfálticas por incorporamento, desempenhando importantes contribuições na melhoria de suas propriedades. Segundo Oda e Fernandes Júnior (2015) a borracha pode ser usada como material de pavimentação constituinte do ligante asfáltico em etapa anterior da adição do agregado ou como parte do agregado (processo úmido e seco respectivamente).

Em uma segunda análise, vale ressaltar as preocupações de natureza ambiental e econômica. Dados da associação nacional da indústria de pneumáticos (ANIP) mostram que no Brasil foram produzidos 74,3 milhões de pneus no ano de 2019. A reciclagem de pneus pela ¹Reciclanip foi de cerca de 60,4 milhões para o mesmo ano. Embora sejam resultados até animadores, pouco mais de 36% são destinados a processos de granulação (que inclui o uso para produção de asfalto-borracha).

Devido à má destinação e significativa poluição por parte de pneus usados, foi aprovada em 26 de agosto de 1999, uma resolução (nº 258) do conselho nacional do meio ambiente (CONAMA, 1999), em que determinava, a partir de então, que as empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos destinassem corretamente pneus inservíveis, de forma a dar um uso ambientalmente adequado (coprocessamento, laminação, granulação, regeneração, pirólise etc.)

Entre os usos destaca-se o desenvolvimento de tecnologias que utilize a borracha como matéria-prima modificadora dos asfaltos convencionais e que gere benefício para o ligante para que se tenha uma qualidade superior da camada de revestimento das estradas brasileiras (CURY *et al.*, 2015). O concreto asfáltico convencional de camada de rolamento (CBUQ Faixa C com CAP 50/70) ainda possui suas limitações no tocante a problemas

¹ A Reciclanip é considerada uma das maiores iniciativas da indústria brasileira na área de responsabilidade pós consumo. O projeto teve início em 1999, com o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, implantado pela ANIP, entidade que representa os fabricantes de pneus novos no Brasil. (Reciclanip)

relativos à suscetibilidade térmica, adesividade (principalmente com agregados graníticos), trincamento por fadiga, etc. o que justifica a busca por melhorias por meio de misturas asfálticas modificadas.

Ainda de acordo com Cury *et al.* (2015), os benefícios econômicos e ambientais tornam-se suficientes para a adoção da borracha como material na execução de grandes obras de pavimentação como rodovias. Estradas executadas com esse agente modificador possuem maior durabilidade e apresentam maior potencial de vida útil.

Para Oda e Fernandes Júnior (2015), a borracha proporciona um aumento de flexibilidade e da resistência aos raios ultravioleta (UV), tornando a mistura asfáltica mais resistente ao envelhecimento, ao aparecimento e propagação de trincas e deformação permanente. Além disso, auxilia na diminuição de ruídos causado pelo fluxo de veículos, na drenagem de chuvas e possui desempenho superior à de um asfalto convencional.

Nesse contexto é que se estabelece esta pesquisa, onde procura-se avaliar o comportamento de misturas asfálticas (densas) por meio do uso de ligante tradicional e do modificado com borracha. Sendo a pesquisa conduzida por uma análise experimental e posteriormente realizado um estudo comparativo das misturas por meio de modelos estatísticos.

1.1 Justificativa

O trabalho justifica-se por acreditar que o estudo e uso de materiais alternativos como a borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas torna-se cada vez mais expressivo à medida que cresce a necessidade de se alinhar desempenho satisfatório, boas práticas ambientais e no caso específico da borracha, barateamento de sua tecnologia. Os esforços sobre essa metodologia requerem uma gama maior de pesquisas e de aperfeiçoamento das técnicas existentes de forma a torná-la capaz para resistir ao tipo de carregamento de projeto, as características climáticas da região e ao volume de tráfego na qual será submetido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar, por meio de métodos laboratoriais, misturas asfálticas (densas) modificadas na faixa C do DNIT (usando-se ligante modificado com borracha) comparativamente com misturas asfálticas convencionais na mesma faixa (com ligante sem agente modificador).

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Avaliação das propriedades dos materiais pétreos utilizados para compor a mistura asfáltica;
- II. Analisar a influência em DMT e D_{mm} na determinação do teor ótimo de ligante;
- III. Avaliar as misturas asfálticas em estudo quanto a sua estabilidade e fluência;
- IV. Verificar possíveis melhorias nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas por meio da realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral e posterior obtenção dos valores para tenacidade;

1.3 Estrutura do trabalho

A pesquisa foi dividida em cinco (5) partes para melhor entendimento e organização, das quais estão arranjados em:

Introdução: Expõe o tema a ser analisado situando-o em um contexto nacional e regional. Em seguida são elencados os objetivos gerais e específicos do trabalho, assim como sua problemática, hipótese geral e por fim sua estruturação.

Revisão bibliográfica: Apresenta uma abordagem acerca de pavimentos, misturas asfálticas, misturas asfálticas modificadas, asfalto-borracha (história, aplicações, vantagens e desvantagens) e parâmetros de dosagem *Marshall*.

Metodologia: Descreve os materiais utilizados (ligantes e agregados) e os ensaios de caracterização para os agregados. São descritos ainda os ensaios físicos e mecânicos para as misturas, o método de dosagem e os modelos estatísticos utilizados.

Análise dos resultados: Apresenta todos os resultados laboratoriais da pesquisa com suas respectivas discussões. Será apresentado também os resultados obtidos durante a análise estatística entre uma mistura referência e uma modificada hipotéticas.

Conclusão: São apresentadas as conclusões do presente estudo nas modalidades gerais e específicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos

A humanidade ao longo de sua história já construía caminhos com o objetivo de facilitar seu deslocamento ou mesmo para o acesso a locais com comida e água. Com o passar do tempo, tornou-se necessário revestir esses caminhos a fim de oferecer maior segurança e comodidade para quem ali transitasse. Mais tarde, esse processo tornou-se mais complexo e eficaz, o que acabou por dar origem aos primeiros processos de pavimentação.

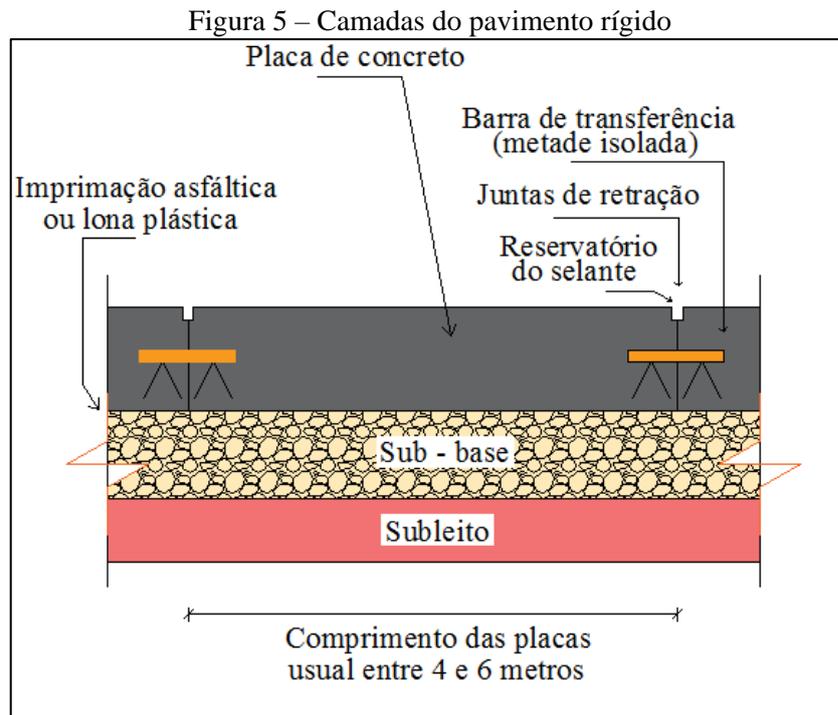
De acordo com Bernucci *et al* (2010) as estradas mais antigas foram construídas pelos egípcios, sobretudo para facilitar os transportes de materiais para a construção das famosas pirâmides, criando desta forma, uma excelente malha logística para a época. Atualmente, há diversos tipos de pavimentos com características distintas para cada tipo de uso e necessidade. Essa análise conceitual *a priori* é necessária para o conhecimento da tipologia e camada do pavimento na qual os asfaltos modificados serão empregados.

O Pavimento em si é toda estrutura existente construída sobre uma terraplanagem por onde se locomovem pessoas, veículos ou qualquer espécie de tráfego. Esses elementos originam cargas e esforços (tanto horizontais como verticais), que em um revestimento bem projetado e executado, deverá resistir e redistribuir os esforços por todas as camadas subjacentes do pavimento.

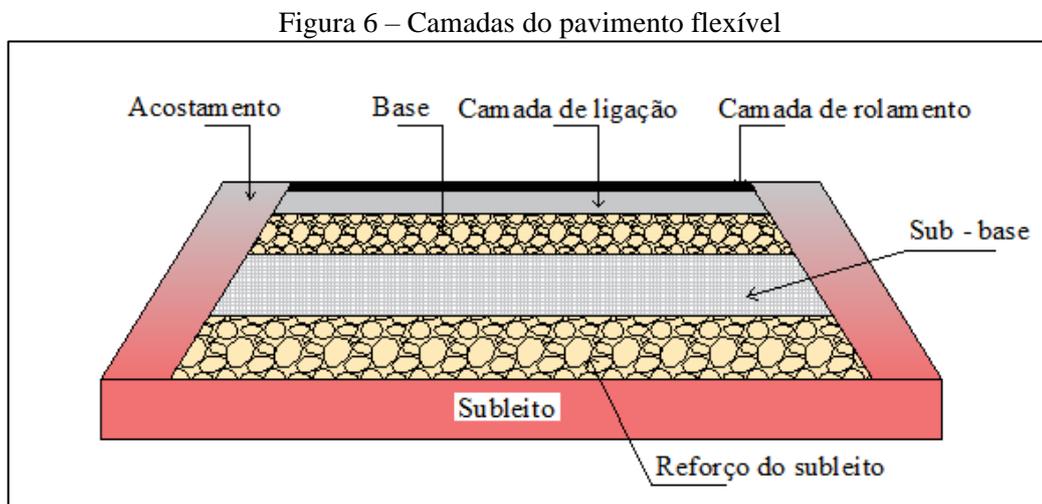
Segundo o manual de pavimentação do departamento nacional de infraestrutura e transportes (DNIT) alusivo ao ano de 2006 e corroborado por Senço (2007), o pavimento é constituído por camadas finitas (revestimento, sub-base, base e reforço do subleito) assentadas sobre um semiespaço (subleito), que exerce a função de fundação da estrutura. A estrutura dimensionada e construída sobre o leito de terra pode variar na espessura, no tipo de materiais de modo a atender às solicitações externas e as suas funções (de transporte, conforto e segurança) adequada aos seus usuários.

A diferença básica entre as tipologias de pavimento é a forma como cada tipo irá distribuir a carga recebida pelo volume de tráfego para o subleito daquela estrutura. De forma geral os pavimentos podem ser divididos em três tipos, sendo eles rígidos, semiflexíveis e flexíveis. Senço (2007) afirma que pavimentos rígidos possuem pouca deformação com constituição básica de concreto de cimento. Já os flexíveis suportam certa deformação até o limite que leve ao seu rompimento.

Os semiflexíveis por sua vez, é um tipo de revestimento intermediário, entre o rígido e o flexível. O manual do DNIT (2006), especifica que o pavimento semiflexível se caracteriza por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. No presente trabalho, se deu enfoque aos pavimentos flexíveis especialmente em sua camada de revestimento onde foram feitos os estudos usando-se a borracha como agente modificador no ligante asfáltico. As Figuras 5 e 6 ilustram as tipologias para as camadas do pavimento (rígido e flexível respectivamente).



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

2.2 Agregados

Os agregados (naturais, reciclados ou artificiais) são materiais geralmente inertes e sem volume definido que com dimensões e propriedades adequadas são usados para diversos fins, entre eles como constituinte de misturas asfálticas (representando por vezes parcelas maiores que 90% em peso do conjunto ligante-agregado).

Os agregados usados em misturas asfálticas são em sua grande maioria obtidas de rochas naturais (de origem ígnea, magmática ou metamórfica). São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc. Os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e dimensão como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem (BERNUCCI *ET AL*, 2010).

Patriota (2004) afirma que, na estrutura do pavimento, os agregados têm como funções principais a resistência mecânica e a flexibilidade da camada de rolamento, devendo possuir características granulométricas adequadas, resistência mecânica e aderência ao ligante asfáltico. Esses agregados são encontrados em depósitos naturais superficiais, tais como: as areias de rio e de campo, os seixos rolados, etc.

De acordo com a norma (DNIT 031/2006 – ES) os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler:

- 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.;
- 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 de abertura no 10. São as areias, o pó de pedra etc.;
- material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075 mm, correspondente à peneira de n° 200. São a cal hidratada, o cimento Portland etc.

2.3 Materiais asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é considerada a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Entre as vantagens que justificam o uso massivo do asfalto é sua capacidade de promover uma forte união entre os agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; ser impermeabilizante, durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, sais e bases. Além disso possui ampla gama de usos e combinações.

O asfalto é um ligante betuminoso obtido a partir da destilação do petróleo, sendo semissólido a temperatura ambiente, viscoelástico que se comporta como um sólido vítreo a baixas temperaturas e/ou durante carregamento rápido (pequeno tempo de aplicação de carga com alta frequência de aplicação) e como um fluido viscoso a altas temperaturas e/ou durante carregamento lento (longo tempo de aplicação de carga com baixa frequência de aplicação).

Atualmente o mercado nacional dispõe dos seguintes tipos de materiais asfálticos:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- Asfaltos diluídos de petróleo – ADP;
- Emulsões asfálticas de petróleo – EAP;
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

2.3.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Os cimentos asfálticos de petróleo são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru e que apresenta características adequadas para aplicação em pavimentos. Sua classificação é determinada pelo seu grau de dureza que é obtido por meio do ensaio de penetração (em que uma agulha padronizada penetra uma amostra com volume determinado sob condições conhecidas de tempo, temperatura e carga). Segundo o DNIT 095 (2006), sua classificação, é relacionada a sua penetração, podendo ser: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

2.4 Misturas asfálticas

As misturas asfálticas são formadas pela junção de agregados e ligante asfáltico dando origem ao revestimento desejado e podem ser classificadas em função de sua temperatura durante sua execução (misturas a quente, misturas mornas e misturas a frio) e no caso das

misturas usinadas a quente ainda por seu padrão granulométrico (graduação densa, aberta ou descontínua).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) de mistura a quente tem-se como exemplo o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), que faz uso do cimento asfáltico de petróleo (CAP), na qual o agregado é aquecido a uma temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, não podendo ultrapassar 177°C. Misturas mornas são aquelas preparadas com temperaturas de 20 a 30°C abaixo das misturas a quente e superiores a 100°C, e misturas semimornas são produzidas com temperaturas inferiores a 100°C. Por fim os de pré mistura a frio (PMF), com uso da emulsão asfáltica de petróleo (EAP) são produzidos a temperatura ambiente. As misturas asfálticas podem ser fabricadas em local próprio (em tratamentos superficiais) ou em usinas específicas.

O CBUQ é uma das misturas mais utilizadas no Brasil e trata-se de um produto com combinações de agregados com ligante asfáltico aquecidos em temperaturas específicas e em proporções corretamente previstas, sendo amplamente usado em revestimentos de pavimentos com volume de tráfego.

Quanto a padrões granulométricos, Bernucci *et al.* (2010) classifica as misturas a quente em:

- **Graduação densa:** curva granulométrica contínua e bem graduada, estrutura mineralógica com poucos vazios, agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: Concreto Asfáltico (CA);
- **Graduação aberta:** curva granulométrica uniforme com agregados basicamente iguais, possibilitando uma grande presença de vazios, com falta de material fino para preencher os vazios deixados por partículas maiores. Esse tipo de mistura é característica de revestimentos drenantes, permitindo a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- **Graduação descontínua:** presença de granulometria variada (grande, média e fina), com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediária, completados por certa quantidade de finos, trazendo um maior contato entre os grãos graúdos e tornando o revestimento mais resistente à deformação permanente. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (*Stone Matrix Asphalt* – SMA).

Um outro fator que distingue as três tipologias é a porcentagem de volume de vazios da mistura. No CA usa-se uma faixa que varia entre 3 a 5% de vazios, na SMA de 4 a 6% e no CPA algo entorno de 20%.

2.4.1 Concreto asfáltico (CA)

O concreto asfáltico é uma classificação específica de misturas a quente quanto a granulometria. O mesmo é constituído de uma mistura de agregados e cimento asfáltico (ligante) sendo lançado e compactado a quente e que quando executado em duas camadas, a camada superior é chamada de capa de rolamento e a inferior recebe o nome de *binder* (ou de ligação). Em sua execução pode assumir função de camada de regularização ou camada de nivelamento com a finalidade de regularizar o nível de um pavimento antigo ou irregular.

Os parâmetros de qualidade de um concreto asfáltico devem levar em consideração seu volume de vazios de ar (haja vista que isso interfere diretamente nos valores de estabilidade e fluência). Para concretos asfálticos utilizados em capas de rolamento o volume de vazios pós compactação deve variar entre 3 a 5%, e de 4 a 6% para camadas de ligação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.5 Misturas asfálticas modificadas com borracha

2.5.1 História do asfalto borracha

Os conceitos e estudos iniciais do que viria a ser denominado asfalto borracha (AB) começaram a ser analisados por volta de 1940 nos Estados Unidos, sendo usado para pequenas aplicações e reparos pela companhia *U.S Rubber Reclaiming Company*, que de forma pioneira introduziu no mercado um produto composto de asfalto e borracha reciclada denominada *Ramflex*. Contudo, apenas em 1964 no estado americano do Arizona é que o uso de borracha de pneus como modificador de misturas asfálticas foi aplicado pela primeira vez em um pavimento (WICKBOLDT, 2005).

Ainda segundo Wickboldt (2005), Charles H. MacDonald, em 1963, desenvolveu um material combinado com borracha altamente elástica (uma espécie de liga) para reparar as ruas da cidade de Phoenix, no estado americano do Arizona. O produto tinha em sua composição ligante asfáltico com 25% de borracha moída de pneu (com granulometria variando de 0,6 mm a 1,2 mm) misturados durante 20 minutos a uma temperatura de 190 °C. A técnica, aplicada basicamente para uso em remendos denominava-se *Band-aid*.

Barbosa (2016) destaca que atualmente, os estados da Califórnia, Flórida e Arizona possuem diversos estudos e técnicas de execução a respeito do uso de borracha de pneus em pavimentos. Na Califórnia, o AB é aplicado em capas selantes, membranas absorvedoras de tensão e como selante de trincas e juntas. Já no estado do Arizona, mais de 90% dos serviços de pavimentação fizeram uso em algum momento dos ligantes modificados.

No cenário nacional, os estudos e pesquisas a respeito do asfalto modificado por borracha (AMB) se deram mais tardiamente. A resolução nº 258/99 do CONAMA em seu segundo artigo proporcionou que os primeiros passos e incentivos fossem dados para o uso pioneiro da borracha no revestimento de pavimentos asfálticos. As primeiras pesquisas focaram em como a borracha poderia aprimorar e melhorar as qualidades do asfalto convencional. Com isso, em 2001, houve o primeiro uso de AMB no Brasil realizada pela Greca Asfaltos, na rodovia sob concessão da Univias em um trecho entre Guaíba e Camaquã, no estado do Rio Grande do Sul (GRECA, 2011).

Em um panorama mais regional, recentemente um trecho de 3,7 quilômetros na BR-153 na travessia urbana da cidade de Crixás, estado do Tocantins, recebeu, em caráter experimental, uma camada de asfalto borracha (ver Figuras 7 e 8). Os motivos elencados para seu uso foi sua maior resistência a variações térmicas, além de ser uma solução sustentável (por dar destino a pneus que seriam descartados). Estimativas do DNIT apontaram que para cada quilômetro de pavimento executado com esse asfalto tenha sido utilizada uma quantidade de borracha equivalente a 1000 pneus velhos. O programa de restauração ainda objetiva, em caso de sucesso, ampliar o uso para futuras obras no estado (DNIT, 2019).

Figura 7 – Trecho executado com asfalto borracha (A)



Fonte: DNIT (2019)

Figura 8 – Trecho executado com asfalto borracha (B)



Fonte: DNIT (2019)

2.5.2 Obtenção da borracha do pneu

A obtenção da borracha, segundo Specht (2004) que constitui o AMB pode ser feita de algumas maneiras, incluindo a moagem de pneus em usinas recicladoras, empresas de recapagem, cisalhamento a temperatura ambiente (corte em pequenos fragmentos), congelamento do material e posterior cisalhamento ou mesmo sua extrusão com uso de aditivos. Oda (2000), especifica três tipos de processos para obtenção da borracha.

- **Criogenia:** junto a borracha moída é acrescentado nitrogênio líquido até seu ponto de congelamento e logo após é prensado e triturado até se obter a granulometria desejada;
- **Regeneração:** a borracha *in natura* é separada dos demais componentes (metais, tecidos, etc.) por meio de uma aplicação de solvente e posterior extração. O produto resultante então é tratado com álcalis, óleos minerais, etc.
- **Moagem a frio:** o pneu é triturado e peneirado na granulometria desejada passando por imãs para separação das partes metálicas restantes.

Vale frisar que por sua maior simplicidade e geralmente menor custo, o processo de moagem à frio é o processo empregado mais comum para obtenção de borracha nas granulometrias adequadas para incorporação no ligante asfáltico. O processo torna-se mais simples na medida em que não se torna necessário nenhum tipo de tratamento ou beneficiamento.

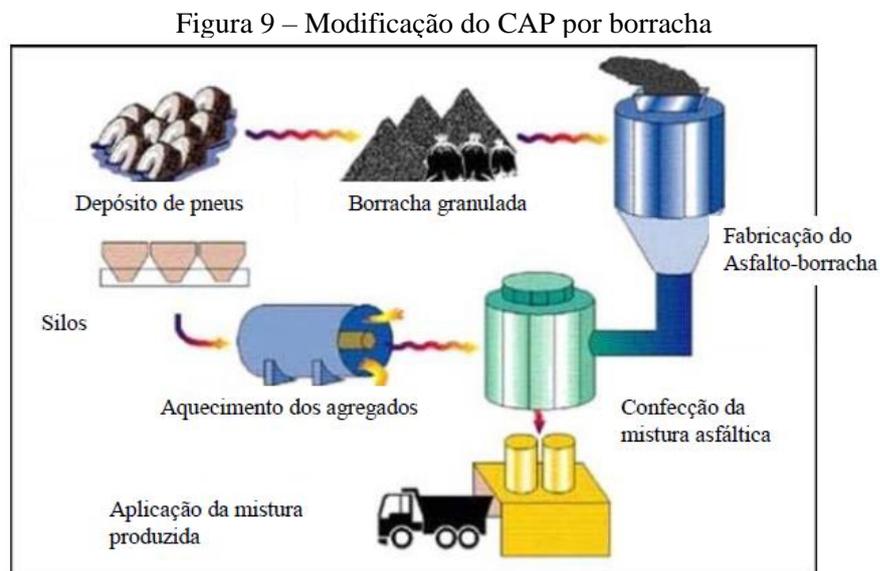
2.5.3 Processos de adição e impregnação de borracha de pneus no asfalto

O processo de adição de borracha nas misturas asfálticas segue métodos planejados e bem executados. As técnicas usadas, assim como seu cuidadoso controle, produzem um material coeso, consistente e dentro dos parâmetros desejados de desempenho.

Existem na bibliografia dois métodos muito comentados por diversos pesquisadores. Oda (2000), Specht (2004) e Soares e Assis (2008), por exemplo, destacam um primeiro método, conhecido como processo úmido, em que há adição de borracha no ligante antes de se acrescentar os agregados. O segundo método, conhecido como processo seco, há a mistura da borracha com os agregados antes de se adicionar o ligante.

2.5.3.1 Processo úmido

Segundo a norma do DNIT 111/2009 – EM, no processo úmido, um teor mínimo de 15% de borracha em relação ao peso do ligante é previamente misturado antes de se incorporar ao agregado. Nessa tipologia de impregnação (ver Figura 9), as reações são muito mais efetivas modificando de forma permanente o material originando uma liga química com alta transferência das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento.



Fonte: Cordeiro (2006)

2.5.3.2 Processo seco

No processo seco a borracha atua mais como substituto parcial dos agregados pétreos que com a posterior adição de ligante formam um produto denominado agregado-borracha

(ver Figura 10). Segundo Oda (2000), neste caso, existe a substituição de no máximo 6% do agregado em peso por essas partículas de borracha, sendo que geralmente o teor de 3% é o mais habitual. A transferência de propriedades para o ligante não é feita de forma tão satisfatória tal como no processo úmido, isso porque a borracha atua mais como agregado e não é misturada no ligante de forma primária. No entanto, mesmo assim é possível agregar melhorias à mistura asfáltica, desde que na sua fabricação obtenha-se um produto homogêneo.

