

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DAVVI LACERDA HELUY

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE PARA CAMADAS DE PAVIMENTOS**

São Luís
2018

DAVVI LACERDA HELUY

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE PARA CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Monografia apresentada junto ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

São Luís
2018

Heluy, Davvi Lacerda.

Utilização de revestimento asfáltico fresado em misturas asfálticas a quente para camadas de pavimentos / Davvi Lacerda Heluy. – São Luís, 2018.

142 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

1. Pavimentação. 2. Misturas asfálticas. 3. Fresagem.
4. Reciclagem. 5. Revestimento asfáltico fresado. I. Título.

CDU 625.85

DAVVI LACERDA HELUY

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE PARA CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Monografia apresentada junto ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 04 12 2018

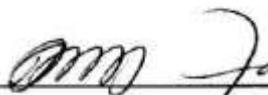
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão



Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Msc. Marivaldo Costa Duarte
Universidade Estadual do Maranhão

A Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada, e aos meus pais e irmãos pelo carinho e apoio que sempre me fizeram seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre iluminar meu caminho, e por me guiar nos momentos mais difíceis.

Agradeço a meus pais, Carlos Jorge Reis Heluy e Silvia Coelho de Lacerda Heluy, por todo amor, carinho e todos os ensinamentos e lições ao longo da vida.

Agradeço aos meus irmãos Carolinna Lacerda Heluy e Luccas Lacerda Heluy, por sempre estarem do meu lado, pela parceria e companheirismo desde que viemos ao mundo.

Agradeço a Ana Caroline Rosa Matos, por ter compartilhado comigo, além de muitos momentos de descontração, inúmeras provas, trabalhos intermináveis e longas madrugadas de estudo.

Agradeço a meus amigos de turma, em especial Eduardo de Castro Ferreira Filho e Gabriel Araújo Rego, pela troca de conhecimentos, pela ajuda e pelo companheirismo durante todo o curso.

Agradeço a todos meus professores, em especial Prof.^o Dr. Walter Canales Sant'Ana e Prof.^a Maria Terezinha de Medeiros Coelho, que foram peça fundamental para realização desse trabalho, além de fazerem parte da minha formação acadêmica.

E a todos os outros amigos que não foram citados, mas que de uma forma ou de outra me auxiliaram para que eu pudesse chegar até onde cheguei.

Sem vocês essa conquista não seria possível.

RESUMO

O modal rodoviário no Brasil é considerado o mais importante, concentrando cerca de 60% do transporte de cargas no território. Dentro desse modal, existe ainda a predominância da utilização de pavimentos asfálticos, somando mais de 200 mil quilômetros pavimentados. Entretanto, todo pavimento possui uma vida útil de projeto, e quando ela é atingida é necessário que se revise a estrutura do mesmo, analisando todas suas camadas. A manutenção adequada seria a fresagem do pavimento, para que a camada que não serve mais seja retirada da estrutura. O resíduo proveniente da fresagem da pista é conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Esse resíduo possui, além do ligante envelhecido, uma quantidade de materiais agregados que não são afetados pelo tráfego da via, mantendo suas características e propriedades. Em São Luís, além da não utilização do resíduo asfáltico fresado para composição de novas misturas, é necessário que se contrate uma empresa para dar o destino correto ao material. Existem gastos com novos materiais agregados e também gastos com a empresa de remoção de resíduos. Assim sendo, o presente trabalho tem o objetivo de investigar as características desse resíduo asfáltico, proveniente da rua José Sarney (São Luís – MA), e analisar a viabilidade ou não da utilização desse resíduo como agregado de misturas asfálticas a quente. Para tanto foram realizados inúmeros ensaios laboratoriais, até que foram definidos 4 tipos de novos revestimentos, sendo 3 misturas recicladas com 61%, 50% e 25% de RAP e uma mistura asfáltica convencional, sem uso de RAP. Apenas uma das misturas recicladas apresentou resultados satisfatórios, resultando em uma economia de 25% de matéria-prima, em comparação com a mistura convencional, favorecendo tanto o orçamento da obra quanto o meio ambiente.

Palavras-chave: Pavimentação; Fresagem; Misturas Asfálticas; Revestimento Asfáltico Fresado; Reciclagem.

ABSTRACT

The road modal in Brazil is very important, concentrating about 60% of the cargo transportation in the territory. In that modal, there is still a predominance of the use of asphaltic pavements, counting more than 200 thousand kilometers paved. However, the whole project has a project life, and when it is done, it is necessary to review the structure of the project, analyzing all its layers. Proper maintenance would be the milling the pavement, so that the layer that no longer serves is removed from the structure. The residue from the milling of the track is known as RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). This residue has, besides the aged binder, a quantity of aggregate materials that are not affected by the track traffic, maintaining its characteristics and properties. In São Luís, besides not use of the Reclaimed Asphalt Pavement for new mixtures compositions, it is necessary that a company be hired to give the correct destination to the material. There are expenditures with new aggregate materials and also expenses with the company's waste removal. Therefore, the present work has the objective of investigating the characteristics of the RAP, coming from street José Sarney (São Luís – MA), and analyze the viability or not of the use of this residue as an aggregate of hot asphalt mixture. In order to do so, several laboratory tests were carried out, until 4 types of new mixtures were defined, being 3 mixtures recycled with 61%, 50% and 25% of RAP and one conventional asphalt mixture, without use of RAP. Only one of the recycled mixtures presented satisfactory results, resulting in a saving of 25% in raw material, compared to conventional mixing, favoring the budget of the work and the environment.