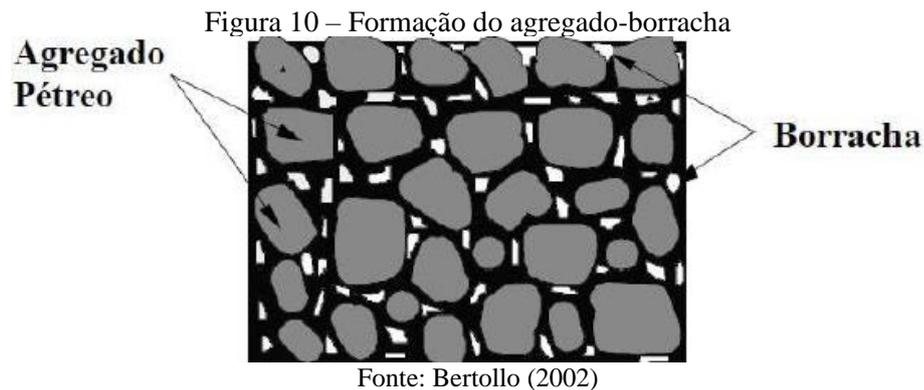
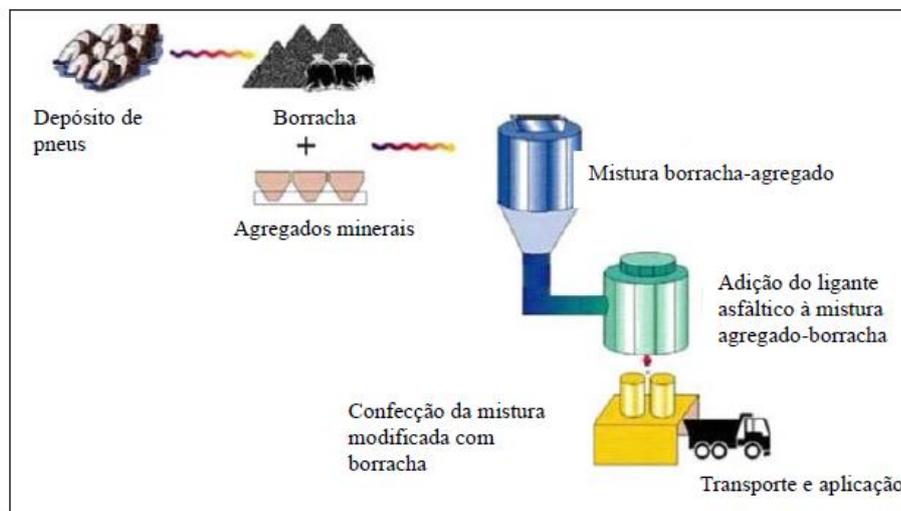


Figura 11 – Processo seco de incorporação de borracha em misturas asfálticas



Specht (2004) afirma que mistura asfáltica executada por meio da via seca (ver Figura 11) só deve ser aplicada usinadas a quente (CBUQ convencional ou com granulometria especial descontínua – *gape-graded*, por exemplo). Por fim, Machado (2013) afirma que o processo seco é considerado mais econômico que o processo úmido, todavia ainda acarreta questionamentos acerca de sua capacidade de aumentar a durabilidade do revestimento do pavimento, haja vista que estudos mostram resultados superiores no processo úmido.

2.5.4 Asfalto borracha da Greca Asfaltos

O Ecoflex B/3G da Greca Asfaltos é um ligante asfáltico modificado por borracha obtido pelo processo úmido que apresenta incorporação de 15% de pó de borracha e que permite usinagem e compactação das misturas asfálticas em parâmetros similares aos do ligante convencional (CAP 50/70).

Greca (2011) afirma que entre as vantagens no uso do Ecoflex B/3G estão uma maior durabilidade do pavimento, a redução da formação de trilhas de roda, redução da propagação de trincas, maior aderência pneu-pavimento e menores níveis de ruídos provocados pelo tráfego. O catálogo do produto ainda cita que suas principais indicações de uso são em vias urbanas e rodoviárias; e na manutenção de pavimentos.

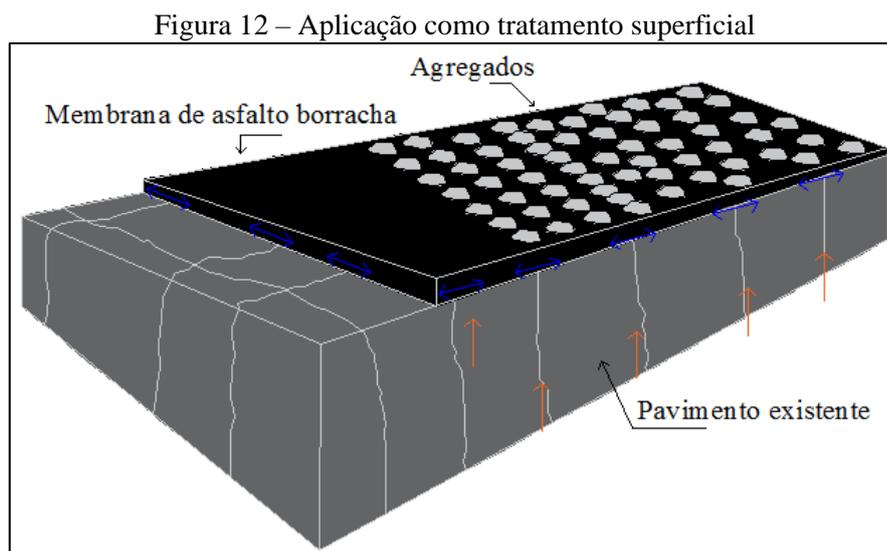
Por fim Greca (2011) cita que o Ecoflex B/3G pode ser aplicado em CBUQ ou PMQ (Pré misturado a quente), em SMA, em misturas descontínuas (*Gap-graded* ou CPA) e como tratamento superficial.

2.5.5 Aplicações e trabalhos com asfalto borracha (AB)

O ligante modificado com borracha, apesar da ocorrência de algumas manifestações patológicas na superfície de rolamento tem sido aplicado nos mais variados serviços de pavimentação. E de maneira geral, mostrou até então bons resultados. As manifestações patológicas mais comuns são a exsudação e as trincas por origem térmica, ambos associados, sobretudo, à dosagem incorreta do teor asfalto-borracha. Ao fazer uma comparação com o ligante tradicional, pode-se verificar que a quantidade de AB necessária para uma mistura é maior, o que por um lado explica o problema da exsudação, mas em contrapartida origina um material com maior durabilidade (ODA, 2000).

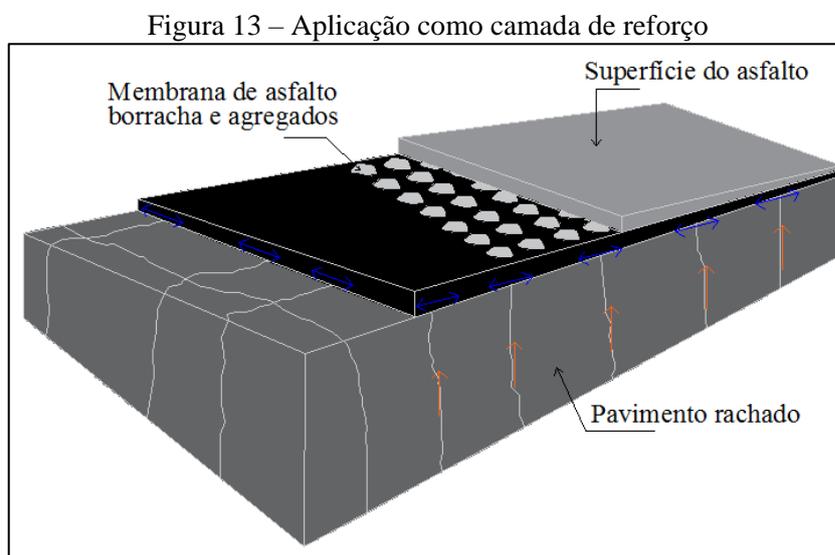
Quando dosado corretamente o AB possui aplicações que vão desde a selagem de fissuras e trincas até o tratamento de juntas de dilatação entre pavimentos e tabuleiros de pontes. Esse uso é recomendado sobretudo pelas características viscoelásticas do AB que com isso possuem a capacidade de retornarem ao estado original e desta forma se movimentarem e trabalharem junto com a estrutura tratada perante ações mecânicas e térmicas.

Conforme Oda (2000) e Way (2012) afirmam, pode-se fazer uso do AB em tratamentos superficiais através do espalhamento sobre um pavimento existente e posterior distribuição dos agregados uniformes no ligante, de modo a retardar a formação de trincas por reflexão. Este processo denomina-se *Stress Absorbing Membrane (SAM)* (ver Figura 12).



Fonte: Adaptado de Way (2012)

Outra forma de aplicação é constituindo uma camada de reforço entre as camadas convencionais do CBUQ, desempenhando a função de selante de trincas, processo que se denomina *Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI)* (ver Figura 13).



Fonte: Adaptado de Way (2012)

Na literatura existente nacional e internacional são abordados diversos estudos relativos a novas técnicas ou aperfeiçoamento da tecnologia que faz uso do AB assim como suas limitações e desvantagens. Os pesquisadores Sartori e Luvizão (2014), por exemplo, desenvolveram uma mistura asfáltica por incorporação seca com 20% de brita 01, 25% de brita 00 e 55% de pó de pedra. Os mesmos definiram essas porcentagens como um traço padrão que posteriormente foi misturado a diferentes teores de borracha (1% a 3%, com variação constante de 0,5%) originando-se assim, diferentes traços com presença de borracha.

Todos os traços estavam em conformidade a valores exigidos por normas de ensaios de estabilidade, vazios de agregado mineral, relação betume/vazios e volume de vazios. Diante disso, optou-se pelo teor de ligante mais econômico (com menor consumo) de 6,15%. A mistura apresentou uma estabilidade de 700 Kgf.

Presti (2013) em um estudo pela Universidade de Nottingham, na Inglaterra, aponta que há anos a Austrália faz uso do AB como substituto de outros ligantes, com particular interesse no uso de produtos pré-misturados. As investigações laboratoriais apontam que os ligantes submetidos a misturas previamente misturadas possuem desempenho satisfatório, contudo com maior consumo do aglutinante ($> 8\%$).

Muito se fala sobre as diversas qualidades e vantagens do uso da borracha como agente modificador em asfaltos na camada de rolamento seja em agregado (processo seco),

seja misturado ao ligante (processo úmido). Contudo, é justo elencar quais limitações e desvantagens que o mesmo pode trazer.

Nesse contraponto, Presti (2013) disserta sobre a alta viscosidade da mistura asfáltica (o que pode ocasionar problemas relativos à armazenagem, temperaturas mais altas de compactação e execução de asfaltos de graduação mais densa) e custos iniciais mais elevados.

Tratando-se de custos, alguns estudos da Universidade Estadual do Arizona fizeram uma comparação de manutenção entre os pavimentos convencionais e os modificados por borracha. Em suma, os resultados mostraram que após 5 anos, os custos de manutenção e de uso não eram tão distintos. Após 10 anos, o custo de manutenção de ambas as misturas começa a ser substancialmente diferente (com melhor custo-benefício para a mistura modificada) de tal forma que uma diferença significativa começou a ser observada a partir dos 15 anos pós execução (PRESTI, 2013).

Já Martinez (2017) realizou uma pesquisa com um composto de borracha incorporado por via úmida em que se observou diminuição da coesão das misturas tipo CBUQ e CPA. Na pesquisa citou-se que a diminuição da coesão pode ser minimizada ao se adicionar cal virgem na superfície da borracha com uso de uma energia de compactação de 75 golpes por face.

Por fim, em um estudo recente, Seyed *et al.* (2019) focaram em realizar um processo para melhoramento do processo seco através de um processo de cura otimizado e com menor granulometria da borracha. Para isso foram executadas amostras divididas em três séries. A primeira foi preparada sem levar em consideração o tempo de cura. A segunda e terceira foram preparadas com 1 e 2h de cura, respectivamente. A borracha foi adicionada aos agregados aquecidos e, em seguida, misturada por 20 segundos a fim de se obter uma mistura homogênea. Logo após, o ligante foi adicionado aos agregados contendo borracha e tudo foi misturado a 165 °C com cada tempo especificado.

Os resultados mostraram que as misturas com borracha possuíam maiores teores de vazios de ar em relação ao controle, e que a borracha fragmentada, tal como esperado, pareceu provocar um aumento no espaço vazio de ar. Com maiores vazios, surgiu a hipótese de dificuldades com trabalhabilidade o que poderia causar problemas de compactação.

Quanto ao tempo de cura dos corpos de prova foi notado que os com maiores períodos de tempo se mostraram consideravelmente melhores em suas resistências, sobretudo, contra falhas. Além disso, observou-se que misturas com maiores teores de borracha chegavam a um ponto de enfraquecimento do desempenho, o que era compensado pelo maior e mais eficaz tempo de cura.

2.5.6 Vantagens e desvantagens do uso de borracha em misturas asfálticas

Cury *et al.* (2002) e Barbosa (2016) definem como principais vantagens obtidas com o asfalto-borracha, a saber:

- **Redução do aparecimento de fissuras:** por ser um material mais elástico, o AB suporta mais oscilações oriundas de movimentações horizontais e verticais resultantes de cargas de tráfego, amplitudes térmicas e movimentos de terra;
- **Redução dos custos de manutenção:** rodovias que fazem uso do AB têm seus custos com manutenções a médio/longo prazo reduzidos graças a sua maior resistência ao envelhecimento e à fissuração;
- **Aumento da vida útil do pavimento:** devido ao seu maior efeito antioxidante e elástico;
- **Melhoria da resistência à derrapagem:** o AB proporciona maior estabilidade do veículo no pavimento (melhor aderência pneu-pavimento);
- **Diminuição dos níveis de ruído:** o AB diminui de três a cinco decibéis o ruído em pavimento quando comparado ao convencional;
- **Redução da camada asfáltica:** pode-se ter até 50% de redução na espessura da camada asfáltica com a adição da borracha, diminuindo-se assim, o uso de ligantes e agregados;
- **Diminuição de pneus inservíveis na natureza:** estima-se um uso entre 20 t e 30 t de pneus por quilômetro executado;
- **Redução da suscetibilidade térmica:** a borracha na mistura resulta em melhor desempenho tanto em climas frios quanto em quentes.

Contudo, Cury *et al.* (2002) e DNIT (2006) apontam algumas desvantagens que ainda necessitam de estudos mais profundos e investimentos para serem mitigados. São eles, a saber:

- **Aumento quase sempre do custo de fabricação:** embora haja estudos, até mesmos nacionais, que demonstram certa vantagem econômica por parte do AB, em um contexto geral o AB tem um investimento inicial maior se comparado aos asfaltos habituais (devido, sobretudo ao pré-tratamento da borracha e a mão de obra qualificada);

- **Maior gasto energético:** aumento do tempo de aquecimento devido a maior viscosidade do material;
- **Falta de investimento:** embora não seja uma tecnologia tão nova, o uso de borracha como modificador de misturas asfálticas ainda não é amplamente divulgado ou mesmo executado;
- **Produção de ruídos durante fabricação:** segundo informações de Barbosa (2016), o DNIT de João Pessoa, cessou seus investimentos na produção de AB devido aos altos ruídos provocados pelas usinas misturadoras quando há produção em grande escala.

2.6 Dosagem *Marshall*

Dosar uma mistura asfáltica consiste em determinar um teor ótimo de ligante asfáltico para uma determinada faixa granulométrica, a qual é previamente definida. Segundo Bernucci *et al.* (2010), durante o surgimento das técnicas de dosagem, muitas formas de compactação de amostras vêm sendo desenvolvidas. E dependendo do método (*marshall*, *superpave*, etc.) a compactação pode ser realizada através de impacto, amassamento, vibração ou rolagem.

Neste trabalho, foi adotada a dosagem *Marshall* fazendo-se uso da compactação por impacto. Essa dosagem é considerada o método mais usado no Brasil e é normatizada pelo departamento nacional de estradas de rodagem na DNER –ME 043/95. Já os parâmetros e especificações de serviço de projeto em misturas asfálticas são regidos com base na norma ES-031/2006 do DNIT. Apesar de ser amplamente utilizada, há controvérsias de que esse tipo de dosagem produz corpos de prova com densidades que não condizem com as do pavimento em campo.

Na metodologia *Marshall*, define-se uma faixa granulométrica em função da camada em que a mistura asfáltica será utilizada (rolamento, ligação, etc.) que deverá ser enquadrada nos limites da faixa especificada, conhecidos os percentuais de cada material da mistura. Em seguida os agregados e o ligante são aquecidos separadamente até a temperatura determinada a partir da curva viscosidade versus temperatura do ligante (com temperatura de aquecimento dos agregados de 15 a 20 °C mais alta).

A mistura é então colocada em molde aquecido golpeando-se 75 vezes por face com soquete padrão caindo de uma altura de 45,72 cm. Moldam-se no mínimo três corpos de prova para cada teor de ligante. Ao final, obtêm-se amostras com aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura (LEANDRO, 2016).

Os corpos de provas são deixados em repouso por no mínimo 12 h sendo então executado o processo de extração dos corpos de prova em macaco hidráulico. Após este processo, os corpos de prova ainda são submetidos a pesagem (com obtenção do peso seco, saturado e submerso) e tem aferida suas dimensões (médias para a altura e o diâmetro).

Por fim, os corpos de prova são imersos em banho-maria, a 60°C, durante 30 minutos. Logo após, as amostras são imediatamente submetidas a um carregamento na prensa *Marshall* até a ruptura, para a determinação de suas propriedades mecânicas (estabilidade e fluência);

Com os dados, são traçadas as curvas de variação de volume de vazios, relação betume/vazios, vazios de agregado mineral, densidade máxima teórica, densidade aparente, estabilidade e fluência; em função do teor de ligante utilizado. Finalmente, com os gráficos feitos há a determinação do teor ótimo de ligante.

Na dosagem de misturas asfálticas pela metodologia *Marshall*, é considerado e descrito os seguintes parâmetros:

- **Granulometria:** Arranjo físico dos agregados em que se busca a densidade máxima possível para garantir a máxima estabilidade;
- **Densidade aparente da mistura (D_a):** calculada com os corpos de prova do ensaio de dosagem;
- **Densidade máxima teórica da mistura (DMT):** densidade da mistura suposta sem vazios;
- **Volume de vazios (V_v):** volume total de pequenas bolsas de ar existentes entre as partículas de agregados recobertos por cimento asfáltico em uma mistura compactada em relação ao volume total da mistura;
- **Vazios do agregado mineral (VAM):** porcentagem do volume do espaço intergranular de uma mistura asfáltica compactada, que inclui o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total da mistura;
- **Relação betume vazios (RBV):** é a relação entre o volume de betume e o volume total de vazios;
- **Estabilidade *Marshall*:** carga máxima à compressão a qual o corpo de prova (CP) resiste antes da ruptura;
- **Fluência *Marshall*:** deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima no ensaio de estabilidade.

Leandro (2016) corrobora que a DNIT 031/2006-ES sugere a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (*RT*) estabelecendo-se limites de valores. É recomendável também o conhecimento dos valores para o quociente *Marshall* e da tenacidade das misturas asfálticas.

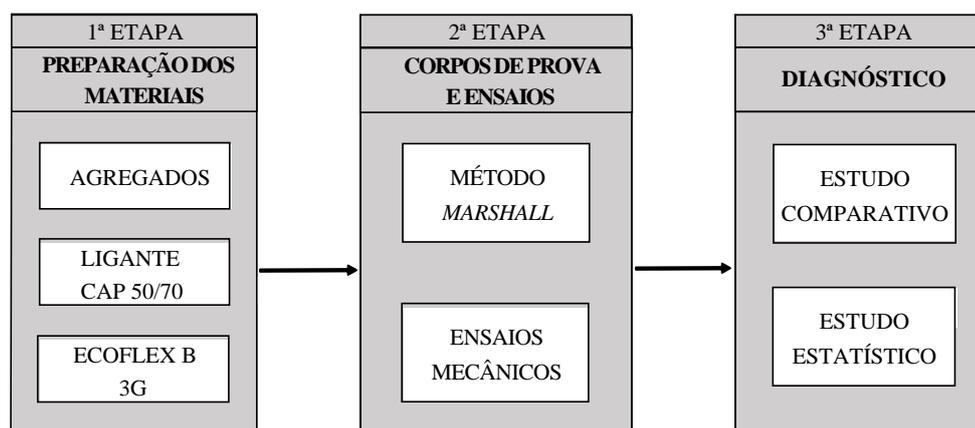
Revisando-se a bibliografia, percebe-se que alguns estudos concluíram que o AB apresenta diminuição da estabilidade e aumento da fluência em relação ao asfalto convencional. Todavia, existem estudos que maiores valores para estabilidade foram encontrados. Isso sofre direta influência do procedimento executado para a moldagem dos corpos de prova, podendo-se chegar a valores distintos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos realizados para se atingir os objetivos estabelecidos neste trabalho. Tratou-se de um estudo experimental de caráter indutivo, recorrendo a métodos tradicionais de pesquisa.

A metodologia para a execução deste estudo foi dividida em três etapas: preparação dos materiais (quarteamento e caracterização dos agregados), produção de corpos de prova (convencionais e modificados) com execução de ensaios físicos e mecânicos e por fim, o diagnóstico com análise comparativa junto ao estudo estatístico. Cada etapa está relacionada a grupos de atividades específicas, com execução em série ou em paralelo, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de execução da metodologia da pesquisa



Fonte: O autor (2021)

3.1 Programação laboratorial

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar, por meio de ensaios realizados no laboratório de geotecnia e infraestrutura da Universidade Federal do Tocantins (UFT) em Palmas-TO (Ver Figura 15) misturas asfálticas (CBUQ) modificadas por borracha pelo método úmido (asfalto borracha), sendo feita uma comparação com uma mistura de referência (sem a borracha). Para a execução dos corpos de prova com uso de borracha foi usado o ligante com a borracha já incorporada (AMB Ecoflex B 3G da Greca asfaltos), agregados graníticos (brita 01, brita 00 e pó de pedra) e material de enchimento (fíler) em conformidade com a Faixa C do DNIT. Para as misturas convencionais (sem borracha), foi usado o CAP 50/70 com agregados graníticos e fíler incorporados respeitando-se a mesma faixa granulométrica. A programação detalhada da pesquisa é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Planejamento geral da pesquisa

OBJETIVO GERAL	OBJETIVO ESPECÍFICOS		PLANO DE AÇÃO	ESTRATÉGIA
Estudar por meio de métodos laboratoriais o desempenho de misturas asfálticas modificadas com borracha em comparação a mistura de referência (sem borracha)	Caracterização dos agregados e produção dos corpos de prova	Coleta e quarteamento dos agregados graníticos e fíler	Obtenção dos agregados em pedra	Separação por tipo de agregado (brita 01, brita 00 e pó de pedra)
			Peneiramento das frações	Separação por granulometria
		Caracterização dos agregados graníticos	Ensaio de densidade, índice de forma e absorção	Elaboração de gráfico da granulometria dos agregados e fíler
		Produção dos corpos de prova convencionais e modificados	Mistura do ligante junto a agregados e fíler submetidos à compactação <i>Marshall</i>	75 golpes por face em temperatura adequada de ligantes e agregados e posterior desmolde
	Verificar melhorias nas propriedades das misturas	Determinação dos parâmetros <i>Marshall</i>	Determinação da Gmm, DMT, Vv, RBV e VAM. Plotar gráficos	Pesagem (seca, saturada e submersa) dos corpos de prova e aferimento de dimensões (altura e diâmetro)
		Determinação do teor ótimo de projeto	Utilizar gráficos do Vv e RBV	Média dos encontros das curvas com as faixas máximas e mínimas normativas
		Execução dos ensaios	Submeter os corpos de prova à ensaios de estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral (<i>RT</i>). Executar ensaio de adesividade para as misturas.	Plotar gráficos em função do teor, corrigir estabilidade em função da altura e cálculo de tenacidade (integração da curva tensão-deformação no ensaio <i>RT</i>)
	Estudo comparativo da mistura normal e da modificada	Análise estatística	Uso de metodologia paramétrica t-student e não paramétrica de Mann-Whitney	Análise da variável <i>p</i> (nível de significância)
		Sintetizar os resultados e discussões por meio de um estudo comparativo	Verificar o comportamento final de misturas modificadas por borracha em comparação às normais	Uso de uma abordagem qualitativa

Fonte: O autor (2021)

Figura 15 – Laboratório de geotecnia e infraestrutura da UFT



Fonte: O autor (2021)

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Agregados minerais

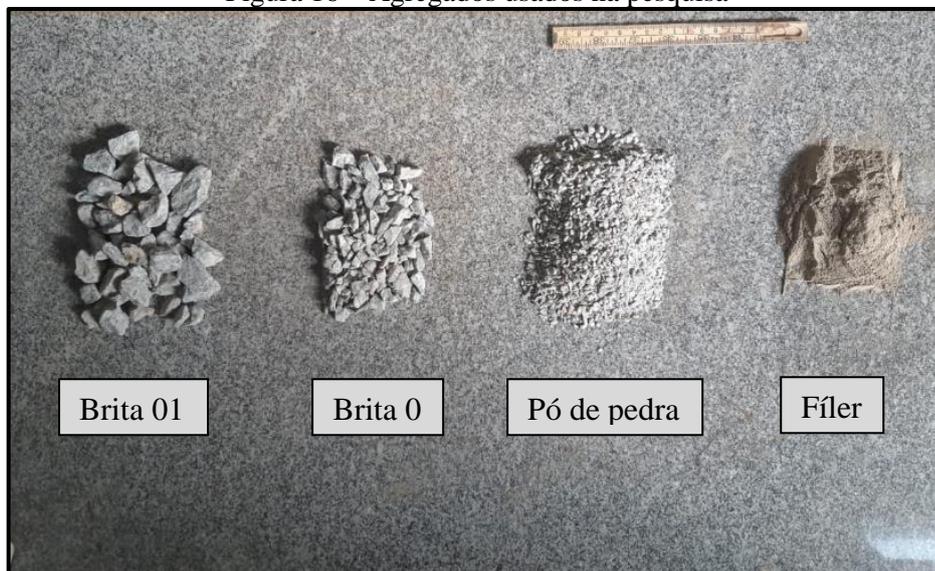
Com significativa influência no desempenho da mistura, o agregado corresponde a cerca 95% do peso total do asfalto e é o principal responsável por suportar o impacto das cargas no asfalto. Devido a sua importância direta na qualidade da mistura, a escolha do mesmo deve atender não somente características mecânicas, mas para que se torne viável deve ser levado em consideração também seu valor, sua disposição quanto a região, questões geométricas (índice de forma) e químicas (sobretudo a adesividade ao ligante betuminoso), que posteriormente irão influenciar no desempenho e funcionalidade da mistura asfáltica.

Os agregados (ver Figura 16) usados foram doados pela pedreira Grampata localizada no distrito de Taquaralto na cidade de Palmas-TO. Trata-se de um agregado granítico britado em três faixas granulométricas distintas (brita 01, brita 00 e pó de brita). Os mesmos foram acomodados em sacos plásticos (separados por tipo de brita) e em seguida quarteados e peneirados em um conjunto de oito peneiras (usando-se a série normal e intermediária).

O agregado graúdo (retida na peneira n°4 de 4,76 mm) foi submetido aos ensaios de massa específica aparente, absorção de água, índice de forma e adesividade em conformidade com as normas DNER-ME 081/98, NBR 7809:2019 e DNER-ME 078/94 respectivamente. Já o agregado miúdo (passante na peneira n°4 e retido na 200 de 0,075mm) foi submetido ao ensaio de massa específica (método do frasco de *Chapman*), regulamentado pela DNER-ME

194/98. Para material de enchimento usou-se fíler calcário (da empresa Valemix). Não foram realizados ensaios para este material sendo usados os dados fornecidos pelo fabricante.

Figura 16 – Agregados usados na pesquisa



Fonte: O autor (2021)

3.2.1.1 Granulometria dos agregados

Ensaio básico feito no agregado sendo fundamental para realização de outros ensaios na pesquisa. A análise granulométrica dos agregados brita 01, brita 00, pó de pedra e material de enchimento (fíler) foi executada por meio do método de ensaio DNER ME 083/98.

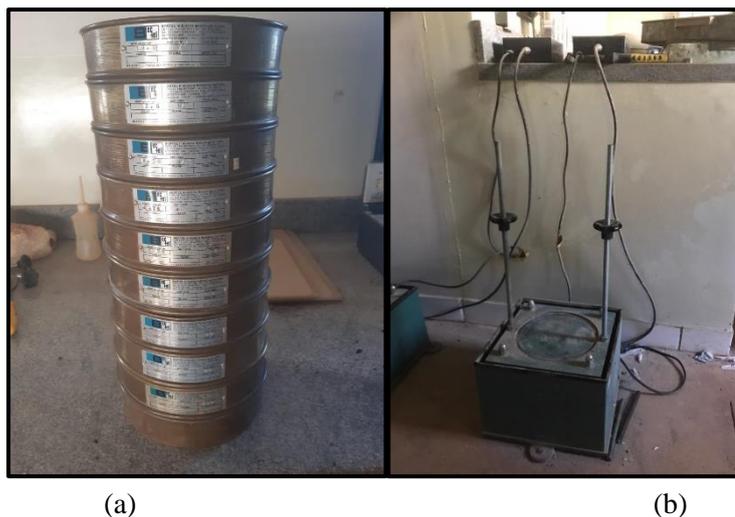
De início, para a realização do ensaio deve-se atender a norma ABNT NBR NM 248:2003 a qual determina a amostra mínima a ser usada. Entretanto, foram adotados valores superiores para melhor qualidade dos resultados. As quantidades de brita 01, brita 00, pó de pedra e fíler foram respectivamente 7kg, 5kg, 5kg e 1kg. O valor do diâmetro máximo dos agregados foi fornecido pela pedreira doadora do material.

Após a separação da quantidade de amostras, o material foi levado a estufa à temperatura de 105 °C durante 24 horas. Em seguida foi determinada a série de peneiras a serem utilizadas. Conforme a ABNT NBR NM 248:2003 existem duas séries de peneiras (a série normal e a série intermediária). Para uma melhor execução do ensaio optou-se por utilizar elementos de ambas as séries combinando-as para melhor plotagem da posterior curva granulométrica.

Com isso, os agregados foram passados nas peneiras de abertura de 19,1 mm (3/4''), 12,7 mm (1/2''), 9,52 mm (3/8''), 4,76 mm (# 4), 2 mm (# 10), 0,42 mm (# 40), 0,177 mm (#

80) e 0,075 mm (# 200). O material passante na peneira # 200 foi denominado fundo. O método de execução usado para o peneiramento foi dispor as amostras pouco a pouco no topo da sequência do jogo de peneiras que logo em seguida foram submetidas à vibração por agitador mecânico (ver Figura 17) por um tempo de 15 minutos.

Figura 17 – (a) jogo de peneiras (b) agitador mecânico



Fonte: O autor (2021)

Por fim, pesou-se e calculou-se a porcentagem de material retido e passante de amostra em cada peneira utilizada. Realizadas as pesagens, obteve-se todos os requisitos para a geração da curva granulométrica. A curva granulométrica é um elemento gráfico que relaciona as porcentagens passantes de material em função da abertura da peneira. Por último, é válido frisar que a somatória das massas de cada peneira deverá ser igual à massa inicial de amostra peneirada com uma diferença máxima de 0,3%.

3.2.1.2 Índice de forma

O índice de forma trata-se de um parâmetro pelo qual se determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado graúdo. O índice corresponde a valores entre 0 e 1. Na prática quanto mais próximo de 1, menor a variação dos eixos e mais cúbico é o agregado. Já valores menores que 0,5 (não recomendado por norma) indicam grande variação dos eixos e, portanto, partículas lamelares ou alongadas (ABNT NBR 7809:2006). Nesta pesquisa o índice de forma foi determinado pelo método do paquímetro.

Primeiramente, iniciou-se o ensaio separando-se a quantidade mínima de material para a realização do ensaio segundo a ABNT NBR 7809:2006. Para a brita 01 foi adotado um total

de 7 kg, já para a brita 00 foi adotado 5 kg. As amostras então foram mantidas em estufa a 105 °C até que se obteve massa constante em períodos de 60 minutos para cada avaliação.

Após a determinação da amostra mínima e secagem em estufa, separou-se as porcentagens retidas nas peneiras 3/4, 1/2 e 3/8 de cada brita (01 e 00), e caso os valores percentuais fossem inferiores a 5% do peso total da amostra, estas peneiras seriam descartadas para efeito de cálculo do índice de forma. Com base nos valores percentuais retidos para cada peneira, o operador proporcionalmente separou as britas de cada peneira não descartada, sendo que o total de britas medidas, tanto da brita 01 como da brita 0, foi de 200 unidades. A Equação 1 determinou a proporcionalidade quantitativa para cada granulometria.

$$N_i = 200 \cdot \frac{E_i}{E_t} \quad (1)$$

Onde:

N_i = número de grãos medidos na fração de interesse;

200 = número de grãos necessários para a realização do ensaio;

E_i = percentual retido de amostra na fração de interesse;

E_t = somatória dos percentuais de cada fração (maiores que 5% do peso da amostra).

Por fim, com auxílio do paquímetro (ver Figura 18) foram medidos brita a brita os valores de espessura e comprimento (sendo o maior valor para comprimento). O valor do índice de forma deu-se pela média ponderada da razão entre comprimento e espessuras medidos para cada granulometria.

Figura 18 – Aferição de medidas (a) e pesagem das britas (b)



Fonte: O autor (2021)

3.2.1.3 Densidade e absorção do agregado graúdo

Os ensaios de densidade e absorção do agregado graúdo foram realizados seguindo-se a norma DNER ME 081/98. O conceito de densidade define-se como a razão entre o peso e o ar da unidade de volume de um agregado (porção impermeável), a uma dada temperatura e o peso ao ar da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura.

Primeiramente, separou-se as quantidades amostrais do ensaio (retidas em na peneira de 4,75 mm). A norma relaciona as massas mínimas em função da dimensão máxima característica do agregado (DMCA). A DMCA é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

No ensaio foram utilizadas quantidades superiores aos previsto em norma. Foram separados 7 kg para brita 01 e 5 kg para brita 00. Na sequência, as amostras foram lavadas e colocadas em estufa a temperatura de 105 °C até se alcançar a constância de massa. Logo após, resfriadas e assim que o agregado permitiu manipulação efetuou-se a pesagem seca e em seguida efetuou-se a imersão em água à temperatura ambiente por um período de 24 h, tendo-se cuidado de agitar-se algumas vezes para expulsar as bolhas de ar do material.

Após cerca 24 h em água as amostras foram retiradas e espalhadas em pano absorvente de modo que as películas visíveis de água fossem eliminadas (tomando-se cuidado para evitar a evaporação de água dos poros durante a operação). Realizou-se então, as pesagens obtendo-se o valor da massa saturada com superfície seca. Finalmente, as amostras foram pesadas em balança hidrostática para obtenção do valor de massa na condição submersa.

A Equação 2 determina os valores para densidade (D_a) em função das massas obtidas e a Figura 19 ilustra alguns passos do procedimento de ensaio.

$$D_a = \frac{m}{m_s - m_{sub}} \quad (2)$$

Onde:

m = massa ao ar seca (g);

m_s = massa ao ar saturada com superfície seca (g);

m_{sub} = massa submersa (g).

Figura 19 – Procedimentos para determinação da densidade



Fonte: O autor (2021)

O ensaio de absorção fornece o aumento percentual de massa que o agregado sofre devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, em relação à massa seca. Seu cálculo é derivado dos resultados obtidos nas pesagens e segue a mesma norma para o cálculo das densidades (DNER ME 081/98). A Equação 3 apresenta a fórmula para o cálculo da absorção.

$$A_a = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

A_a = absorção do agregado (%);

m = massa ao ar seca (g);

m_s = massa ao ar saturada com superfície seca (g);

3.2.1.4 Densidade do agregado miúdo

No caso dos agregados miúdos, foi executado o método de ensaio regulamentado pela DNER ME 194/98 - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de *Chapman*. Neste método, a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0,075 mm.

Com uma amostra de 500 g seca em estufa a 105 °C (até a constância de massa), iniciou-se inserindo 200 cm³ de água destilada no frasco *Chapman*. Posteriormente, o agregado miúdo (pó de brita) foi adicionado lentamente com o auxílio de funil ou semelhante. Durante a operação em que o agregado foi adicionado o frasco foi submetido à leves agitações a fim de se remover bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco

indicou o volume ocupado pelo conjunto água e agregado miúdo, que foi usado para calcular a massa específica real do agregado por meio da Equação 4.

$$D_a = \frac{500}{L_n - 200} \quad (4)$$

Onde:

D_a = densidade aparente do pó de pedra;

L_a = valor da leitura;

A Figura 20 ilustra alguns dos procedimentos do ensaio.

Figura 20 – Densidade do agregado miúdo por meio do frasco de *Chapman*



Fonte: O autor (2021)

3.2.1.5 Adesividade

A adesão do ligante asfáltico à superfície do agregado é fundamental para que haja boa interação entre ambos. O descolamento do filme asfáltico é principalmente ocasionado pelo efeito da água (em forma de vapor ou no estado líquido) e está ligado a questões de materiais, clima, tráfego, projeto, construção da via, etc. Uma má adesividade pode levar a sérios problemas em misturas asfálticas (sobretudo diminuição da vida útil). Com isso, torna-se necessário a execução de um ensaio que possa atestar de forma qualitativa a adesividade de um determinado agregado a um determinado ligante. O ensaio de adesividade é preconizado pela norma DNER ME 078/94.

Para o ensaio de adesividade do agregado ao ligante betuminoso utilizou-se 500 gramas de material passante na peneira 19 mm e retido na de 12,7 mm. Logo após o material passou por processo de lavagem durante 1 minuto com água destilada em temperatura ambiente e então seguiu para estufa a 120 °C por um período de duas horas.

Na sequência adicionaram-se 17,5 gramas de ligante (previamente aquecido a 120 °C para CAP 50/70 e a 140 °C para o Ecoflex B 3G) ao agregado (previamente aquecido a 100 °C) e iniciou-se o processo de mistura. A amostra foi disposta em um béquer e ficou recoberta com água destilada. Em seguida o conjunto seguiu para a estufa durante 72 horas a 40°C. Por fim, após as 72 horas, avaliou-se a amostra. Para o caso de deslocamento parcial ou total da película concluiu-se que o ensaio foi não reagente, ou seja, não possuiu adesividade satisfatória. E para os casos em que não houve deslocamento da película concluiu-se que o ensaio foi reagente, ou seja, possuiu adesividade satisfatória. Para todos os casos recomenda-se ainda drenar a água e avaliar novamente a amostra checando o deslocamento ou não de película. Em termos práticos, recomenda-se para os casos de má adesividade o uso de aditivos, tais como fíler (para correção da polaridade negativa no agregado). A Figura 21 ilustra alguns processos para realização do ensaio de adesividade.

Figura 21 – Esquema do ensaio de adesividade



Fonte: O autor (2021)

3.2.2 Ligante CAP 50/70

O ligante utilizado na pesquisa (CAP 50/70) foi fornecido pela TECCON ENGENHARIA e adotado devido ao seu comum uso para misturas asfálticas e sua disponibilidade próxima a região de Palmas-TO. O CAP se enquadra como 50/70, ou seja, sua penetração está na faixa de 50 a 70 décimos de milímetro a uma temperatura ambiente de

25°C e possui as seguintes características conforme a Tabela 2 (DNIT 095/2006 - EM). A Figura 22 ilustra o CAP 50/70 usado na pesquisa.

Tabela 2 – Especificações do CAP 50/70

Propriedade	Unidade	Norma	Especificações
Penetração	0,1 mm	NBR 6576	50 a 70
Ponto de Amolecimento	° C	NBR 6560	46
Viscosidade <i>Brookfield</i> 135 °C	cP	NBR 15184	274
Viscosidade <i>Brookfield</i> 150 °C	cP	NBR 15184	112
Viscosidade <i>Brookfield</i> 177 °C	cP	NBR 15184	57 a 285
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	-	(-0,5) a (+0,7)
Ductilidade a 25 °C, mín	cm	NBR 15184	57 a 285 min
Massa Específica	g/cm ³	NBR 6296	1,01
Ponto de Fulgor	° C	NBR 11341	235 min

Fonte: Adaptado de DNIT 095/2006 - EM

Figura 22 – Ligante CAP 50/70



Fonte: O autor (2021)

Nesta pesquisa não foram feitos ensaios de caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70. Com isso, os dados de interesse do ligante para a dosagem da mistura (tais como

densidade, temperatura de mistura, etc.) serão adotados com base em bibliografia existente. Para determinação das temperaturas de mistura e compactação foram adotadas faixas previstas em norma em função da viscosidade dinâmica.

3.2.3 Ligante CAP Ecoflex B 3G

O CAP Ecoflex B 3G é um ligante asfáltico da Greca Asfaltos de aparência escura e opaca modificado com a incorporação de 15% em peso de pó de borracha (ver Figura 23). Uma amostra do produto foi obtida diretamente do caminhão tanque durante a execução de um trecho experimental feito pelo DNIT na travessia urbana da cidade de Crixás, estado do Tocantins no ano de 2019. Foi obtida também a planilha de controle tecnológico com dados da caracterização física do CAP Ecoflex B 3G. Os dados de interesse do ligante modificado para a dosagem da mistura foram fornecidos pela fabricante e pela planilha de controle tecnológico feita *in loco* (ver Tabela 3 para os dados compilados e o ANEXO A para a planilha na íntegra).

Figura 23 – CAP Ecoflex B 3G da Greca Asfaltos



Fonte: O autor (2021)

Tabela 3 – Especificações do CAP Ecoflex B 3G da Greca Asfaltos

Propriedade	Unidade	Norma	Especificações	Resultados
Penetração	0,01 mm	NBR 6576	30 a 70	53,5
Ponto de Amolecimento	° C	NBR 6560	55 min	57,2

Viscosidade <i>Brookfield</i> 135 °C	cP	NBR 15184	-	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 150 °C	cP	NBR 15184	-	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 175 °C	cP	NBR 15184	800-2000	1659
Recuperação Elástica	%	NBR 15086	50 min	76
Massa Específica	g/cm ³	-	Anotar	1,029
Ponto de Fulgor	° C	NBR 11341	235 min	243

Fonte: Adaptado de DNIT (2019)

A borracha usada na produção do AMB foi peneirada e sua granulometria determinada conforme rege a norma DNIT 111/2009, onde descreve que as partículas a serem usadas devem ser passantes na peneira de nº 40 (0,425 mm) (GRECA, 2011). A mesma norma ainda determina que a porcentagem de borracha moída acrescentada deva estar entre teores de 15% a 20% da massa total do ligante.

3.3 Dosagem e execução da mistura asfáltica

O processo de dosagem teve início na definição das curvas granulométricas dos agregados usados na pesquisa com posterior definição da composição granulométrica e quantitativo de material (agregados e ligante). A composição montada foi usada tanto para a execução da mistura asfáltica convencional (com o ligante CAP 50/70) quanto para a mistura asfáltica modificada (com o ligante Ecoflex B 3G).

Foram moldados uma quantidade de 15 corpos de prova (CP's) para cada uma das misturas (sendo 3 corpos para cada teor de ligante de um total de 5) totalizando assim, 30 CP's nesta etapa inicial. Este primeiro conjunto de compactação e moldagem dos CP's teve como objetivo a definição do teor ótimo de cada mistura baseado nos parâmetros e procedimentos da metodologia *Marshall* regulamentado pela DNER ME 043/95. Como ferramenta auxiliar e comprobatória ainda foi realizado o *Rice Test* norteado pela ABNT NBR 15619:2016.

Definido os teores ótimos (para a mistura convencional e modificada), foram moldados mais um grupo de 6 corpos de prova para cada mistura para realização dos ensaios *Marshall* (estabilidade e fluência) e *RT* (resistência a tração por compressão diametral)

seguindo-se os passos da DNER ME 043/95 e a DNIT 136/2010-ME, respectivamente. A Tabela 4 elenca o quantitativo geral de corpos de prova moldados nesta pesquisa.

Tabela 4 – Quantitativo de corpos de prova moldados na pesquisa

Ensaio	Convencional	Modificado
Parâmetros <i>Marshall</i>	15	15
Fluência e estabilidade <i>Marshall</i> para teor ótimo de ligante	3	3
Resistência à tração por compressão diametral (<i>RT</i>) para teor ótimo	3	3
TOTAL:	21 corpos de prova	21 corpos de prova

Fonte: O autor (2021)

3.3.1 Definição da composição granulométrica das misturas

O processo de definição da composição granulométrica da mistura consistiu em um método de tentativa e erro para várias simulações (“pré-composições” simuladas no *solver* do *Microsoft Excel*) compostas por diferentes quantidades de agregados (brita 01, brita 00 e pó de pedra) e material de enchimento (fíler). Da mesma maneira que nas curvas granulométricas do agregado, a composição granulométrica da mistura consistiu em uma curva definida a partir de valores em porcentagem do material passante versus a abertura do jogo de peneiras.

Desta forma, chegou-se a uma “simulação final” da qual obteve-se uma curva enquadrada na faixa de projeto (faixa C do DNIT para ligante convencional utilizada em camada de rolamento conforme DNIT 031/2006 – ES). Esta faixa possui “tolerâncias” (curvas que servem como limites máximos e mínimos) que devem ser respeitadas.

3.3.2 Definição da faixa ótima de teor de ligante

Inicialmente, para a determinação da faixa ótima de ligante fez-se o uso do seguinte passo a passo (que fornece uma estimativa do teor provável de ligante em porcentagem de uma maneira aproximada), baseada na granulometria da mistura de agregados. A metodologia teve início com a determinação da superfície específica (*S*) que é uma equação que consiste basicamente em relacionar as porcentagens retidas (%) calculadas a partir da curva de composição granulométrica (ver Equação 5).

$$S = \frac{0,17G+0,33g+2,3A+12a+135f}{100} \quad (5)$$

Onde:

S = é a superfície específica (m²/kg);

G = é a % retida na # 9,5 mm;

g = % passante na # 9,5 mm e retida na # 4,8,

A = % passante na # 4,8 mm e retida na # 0,297,

a = % passante na # 0,297 mm e retida na # 0,075

f = % passante na # 0,075 mm.

Em seguida, com o valor da superfície específica (S) já obtido calculou-se o teor provável de ligante em relação a massa do agregado (T_{ca}) conforme a Equação 6.

$$T_{ca} = m \cdot S^{1/5} \quad (6)$$

Onde:

T_{ca} = Teor provável de ligante em relação a massa do agregado;

m = módulo de riqueza (3,75 – 4,00);

S = Superfície específica (m²/kg).

O valor do T_{ca} foi corrigido por meio da densidade média ponderada (d_{am}) que é uma ponderação das densidades individuais dos agregados (gráudo, miúdo e fíler) em função da porcentagem (%) respectiva de cada um na composição granulométrica. Assim o novo teor provável em relação a massa de agregado ($T_{ca'}$) foi obtido pela Equação 7.

$$T_{ca'} = 2,65 \cdot \frac{T_{ca}}{d_{am}} \quad (7)$$

Onde:

$T_{ca'}$ = Teor provável de ligante em relação a massa do agregado corrigido;

T_{ca} = Teor provável de ligante em relação a massa do agregado;

d_{am} = Densidade média dos agregados.

Finalmente, com o teor corrigido ($T_{ca'}$), calculou-se a porcentagem de asfalto em relação à mistura (P_{ca}) conforme a Equação 8.

$$P_{ca} = \frac{100 \cdot T_{ca'}}{100 + T_{ca'}} \quad (8)$$

Estimado o teor provável de asfalto (P_{ca}) foram moldadas baterias de 3 corpos de prova para cada um dos seguintes teores: P_{ca} , $P_{ca} \pm 0,5\%$ e $P_{ca} \pm 1,0\%$ (faixa de teor ótima). Depois de moldados os corpos foram submetidos a ensaios iniciais (pesagem e aferimento de dimensões) para determinação de parâmetros volumétricos das misturas asfálticas no estado compactado que são de fundamental importância no processo de dosagem. Estes permitem dentre outras coisas, avaliar a eficiência do processo de compactação e quantificar o volume de vazios existentes.

3.3.3 Dosagem *Marshall* em massa, mistura e temperaturas de moldagem

Com a curva da composição granulométrica montada e com a faixa de teor ótima determinada tornou-se possível o dimensionamento de uma planilha quantitativa relacionando a quantidade em gramas dos agregados (para cada peneira) em função de cada teor individual de ligante da faixa ótima. Partiu-se da definição que cada corpo de prova teria teoricamente um peso 1200 gramas.

A metodologia de mistura consistiu em separar previamente os agregados (para cada fração de peneira) em função de cada teor de ligante em recipientes/sacos previamente identificados (ver Figura 24) e na sequência colocá-los em estufa (modelo elétrico da DeLeo) em temperatura de 160 °C (recomendação de faixa entre 10 °C a 15 °C acima da temperatura de mistura do ligante CAP 50/70). Na sequência o ligante foi aquecido até sua temperatura de mistura de 150 °C (para o CAP 50-70) e 160 °C (para o Ecoflex B 3G) usando-se como auxílio o termômetro digital infravermelho para alta temperatura modelo GM-300. Por fim, os agregados e o ligante foram misturados até que houvesse incorporamento completo entre ambos (ver Figura 25).

Figura 24 – Separação e acomodação em estufa dos agregados



Fonte: O autor (2021)

Figura 25 – Processo de mistura e incorporamento



Fonte: O autor (2021)

O procedimento seguiu com a disposição da mistura asfáltica nos moldes de compactação pré aquecidos a 140 °C em estufa. Nos moldes foram introduzidas folhas de papel-filtro (cortadas conforme a seção do molde) tanto na base inferior quanto na superior logo após a introdução da mistura no molde. Além disso os moldes foram untados internamente com vaselina com um pincel. As misturas ainda foram acomodadas com 15 golpes de espátula no interior e ao redor do molde e 10 no centro da massa.