Key Words: Paving; Milling; Asphalt Mixtures; Reclaimed Asphalt Pavement; Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de contato pneu x pavimento.	19
Figura 2: Rodovia com pavimento flexível.	20
Figura 3: Rodovia com pavimento rígido.	21
Figura 4: Camadas de um pavimento.	22
Figura 5: Prensa para ensaio de determinação do CBR / ISC.	23
Figura 6: Classificação dos revestimentos.	25
Figura 7: Pavimento fresado em Paraopeba - MG.	30
Figura 8: Máquina fresadora.	30
Figura 9: Cilindros de fresagem.	31
Figura 10: Detalhe do dente de corte.	31
Figura 11: Tipos de fresagem quanto à rugosidade da superfície.	34
Figura 12: Local da Fresagem e Coleta da Amostra.	35
Figura 13: Rua José Sarney, antes da Fresagem.	36
Figura 14: Superfície após Fresagem.	36
Figura 15: Máquina Fresadora e Caminhão Basculante.	37
Figura 16: Jogo de Peneiras Utilizado.	38
Figura 17: Máquina de Abrasão a Los Angeles.	39
Figura 18: Amostra e Esferas de Aço para ensaio de Abrasão.	40
Figura 19: Material agregado imerso em água.	43
Figura 20: Pesagem do agregado seco.	44
Figura 21: Materiais e amostras necessários para ensaio de densidade.	45
Figura 22: Método de Ensaio de Índice de Forma.	47
Figura 23: Máquina Rotarex com amostra.	48
Figura 24: Máquina de Viscosidade Saybolt-Furol.	50
Figura 25: Materiais e amostras necessários para ensaio de penetração.	51
Figura 26: Ensaio de ponto de amolecimento (Anel e Bola).	52
Figura 27: Marshall Automática para Ensaio.	56
Figura 28: Ensaio de Adesividade: agregado com desprendimento de ligante.	69
Figura 29: Corpo de Prova Rompido a Tração.	110
Figura 30: Corpos de Prova após Ensaio Cantabro.	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curvas granulométricas das classificações dos agregados quanto à distribuição dos grãos.	29
Gráfico 2: Curva Granulométrica da Mistura A.	81
Gráfico 3: Curva Granulométrica da Mistura B.	83
Gráfico 4: Curva Granulométrica da Mistura C.	85
Gráfico 5: Curva Granulométrica da Mistura D.	87
Gráfico 6: Curva granulométrica da Brita 1.	59
Gráfico 7: Curva granulométrica da Brita 0.	60
Gráfico 8: Curva granulométrica do Pó de Brita.	61
Gráfico 9: Curva granulométrica da Areia.	63
Gráfico 10: Curva granulométrica do Cimento Portland.	64
Gráfico 11: Curvas granulométricas do RAP.	66
Gráfico 14: Viscosidade Saybolt-Furol.	77
Gráfico 15: Volume de Vazios x %CAP da Mistura A.	88
Gráfico 16: Densidade Aparente x %CAP da Mistura A.	88
Gráfico 17: DMT x %CAP da Mistura A.	89
Gráfico 18: VAM x %CAP da Mistura A.	89
Gráfico 19: RBV x %CAP da Mistura A.	90
Gráfico 20: Estabilidade x %CAP da Mistura A.	90
Gráfico 21: Volume de Vazios x %CAP da Mistura B.	92
Gráfico 22: Densidade Aparente x %CAP da Mistura B.	92
Gráfico 23: DMT x %CAP da Mistura B.	93
Gráfico 24: VAM x %CAP da Mistura B.	93
Gráfico 25: RBV x %CAP da Mistura B.	94
Gráfico 26: Estabilidade x %CAP da Mistura B.	94
Gráfico 27: Volume de Vazios x %CAP da Mistura C.	96
Gráfico 28: Densidade Aparente x %CAP da Mistura C.	96
Gráfico 29: DMT x %CAP da Mistura C.	97
Gráfico 30: VAM x %CAP da Mistura C.	97
Gráfico 31: RBV x %CAP da Mistura C.	98
Gráfico 32: Estabilidade x %CAP da Mistura C.	98
Gráfico 33: Volume de Vazios x %CAP da Mistura D.	100
Gráfico 34: Densidade Aparente x %CAP da Mistura D.	100
Gráfico 35: DMT x %CAP da Mistura D.	101
Gráfico 36: VAM x %CAP da Mistura D.	101
Gráfico 37: RBV x %CAP da Mistura D.	102
Gráfico 38: Estabilidade x %CAP da Mistura D.	102
Gráfico 39: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura A.	135
Gráfico 40: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura B.	136
Gráfico 41: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura C.	137
Gráfico 42: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura D.	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da Forma dos Grãos.....	46
Tabela 2: Faixa Granulométrica da Mistura A.	81
Tabela 3: Traço dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura A.....	82
Tabela 4: Faixa Granulométrica da Mistura B.	83
Tabela 5: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura B.....	84
Tabela 6: Faixa Granulométrica da Mistura C.	84
Tabela 7: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura C.....	85
Tabela 8: Faixa Granulométrica da Mistura D.	86
Tabela 9: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura D.....	87
Tabela 10: Granulometria da Brita 1.....	59
Tabela 11: Granulometria da Brita 0.....	60
Tabela 12: Granulometria do Pó de Brita.	61
Tabela 13: Granulometria da Areia.....	62
Tabela 14: Granulometria do Cimento Portland.	64
Tabela 15: Granulometria do RAP.....	65
Tabela 16: Ensaio de Abrasão a Los Angeles do RAP.	67
Tabela 17: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 1.....	68
Tabela 18: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 0.....	68
Tabela 19: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 1.....	70
Tabela 20: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 0.....	71
Tabela 21: Ensaio de Densidade e Absorção do RAP Graúdo.....	71
Tabela 22: Ensaio de Densidade da Areia.	72
Tabela 23: Ensaio de Densidade do Pó de Brita.....	72
Tabela 24: Ensaio de Densidade do RAP Miúdo.	72
Tabela 25: Densidade do RAP.....	73
Tabela 26: Massa Específica do cimento Portland.....	73
Tabela 27: Resumo do Índice de Forma da Brita 1.....	74
Tabela 28: Resumo do Índice de Forma do RAP.....	75
Tabela 29: Ensaio de Teor de Betume (Rotarex).....	76
Tabela 30: Ensaio de Penetração do CAP 50/70.....	78
Tabela 31: Ensaio de Ponto de Amolecimento do CAP.....	78
Tabela 32: Estabilidade Marshall da Mistura A.....	107
Tabela 33: Estabilidade Marshall da Mistura B.....	108
Tabela 34: Estabilidade Marshall da Mistura C.....	109
Tabela 35: Estabilidade Marshall da Mistura D.....	109
Tabela 36: Resistência a Tração da Mistura A.....	111
Tabela 37: Resistência a Tração da Mistura B.....	111
Tabela 38: Resistência a Tração da Mistura C.....	112
Tabela 39: Resistência a Tração da Mistura D.....	112
Tabela 40: Desgaste Cantabro das Misturas Estudadas.....	114
Tabela 41: Ensaio de Índice de Forma do RAP.....	121
Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.....	126
Tabela 43: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura A.....	131
Tabela 44: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura B.....	132

Tabela 45: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura C.	133
Tabela 46: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura D.	134
Tabela 47: Parâmetros Volumétricos da Mistura A com Teor Ótimo de CAP.....	139
Tabela 48: Parâmetros Volumétricos da Mistura B com Teor Ótimo de CAP.....	140
Tabela 49: Parâmetros Volumétricos da Mistura C com Teor Ótimo de CAP.	141
Tabela 50: Parâmetros Volumétricos da Mistura D com Teor Ótimo de CAP.	142

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos agregados.	28
Quadro 2: Ensaio de Viscosidade do CAP.	77
Quadro 3: Temperaturas de Mistura e Compactação das Misturas Asfálticas.	77
Quadro 4: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura A.	91
Quadro 5: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura B.	95
Quadro 6: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura C.	99
Quadro 7: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura D.	103
Quadro 8: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura A com Teor Ótimo de Ligante.	104
Quadro 9: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura B com Teor Ótimo de Ligante.	105
Quadro 10: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura C com Teor Ótimo de Ligante.	106
Quadro 11: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura D com Teor Ótimo de Ligante.	106

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADP – Asfalto Diluído de Petróleo

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

CCT – Centro de Ciências Tecnológicas

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

DMM – Densidade Máxima Medida

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAP – Emulsão Asfáltica de Petróleo

GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

GMB – Densidade Aparente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LSP – Laboratório de Solos e Pavimentação

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RBV – Relação Betume/Vazios

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

UNEP – *United Nations Environment Program*

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VV – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Considerações Iniciais.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Justificativa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Pavimento.....	18
2.2	Tipos de Pavimentos.....	19
2.3	Camadas dos Pavimentos.....	21
2.4	Fresagem.....	29
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Coleta de Amostra.....	35
3.2	Ensaio Laboratoriais para Agregados.....	37
3.3	Ensaio Laboratoriais para Ligante.....	49
3.4	Misturas Asfálticas.....	53
3.5	Misturas Asfálticas Estudadas.....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1	Ensaio Laboratoriais para Agregados.....	58
4.2	Ensaio Laboratoriais para Ligante.....	76
4.3	Dosagem Marshall.....	79
4.4	Parâmetros Volumétricos.....	103
4.5	Estabilidade Marshall.....	107
4.6	Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	110
4.7	Ensaio Cantabro.....	113
5	CONCLUSÃO.....	115
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
	APÊNDICES.....	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A pavimentação rodoviária, historicamente, sempre representou uma preocupação para as nações, que viam nas rodovias um meio de transporte de cargas e locomoção de pessoas eficiente e de baixo custo, se comparado aos demais modais de transporte.

Para um engenheiro civil, o pavimento é visto como uma estrutura, composta por diversos elementos com suas respectivas funções. Se tratando de pavimentos flexíveis, esses elementos podem ser representados pelas camadas de revestimento, base, sub-base e reforço. Cada uma delas é constituída por materiais diversos com características peculiares, definidos e regulados por normas do DNIT e DNER.

O principal objetivo do pavimento é resistir aos esforços provenientes do tráfego, propiciando condições de rolamento adequadas, assim como parâmetros de conforto e segurança satisfatórios (BERNUCCI et al., 2006). Esses esforços devem ser em parte absorvidos pela camada superficial de rolamento e parte transmitida a camada subsequente, assim sucessivamente, até que se atinja o subleito da via.

Dentre os diversos tipos de revestimento, existem os revestimentos reciclados, que se utilizam de parcela dos revestimentos envelhecidos na sua composição, objetivando poupar tanto agregados quanto ligante, tornando assim o revestimento menos caro economicamente e menos danoso ao meio ambiente.

Referindo-se a camada de revestimento de um pavimento flexível, ela é constituída basicamente de materiais agregados e ligantes. Os agregados podem ser tanto naturais quanto artificiais, pétreos ou finos, dependendo da estrutura desejada. Já os ligantes são essencialmente produzidos através da destilação do petróleo, material finito obtido na natureza.

Quando nessa camada é utilizado parte de revestimento de um pavimento antigo, devidamente fresado, denomina-se que esse é um pavimento asfáltico reciclado. O material fresado utilizado é denominado RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Esse é o elemento de estudo desse trabalho, que visa estudar o revestimento fresado para fabricação de revestimentos asfálticos a quente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- I. Estudar a viabilidade da utilização de revestimento asfáltico fresado, proveniente da rua José Sarney (São Luís – MA), em misturas asfálticas a quente para camadas de pavimentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Estudar o material asfáltico fresado para obtenção das suas características e propriedades dos materiais agregados;
- II. Estudar o material asfáltico fresado para obtenção das características e propriedades do ligante;
- III. Estudar volumetrias e características mecânicas das misturas asfálticas recicladas propostas, com diferentes teores de ligante;
- IV. Obter a porcentagem ideal de utilização de material fresado na produção da mistura asfáltica reciclada;
- V. Comparar as misturas asfálticas recicladas com a mistura asfáltica convencional.