Por fim, foi realizado a compactação dos corpos de prova (em temperatura de 140 °C para as misturas convencionais e modificadas) por meio do compactador *Marshall* com 75 golpes para cada face do corpo de prova por meio de soquete normatizado com 4,54 Kg e 98,4 mm de diâmetro a uma altura de queda livre de 45,72 cm. Após a etapa de compactação, os corpos de prova foram deixados em repouso por 24 h e em seguida desmoldados em macaco hidráulico e identificados pelo teor e tipo de ligante asfáltico. A Figura 26 ilustra o processo de compactação dos corpos de prova.

Figura 26 – Compactação dos corpos de prova pela metodologia *Marshall*



Fonte: O autor (2021)

3.3.3.1 Temperaturas de mistura e compactação

Segundo a metodologia *Marshall* (DNER 043/95) a temperatura de aquecimento do ligante CAP 50/70, para mistura com os agregados, é aquela na qual apresenta uma viscosidade cinemática de 170 ± 20 cSt (centistokes) e a temperatura de compactação da mistura é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade cinemática de 280 ± 30 cSt. A viscosidade cinemática, medida em centistokes (cSt), é igual à viscosidade dinâmica, medida em centipoise (cP), dividida pela massa específica do ligante em g/cm^3 . Como a massa do ligante é praticamente igual à unidade, os mesmos valores acima podem ser tomados em cP.

Nesta pesquisa não foram realizados ensaios de caracterização dos ligantes, de tal forma que as temperaturas de mistura e compactação para o CAP 50/70 (150 °C e 140 °C, respectivamente) foram determinadas a partir de uma curva de viscosidade versus temperatura

plotada por Cunha *et al.* (2018), desde que obedecesse a faixa de viscosidade prevista em norma. Já para o ligante Ecoflex B 3G, as temperaturas de mistura e compactação (160 °C e 140 °C, respectivamente) foram fornecidas no catálogo da fabricante. A curva referência de viscosidade adaptada inserindo-se as faixas de temperatura normativas para o CAP 50/70 e o catálogo com recomendação das temperaturas de execução do Ecoflex B 3G encontram-se no ANEXO B.

3.3.4 Parâmetros *Marshall*

Após a compactação e desmolde dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos ao processo de aferimento de suas dimensões com o auxílio de um paquímetro. As dimensões aferidas foram o diâmetro e a altura (calculou-se a média de 4 pontos medidos para cada corpo de prova).

Em seguida, partiu-se para o processo de pesagem dos corpos de prova. Os corpos foram pesados secos ao ar (M_s), submersos fazendo-se uso de balança hidrostática com corpos de prova imersos em água por 24 h antes da pesagem (M_{sub}) e com superfície saturada (M_{sat}). Para a pesagem na modalidade com superfície saturada, os corpos foram previamente secos superficialmente com pano para retirada do excesso de água e logo após pesados. O procedimento de aferição de medidas e pesagem dos corpos de prova estão ilustrados na Figura 27.

Com os dados das pesagens e aferimento das dimensões obtidos, tornou-se possível o cálculo dos parâmetros *Marshall*. Os parâmetros calculados foram a densidade aparente (D_a), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios (Vv), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume/vazios (RBV), estabilidade e fluência.

Figura 27 – Aferimento de medidas e pesagem dos corpos de prova



Fonte: O autor (2021)

3.3.4.1 Densidade aparente (D_a)

O cálculo da densidade aparente seguiu as diretrizes da DNER ME 117/94 com classificação de corpos de prova de até 7% de vazios. Para esta classificação o cálculo da densidade aparente é feito conforme a Equação 9.

$$D_a = \frac{M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \cdot 0,9971 \quad (9)$$

Onde:

M_s = massa do corpo de prova seco (g);

M_{sat} = massa do corpo de prova com superfície saturada seca (g);

M_{sub} = massa seca do corpo de prova submerso (g);

D_a = massa específica aparente (g/cm³);

0,9971 = massa específica da água a 25 °C (g/cm³).

3.3.4.2 Densidade máxima teórica (DMT)

A densidade máxima teórica da mistura (DMT) corresponde à densidade da mistura asfáltica sem vazios. Ou seja, a mesma é numericamente igual à razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto. Pode ser calculada a partir das porcentagens de cada um dos componentes da mistura (determinados na composição granulométrica) e das densidades relativas destes, segundo a Equação 10.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%_{CAP}}{D_{CAP}} + \frac{\%_{B01}}{D_{B01}} + \frac{\%_{B00}}{D_{B00}} + \frac{\%_{P6}}{D_{P6}} + \frac{\%_f}{D_f}} \quad (10)$$

Onde:

$\%_{CAP}$ = teor de ligante na mistura;

$\%_{B01}$ = teor de brita 01 na mistura;

$\%_{B00}$ = teor de brita 00 na mistura;

$\%_{pó}$ = teor de pó de pedra na mistura;

$\%_f$ = teor de fíler na mistura;

DMT = densidade máxima teórica da mistura

3.3.4.3 Volume de vazios (*Vv*)

A Porcentagem de volume de vazios da mistura compactada (*Vv*) é a relação entre o volume de vazios e o volume total da mistura. Representa a concentração de volume de ar dentro da amostra compactada. A sua determinação é feita com o uso da densidade aparente e da densidade máxima teórica da mistura, conforme a Equação 11.

$$Vv = \frac{DMT - D_a}{DMT} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

Vv = volume de vazios (%);

DMT = densidade máxima teórica;

D_a = densidade aparente.

3.3.4.4 Vazios com betume (*VCB*)

Conhecendo-se a D_a , calcula-se pela Equação 12.

$$VCB = \frac{D_a \cdot \%_a}{D_{lig}} \quad (12)$$

Onde:

$\%_a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

D_a = densidade aparente;

D_{lig} = massa específica do ligante;

VCB = vazios com betume (%);

3.3.4.5 Vazios do agregado mineral (*VAM*)

Calculados o *Vv* e o *VCB*, é possível se conhecer o valor de vazios do agregado mineral (*VAM*) pela Equação 13.

$$VAM = Vv + VCB \quad (13)$$

Onde:

Vv = volume de vazios (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%);

VCB = vazios com betume (%).

3.3.4.6 Relação betume/vazios (*RBV*)

Calculados o *VCB* e o *VAM*, é possível conhecer a relação entre o betume e os vazios (*RBV*) pela Equação 14.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde:

VCB = vazios com betume (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%);

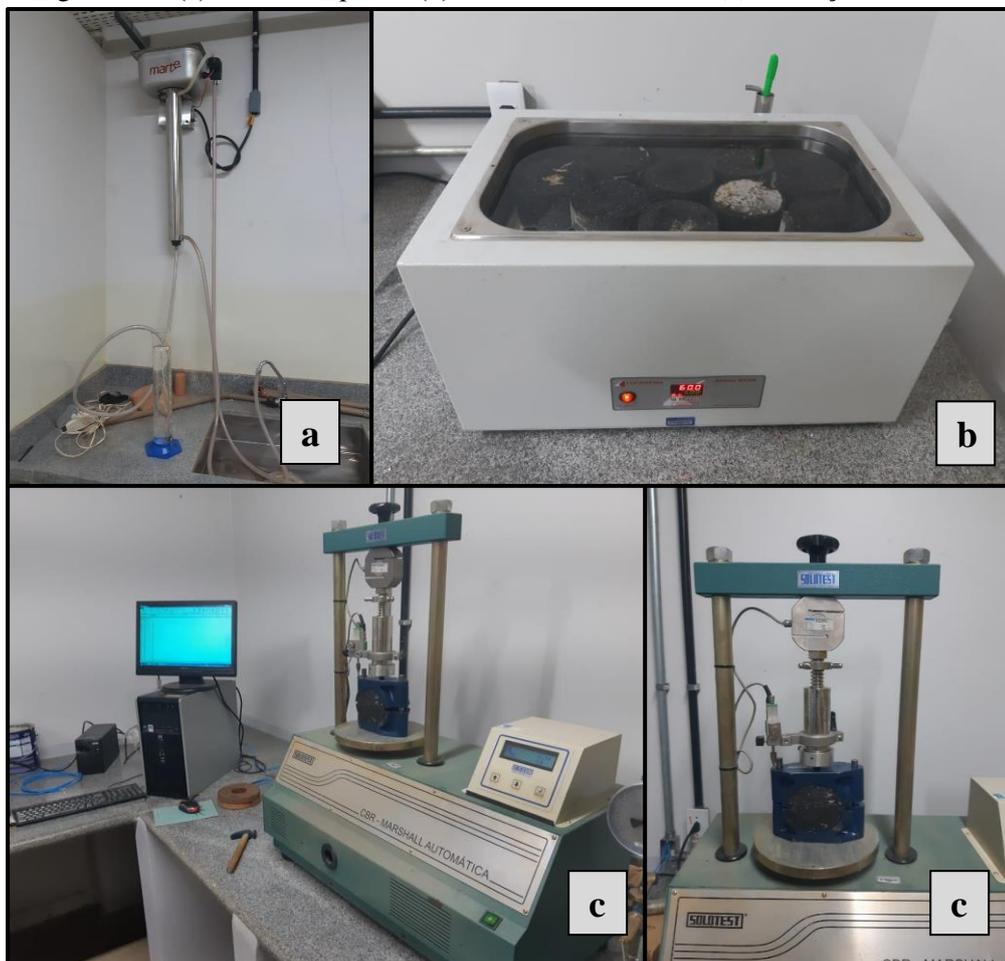
RBV = relação betume / vazios (%).

3.3.4.7 Estabilidade e fluência *Marshall*

Para a determinação da estabilidade e da fluência *Marshall* os corpos de prova foram colocados em banho-maria (modelo 153/22 da Lucadema) com água destilada (usando-se o destilador MARTE tipo pilsen) a 60 °C por um período de 30 a 40 minutos conforme DNER-ME 043/95. Em seguida, cada corpo de prova foi colocado no molde de compressão (com temperatura entre 21 °C e 38 °C), limpo e com os pinos-guias lubrificados. O ensaio foi realizado na prensa *Marshall* da Solotest modelo CSR-5T com capacidade de 5000 Kgf. O corpo de prova então estando no molde foi posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência foi colocado e ajustado na posição do ensaio (ver Figura 28).

A prensa foi calibrada para uma velocidade normativa de 5 cm/min, até o rompimento do corpo de prova, o que é observado no defletômetro pela indicação de um máximo. Em suma, a carga necessária para produzir o rompimento do corpo de prova é conhecida como estabilidade *Marshall*. Este valor foi ainda corrigido em função da espessura (altura) para cada corpo de prova ensaiado, multiplicando-se por um fator conforme tabela disponível na DNER-ME 043/95 (ver ANEXO C). O valor da fluência é obtido de forma simultânea ao da estabilidade sendo expressa em mm.

Figura 28 – (a) destilador pilsen (b) CP's no banho-maria (c) execução do ensaio



Fonte: O autor (2021)

3.3.5 Rice test

Uma outra metodologia para se obter a densidade máxima é determinando-a diretamente da mistura asfáltica ainda não compactada. O procedimento é denominado *Rice Test* e é normatizado pela ABNT NBR 15619/2016. O objetivo do ensaio na pesquisa foi

confirmar a proximidade das faixas de densidade máxima teórica calculadas pelo *Rice Test* e pela composição granulométrica (*DMT*).

Para o ensaio foram preparadas 10 amostras de agregados (uma para cada teor de CAP 50/70 e uma para cada teor de Ecoflex B 3G) obedecendo-se as composições granulométricas feitas. Foram separadas 2500 gramas de agregados para cada mistura em concordância ao preconizado por norma que determina essa quantidade amostral se a dimensão máxima do agregado estiver entre 19 e 25 mm.

Os agregados foram então misturados ao ligante asfáltico com a adoção das mesmas temperaturas de mistura (para o CAP 50/70 e o Ecoflex B 3G) e dos mesmos teores calculados na composição granulométrica. Na sequência, as misturas foram colocadas em temperatura ambiente (durante o processo de resfriamento das misturas, e com auxílio de uma espátula, foram destruídos os grumos que eventualmente iam se formando).

Para a execução do *Rice Test*, usou-se um frasco que foi enchido com água destilada (a 25 °C) e posteriormente pesado (variável A). Logo após, as misturas (já resfriadas) foram colocadas no frasco vazio (tarado) para obtenção das massas secas das misturas (variável B).

Em etapa posterior, o conjunto Frasco-Mistura foi preenchido com água destilada (a 25 °C) até que se cobrisse totalmente a mistura. A água foi colocada com baixa altura de queda e com o recipiente inclinado, para que não se provocasse a formação excessiva de bolhas de ar no interior do recipiente. Então, agitou-se levemente o frasco para retirar o excesso de ar contido no interior da amostra.

Por fim, o conjunto Frasco-Mistura foi acoplado ao sistema de bomba de vácuo junto a um *Kitasato* (para evitar-se refluxo de água) e então submetido a um aumento gradual de vácuo (pressão negativa) em mesa agitadora por um tempo de 15 minutos até que se atingisse o máximo de 730 mmHg e com pressão residual de 15 mmHg. Ao final do período de 15 minutos desligou-se o conjunto de ensaio (com liberação do vácuo), completou-se o recipiente com água destilada e procedeu-se com a pesagem do conjunto (variável C).

A Figura 29 ilustra o processo de execução do ensaio e a Equação 15 relaciona as variáveis para o cálculo da densidade máxima medida pelo *Rice Test* (D_{mm}).

$$D_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \cdot f \cdot dw \quad (15)$$

Onde:

D_{mm} = densidade máxima medida;

A = massa do recipiente com volume completo com água destilada (g);

B = massa da mistura seca ao ar (g);

C = massa do recipiente com mistura submersa em água destilada (g);

f = fator de multiplicação (=1);

d_w = massa específica da água em temperatura ambiente (= 0,9971 g/cm³).

Figura 29 – Execução do *Rice Test*



Fonte: O autor (2021)

3.3.6 Definição do teor ótimo de ligante

O método usado nesta pesquisa para a determinação do teor ótimo de ligante foi plotando-se as curvas do volume de vazios (Vv) e da relação betume / vazios (RBV) em um único gráfico e em seguida fazendo-se a média de 4 pontos obtidos a partir do cruzamento de cada curva com sua respectiva faixa de valores normativos (máximos e mínimos). Com o teor ótimo conhecido foram moldados corpos de prova para realização dos ensaios de estabilidade, fluência e RT para esta composição.

3.3.7 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio foi realizado segundo as diretrizes da norma DNER 136/2010 - ME e consistiu na aplicação nos corpos de prova de uma carga estática de compressão distribuída ao

longo de duas geratrizes opostas. A carga aplicada induziu um estado de compressão na direção vertical e de tração na direção horizontal do corpo de prova provocando a sua ruptura.

O ensaio foi realizado primeiramente acomodando-se os corpos de prova em ambiente com temperatura controlada a 25 °C por 24 horas. Na sequência lubrificou-se o molde de ruptura e com os corpos de prova estabilizados termicamente foram realizados ajustes dos pratos e no LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) da prensa até que obtivesse uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova em posição correta e que não comprometesse o curso do LVDT. Por fim, a aplicação da carga foi realizada progressivamente, com velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se desse a ruptura segundo o plano diametral vertical.

A Figura 30 ilustra o molde usado, o processo de execução do ensaio *RT* e o modelo de ruptura.

Figura 30 – Execução do ensaio *RT*



Fonte: O autor (2021)

A resistência à tração do corpo de prova é calculada pela Equação 16, em função das características geométricas do corpo de prova (altura e diâmetro) e da máxima carga vertical aplicada diametralmente obtida pelo ensaio.

$$RT = \frac{2.F_R}{100.\pi.D_{cp}.H_{cp}} \quad (16)$$

Onde:

RT = Resistência à tração (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (cm);

H = Altura do corpo de prova (cm);

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral não se limitaram em só determinar um valor numérico. Foi interessante também verificar o comportamento de ruptura, fosse ela dúctil ou frágil. Fratura dúctil quase sempre é preferida por duas razões. Primeiramente a fratura frágil ocorre subitamente e catastróficamente, sem qualquer aviso, o que é uma consequência da propagação de trincas espontânea e rápida. Por outro lado, para a fratura dúctil, a presença de deformação plástica dá “aviso” de que a fratura é iminente, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas. Em segundo lugar, a energia necessária para induzir a fratura dúctil, em materiais dúcteis, é geralmente maior. Assim os ensaios conduzidos também registraram os deslocamentos durante a ruptura de cada corpo de prova, para evidenciar o comportamento de ruptura e a energia desprendida no processo.

Finalmente com o gráfico de carga de ruptura versus o deslocamento plotado, realizou-se o cálculo da quantidade de trabalho ou energia por unidade de volume necessário para causar a ruptura que é definida fisicamente como tenacidade. O valor da tenacidade (em MPa) varia em função do tipo de mistura asfáltica e pode ser obtido pela integração da área sob a curva tensão-deformação.

3.4 Análise estatística e teste de hipóteses

A análise estatística nesta pesquisa teve como objetivo validar matematicamente o efeito dos fatores (uso da borracha incorporado ao ligante asfáltico em misturas asfálticas) em comparação a uma mistura convencional (controle), visando identificar padrões de significância que pudessem atestar a diferença ou não das amostras analisadas.

Geralmente, sabe-se quais os fatores são importantes. O que dificulta as análises de um experimento é a presença de efeitos de fatores não controlados, que podem alterar em muito os resultados. Para evitar que isso ocorra, é necessário verificar se os resultados observados foram produzidos pelos fatores ou por uma mera variação aleatória.

Para aceitar um determinado fator como responsável pelas variações nas respostas de um experimento utilizam-se testes de significância. O nível de significância pode ser interpretado como a probabilidade de que seja nulo o efeito de uma dada variável sobre o modelo. Para o t-student a significância permite a obtenção de um parâmetro (valor de p) na qual pode-se aceitar uma hipótese nula (H_0) ou uma hipótese alternativa (H_1), ambas estabelecidas previamente. O teste foi realizado usando-se uma abordagem bicaudal de probabilidades direcionando-se as análises no sentido das diferenças ao invés da validação de um caminho único de hipótese (monocaudal). Em suma, avaliou-se as probabilidades em termos de significância de se obter um rol de dados considerando-se uma das hipóteses como verdadeira.

Na prática, os resultados para estabilidade, fluência, resistência à tração e tenacidade para mistura convencional e modificada foram analisados e comparados a fim de se atestar se a mudança do tipo de ligante (de CAP 50/70 para Ecoflex B 3G) de fato foi o fator responsável por alterações nos valores dos parâmetros citados. Ou, se as alterações nos valores foi fruto do acaso ou até mesmo se as amostras não possuem diferença estatística.

O modelo estatístico utilizado foi enquadrado na categoria de amostragens independentes (não pareados), paramétrico e que cumpriu alguns pressupostos, tais como: homogeneidade de variâncias, ausência de *outliers* significativos e dados com distribuição aproximadamente normal.

O nível de significância (α) adotados em todos os testes foi de 5% (0,05). Para a verificação do pressuposto da distribuição normal foi realizado o teste de *Shapiro-Wilk* (com hipótese nula (H_0) para dados com distribuição normal, $p > 0,05$; e hipótese alternativa (H_1) para dados com distribuição não normal, $p \leq 0,05$). Já a para a verificação da homogeneidade de variâncias foi usado o modelo de *Lavene's Tests* baseado na média (com hipótese nula (H_0) para dados com variâncias homogêneas, $p > 0,05$; e hipótese alternativa (H_1) para dados com variâncias não homogêneas, $p \leq 0,05$).

Verificados todos os pressupostos, o teste de t-student foi realizado e encontrado os valores de p . Por fim, foi verificado para cada ensaio (estabilidade, fluência, *RT* e tenacidade) as validações das hipóteses (nulas ou alternativas) em função do tipo de ligante.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Aqui são apresentados os resultados obtidos durante a execução dos processos metodológicos descritos no capítulo anterior. Inicialmente, são apresentados os resultados da caracterização física dos agregados, da composição granulométrica e da faixa de teor ótima de ligante asfáltico. Posteriormente, são expostos os resultados obtidos dos parâmetros *Marshall*, do teor ótimo de ligante, dos ensaios de resistência à tração e da tenacidade (realizados nas misturas que apresentaram o teor ótimo de projeto). Por fim, discutiu-se os resultados obtidos por uma metodologia quantitativa (com os resultados das análises estatísticas) e qualitativa.

4.1 Caracterização dos agregados

O bom desempenho de um pavimento esbarra nas propriedades do agregado. Assim, a caracterização do agregado é de fundamental importância na mistura asfáltica. Neste item são abordados os resultados dos ensaios realizados para avaliar o formato, as características de aderência ao ligante asfáltico e os valores para densidade e absorção dos agregados usados.

4.1.1 Granulometria dos agregados

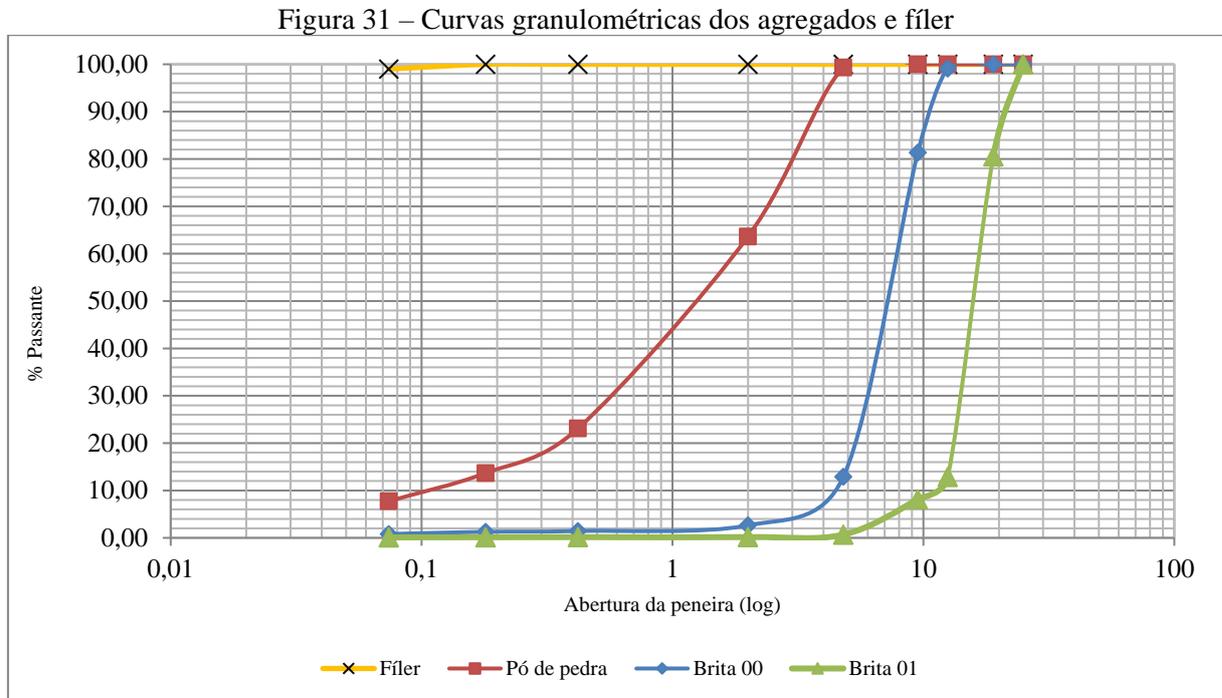
A granulometria é a base para a definição de muitos ensaios realizados no agregado. A distribuição granulométrica de cada agregado mineral vai proporcionar o estudo da melhor composição de uma determinada mistura. A Tabela 5 (versão resumida) e a Figura 31 apresentam as distribuições e as curvas granulométricas dos agregados brita 01, brita 00, pó de pedra e do fíler que foram usados na composição do traço, respectivamente.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos agregados e fíler

Peneiras		Brita 01	Brita 0	Pó-de-pedra	Fíler
(in)	(mm)	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19	80,56	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,5	12,88	99,10	100,00	100,00
3/8"	9,5	8,17	81,36	100,00	100,00
Nº 4	4,8	0,68	12,92	99,31	100,00
Nº 10	2	0,16	2,65	63,65	100,00
Nº 40	0,42	0,15	1,45	23,11	100,00
Nº 80	0,18	0,14	1,28	13,69	100,00
Nº 200	0,074	0,10	0,81	7,74	99,00

Fonte: O autor (2021)

A versão completa da Tabela 5 com as porcentagens retidas e acumuladas; o cálculo do diâmetro característico máximo do agregado (DMCA), coeficiente de uniformidade (C_U) e o coeficiente de curvatura (C_C) para cada tipo de agregado encontram-se no APÊNDICE A.



Fonte: O autor (2021)

A observação do padrão das curvas granulométricas para todos os agregados mostrou distribuições bem graduadas ($1 \leq C_C \leq 3$) com diversidade de frações grossas e finas (sobretudo no pó de pedra) ideal para o tipo de mistura executada nesta pesquisa (CA) por proporcionar um esqueleto mineral com menos vazios. Quanto a uniformidade a brita 01 e 00 mostraram-se uniformes ($C_U < 5$) e o pó de pedra com maior diversificação ($C_U > 15$).

4.1.2 Resultados do índice de forma

Os resultados para o índice de forma foram calculados separando-se os agregados nas faixas granulométricas adequadas ($3/4''$, $1/2''$ e $3/8''$) e em seguida desprezando-se as porcentagens retidas menores que 5%. Logo após, foram calculados a quantidade de grãos aproximada proporcional para cada granulometria (com total de 200 unidades). Por fim, cada unidade foi aferida e partiu-se para o cálculo das médias ponderadas (em função de cada granulometria) e para cada tipo de brita (01 e 00). Os resultados resumidos do ensaio encontram-se na Tabela 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Porcentagens passantes para cálculo do índice de forma

Índice de Forma	Pesagem							
	Granulometria	3/4"	3/4" %	1/2"	1/2" %	3/8"	3/8" %	Total
BRITA 01	1359,68	19,44	4732,44	67,68	329,38	4,71	6992,45	0,11
BRITA 00	0	0	44,90	0,90	885,50	17,74	4992,50	0,09

%PT: Porcentagem de perda de material após pesagem, considerando 7000 g para brita 01 e 5000 g para brita 0; Células em **vermelho** indicam porcentagens desprezadas para o cálculo do índice. As **verdes** indicam as usadas.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 7 – Quantidade de unidades aferidas por granulometria

Granulometria	n° de unidades			TOTAL
	3/4	1/2	3/8	
BRITA 01	45	155	0	200
BRITA 00	0	0	200	200

Fonte: O autor (2021)

Tabela 8 – Valor individual e geral para o índice de forma

Granulometria	Valor do índice de forma			Média ponderada	Média Geral
	3/4	1/2	3/8		
BRITA 01	0,60	0,66	-	0,65	0,61
BRITA 00	-	-	0,57	0,57	

Fonte: O autor (2021)

O valor encontrado para o índice de forma geral foi de 0,61, no entanto, o limite mínimo do índice de forma é de 0,5, o que habilita o agregado aos devidos fins de uso na pavimentação. Contudo, seria mais satisfatório um agregado próximo a $f=1$ o que significaria que nenhuma das dimensões prevaleceria sobre a outra. Agregados com índice de forma próximo a 0,5 são mais lamelares e/ou agudos o que pode implicar em menores resistências sendo mais facilmente quebrados quando sujeitos ao tráfego.

4.1.3 Ensaios de densidade e absorção

A densidade e a absorção são propriedades de extrema importância em misturas asfálticas. Este fato se dá pela necessidade do conhecimento dessas características do agregado para a determinação do teor de projeto. Os valores obtidos referentes a este ensaio estão dispostos na Tabela 9 e 10 e estão divididos em agregados graúdos, miúdos e filer. Ressalta-se que os dados referentes ao filer foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 9 – Resultados para densidade e absorção do agregado graúdo

Densidade e Absorção do agregado graúdo					
Variáveis	Pesagem seca (g)	Pesagem submersa (g)	Pesagem seca com pano (g)	Densidade aparente	Absorção (%)
BRITA 01	7000,2	4100,7	7009,1	2,41	0,13
BRITA 00	5000,6	3014	5008,4	2,52	0,16

Fonte: O autor (2021)

Tabela 10 – Resultados para densidade do agregado miúdo e fíler

Densidade e Absorção do agregado miúdo e fíler		
Variáveis	Leitura do nível (cm ³)	Densidade
Pó de pedra	379	2,79
Fíler	-	2,31

Fonte: O autor (2021)

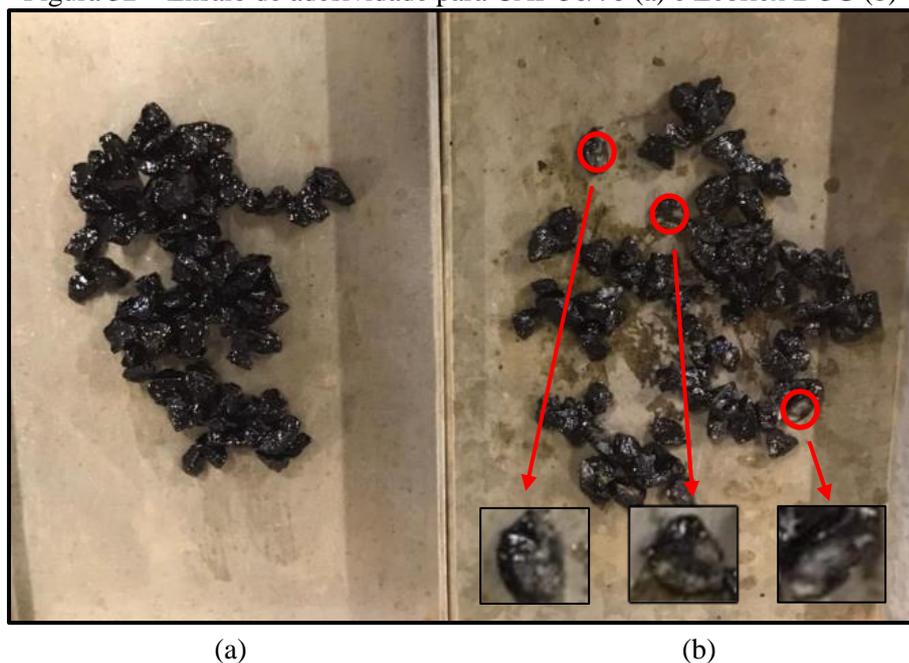
4.1.4 Ensaios de adesividade

Adesividade é um parâmetro qualitativo da aderência existente entre o agregado e o ligante e que depende da tipologia e condição deste agregado (sobretudo sua polaridade química). Devido a variedade de agregados encontrados na natureza passíveis de aplicação na pavimentação se faz necessário avaliar seu desempenho em aplicações práticas, e para isso, executou-se o ensaio de adesividade para os agregados graníticos utilizados nesta pesquisa.

Os agregados graníticos geralmente possuem menor adesividade ao ligante em relação a outros tipos devido as suas características mais ácidas para polaridade. Usa-se frequentemente como medida paliativa o fíler para a correção desta acidez.

Primeiramente, deve-se esclarecer que existem dois tipos de adesividade (ativa e passiva). A ativa ocorre quando o ligante cobre a superfície do agregado, ao passo que a passiva corresponde a resistência ao deslocamento da película de ligante que já se encontra envolvida no agregado. O ensaio de adesividade foi feito usando-se ligante convencional (CAP 50/70) e o modificado (Ecoflex B 3G). Os resultados qualitativos mostraram que o ligante convencional apresentou resultado satisfatório com boa adesividade (ao contrário do que se esperava para a interação com um agregado granítico mais ácido e com teor elevado de sílica), ao passo que o modificado apresentou pior adesividade apresentando alguns pontos isolados com descolamento de ligante (uma hipótese é a necessidade de temperaturas mais altas para mistura do ligante com os agregados) conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Ensaio de adesividade para CAP 50/70 (a) e Ecoflex B 3G (b)



○ Pontos de adesividade parcial

Fonte: O autor (2021)

4.2 Dosagem das misturas asfálticas

O processo de dosagem das misturas asfálticas teve início com a determinação da composição granulométrica das misturas seguida da plotagem da curva granulométrica dentro da faixa de projeto (faixa C do DNIT). Na sequência são apresentados os resultados para a faixa de teor ótimo de ligante e tabela quantitativa de agregados em função de cada teor de ligante da faixa ótima. Por fim, são mostrados os resultados para o *Rice test*, para os parâmetros *Marshall* e a definição do teor ótimo de ligante (tanto para o CAP 50/70 quanto para o Ecoflex B 3G).

4.2.1 Composição granulométrica

O método de composição granulométrica consistiu em simular por meio de testes na ferramenta *solver* do Excel percentagens de brita 01, 00, pó-de-pedra e fíler de tal forma que a curva de projeto ficasse enquadrada dentro das tolerâncias da faixa C do DNIT (ver Tabela 11 e 12). A curva de projeto é determinada então por meio de uma ponderação entre as percentagens simuladas e a granulometria do agregado (% passantes) conforme ilustrado na Figura 33. Ademais, ainda foram calculadas as percentagens retidas da curva de projeto.

Tabela 11 – Composição granulométrica das misturas asfálticas

PENEIRAS	Brita 00		Brita 01		Pó-de-pedra		Filer		FAIXA C	
	%	30,00	%	15,69		52,62	%	1,69	X mín	X máx
2"	100,00	30,0	100,00	15,69	100,00	52,6				
1"	100,00	30,0	100,00	15,69	100,00	52,6				
3/4"	100,00	30,0	80,56	15,69	100,00	52,6	100,00	1,69	100	100
1/2"	99,10	30,0	12,88	15,69	100,00	52,6	100,00	1,69	80	100
3/8"	81,36	30,0	8,17	15,69	100,00	52,6	100,00	1,69	70	90
Nº 4	12,92	30,0	0,68	15,69	99,31	52,6	100,00	1,69	44	72
Nº 10	2,65	30,0	0,16	15,69	63,65	52,6	100,00	1,69	22	50
Nº 40	1,45	30,0	0,15	15,69	23,11	52,6	100,00	1,69	8	26
Nº 80	1,28	30,0	0,14	15,69	13,69	52,6	100,00	1,69	4	16
Nº 200	0,81	30,0	0,10	15,69	7,74	52,6	99,00	1,69	2	10

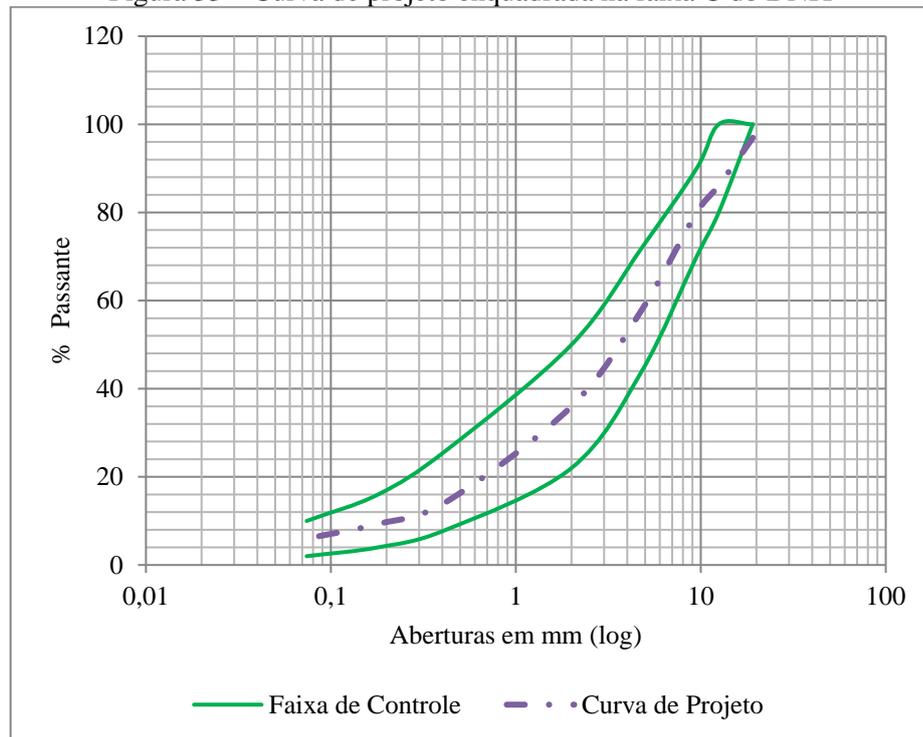
Fonte: O autor (2021)

Tabela 12 – Determinação da curva de projeto e das porcentagens retidas

Tipo de agregado →		Granítico	Faixa de Controle (com tolerâncias)		
PENEIRAS	Abertura (mm)	% Retida	% Passante		
			Pmín	Curva de Projeto	Pmáx
1"	25,4			100	
3/4"	19,1	3,1	93	96,95	100
1/2"	12,5	10,9	73	86,06	100
3/8"	9,5	6,1	63	80,00	97
Nº 4	4,8	22,1	39	57,93	77
Nº 10	2	21,9	17	36,00	55
Nº 40	0,42	21,7	3	14,30	31
Nº 80	0,18	5,0	1	9,30	19
Nº 200	0,074	3,3	0	6,00	12
Filer		6,0			
TOTAL		100,0			

Fonte: O autor (2021)

Figura 33 – Curva de projeto enquadrada na faixa C do DNIT



Vale ressaltar que as misturas convencionais e modificadas foram confeccionadas com a mesma composição granulométrica e a massa específica de cada ligante referente para cada mistura é de **1,029 g/cm³** para o ligante modificado por borracha (Ecoflex B 3G) e de **1,010g/cm³** para o convencional (CAP 50/70).

4.2.2 Resultados para a faixa de teor ótimo de ligante

Com as porcentagens retidas da curva de projeto obtidas, realizou-se os cálculos para a faixa de teor ótimo de ligante. Primeiramente, obteve-se a superfície específica (S) e em seguida o teor provável de CAP em relação a massa de agregado (T_{ca}). Logo após, com a densidade média ponderada dos agregados calculada (ver Tabela 13) corrigiu-se o (T_{ca}) obtendo-se o teor provável de CAP em relação a massa de agregado corrigido (T_{ca}'). Enfim, com o (T_{ca}') calculado definiu-se a porcentagem de asfalto em relação à mistura (P_{ca}).

O (P_{ca}) é o parâmetro central da faixa de teor ótimo de ligante. Com seu valor conhecido determinou-se uma faixa com 5 teores de ligante, a saber: P_{ca} , $P_{ca} \pm 0,5\%$ e $P_{ca} \pm 1,0\%$. Estes teores foram utilizados tanto para as misturas convencionais quanto para as modificadas. Os resultados do processo de definição da faixa ótima para cada parâmetro são mostrados na Tabela 14.

Tabela 13 – Densidade individual e densidade média ponderada dos agregados

Quantidade na mistura (%)	Agregados	Densidade
15,69	Brita 01	2,41
30,00	Brita 00	2,52
52,62	Pó-de-pedra	2,79
1,69	Fíler	2,31
Densidade média ponderada dos Agregados		2,65

Fonte: O autor (2021)

Tabela 14 – Resultados dos parâmetros para definição da faixa ótima de teor de ligante

S (m ² /kg)	T_{ca} (%)	$T_{ca'}$ (%)	P_{ca} (%)
10,21	5,97	5,74	5,43

Fonte: O autor (2021)

Para melhoria em termos práticos, o resultado do (P_{ca}) de 5,43% foi arredondado para 5,5%. Com isso, os teores para a faixa ótima de teor de projeto ficaram, a saber: 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%. Com os teores da faixa ótima conhecidos, tornou-se possível o cálculo da tabela quantitativa de materiais (agregados e ligantes) em função de cada teor da faixa ótima.

4.2.3 Tabela quantitativa da dosagem *Marshall* em massa

A tabela quantitativa em massa da dosagem *Marshall* foi calculada tendo como parâmetros o peso teórico do cada corpo de prova (1200 gramas) e as porcentagens retidas na tabela de composição granulométrica (ver Tabela 16). Em posse destes dados e sabendo-se os teores de ligante da faixa ótima (para CAP 50/70 e Ecoflex B 3G) obteve-se a tabela quantitativa para preparação das misturas asfálticas para compactação (ver Tabela 15).

Com os dados em massa para cada granulometria (peneiras) das misturas, tornou-se possível a elaboração de uma tabela quantitativa dos agregados em porcentagem de cada peneira em função do total de massa dos agregados conforme apresentado na Tabela 20. Os dados de porcentagem obtidos foram necessários para o cálculo da densidade máxima teórica da mistura (*DMT*) obtida pela ponderação das densidades (dos agregados e do ligante específico da mistura) e porcentagens dos agregados (ver Tabela 16). O processo foi feito para as misturas convencionais e modificadas.

Tabela 15 – Quantidade em massa para dosagem das misturas convencionais e modificadas

PENEIRAS	Teor 4,5%	Teor 5,0%	Teor 5,5%	Teor 6,0%	Teor 6,5%
	Massa (g)				
CAP	54,0	60,0	66,0	72,0	78,0
3/4"	35,0	34,8	34,6	34,4	34,2
1/2"	124,8	124,1	123,5	122,8	122,2
3/8"	69,5	69,1	68,7	68,4	68,0
Nº4	252,9	251,6	250,3	249,0	247,6
Nº10	251,3	250,0	248,7	247,4	246,0
Nº40	248,6	247,3	246,0	244,7	243,4
Nº80	57,4	57,1	56,8	56,5	56,2
Nº200	37,8	37,6	37,4	37,2	37,0
Filer	68,8	68,4	68,0	67,7	67,3
SOMA (g)	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0	1122,0
Massa total do CP	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0
Porcentagem de agregado em 1 CP	95,5%	95,0%	94,5%	94,0%	93,5%
Porcentagem de CAP em 1 CP	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%

Fonte: O autor (2021)

Tabela 16 – Quantitativo dos agregados (%) para misturas convencionais e modificadas

PENEIRAS	Correção da % de Agregado				
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
CAP	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
3/4"	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
1/2"	10,4%	10,3%	10,3%	10,2%	10,2%
3/8"	5,8%	5,8%	5,7%	5,7%	5,7%
Nº4	21,1%	21,0%	20,9%	20,7%	20,6%
Nº10	20,9%	20,8%	20,7%	20,6%	20,5%
Nº40	20,7%	20,6%	20,5%	20,4%	20,3%
Nº80	4,8%	4,8%	4,7%	4,7%	4,7%
Nº200	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%
Filer	5,7%	5,7%	5,7%	5,6%	5,6%

Fonte: O autor (2021)

Para uma melhor organização, foi feita também uma tabela quantitativa das porcentagens dos agregados juntando-se as peneiras em função do tipo de agregado (gráudo, miúdo e fíler). Vale ressaltar que as porcentagens para misturas convencionais e modificadas são as mesmas diferenciando-se somente no cálculo da *DMT* que leva em consideração a massa específica do ligante usado na mistura (1,010 g/cm³ para o CAP 50/70 e 1,029 g/cm³ para o Ecoflex B 3G) e as porcentagens de cada tipo de agregado na mistura. Os resultados encontram-se na Tabela 17 e 18.

Tabela 17 – Densidade máxima teórica (*DMT*) para misturas com CAP 50/70

Teor de CAP 50/70	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Agregados Graúdos	40,2%	40,0%	39,8%	39,5%	39,3%
Agregados Miúdos	49,6%	49,3%	49,1%	48,8%	48,6%
Fíler	5,7%	5,7%	5,7%	5,6%	5,6%
<i>DMT</i>	2,46	2,44	2,42	2,41	2,39

Fonte: O autor (2021)

Tabela 18 – Densidade máxima teórica (*DMT*) para misturas com Ecoflex B 3G

Teor de Ecoflex B 3G	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
Agregados Graúdos	40,2%	40,0%	39,8%	39,5%	39,3%
Agregados Miúdos	49,6%	49,3%	49,1%	48,8%	48,6%
Fíler	5,7%	5,7%	5,7%	5,6%	5,6%
<i>DMT</i>	2,47	2,45	2,43	2,42	2,40

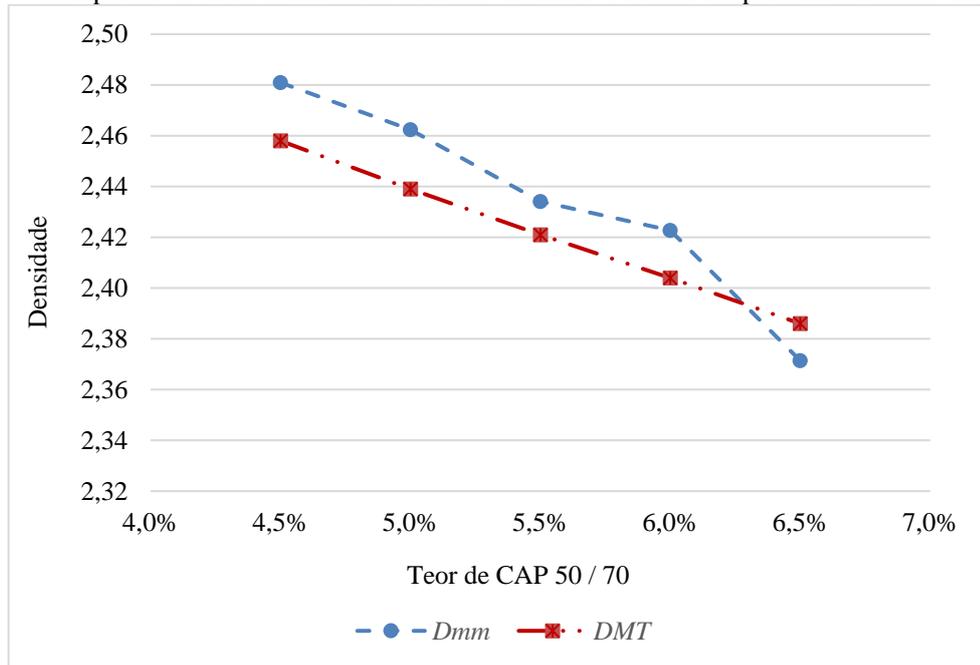
Fonte: O autor (2021)

4.2.4 Densidade máxima medida obtida pelo *rice test* (D_{mm})

Encontrados os valores de *DMT*, foi realizado o ensaio *Rice Test* para obtenção dos valores de densidade máxima medida (D_{mm}) nas misturas. O objetivo principal foi atestar se as faixas de densidades teóricas e medidas eram semelhantes estatisticamente.

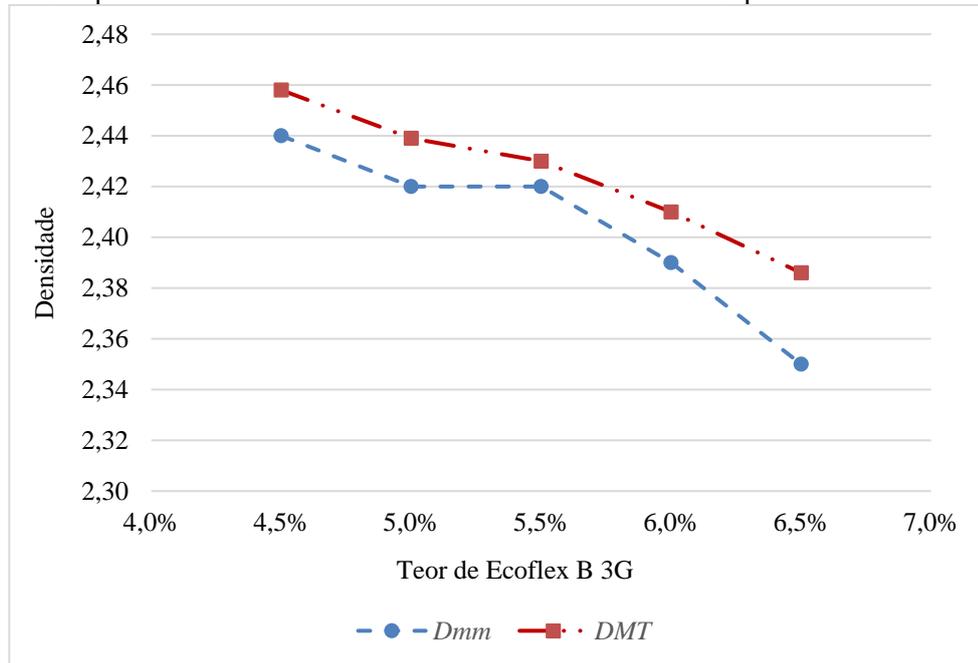
Os ensaios e análises foram executadas tanto nas misturas com CAP 50/70 quanto nas com Ecoflex B 3G. Os resultados das densidades obtidas pelo *Rice Test* (D_{mm}) foram plotados junto com os de *DMT* para fins de comparação (ver Figura 34 e 35). Para misturas convencionais o valor de D_{mm} mostrou-se, em média, superior ocorrendo o inverso para misturas modificadas. Uma hipótese a se considerar é a maior presença de vazios oriundas da mistura com Ecoflex B 3G, ocasionando uma faixa menos densa do que a teórica (*DMT*). Por fim, aplicou-se o modelo de t-student que indicou semelhança estatística entre os valores obtidos via *Rice Test* e via *DMT* nas misturas (ver itens 4.4.1 e 4.4.2).