1.3 Justificativa

A pavimentação asfáltica é sem dúvida um dos tipos de pavimentos mais utilizados no Brasil e no mundo. Tomando como exemplo o cenário brasileiro, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), em 2015, a malha rodoviária possuía uma extensão de mais de 1,7 milhão de quilômetros de rodovias, sendo 12,2 % delas, pavimentadas. Além disso, segundo dados de 2001 do GEIPOT (Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes), estima-se que cerca de 60% do transporte de mercadorias se dá por esse modal. Esses dados trazem números expressivos, que comprovam a real importância das rodovias no Brasil.

Além disso, vale ressaltar a elevada incidência de defeitos nesses mais de 200 mil quilômetros de pavimento asfáltico, sem contar que esse tipo de revestimento tem um tempo vida útil sendo necessário sua substituição ou tratamento para prolongamento do mesmo.

Sob outro ponto de vista, existe ainda a questão ambiental. Essa questão, com a chegada do século XXI, tem tomado cada vez mais a atenção de todos. Conferências como a Eco-92 e a Rio+20, mostram a urgência que essa discussão ganhou durante quase 30 anos.

De acordo com dados da UNEP (2011) nesse intervalo as emissões de gás carbônico tiveram um incremento de 36%, ao passo que a concentração desse gás na atmosfera atingiu o patamar de 389 partes por milhão. Sem contar o aumento da temperatura média global que chegou a 0,4°C, maior número desde 1880. Esses impactos são todos decorrentes de ações humanas que interferem no meio ambiente natural, retirando para si a matéria-prima e o espaço que julgar necessário para seu desenvolvimento.

A utilização de matéria reciclada como o RAP, surge nessa nova linha adotada pelos países emergentes, que buscam otimizar os materiais extraídos da natureza, como o ligante e os materiais agregados utilizados na produção do revestimento, afetando assim minimamente a biosfera.

Diante da questão ambiental supracitada, da importância do pavimento asfáltico, e dos eventuais defeitos nas rodovias, é iminente a substituição do mesmo, existindo no asfalto reciclado, com revestimento fresado, uma excelente oportunidade para reforma e melhoria das rodovias do Brasil e do mundo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimento

O pavimento pode ser entendido por um sistema complexo de camadas com espessuras finitas, assentadas sobre o subleito da rodovia. Essas camadas construídas sob a superfície final de terraplenagem podem variar tanto na espessura adotada quanto nos materiais utilizados, alterando sua resistência e deformabilidade, fato que justifica sua complexidade (DNIT, 2006).

Senço (2007, p.6) afirma que o pavimento é uma estrutura

[...] destinada, técnica e economicamente, a:

a – resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;

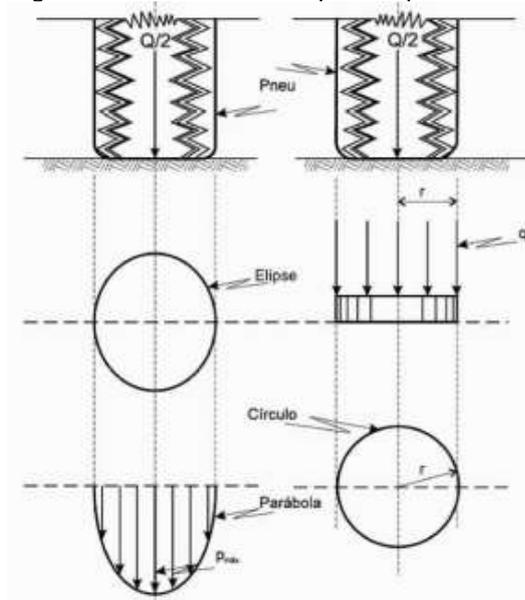
b – melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;

c – resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

Portanto, em síntese, o pavimento é tido como a superestrutura da rodovia, assentado no subleito (infraestrutura da rodovia), que de acordo com o tráfego e a respectiva carga da via, será dimensionado para receber e transmitir esforços e solicitações para as camadas adjacentes inferiores, adequando também aspectos de rolamento, conforto e segurança.

Se tratando das cargas oriundas do tráfego, segundo Senço (2007), elas são transmitidas para o pavimento através das rodas dos veículos, unidas aos eixos, que possuem uma área de contato parabólica com a superfície, gerando uma pressão com distribuição parabólica da carga. Entretanto, para fins didáticos e de estudo, a ação dessas cargas pode ser considerada distribuída uniformemente numa região circular, sem perdas significativas no dimensionamento estrutural, como ilustra a figura 1.

Figura 1: Área de contato pneu x pavimento.



Fonte: Senço, 2007.

2.2 Tipos de Pavimentos

Dentro da esfera da pavimentação são encontrados dois tipos de pavimentos: rígidos e flexíveis. “Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento” (BERNUCCI et al., 2006, p. 9).

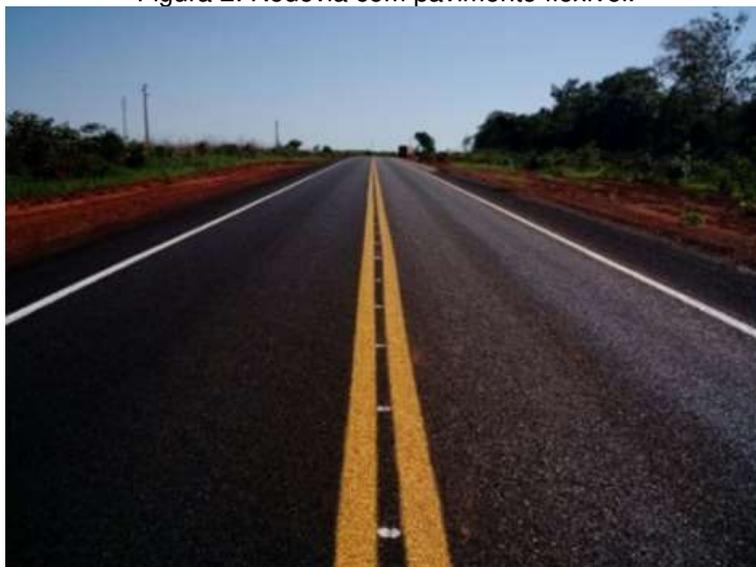
Existem ainda autores contemporâneos como José Tadeu Balbo (2007), que consideram um terceiro tipo de pavimento, classificado como semirrígido.