Figura 34 – Comparativo entre densidades obtidas via *DMT* e *Rice Test* para misturas convencionais



Fonte: O autor (2021)

Figura 35 – Comparativo entre densidades obtidas via *DMT* e *Rice Test* para misturas modificadas



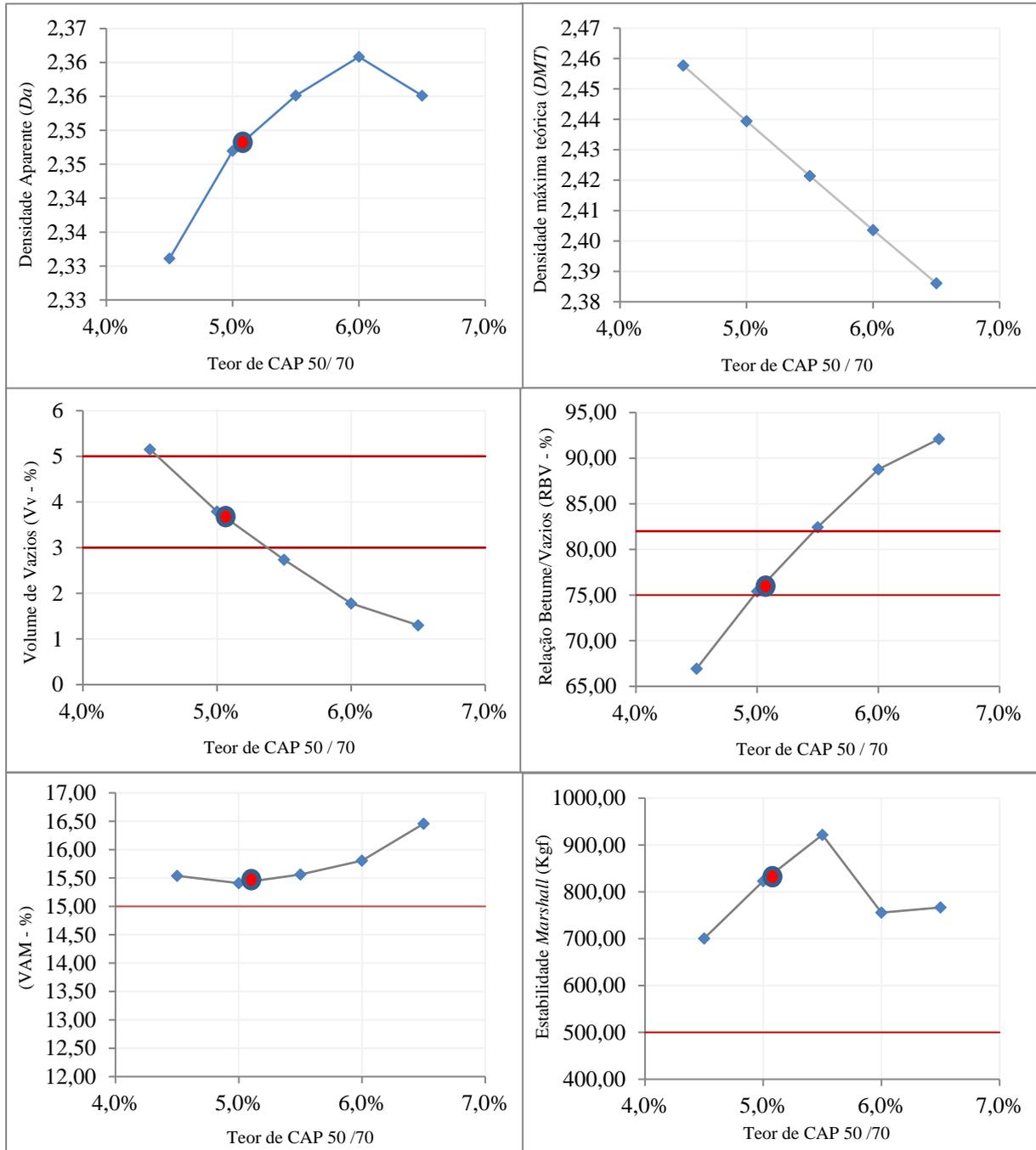
Fonte: O autor (2021)

4.2.5 Resultados e análises dos parâmetros *Marshall* para misturas convencionais

Os parâmetros *Marshall* para misturas convencionais foram plotados em gráficos em função do teor de CAP 50/70. Foi indicado também o teor ótimo de 5,06% da mistura analisada (em círculo vermelho), além das faixas normativas (em linhas vermelhas) para o

V_v , VAM , RBV e estabilidade. Os resultados finais calculados ilustrados na Figura 36. Os dados calculados em sua totalidade referentes as pesagens, aferições, parâmetros, etc. para cada uma das três amostras para cada teor encontram-se no APÊNDICE B.

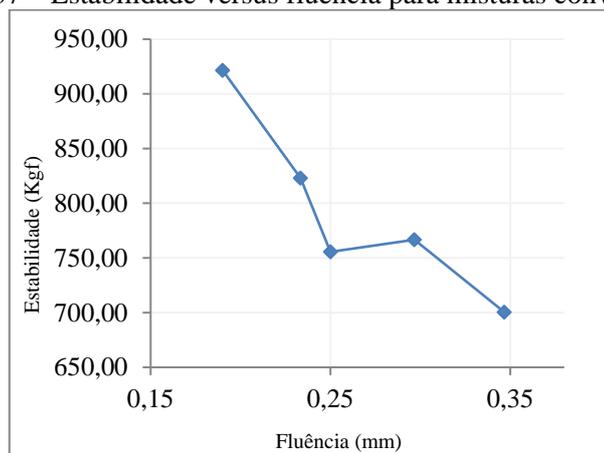
Figura 36 – Gráficos dos parâmetros *Marshall* para misturas convencionais



Fonte: O autor (2021)

Ademais, ainda foi plotado o gráfico da estabilidade em conjunto com a fluência, conforme apresentada na Figura 37.

Figura 37 – Estabilidade versus fluência para misturas convencionais



Fonte: O autor (2021)

Os resultados para misturas convencionais mostraram um aumento da densidade aparente com aumento do teor de ligante com um pico próximo dos 6,0% (resultados por si só ainda insuficiente para se atestar alguma mudança nas características mecânicas).

O volume de vazios das misturas tende a diminuir significativamente com o aumento do teor de CAP 50/70. Geralmente, as misturas com elevados índices de vazios apresentam menores resistências ao aparecimento de trincas por fadiga. Por isso em termos normativos para uso em camadas de rolamento o seu valor não deve ser inferior a 3%, para a evitar a exsudação, nem superior a 5%, afim de se evitar problemas relativos à deformação permanente em trilha de roda (BERTOLLO, 2002). O volume de vazios apresentou valores decrescentes com o aumento do teor de CAP 50/70 com permanência dentro da faixa normativa entre 4,6% e 5,3%. Ademais, para o teor ótimo calculado o volume de vazios apresentou valor de aproximadamente 3,8%.

Os valores para *DMT* foram obtidos de forma teórica com o valor de aproximadamente 2,44 para o teor ótimo. Para o *RBV* o teor ótimo ficou próximo do limite mínimo (de 75%) com valor de 76%, ficando assim dentro da faixa normativa. Valores baixos de *RBV* devem ser evitados pois comprometem a durabilidade da mistura asfáltica.

Para *VAM* valores muito baixos devem ser evitados (limite mínimo de 15%), dependendo do tamanho nominal máximo do agregado (19 mm para a presente pesquisa). A mistura mostrou-se satisfatória com valor para o teor ótimo de 15,4%.

Por fim, os resultados para estabilidade e fluência *Marshall* tiveram comportamentos distintos. A estabilidade apresentou dispersão dos dados e aumentou até aproximadamente 5,5% decrescendo a partir de então. A fluência, por sua vez, apresentou comportamento contrário com uma linha de tendência parabólica positivamente com valor mínimo próximo

dos 5,5%. Os valores para o teor ótimo foram de 820 Kgf e 0,24 mm para estabilidade e fluência, respectivamente. Quando analisadas de forma conjunta, a fluência tende a aumentar com a queda da estabilidade. Em suma, os resultados para os parâmetros analisados mostraram-se satisfatórios com o teor ótimo de ligante atendendo todas as faixas normativas.

Specht (2004), explica que o estado de tensões obtido pelo ensaio *Marshall* é uma das maiores críticas ao método, assim, é mais comum se considerar a relação entre os valores da estabilidade e da fluência, definido como quociente *Marshall*.

O quociente *Marshall* (*MQ*) é definido como a razão entre a estabilidade e a fluência expresso em Kgf/mm, conforme a Equação 17. Vale frisar, que foram usados as médias de todos os teores para estabilidade e fluência no cálculo do quociente.

$$MQ = \frac{E}{F} \quad (17)$$

Onde:

MQ = Quociente *Marshall* (Kgf/mm);

E = Estabilidade (Kgf);

F = Fluência (mm).

O resultado para as médias de estabilidade e fluência, assim como do *MQ* das misturas convencionais encontram-se na Tabela 19. Posteriormente, o valor do quociente das misturas convencionais e modificadas serão comparados. Na prática, um valor maior do *MQ* representa uma tendência/indicativo de melhor comportamento frente às deformações permanentes.

Tabela 19 – Cálculo do quociente *Marshall* para misturas convencionais

Média Estabilidade (Kgf)	Média Fluência (mm)	<i>MQ</i> (Kgf/mm)
793,5	0,26	3051,9

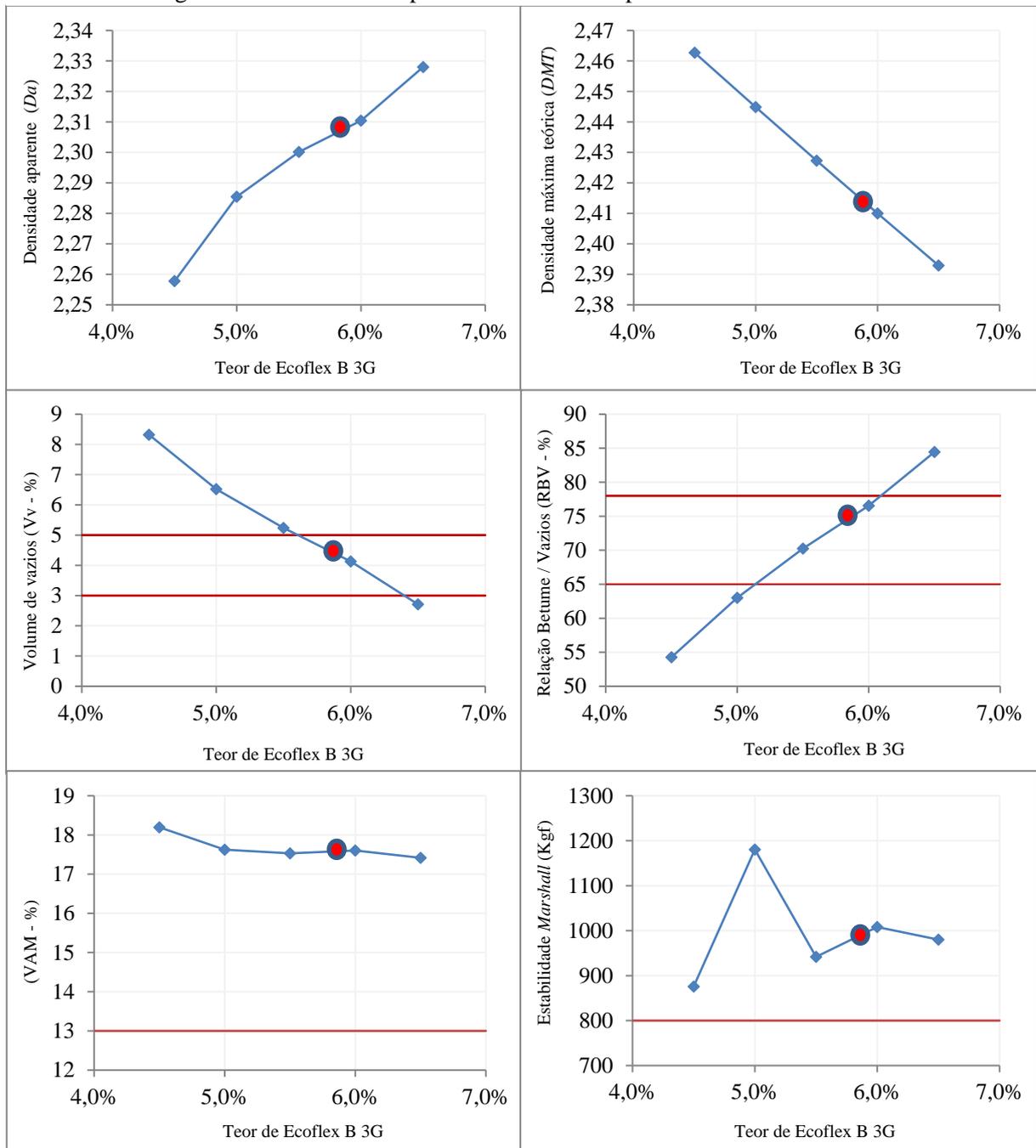
Fonte: O autor (2021)

4.2.6 Resultados e análises dos parâmetros *Marshall* para misturas modificadas

Os parâmetros *Marshall* para misturas modificadas foram plotados em gráficos com linhas de tendência em função do teor de Ecoflex B 3G. De maneira análoga aos convencionais indicou-se o teor ótimo de 5,81% da mistura (em círculo vermelho), além das faixas normativas (em linhas vermelhas) para o *Vv*, *VAM*, *RBV* e estabilidade. Os resultados

encontram-se na Figura 38. Os dados calculados em sua totalidade referentes as pesagens, aferições, parâmetros, etc. encontram-se no APÊNDICE C.

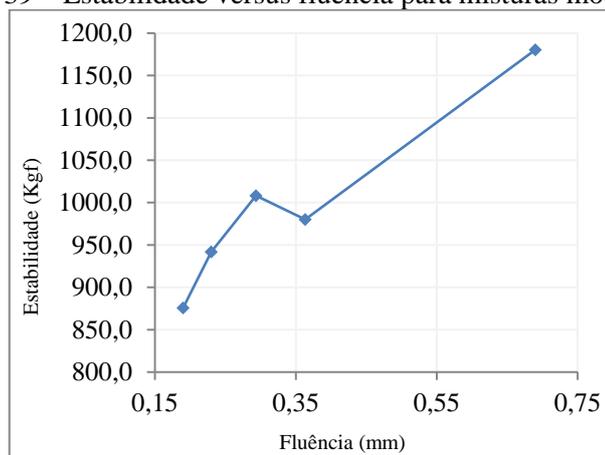
Figura 38 – Gráficos dos parâmetros *Marshall* para misturas modificadas



Fonte: O autor (2021)

De forma análoga às misturas convencionais, ainda foi plotado o gráfico da estabilidade em conjunto com a fluência, conforme apresentada na Figura 39.

Figura 39 – Estabilidade versus fluência para misturas modificadas



Fonte: O autor (2021)

Os resultados para misturas modificadas mostraram um aumento da densidade aparente com aumento do teor de ligante e em uma faixa menor em comparação as misturas convencionais. Isso era um comportamento esperado, já que a borracha se expande dentro da mistura asfáltica quando submetida a temperaturas mais altas. Contudo, ao contrário do que se esperava, a taxa de decréscimo da densidade com o aumento do teor mostrou-se menor, ou seja, não se formou um ápice no valor de densidade com posterior queda.

O volume de vazios apresentou valores decrescentes com o aumento do teor de Ecoflex B 3G com permanência dentro da faixa normativa entre 5,6% e 6,4%. Ademais, o teor ótimo cálculo apresentou volume de vazios de aproximadamente 4,4%.

Os valores para *DMT* foram obtidos de forma teórica com o valor de aproximadamente 2,41 para o teor ótimo. Para o *RBV* o teor ótimo ficou próximo do limite máximo (de 78%) com valor de 75%, ficando assim dentro da faixa normativa.

Para *VAM* os valores ficaram oscilando em uma faixa média entre 17 e 18% bem acima do limite mínimo de 13% para misturas que façam uso de borracha, com tamanho nominal máximo do agregado de 19 mm. A mistura mostrou-se satisfatória com valor de *VAM* para o teor ótimo de 17,6%.

Por fim, os resultados para estabilidade e fluência *Marshall* tiveram comportamentos semelhantes. A estabilidade apresentou dispersão dos dados e aumentou até aproximadamente 5,0% decrescendo a partir de então. A fluência, por sua vez, teve comportamento semelhantes às estabilidades aumentando juntamente com a mesma quando analisadas em conjunto. Já era esperado que os dados de fluência para as misturas com borracha fossem maiores que os convencionais. Isso deve-se, sobretudo, a um comportamento mais

viscoelástico característico da mistura com borracha, além do maior consumo de ligante em dosagens para AMB.

Quanto ao quociente *Marshall* os resultados para as médias de estabilidade e fluência, assim como do quociente para misturas modificadas encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 – Cálculo do quociente *Marshall* para misturas modificadas

Média Estabilidade (Kgf)	Média Fluência (mm)	MQ (Kgf/mm)
997,3	0,35	2849,4

Fonte: O autor (2021)

Os resultados para o quociente *Marshall* encontrados foi de **3051,9** kgf/mm para misturas convencionais e de **2849,4** kgf/mm para modificadas. Porém, retirando-se do cálculo da média de fluência o *outlier* de 0,69 mm, o valor do *MQ* para as modificadas sobe para **3693,7** Kgf/mm (com média de fluência caindo para 0,27 mm). Diante destas variações, os resultados para *MQ* tornam-se poucos conclusivos. Com isso, melhores investigações laboratoriais (ensaios de resiliência, fadiga, *flow number*, etc.) são necessárias.

No geral, o *MQ* funciona mais como um indicador (sem se fazer, portanto, conclusões mais aprofundadas) de um melhor comportamento da mistura frente às deformações permanentes. Em suma, os parâmetros *Marshall* mostram que é necessário um “equilíbrio”, ou seja, um teor ideal em que se tenha ganhos em comparação às misturas convencionais e que potenciais ônus de um excesso de teor de Ecoflex B 3G sejam atenuados.

4.2.7 Teor ótimo de ligante para misturas convencionais e modificadas

Quanto ao teor ótimo para misturas convencionais, o mesmo foi calculado pela média de 4 pontos obtidos a partir do cruzamento de cada curva com sua respectiva faixa de valores normativos (máximos e mínimos) para *Vv* e *RBV* conforme a Tabela 21 e a Figura 40. Já para as misturas modificadas seguiu-se o mesmo procedimento e os resultados encontram-se na Tabela 22 e na Figura 41.

Tabela 21 – Cálculo do teor ótimo de CAP 50/70

<i>Vv</i> mínimo (%)	<i>Vv</i> máximo (%)	<i>RBV</i> mínimo (%)	<i>RBV</i> máximo (%)	Teor ótimo (%)
5,32	4,54	4,94	5,44	5,06

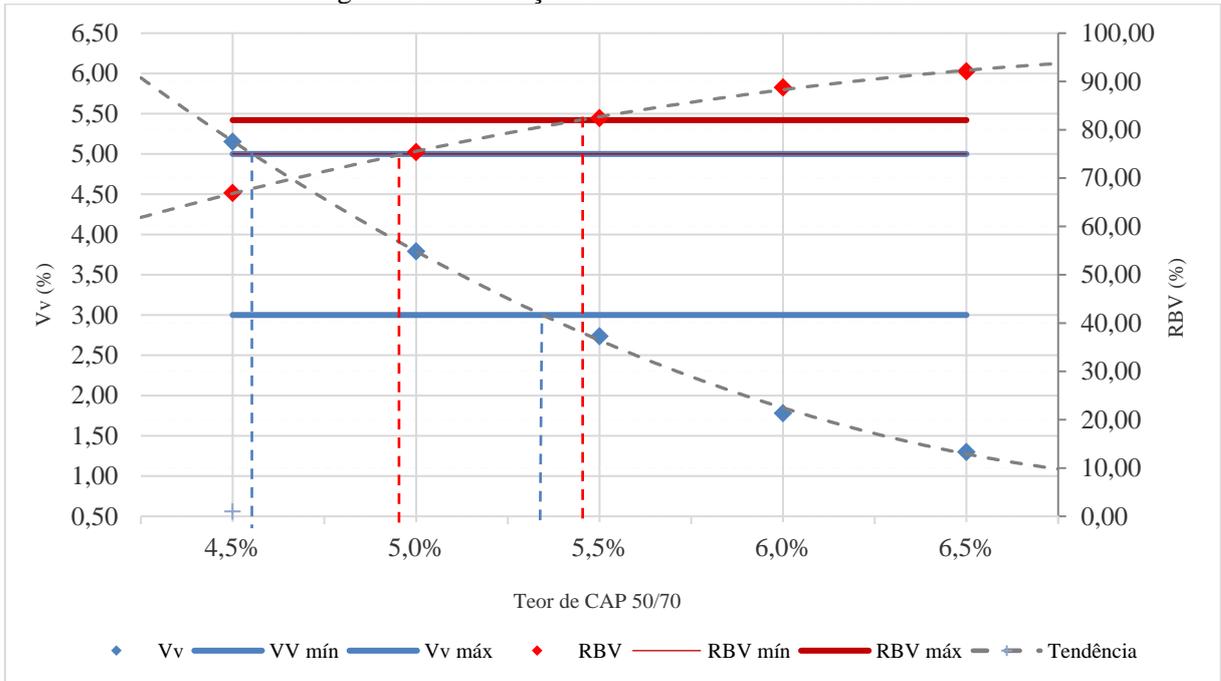
Fonte: O autor (2021)

Tabela 22 – Cálculo do teor ótimo de Ecoflex B 3G

Vv mínimo (%)	Vv máximo (%)	RBV mínimo (%)	RBV máximo (%)	Teor ótimo (%)
6,40	5,59	5,15	6,07	5,80

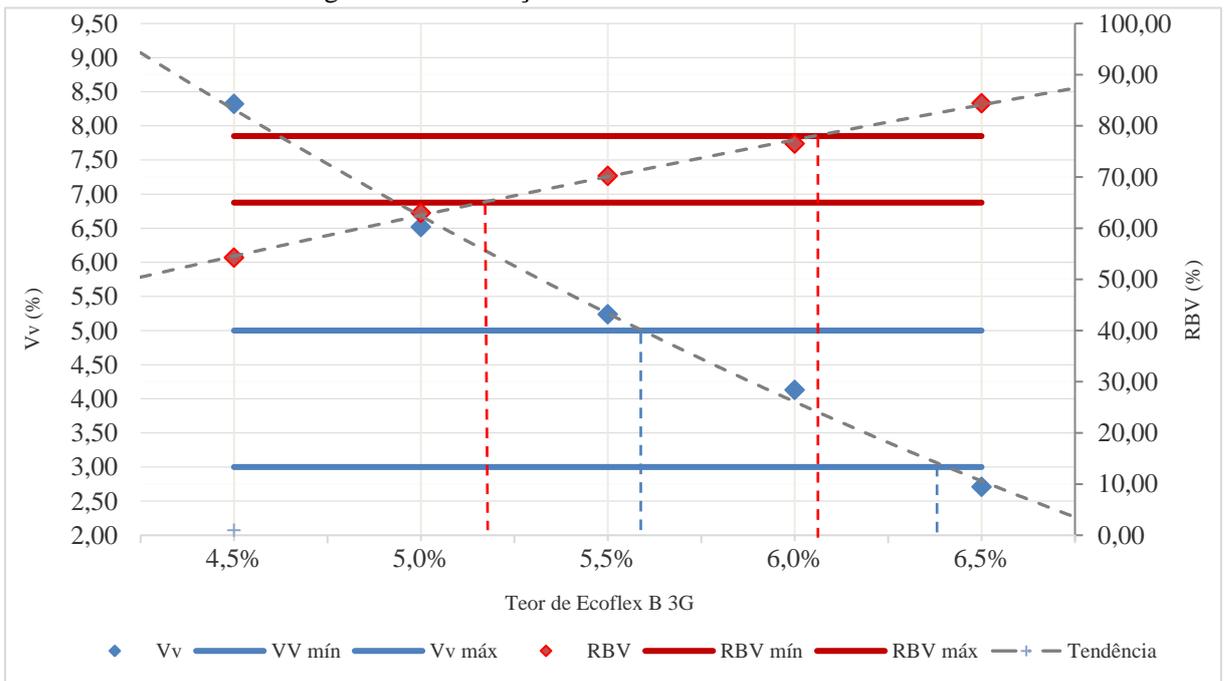
Fonte: O autor (2021)

Figura 40 – Definição do teor ótimo de CAP 50/70



Fonte: O autor (2021)

Figura 41 – Definição do teor ótimo de Ecoflex B 3G



Fonte: O autor (2021)

Com os teores ótimos calculados, tornou-se possível a moldagem de 12 novos corpos de prova (6 para cada tipo de mistura) para a realização dos ensaios para estabilidade, fluência e *RT* com corpos moldados nos teores de projeto. Como os teores foram distintos em relação aos da faixa ótima, foram calculadas novas composições granulométricas para o teor ótimo de 5,06% para CAP 50/70 e 5,80% para Ecoflex B 3G (ver Tabela 23).

Tabela 19 – Composição granulométrica para teor ótimo das misturas

Tipo da mistura	Convencional		Modificada	
PENEIRAS	Teor ótimo	5,06%	Teor ótimo	5,80%
	Massa retida (g)		Massa retida (g)	
Ligante	60,7		69,6	
3/4"	34,7		34,5	
1/2"	124,1		123,1	
3/8"	69,1		68,5	
Nº4	251,5		249,5	
Nº10	249,8		247,9	
Nº40	247,2		245,2	
Nº80	57,1		56,6	
Nº200	37,5		37,2	
Filer	68,4		67,8	
Soma (g)	1139,3		1130,4	
Massa total do CP	1200,0		1200,0	
Porcentagem de agregado em 1 CP	94,94%		94,20%	
Porcentagem de CAP em 1 CP	5,06%		5,80%	

Fonte: O autor (2021)

4.2.8 Estabilidade e fluência *Marshall* para teor ótimo de ligante

Os resultados para estabilidade e fluência realizados em corpos de prova com teores de projeto para as misturas convencionais são apresentados abaixo na Tabela 24.

Tabela 24 – Estabilidade e fluência *Marshall* para teor ótimo das misturas convencionais

Amostras	5,06% (1)	5,06% (2)	5,06% (3)	Média
Estabilidade (Kgf)	896	827	791	838
Fluência (mm)	0,24	0,20	0,39	0,28

Fonte: O autor (2021)

Já para as misturas com borracha realizou-se o mesmo procedimento e os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Estabilidade e fluência *Marshall* para teor ótimo das misturas modificadas

Amostras	5,80% (1)	5,80% (2)	5,80% (3)	Média
Estabilidade (Kgf)	1124	954	1001	1026
Fluência (mm)	0,34	0,41	0,47	0,41

Fonte: O autor (2021)

4.3 Resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (*RT*)

Foram moldados 6 corpos de prova para a realização do ensaio, sendo 3 para misturas com o ligante CAP 50/70 e 3 com o ligante Ecoflex B 3G. Depois de compactados e desmoldados, os mesmos tiveram aferidas suas dimensões (altura e diâmetro) tomando-se como valor final a média de 4 pontos medidos para cada dimensão. Os resultados de *RT* para misturas não modificadas encontram-se na Tabela 26 e para as modificadas na Tabela 27. Por fim, as médias comparadas estão dispostas na Tabela 28.

Tabela 20 – Resultados para *RT* em misturas não modificadas

Amostras	5,06% (1)	5,06% (2)	5,06% (3)
Média do diâmetro (cm)	10,19	10,22	10,17
Média da altura (cm)	6,42	6,22	6,37
Carga de ruptura (Kgf)	818	775	703
Carga de ruptura (N)	8025	7603	6896
Resistência a tração (MPa)	0,78	0,76	0,68

Fonte: O autor (2021)

Tabela 27 – Resultados para *RT* em misturas modificadas

Amostras	5,80% (1)	5,80% (2)	5,80% (3)
Média do Diâmetro (cm)	10,14	10,16	10,16
Média da Altura (cm)	6,44	6,49	6,54
Carga de Ruptura (Kgf)	819	856	732
Carga de Ruptura (N)	8034	8397	7181
Resistência a tração (MPa)	0,78	0,81	0,69

Fonte: O autor (2021)

Tabela 28 – Médias do ensaio *RT*

Tipo de mistura	Não modificada	Modificada
Resistência a tração (MPa)	0,74	0,76

Fonte: O autor (2021)

Os resultados mostraram valores próximos de RT para os dois tipos de mistura, com ambas acima do limite mínimo normativo (0,65 MPa conforme DNIT 031/2006-ES para misturas não modificadas e 0,75 MPa conforme DNIT 112/2009-ES para misturas modificadas).

Os valores de RT quase sempre sofrem influências de fatores externos aos ensaios que devem ser devidamente controlados pelo operador, tais como a temperatura (25 °C para o ensaio). Outro fator relevante a se observar é o tempo de moldagem dos CP's, haja vista que o RT aumenta com o envelhecimento da mistura (o que nem sempre representa uma vantagem, pois também perde sua flexibilidade, ou seja, aumenta seu módulo de resiliência).

As misturas modificadas apresentaram uma faixa de valores esperada, por se tratar de uma mistura geralmente mais flexível e também recém moldada. Por fim, analisou-se não só os valores de RT , como também foram registrados os deslocamentos durante a ruptura de cada corpo de prova, para evidenciar o comportamento de ruptura das amostras e a energia despendida durante o processo de ruptura, parâmetro definido como tenacidade.

4.3.1 Resultado para a tenacidade das misturas

As tenacidades (W_x) para as misturas foram calculadas a partir da integração da curva de tensão versus deformação (RT versus fluência) com auxílio da ferramenta *Excel*. Os valores mediram a quantidade de energia (trabalho) necessário para se causar a ruptura do corpo de prova. Os resultados para ambas as misturas são apresentados nas Figuras 42 e 43.

Calculadas os resultados para cada amostra, foram feitas as médias para tenacidade para cada tipo de mistura. Os resultados estão apresentados na Tabela 29.

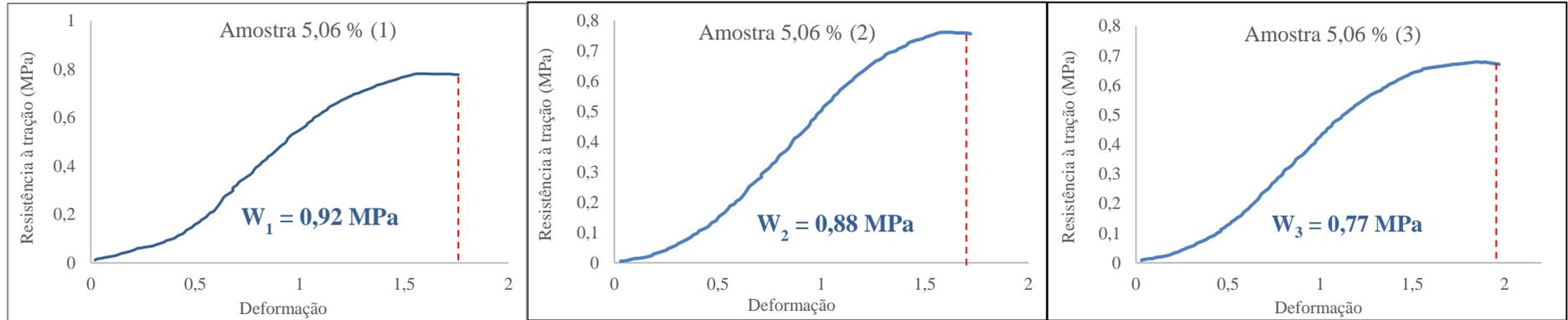
Tabela 29 – Média para tenacidade das misturas

Tipo de mistura	Não modificada	Modificada
Tenacidade média (MPa)	0,86	0,96

Fonte: O autor (2021)

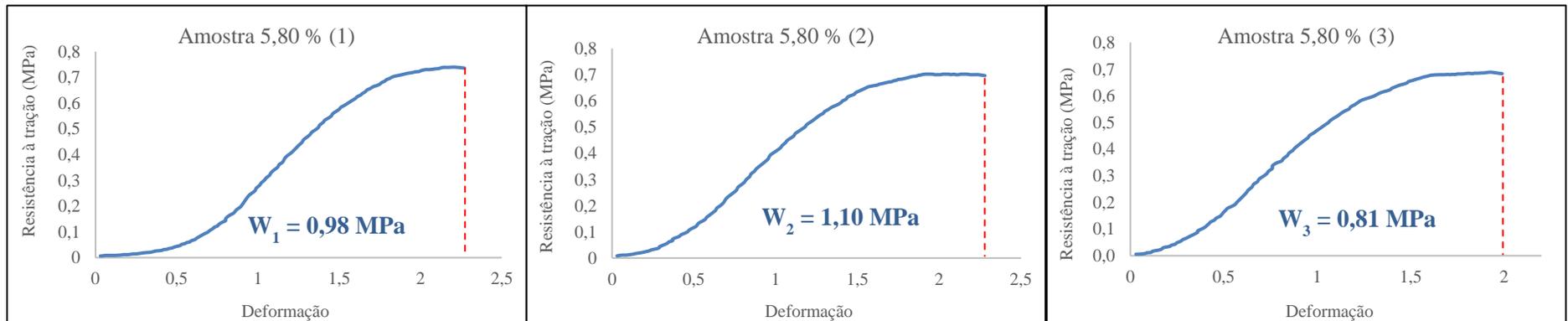
Ao se analisar os gráficos e os valores para tenacidade percebe-se que a média dos valores para misturas modificadas por borracha são maiores que os dos sem borracha. Isso já era esperado, haja vista que conforme apontou Bernucci *et al.* (2010) o aumento de teor de polímeros em uma mistura asfáltica quase sempre implica no aumento do valor da tenacidade.

Figura 42 – Resultados para tenacidade para misturas convencionais



Fonte: O autor (2021)

Figura 43 – Resultados para tenacidade para misturas modificadas



Fonte: O autor (2021)

4.4 Resultados para a análise estatística e teste de hipóteses

Por meio de modelos estatísticos (paramétricos e não paramétricos) foram feitas as análises de significância para as densidades (obtidas via *DMT* e *Rice test*), a estabilidade geral, estabilidade nos teores de projeto, fluência geral, fluência nos teores de projeto, resistência à tração por compressão diametral (*RT*) e tenacidade. Para as densidades, as significâncias foram calculadas comparando-se as faixas obtidas na etapa de dosagem via *DMT* e via *Rice test* com o objetivo de se atestar semelhança estatística entre ambas. Já para os parâmetros restantes, as significâncias foram calculadas comparando-se as misturas com CAP 50/70 e as misturas com Ecoflex B 3G.

Primeiramente, analisou-se os pressupostos para a realização do teste paramétrico de t-student (observações independentes, homogeneidade de variâncias, distribuição aproximadamente normal e ausência de *outliers*). Quando atendidos, foram calculados os valores de *p* e dos graus de liberdade. Quando não atendidos, realizou-se a versão não paramétrica do student (conhecido como teste de Mann-Whitney) na qual o único pressuposto são as observações independentes. Para o teste não paramétrico, as hipóteses são em função da mediana e não da média. Ademais, usa-se os mesmos padrões de significância. Por fim, utilizou-se ainda *boxplots* (diagramas de caixa) para se ilustrar as variações, quartis (—), *outliers* (°) e médias (*x*) para cada parâmetro analisado.

4.4.1 Resultados para densidade (CAP 50/70)

Para a análise das densidades (obtidas na etapa de dosagem), foram comparados os valores obtidos via *DMT* e via *Rice test* para misturas com CAP 50/70 fazendo-se uso do modelo estatístico paramétrico de t-student. Os resultados estão apresentados na Tabela 30 e o *boxplot* correspondente na Figura 44.

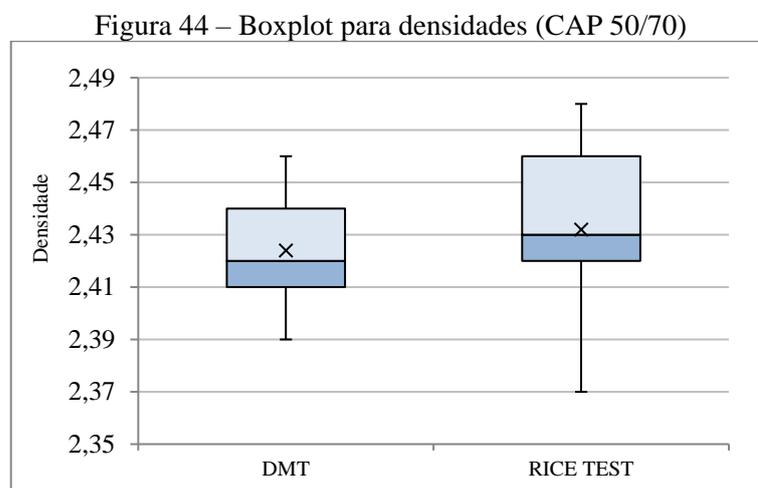
Tabela 30 – T-sudent para densidades das misturas (CAP 50/70)

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Densidades CAP 50/70	2,31	8	0,72977	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que não há diferenças significativas nas densidades obtidas via *DMT* e via *Rice test* para misturas com CAP 50/70 ($t_{(8)} = 0,35$; $p >$

0,05). Com isso, ambas se assemelham estatisticamente. A média para as densidades obtidas via *DMT* foi de 2,424 e desvio padrão de 0,012. Já para as obtidas via *Rice test* a média foi de 2,432 e 0,018 de desvio padrão



Fonte: O autor (2021)

4.4.2 Resultados para densidade (Ecoflex B 3G)

Para a análise das densidades (obtidas na etapa de dosagem), foram comparados os valores obtidos via *DMT* e via *Rice test* para misturas com Ecoflex B 3G fazendo-se uso do modelo estatístico paramétrico de t-student. Os resultados estão apresentados na Tabela 31 e o *boxplot* correspondente na Figura 45.

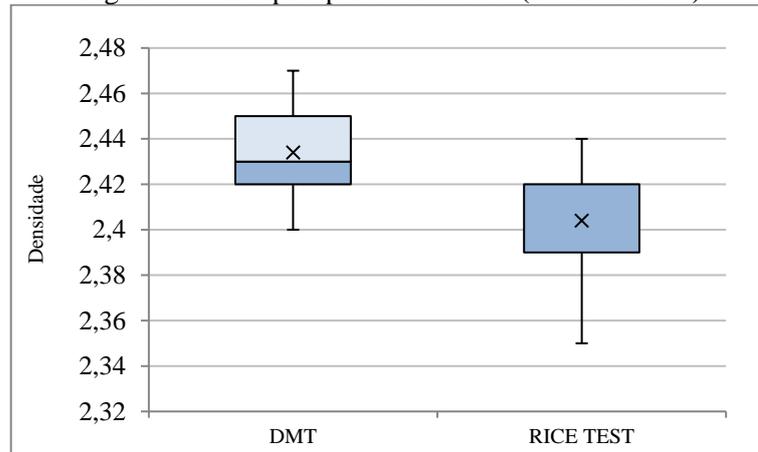
Tabela 21 – T-student para densidades das misturas (Ecoflex B 3G)

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Densidades Ecoflex B 3G	2,31	8	0,168181	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que não há diferenças significativas nas densidades obtidas via *DMT* e via *Rice test* para misturas com Ecoflex B 3G ($t(8) = 2,31$; $p > 0,05$). Com isso, ambas se assemelham estatisticamente. A média para as densidades obtidas via *DMT* foi de 2,434 e desvio padrão de. Já para as obtidas via *Rice test* a média foi de 2,404 e 0,015 de desvio padrão.

Figura 45 – Boxplot para densidades (Ecoflex B 3G)



Fonte: O autor (2021)

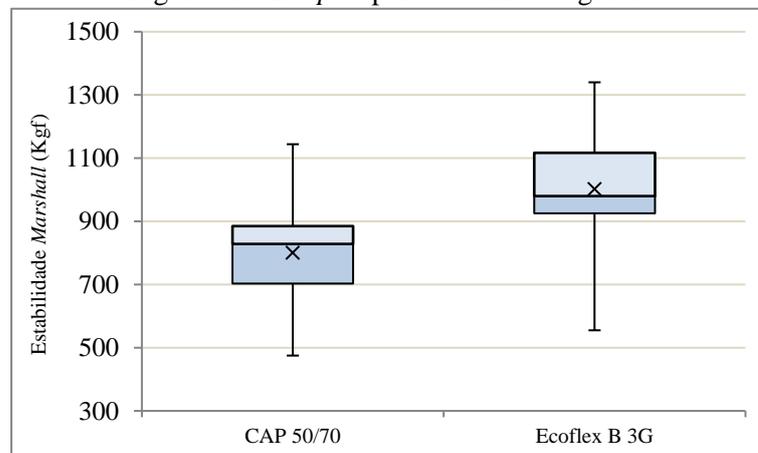
4.4.3 Resultados para estabilidade *Marshall*

Para estabilidade, inicialmente fez-se uma análise global utilizando-se os dados da dosagem e dos teores ótimos (18 ao total, sendo 15 da etapa de dosagem e 3 em teores de projeto). Em seguida, fez-se somente para os teores ótimos. Foram plotados também os *boxplots* respectivos para cada análise. Os resultados para estabilidade geral estão apresentados nas Tabela 32 e o *boxplot* correspondente na Figura 46.

Tabela 22 – T-student para estabilidade geral das misturas convencionais e modificadas

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Estabilidade <i>Marshall</i> geral	3,64	34	0,000893	Existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

Figura 46 – *Boxplot* para estabilidade geral

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que há efeito do tipo de ligante utilizado (aceitou-se a hipótese alternativa) nas misturas asfálticas para o valor de estabilidade ($t_{(34)}=3,64$; $p < 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante Ecoflex B 3G têm, em média, valores maiores para estabilidade que as misturas com CAP 50/70. A média para misturas com CAP 50/70 foi de 801 Kgf e desvio padrão de 156 Kgf. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a média foi de 1002 Kgf e 175 Kgf de desvio padrão.

Quanto aos resultados para estabilidade nos teores ótimos, os mesmos se encontram na Tabela 33 e o *bloxpot* correspondente na Figura 47.

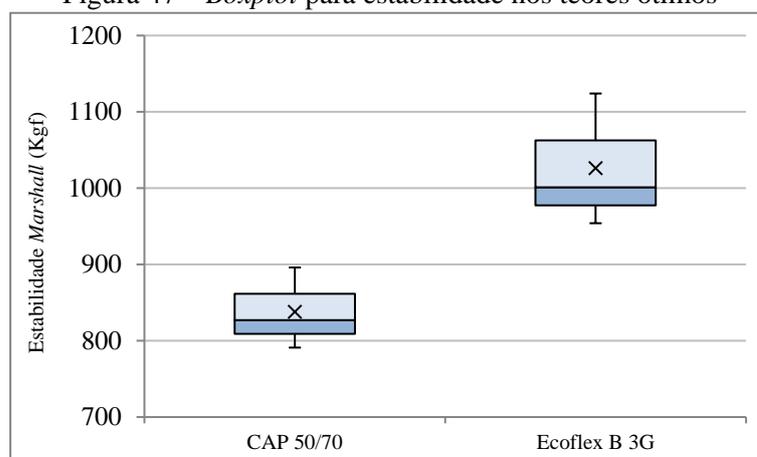
Tabela 23 – T-student para estabilidade das misturas convencionais e modificadas nos teores ótimos

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Estabilidade Marshall nos teores ótimos	3,17	4	0,033684	Existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

Para as estabilidades em teores ótimos, o test-t para amostras independentes mostrou que há efeito significativo (aceitou-se a hipótese alternativa) do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas para o valor de estabilidade nos teores ótimos para cada mistura ($t_{(4)}=3,17$; $p < 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante Ecoflex B 3G têm, em média, valores superiores de estabilidade do que as com CAP 50/70 quando dosados nos teores ótimos. A média para misturas com CAP 50/70 foi de 838 Kgf e desvio padrão de 53 Kgf. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a média foi de 1026 Kgf e 87 Kgf de desvio padrão.

Figura 47 – *Boxplot* para estabilidade nos teores ótimos



Fonte: O autor (2021)

4.4.4 Resultados para fluência *Marshall*

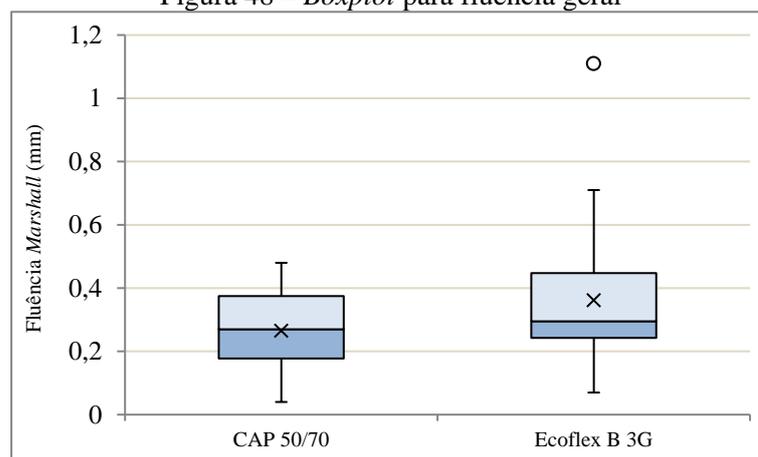
Seguiu-se o mesmo processo nos testes estatísticos para fluência (com uso dos 15 dados de dosagem acrescido dos 3 moldados em teor ótimo). Entretanto, aqui os pressupostos para ausência de *outliers* e distribuição aproximadamente normal não foram atendidos. Com isso, optou-se por realizar o teste não paramétrico de Mann-Whitney. Os resultados para fluência geral estão apresentados na Tabela 34 e o *boxplot* correspondente na Figura 48.

Tabela 24 – Mann-Whitney para fluência geral das misturas convencionais e modificadas

MANN-WHITNEY	U	p-exact	Significância
Fluência <i>Marshall</i> geral	127	0,278784	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

Figura 48 – *Boxplot* para fluência geral



Fonte: O autor (2021)

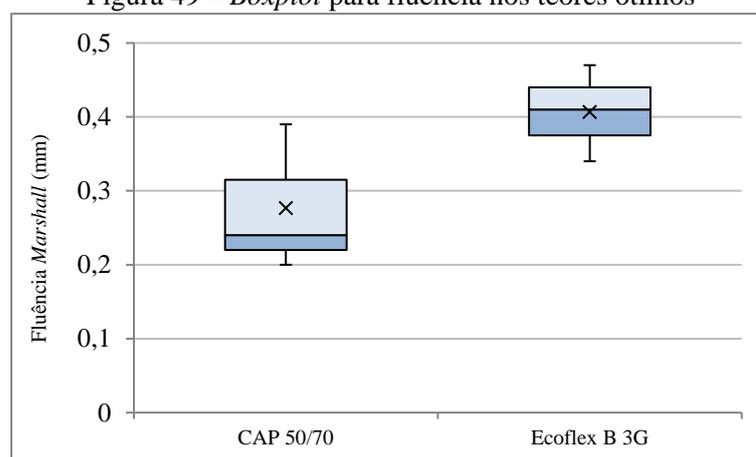
O teste de Mann-Whitney para amostras independentes mostrou que não houve efeito significativo (aceitou-se a hipótese nula) do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas para os valores de fluência ($U= 127$; $p > 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante CAP 50/70 e Ecoflex B 3G possuem valores semelhantes para fluência. A mediana para misturas com CAP 50/70 foi de 0,27 mm com amplitude interquartil de 0,20 mm. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a mediana foi de 0,30 mm com 0,21 mm de amplitude interquartil.

Quanto aos resultados para fluência nos teores ótimos os mesmos se encontram na Tabela 35 e o *boxplot* correspondente na Figura 49. Como houve para este parâmetro atendimento a todos os pressupostos, voltou-se a fazer o t-student.

Tabela 35 – T-student para fluência das misturas convencionais e modificadas nos teores ótimos

T-STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Fluência <i>Marshall</i> nos teores ótimos	1,88	4	0,132493	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

Figura 49 – *Boxplot* para fluência nos teores ótimos

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que não há efeito significativo (aceitou-se a hipótese nula) do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas para o valor de fluência nos teores ótimos ($t_{(4)} = 1,88$; $p > 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante CAP 50/70 e Ecoflex B 3G têm, em média, valores semelhantes para fluência quando dosados nos teores ótimos. A média para misturas com CAP 50/70 foi de 0,28 mm e desvio padrão de 0,10 mm. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a média foi de 0,40 mm e 0,065 mm de desvio padrão.

4.4.5 Resultados para resistência à tração (*RT*) e tenacidade

Para *RT* e tenacidade foram usados os CP's dosados nos teores ótimos de ambas as misturas. Os resultados para *RT* encontram-se na Tabela 36 e o *boxplot* na Figura 50.

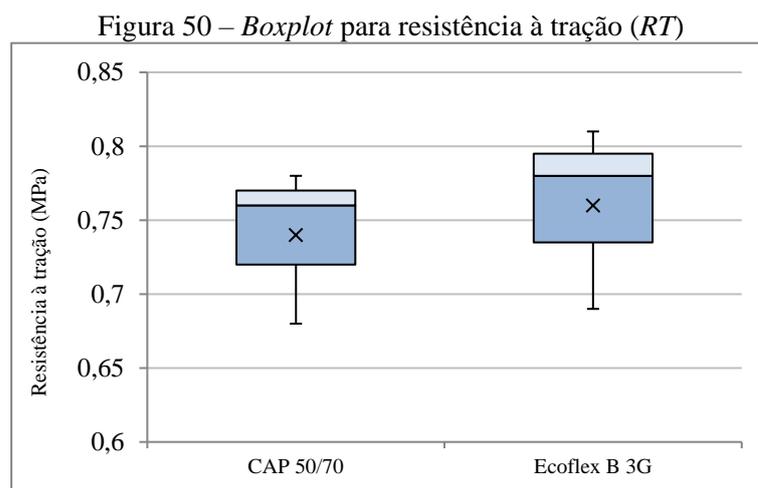
Tabela 36 – T-student para resistência à tração das misturas convencionais e modificadas

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Resistência à tração (<i>RT</i>)	0,42	4	0,693907	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que não há efeito significativo do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas para o valor de resistência à tração por compressão

diametral (RT) nos teores ótimos para cada mistura ($t_{(4)} = 0,42$; $p > 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante CAP 50/70 e Ecoflex B 3G têm, em média, valores semelhantes para RT quando dosados nos teores ótimos. A média para misturas com CAP 50/70 foi de 0,74 MPa e desvio padrão de 0,05 MPa. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a média foi de 0,76 MPa e 0,06 MPa de desvio padrão.