2.2.1 Pavimento Flexível

Conforme especificado pelo DNIT (2006, p. 95) o pavimento flexível é “aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas equivalentes[...]”.

Esse tipo de revestimento é caracterizado pela camada de revestimento em material asfáltico, conforme explicitado na figura 2, além de três outras camadas principais: base, sub-base e reforço do subleito.

Figura 2: Rodovia com pavimento flexível.



Fonte: RODOCON apud FILHO, ROCHA, 2018.

2.2.2 Pavimento Rígido

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 9), “os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland”, como mostra a figura 3. Essas placas possuem espessura fixada em projeto de acordo com as solicitações do tráfego, podendo existir ou não barras de transferência de esforços entre as placas, para melhor distribuição dos esforços.

Existe uma peculiaridade nesse tipo de revestimento que se refere a subcamada do mesmo, que pode ser denominada de sub-base, visto que ela apresenta materiais e características similares a camada de sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2006, p. 9).

Figura 3: Rodovia com pavimento rígido.



Fonte: VIAS CONCRETAS apud FILHO, ROCHA, 2018.

2.2.3 Pavimento Semirrígido

O pavimento classificado como semirrígido é identificado pela presença de uma camada de revestimento asfáltico, entretanto, diferenciando-o do pavimento flexível, ele possui uma camada de base cimentada, estabilizada com a utilização de aglutinante cimentício (DNIT, 2006). Essa característica faz com que esse pavimento possua um comportamento diversificado dos demais tipos, fato que justifica a adoção dessa terceira classificação (BALBO, 2007).

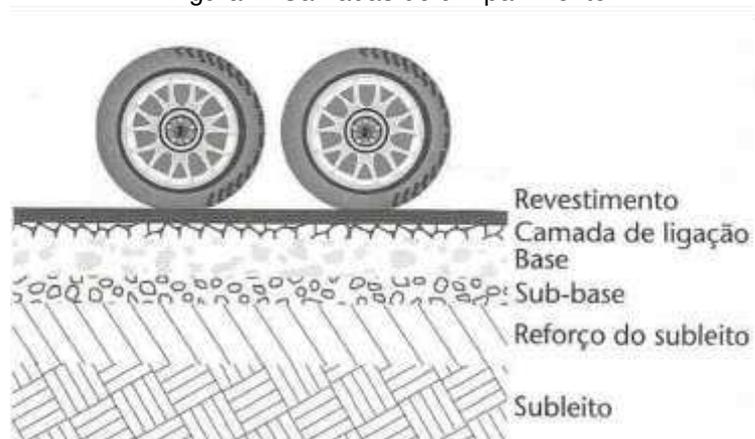
2.3 Camadas dos Pavimentos

De acordo com Balbo (2007), a união de duas ou mais camadas, com seus respectivos materiais, buscam atender estruturalmente e operacionalmente o tráfego, de forma que o pavimento em questão seja o mais durável e menos custoso possível. Em linhas gerais, as camadas usuais são: subleito, reforço do subleito, sub-base e revestimento (figura 4).

Nesse conjunto, cada camada é responsável por uma ou mais funções dentro do pavimento, propiciando condições de suporte e rolamento adequadas. Por isso, vale ressaltar que, de acordo com a solicitação do trânsito, duas dessas camadas, o reforço do subleito e a sub-base, podem não existir. Entretanto, além

delas, todas as outras devem sempre aparecer para que a estrutura seja considerada um pavimento (BALBO, 2007).

Figura 4: Camadas de um pavimento.

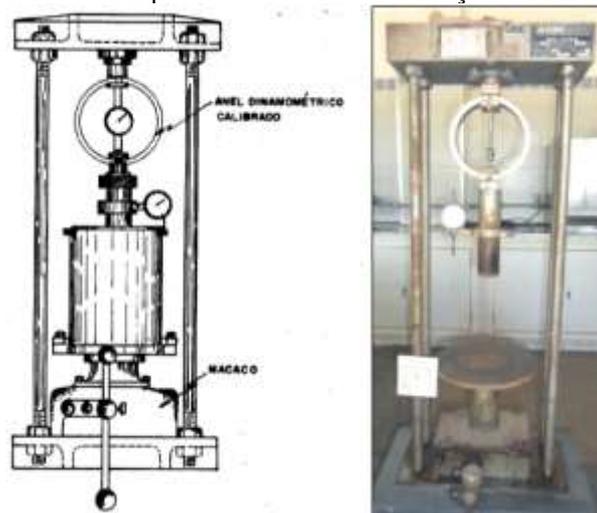


Fonte: Balbo, 2007.

Como essas camadas são partes integrantes de uma estrutura, é necessário que elas possuam alguma resistência estrutural, que vai variar de acordo com a camada analisada.

Essa grandeza pode ser verificada através de um ensaio laboratorial triaxial que determinará o CBR (*California Bearing Ratio* ou ISC – Índice de Suporte Califórnia) dessa camada (figura 5). Esse índice é obtido em porcentagem, relacionando a pressão exercida por um pistão padrão para penetrar no solo em questão e a pressão exercida para penetrar a mesma quantidade de um solo padrão de brita graduada.

Figura 5: Prensa para ensaio de determinação do CBR / ISC.



Fonte: DNIT, 2016.

2.3.1 Subleito

A camada do subleito pode ser definida, conforme Senço (2007, p. 15), como “o terreno de fundação do pavimento”. Essa camada é delimitada por toda seção do solo que está sujeita a ação do bulbo de tensões das cargas solicitadas, que geralmente não ultrapassa o primeiro metro de espessura (BALBO, 2007).

2.3.2 Reforço do Subleito

A camada de reforço do subleito pode ser considerada opcional, uma vez que ela é dispensável caso o subleito da via já possua uma resistência satisfatória.

Além disso, como o reforço é construído com material mais nobre se comparada à camada de subleito e menos nobre se comparado a sub-base, ele pode existir para que a espessura da camada superior não fique demasiadamente espessa, reduzindo o custo global do pavimento.

Dessa forma, apesar dessa camada ser denominada de reforço do subleito, ela não é parte integrante da fundação do pavimento, e sim da superestrutura da rodovia, dado que ela funciona em consonância com a base e sub-base (SENÇO, 2007).

2.3.3 Base

A base é a camada responsável por receber diretamente os esforços das cargas atuantes sobre o revestimento, resistindo aos esforços verticais, e distribuindo-os. Dessa forma as camadas inferiores receberão uma sollicitação de menor magnitude, além de maior área.

Além disso, essa camada pode ter função hidráulica, quando for constituída de materiais granulares, exercendo função significativa na drenagem superficial do pavimento (SENÇO, 2007).

2.3.4 Sub-Base

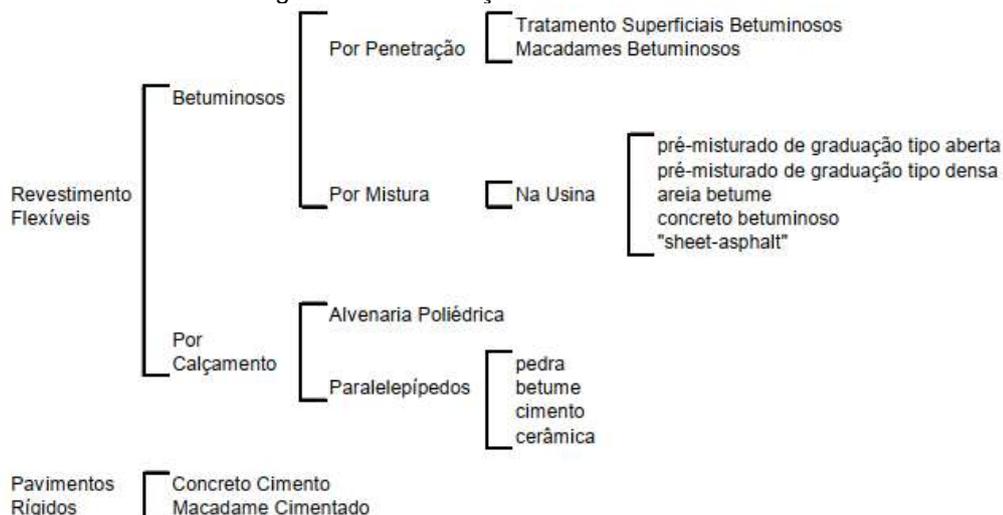
A camada de sub-base é outra camada que é considerada como facultativa. Segundo Senço (2007, p.19), o emprego dela se justifica apenas quando a camada de base se mostrar inviável técnica ou economicamente. Isso se daria caso a base, de material mais nobre e de maior qualidade, possuía uma espessura elevada.

Por consequência, é necessária uma camada adicional de material inferior a base e de qualidade superior ao reforço do subleito. A sub-base é, portanto, uma camada complementar a base (SENÇO, 2007).

2.3.5 Revestimento

Os revestimentos podem ser classificados em dois grandes grupos: revestimentos flexíveis e revestimentos de pavimentos rígidos. Segundo DNIT (2006), essa classificação se detalha de acordo com a figura 6.

Figura 6: Classificação dos revestimentos.



Fonte: DNIT, 2006.

A camada de revestimento também é conhecida como capa de rolamento. Ela é responsável, dentro da concepção do pavimento, por receber e absorver cargas estáticas e dinâmicas da via, tanto verticais quanto horizontais, assegurando diretamente condições de conforto e segurança, além de proteger o pavimento contra o desgaste precoce (SENÇO, 2007).

A capa de rolamento deve ser o mais impermeável possível, evitando a penetração de água da chuva nas demais camadas do pavimento e garantindo maior durabilidade. Além disso, essa camada, por receber esforços verticais e horizontais, deve ser composta de algum material que resista a esses esforços, evitando movimentações laterais da camada.

Todas essas características supracitadas, podem fazer com que essa camada se torne extremamente cara, devido a necessidade do emprego de bons materiais. Segundo Senço (2007), o revestimento é considerado a camada mais nobre do pavimento. Por conta disso, nos métodos de dimensionamento de pavimentos usuais, a espessura da capa de rolamento é adotada em função de algum critério, sendo esse o ponto de partida do cálculo.

É importante lembrar que todo revestimento tem uma vida útil de projeto. Quando esse tempo for atingido, ou quando as condições de rolamento, conforto e segurança deixarem de ser atendidos, essa camada precisará ser superposta ou substituída. Nesse caso não é necessário alterar as camadas inferiores do pavimento, o que torna essa manutenção mais viável economicamente.

2.3.5.1 Pavimentos Rígidos

Nos pavimentos rígidos a camada de revestimento é uma placa de concreto, proveniente da mistura de cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo e água, corretamente homogeneizados e adensados na forma de concretagem. Essa placa pode ainda possuir uma armadura de aço e barras de transferência para auxílio na resistência a tração.