Fonte: O autor (2021)

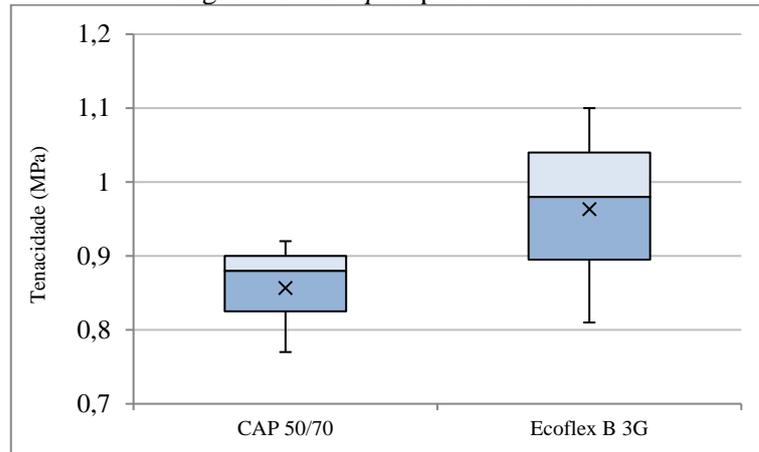
Por fim, para tenacidade os resultados encontram-se na Tabela 37 e o *boxplot* correspondente na Figura 51.

Tabela 37 – T-student para tenacidade das misturas convencionais e modificadas

TEST-T STUDENT	t-stat.	df	p-value	Significância
Tenacidade	1,11	4	0,325853	Não existe diferença entre as amostras

Fonte: O autor (2021)

O test-t para amostras independentes mostrou que não há efeito significativo (aceitou-se a hipótese nula) do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas para o valor de tenacidade nos teores ótimos ($t_{(4)} = 1,11$; $p > 0,05$). As misturas asfálticas com o ligante CAP 50/70 e Ecoflex B 3G têm, em média, valores semelhantes para tenacidade quando dosados nos teores ótimos. A média para misturas com CAP 50/70 foi de 0,86 Mpa.mm e desvio padrão de 0,08 Mpa.mm. Já para as misturas com Ecoflex B 3G a média foi de 0,96 Mpa.mm e 0,15 Mpa.mm de desvio padrão.

Figura 51 – *Boxplot* para tenacidade

Fonte: O autor (2021)

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são descritas as principais conclusões obtidas para a campanha experimental e para as avaliações estatísticas das misturas asfálticas confeccionadas com ligante convencional e modificado.

Inicialmente, é válido fazer-se uma recapitulação da pesquisa. Inicialmente, por meio de estudos laboratoriais, os agregados utilizados na pesquisa foram caracterizados. Em seguida, misturas asfálticas densas foram moldadas usando-se o ligante CAP 50/70 (denominado convencional) e o ligante Ecoflex B 3G (denominado modificado), afim de se realizar uma comparação, verificando se houve ou não melhoria no desempenho do material asfáltico para determinados parâmetros. Por fim, foram feitas avaliações estatísticas com a finalidade de se analisar os níveis de significância das misturas para diferentes variáveis.

Com isso, de acordo com a pesquisa realizada e seus objetivos, apresenta-se adiante as conclusões.

5.1 Conclusões gerais

De forma geral, o ligante modificado por borracha (Ecoflex B 3G) forneceu uma razoável melhoria de algumas propriedades físicas das misturas asfálticas quando comparado com as misturas em que foi utilizado o CAP 50/70 (referência). As melhorias mais notáveis foram sobretudo relativas à estabilidade e a tenacidade.

Agora de forma separada as conclusões referentes a cada objetivo da pesquisa são colocadas individualmente a seguir:

5.1.1 Quanto aos agregados

O agregado granítico apresentou valores para densidade e absorção dentro das faixas esperadas nas três tipologias (brita 01, 00 e pó de pedra). O agregado apresentou baixos valores de índice de forma devido sua forma lamelar, o que de certa forma pode ter contribuído para valores mais baixos e/ou dispersos na estabilidade e no *RT*.

A interação entre os ligantes e o agregado foi avaliada pelo ensaio qualitativo de adesividade que comprovou um bom comportamento para ambas as misturas, apesar de apresentar alguns poucos pontos de adesividade parcial para o Ecoflex B 3G. Neste caso, a adesividade parcial pode ter relação com a maior viscosidade do AMB. Outro fator a ser ponderado é que a avaliação de adesividade por essa metodologia é destinada a CAP's

convencionais, de tal forma que investigações complementares são recomendadas. Por fim, o filito calcário utilizado nas dosagens auxiliou no processo de adesividade corrigindo a polaridade nas misturas asfálticas moldadas.

5.1.2 Quanto aos ensaios físicos e análises estatísticas

As misturas com Ecoflex B 3G apresentaram valores maiores para estabilidade (em média 25,1% maior que a referência) do que as misturas com CAP 50/70. As misturas com borracha mostraram-se superiores quando comparadas teor a teor e também quando comparadas nos teores ótimos. Já para fluência, tanto teor a teor quanto no ótimo, não houve diferenças significativas para se atestar que algum ligante teve influência neste parâmetro. Um dos fatores para tal conclusão é certamente o tamanho amostral pequeno somada às limitações do ensaio. Contudo, embora não validadas diferenças estatísticas em termos de significância, na média, os valores de fluência para o Ecoflex B 3G foram superiores em cerca de 33,3%.

O valor do quociente *Marshall* mostrou-se pouco conclusivo para as amostras ensaiadas, devido sobretudo a presença de *outlier* e pela limitação do dado empírico. Desta forma, o quociente foi avaliado mais como um indicador (que necessita de ensaios complementares para validação) possuindo valor 21 % maior para as misturas modificadas.

Para resistência à tração por compressão diametral (*RT*), não houve diferenças significativas entre as amostras (com valor, em média, 2,7% superior para as modificadas). Fatores como tamanho amostral (maior dispersão de resultados) podem ter sido responsáveis pelos valores, em média, mais baixos obtidos para ambas as misturas situando-se próximas dos limites normativos, embora todas estejam acima do limite mínimo.

Por fim, para tenacidade os valores para o Ecoflex B 3G mostraram-se superiores do que os com CAP 50/70 (em média, 11,6 %), inferindo-se que um maior gasto de energia, em média, é necessário para se levar ao rompimento da mistura asfáltica modificada.

Em suma, as misturas asfálticas densas modificadas com o ligante Ecoflex B 3G apresentaram melhorias para estabilidade e tenacidade; e valores bons para *RT*. Contudo, é válido aprofundar novas investigações (ensaios de resiliência, fadiga, *flow number*, etc.) afim de se delimitar melhor o comportamento da mistura asfáltica usando-se a borracha como agente modificante. Considerando-se a solução parcial de gargalos ambientais relativos à borracha e as melhorias elencadas na presente pesquisa para as misturas asfálticas, salienta-se a importância de uma exploração maior do potencial de aplicação da borracha como agente modificador de ligantes asfálticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D 2726**: Standard test method for bulk specific gravity and density of non – absorptive compacted bituminous mixtures. West Conshohocken, 2019, 7 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Produção e Vendas 2019**. Disponível em: <https://www.anip.org.br/anip-em-numeros/dados-gerais/>. Acesso em: 17 jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15619**: Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2014, 7 p.

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

_____. **NBR 7809:2019**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019, 3 p.

BARBOSA, Roberta de Carvalho. **Análise de Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha de Pneus Pelo Processo Seco**. 2016. 63p. Monografia em pavimentação – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica Formação Básica para Engenheiros**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010. 504p.

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação laboratorial de Misturas Asfálticas densas modificadas com Borracha Reciclada de Pneus**. 280 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. **Anuário Confederação Nacional do Transporte**. Brasília: 2018. 229 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 258 – **Gestão de resíduos e produtos perigosos**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=258>. Acesso em: 15 out. 2019.

CORDEIRO, Willian Rubbioli. **Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus**. 2006. 255 p. Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

CUNHA, et al. **Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado**. Revista Matéria. v. 23, n.3, 10 p. Out, 2017.

CURY, M. V. Q. MURTA, A. L. S., FIGUEIREDO, L. H. F., MONTENEGRO, L.C.S. **Análise socioeconômica e ambiental para o uso de asfalto emborrachado na construção de rodovias**. 2002. 12 p. Instituto Militar de Engenharia – IME, Mestrado de Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro, 2002.

DANTAS NETO, Silvrano Adonias. **Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificados com borracha granulada de pneus usados**. 265 p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER – ME 043/95**. Misturas Betuminosas a quente - ensaio Marshall - Método de ensaio. DNIT. Rio de Janeiro, 11 p. 1995.

_____. **DNER 078/94 – ME**: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. 3 p. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER 117/94 – ME**: Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente. 4 p. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER 054/97 – ME**: Equivalente de areia. 10 p. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER 035/98 – ME**: Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles". 6 p. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER 081/98 – ME**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. 6 p. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER 083/98 – ME**: Agregados – análise granulométrica. 5 p. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER 194/98 – ME**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. 4 p. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER 003/99 – ME**: Material betuminoso - determinação da penetração. 7 p. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER 382/99 – ME**: Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímeros, pelo método do ductilômetro. 7 p. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. 278 p. 3. Ed. Ministério dos Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT-ES 031/2006**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. 14 p. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 095/2006 – EM**. Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. 6 p. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 111/2009 – EM**. Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material. 6 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **DNIT 111/2009 – ES**. Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de serviço. 13 p. Rio de Janeiro, Set, 2009.

_____. **DNIT 112/2009 – EM.** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço. 13 p. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **DNIT 131/2010 – ME.** Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola - Método de ensaio. 6 p. Rio de Janeiro, 2010.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. **DNIT utiliza asfalto ecológico em trecho da BR-153/TO.** Rio de Janeiro, 17 de jul. 2019. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/noticias/dnit-utiliza-asfalto-ecologico-em-trecho-da-br-153-to>. Acesso em: 08 out 2019.

GRECA ASFALTOS. **Informativo Asfalto Borracha Ecoflex.** 2011. Disponível em: http://www.flexpave.com.br/leiamais_ecoflex/13_estudo_ecoflex_2009.pdf. Acesso em: 28 out 2019.

LEANDRO, Rodrigo Pires. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação.** 289 p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MACHADO, Alexandra Fernanda Almeida. **Análise da Interação Betume Borracha em Misturas Betuminosas com Borracha Reciclada de Pneus pelo Processo a Seco.** 108 p. Dissertação de Mestrado – Universidade do Minho, Braga, 2013.

MARTINEZ, Juan Gabriel Bastidas. **Asfaltos e Misturas Modificadas com Materiais Alternativos.** 242 p. Tese de Doutorado em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação.** 280 p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ODA, Sandra; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** 11 p. Acta Scientiarum Technology, Maringá, v. 23, 2015.

PATRIOTA, M. B. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus - processo seco.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PETROBRÁS. **Asfalto – Informações Técnicas.** 2015. Disponível em: http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/Asfalto-Infomacoes_Tecnicas.pdf. Acesso em: 6 Out 2019.

PRESTI, David Lo. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A Literature Review. **Construction and Building Materials.** 19 p. Nottingham, Set 2013.

SARTORI, Luan Picinin; LUVIZÃO, Gislaine. **Análise de misturas asfálticas tipo CAUQ com adição de resíduo de borracha**. 8 p. Unoesc & Ciência – ACET – Santa Catarina, Joaçaba, 2014.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.

SEYED, Amid Tahami et al. The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. **Construction and Building Materials**. 11 p. Department of civil and environmental engineering – University of Texas at San Antonio, San Antonio, 2019.

SOARES, Rodrigo Almeida.; ASSIS, Edilson Machado de. **O uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 20 p. Universidade Católica de Salvador, Salvador, 2008.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 280 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

WAY, George. **History of Asphalt Rubber in Arizona**. Arizona State University, Tempe, 31 outubro 2012. Disponível em: <https://pavement.engineering.asu.edu/wp-content/uploads/2012/12/Way.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2019.

WICKBOLDT, Viviane e Silva. **Ensaio Acelerados de Pavimentos Para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos**. 134 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Distribuição granulométrica dos agregados

Peneiras		Brita 01			Brita 00			Pó-de-pedra			Fíler		
(in)	(mm)	% Passante	% Retida	% Retida Ac.	% Passante	% Retida	% Retida Ac.	% Passante	% Retida	% Retida Ac.	% Passante	% Retida	% Retida Ac.
1"	25	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4"	19	80,56	19,44	19,44	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	12,88	67,67	87,12	99,10	0,90	0,90	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8"	9,5	8,17	4,71	91,83	81,36	17,74	18,64	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Nº 4	4,8	0,68	7,49	99,32	12,92	68,45	87,08	99,31	0,69	0,69	100,00	0,00	0,00
Nº 10	2	0,16	0,52	99,84	2,65	10,27	97,35	63,65	35,66	36,35	100,00	0,00	0,00
Nº 40	0,42	0,15	0,01	99,85	1,45	1,20	98,55	23,11	40,55	76,90	100,00	0,00	0,00
Nº 80	0,18	0,14	0,02	99,86	1,28	0,17	98,72	13,69	9,41	86,31	100,00	0,00	0,00
Nº 200	0,074	0,10	0,04	99,90	0,81	0,47	99,19	7,74	5,95	92,26	99,00	1,00	1,00

Fonte: O autor (2021)

Parâmetros granulométricos dos agregados

Variáveis	Brita 01	Brita 00	Pó de pedra	Fíler
DMCA (mm)	19	12,5	4,8	0,074
D₆₀ (mm)	17	7,9	1,7	-
D₃₀ (mm)	15	6,0	0,57	-
D₁₀ (mm)	12	4,5	0,11	-
Cu	1,42	1,76	15,45	-
Cc	1,10	1,01	1,74	-

Fonte: O autor (2021)

APÊNDICE B – DADOS OBTIDOS PARA DOSAGEM MARSHALL DAS MISTURAS CONVENCIONAIS (UTILIZANDO CAP 50/70)

Teor de CAP 50/70													4,5%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall		
ϕ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm	
h (cm)	6,47	6,41	6,42	6,42	6,43	1179,5	684,3	1190,4	2,330	2,458	5,18	775	0,36	

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
ϕ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,5	6,52	6,5	6,49	6,50	1188,7	688,8	1194,9	2,349	2,458	4,44	850	0,40

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,57	6,585	6,63	6,68	6,62	1182,3	685,9	1196,8	2,314	2,458	5,84	475	0,28

Teor de CAP 50/70													5,0%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall		
Φ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm	
h (cm)	6,295	6,33	6,335	6,335	6,32	1177,7	685,1	1185,9	2,352	2,439	3,59	970	0,26	

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,405	6,46	6,47	6,40	6,44	1176,4	682,1	1184,6	2,341	2,439	4,03	669	0,13

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
ϕ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,4	6,36	6,35	6,36	6,37	1177,6	684,5	1186,1	2,348	2,439	3,75	829	0,31

Teor de CAP 50/70													5,5%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall		
Φ (cm)						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm	
h (cm)	6,30	6,29	6,27	6,26	6,28	1183,2	688,8	1191,7	2,353	2,421	2,83	1144	0,17	

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,11	10,16	10,13	10,14	10,13								
h (cm)	6,21	6,22	6,20	6,22	6,21	1169,0	683,6	1177,8	2,366	2,421	2,31	680	0,09

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,23	10,22	10,20	10,23	10,22								
h (cm)	6,26	6,33	6,24	6,22	6,26	1180,6	685,7	1188,7	2,347	2,421	3,07	940	0,31

Teor de CAP 50/70

6,0%

N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,18	10,18	10,16	10,15	10,17								
h (cm)	6,30	6,34	6,39	6,30	6,33	1183,6	687,1	1187,4	2,366	2,404	1,57	698	0,23

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,17	10,14	10,12	10,19	10,15								
h (cm)	6,30	6,30	6,34	6,33	6,32	1179,9	686,2	1184,5	2,368	2,404	1,49	717	0,48

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,18	10,16	10,2	10,2	10,18								
h (cm)	6,26	6,30	6,28	6,27	6,28	1170,2	676,4	1174,6	2,349	2,404	2,28	852	0,04

Teor de CAP 50/70

6,5%

N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,14	10,15	10,15	10,15	10,15								
h (cm)	6,15	6,14	6,16	6,17	6,16	1162,2	673,6	1166,8	2,356	2,386	1,25	837	0,42

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,12	10,15	10,14	10,13	10,13								
h (cm)	6,24	6,245	6,22	6,19	6,22	1165,0	674,3	1168,8	2,356	2,386	1,27	912	0,38

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,18	10,23	10,18	10,19	10,20								
h (cm)	6,27	6,29	6,31	6,345	6,30	1179,8	683,1	1184,5	2,353	2,386	1,39	551	0,09

Fonte: O autor (2021)

APÊNDICE C – DADOS OBTIDOS PARA DOSAGEM MARSHALL DAS MISTURAS MODIFICADAS (UTILIZANDO ECOFLEX B 3G)

Teor de Ecoflex B 3G												4,5%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
ϕ (cm)	10,20	10,14	10,18	10,07	10,15	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,49	6,48	6,52	6,62	6,53	1191,6	671,5	1198,1	2,263	2,463	8,12	978	0,23

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
ϕ (cm)	10,12	10,19	10,14	10,15	10,15	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,70	6,60	6,53	6,52	6,59	1193,6	675,9	1205,3	2,255	2,463	8,45	555	0,27

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)	10,12	10,1	10,09	10,13	10,11	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,60	6,41	6,61	6,63	6,56	1192,0	675,1	1203,5	2,256	2,463	8,40	1094	0,07

Teor de Ecoflex B 3G												5,0%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)	10,18	9,93	10,17	10,13	10,10	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,54	6,51	6,47	6,49	6,50	1189,1	682,4	1202,7	2,285	2,445	6,52	982	0,25

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)	10,13	10,15	10,04	10,08	10,10	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,48	6,32	6,31	6,43	6,39	1184,1	677,9	1194,9	2,290	2,445	6,32	1219	0,71

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
ϕ (cm)	10,18	10,14	10,18	10,07	10,14	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,55	6,44	6,32	6,27	6,40	1179,7	671,1	1188,4	2,281	2,445	6,72	1340	1,11

Teor de Ecoflex B 3G												5,5%	
N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
Φ (cm)	10,09	10,13	10,16	10,14	10,13	M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
h (cm)	6,71	6,63	6,64	6,66	6,66	1189,7	682,9	1196,9	2,315	2,427	4,64	780	0,10

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,13	10,12	10,16	10,14	10,14								
h (cm)	6,35	6,45	6,48	6,39	6,42	1185,7	674,1	1195,7	2,273	2,427	6,35	1150	0,27

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
φ (cm)	10,18	10,04	10,14	10,10	10,12								
h (cm)	6,70	6,51	6,64	6,69	6,64	1197,8	686,3	1204,2	2,313	2,427	4,72	896	0,32

Teor de Ecoflex B 3G

6,0%

N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,04	10,14	10,08	10,14	10,10								
h (cm)	6,39	6,41	6,50	6,41	6,43	1195,4	685,4	1201,9	2,314	2,410	3,96	1170	0,24

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	9,98	10,07	10,00	10,19	10,06								
h (cm)	6,48	6,51	6,50	6,43	6,48	1191,9	680,3	1195,9	2,312	2,410	4,08	915	0,18

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
φ (cm)	10,11	10,13	10,07	10,07	10,10								
h (cm)	6,33	6,27	6,42	6,43	6,36	1183,9	674,7	1188,3	2,305	2,410	4,35	940	0,46

Teor de Ecoflex B 3G

6,5%

N1	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,11	10,11	10,05	10,09	10,09								
h (cm)	6,23	6,30	6,38	6,33	6,31	1185,3	680,9	1190,5	2,326	2,393	2,80	920	0,37

N2	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
Φ (cm)	10,10	10,13	10,09	10,06	10,10								
h (cm)	6,29	6,25	6,29	6,34	6,29	1189,1	682,9	1193,6	2,328	2,393	2,69	1065	0,47

N3	1	2	3	4	Média	Massas (g) e Densidade				DMT	Vv (%)	Marshall	
						M _{seca}	M _{imersa}	M _{SSS}	D _{apar.}			Kgf	mm
φ (cm)	10,20	10,14	10,21	10,19	10,185								
h (cm)	6,33	6,18	6,22	6,34	6,27	1186,6	680,5	1189,8	2,330	2,393	2,64	956	0,25

Fonte: O autor (2021)

ANEXO A – DADOS DA CARACTERIZAÇÃO *IN LOCO* DO CAP ECOFLEX B 3G

CONTROLE TECNOLÓGICO SEÇÃO PAVIMENTAÇÃO CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CAP CAP ECOFLEX B 3G			
OBRA:		BR-153 FÁTIMA TO	
INTERESSADO:	DNIT	AMOSTRA:	5
DATA:	16/07/19	TONELADAS:	28210
TRANSPORTE:		ORIGEM CAP:	GRECA ASFALTOS
PLACA:	AZA-9910	FORNECEDOR:	GRECA ASFALTOS
HORA CHEGADA:	09:25	LABORATORISTA:	JOÃO MARCOS
Nº. TANQUE:		CLIENTE:	DNIT

ENSAIOS	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS		MÉDIA
			1°	2°	
Penetração (100g. 5 segundos, 25°C), 0,01 mm	DNER-ME 003/99 ABNT NBR 6576	30-70	53,0	54,0	53,5
Ponto de Amolecimento, °C	DNER-ME 247/94 ABNT NBR 6560	55 Min.	57,0	57,3	57,2
Viscosidade <i>Brookfield</i> a 135 °C, SP 21, cP, 20rpm	ABNT NBR 15184	–	–	–	–
Viscosidade <i>Brookfield</i> a 150 °C, SP 21, cP, 50rpm	ABNT NBR 15184	–	–	–	–
Viscosidade <i>Brookfield</i> a 175 °C, SP 21, cP, 100rpm	ABNT NBR 15184	800-2000	1660	1658	1659
Recuperação Elástica %	NBR 15086	50 Min	76	75	76
Ponto de Fulgor, °C	DNER-ME 148/94 ABNT NBR 11341	235 min.	242	244	243
Densidade	-	Anotar	1,029	1,029	1,029

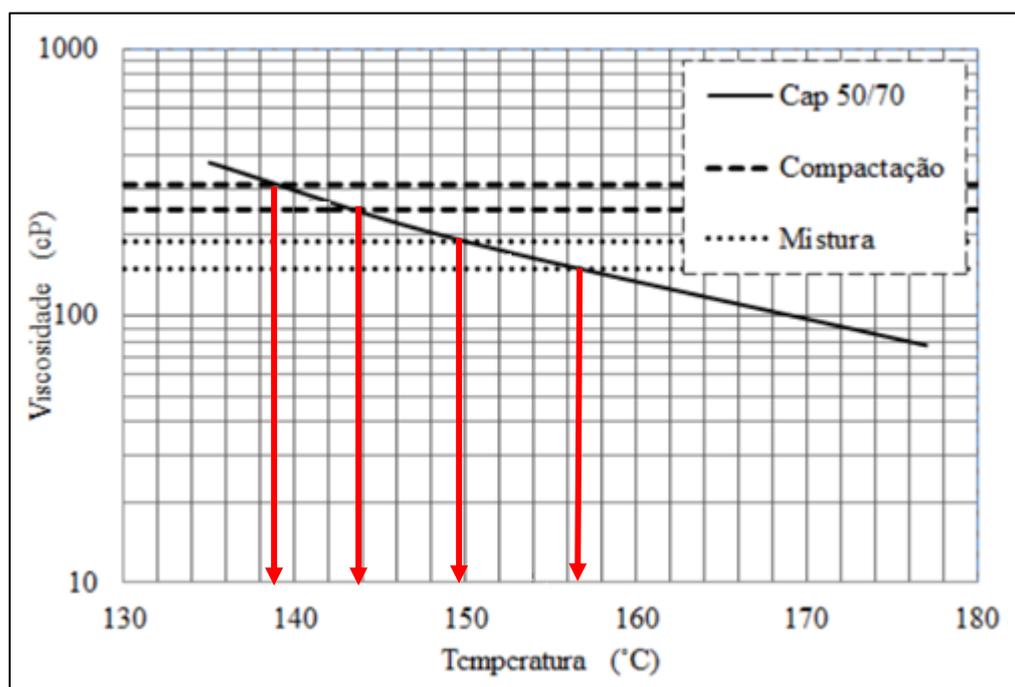
Fonte: Greca Asfaltos (2019)

ANEXO B – DADOS PARA DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO

COMPARATIVO DE TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO:

Temperaturas de Mistura	ECOFLEX B 175° Agregados: 180°C	ECOFLEX B/3G Agregados: 160°C
Temperatura da massa asfáltica saindo da Usina	178°C	160°C
Temperatura de compactação usual	155 a 160°C	140°C
Temperatura mínima de compactação	150°C	130°C

Fonte: Greca Asfaltos (2011)



Fonte: Cunha *et al.* (2018)

**ANEXO C – CORREÇÃO DA ESTABILIDADE, EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO
CORPO DE PROVA**

Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,20	65,1	0,96
51,6	1,43	57,12	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52	1,41	57,7	1,17	66,7	0,93
52,2	1,40	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,90
52,9	1,37	59,0	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60,0	1,10	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,3	0,85
54	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,30	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73,0	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,80
55,1	1,27	62,3	1,03	74,0	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1,00	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99		

Fonte: Adaptado DNER – ME 043/95