2.3.5.2 Revestimentos Flexíveis por Calçamento

Os pavimentos que apresentam camada de rolamento por calçamento já possuíam alguma representação em tempos passados. Atualmente, com o advento dos pavimentos asfálticos e pavimentos de concreto sua utilização se tornou ultrapassada.

Entretanto, existem algumas vantagens como a aderência entre o pavimento e o pneu, muito útil em trechos íngremes. Outra utilização se dava em trechos urbanos onde não existia redes do sistema hidráulica e sanitário, que ainda seriam construídos (DNIT, 2006).

2.3.5.3 Revestimentos Flexíveis Betuminosos

Conforme DNIT (2006, p. 98) “Os revestimentos betuminosos são constituídos por associação de agregados e materiais betuminosos”. Ou seja, os revestimentos flexíveis são construídos a partir de misturas contendo ligantes asfálticos e agregados. Em alguns casos verifica-se a utilização de alguns produtos complementares como aditivos.

2.3.5.3.1 Ligantes Asfálticos

Inicialmente é importante verificar a utilização intensiva do asfalto na pavimentação. De acordo com Bernucci [et al] (2006) “no Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico”. Isso se dá pelas inúmeras

características do asfalto. Ele proporciona uma satisfatória coesão entre os materiais agregados, além de ser um material impermeável, durável e resistente.

A origem desse material pode ser natural, quando ele for encontrado na natureza, em forma de lagos de asfalto, ou pode ser química, quando o asfalto for proveniente da destilação do petróleo em refinaria. Existem cerca de 1500 tipos de petróleos no mundo, fato que justifica a diversidade de asfaltos existente ao redor do globo (SHELL apud BERNUCCI, 2006).

Existem atualmente inúmeros tipos de asfalto. Contudo, quando ele se enquadra numa classificação, que leva em consideração características físicas e químicas, ele pode ser denominado CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) (BERNUCCI [et al], 2006). O CAP é o principal ligante asfáltico utilizado para misturas asfálticas a quente.

O CAP é então o asfalto que possui característica “semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas” (BERNUCCI [et al], 2006).

Vale ressaltar que apesar de toda durabilidade e resistência oferecida pelo asfalto, ele ainda é suscetível a envelhecimento e oxidação devido a interação com o ar e a água, o que determina então sua vida útil no revestimento. Nesses casos é conveniente a utilização dos agentes rejuvenescedores. Esses agentes são produtos químicos utilizados para melhorar as características elásticas já diminuídas com o passar dos anos, aditando assim a vida útil do ligante e, conseqüentemente do revestimento (BETUNEL apud PESTANA, 2016).

Existem ainda outros tipos de ligantes asfálticos, como a EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo), ADP (Asfalto Diluído de Petróleo) e Asfaltos modificados por polímeros. Todos são provenientes do petróleo, porém com distintas características físicas e químicas, além de distintas utilizações.

2.3.5.3.2 Agregados

De acordo com Woods (1960) agregado é “uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escoria ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc.”.

Pode-se perceber que os agregados podem denominar um conjunto de vários materiais, que por sua vez possuem propriedades e características peculiares. Portanto, a escolha do material adequado é primordial para um correto emprego e utilização do agregado.

Bernucci et al. (2006, p. 115) ressalta a importância dos ensaios de desempenho. São eles que vão possibilitar o engenheiro prever como poderá ser a resposta daquele material agregado durante a vida de projeto do pavimento. Alguns exemplos de ensaios são a granulometria, abrasão a Los Angeles, equivalente de areia, Treton, entre outros.

Uma vasta gama de materiais agregados pode ser encontrada para utilização na pavimentação. Todavia, existem três grupos para classificá-los: quanto à natureza, quanto ao tamanho e quanto à distribuição dos grãos. No quadro 1 são expostas as classificações e exemplos de agregados.

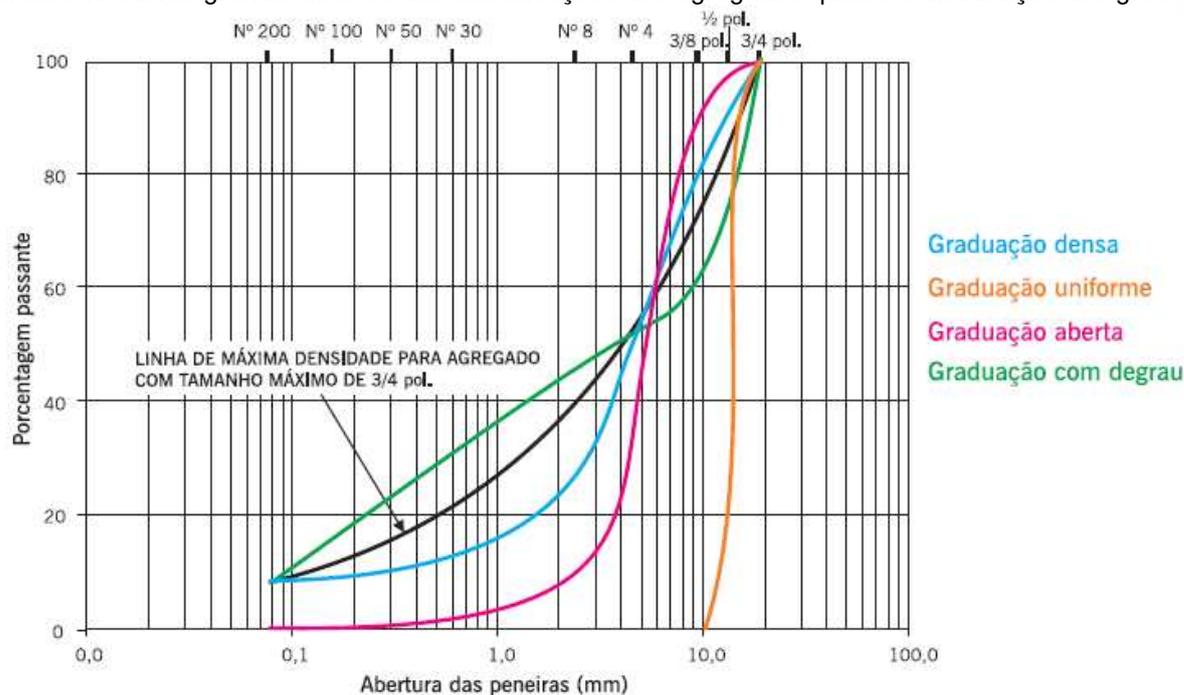
Quadro 1: Classificação dos agregados.

Classificação	Agregado	Exemplo
Quanto à natureza	Natural	Pedregulhos, britas, seixos e areias.
	Artificial	Escória de alto forno, escória de aciaria e argila expandida.
	Reciclado	Fresagem de revestimentos e resíduos de construção civil.
Quanto ao tamanho	Graúdo	Maior que 2,0 mm: britas, cascalhos e seixos.
	Miúdo	Maior que 0,075 mm e menor que 2,0 mm: areias e pó de pedra.
	Material de enchimento	Menor que 0,075 mm: cal hidratada e cimento Portland.
Quanto à distribuição dos grãos	Graduação densa ou bem-graduada	Distribuição granulométrica contínua.
	Graduação aberta	Distribuição granulométrica contínua com insuficiência de finos.
	Graduação uniforme	Majoria das partículas com diâmetros próximos.
	Graduação descontínua	Minoria de partículas com diâmetros intermediários.

Fonte: Autor, 2018.

O gráfico 1 apresenta a curva granulométrica de diversas graduações de agregados, para melhor visualização da diferença entre as classificações quanto à graduação dos grãos.

Gráfico 1: Curvas granulométricas das classificações dos agregados quanto à distribuição dos grãos.



Fonte: Bernucci et al., 2006.

2.4 Fresagem

Conforme Bonfim (2007, p. 20), a fresagem consiste no “corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio”.

O objetivo desse procedimento é a remoção parcial ou total de uma ou mais camadas do pavimento, possibilitando restauro do pavimento de maneira mais viável econômica, técnica e sustentavelmente.

Contudo, esse tipo de fresagem, com altura predefinida, só foi possível após o advento do equipamento de fresagem, na segunda metade década de 1970. Historicamente, no Brasil, a primeira fresagem foi realizada na obra de restauração da via Anchieta, em São Paulo, em 1980 (BONFIM, 2007). A figura 7 mostra a vista de uma rodovia logo após a realização da fresagem.

Figura 7: Pavimento fresado em Paraopeba - MG.



Fonte: HOJE EM DIA, 2018.

2.4.1 Equipamentos Necessários

Para realizar a fresagem o equipamento essencial é a máquina fresadora (figura 8). Ela existe em diversos tamanhos, de pequeno, médio e grande porte, para utilização da forma mais conveniente com a situação da via a ser recuperada.

Figura 8: Máquina fresadora.



Fonte: CAT, 2018.

Na fresadora existem elementos essenciais como: cilindro fresador (figura 9), dentes de corte, correia transportadora e o reservatório de água.

O cilindro fresador, também chamado de tambor fresador ou rolo fresador, é fabricado em aço especial. Ele pode existir em diversas dimensões de acordo com a máquina de fresagem.

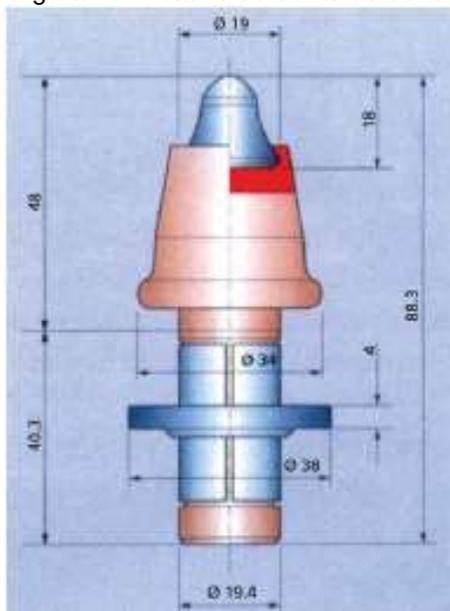
Figura 9: Cilindros de fresagem.



Fonte: Bonfim, 2007.

É nesse cilindro que ficam acoplados os dentes de corte (figura 10), responsáveis pelo corte propriamente dito do pavimento. Ele é também fabricado em aço especial, com ponta em carboneto de tungstênio e cobalto, para resistir ao contato direto com a superfície do pavimento (BONFIM, 2007).

Figura 10: Detalhe do dente de corte.



Fonte: Bonfim, 2007.

Para a operação de fresagem e correto funcionamento dos dentes de corte é necessário que a operação aconteça com adição de água, evitando assim que os dentes travem durante o processo, o que aceleraria a vida útil do componente.

A correia transportadora finaliza o processo de fresagem capturando o resíduo do pavimento e lançando-o para um caminhão basculante, que dará o destino adequado ao material.

2.4.2 Tipos de Fresagem

A partir do surgimento da máquina fresadora, surgiram também novos métodos de desbaste do pavimento, podendo esse procedimento ser realizado em dois métodos: a quente e a frio.

A diferença entre esses dois métodos consiste no aquecimento prévio ou não da superfície a ser fresada. A falta do aquecimento permite que os agregados situados na superfície de corte do equipamento são quebrados ao meio, modificando dessa forma a curva granulométrica da mistura asfáltica. Caso contrário, com o aquecimento da superfície e conseqüente amolecimento do revestimento, os agregados adquirem flexibilidade para sair da mistura sem romper, mantendo a curva granulométrica inicial do revestimento (BONFIM, 2007).

2.4.3 Classificação dos Tipos de Fresagem

No âmbito da reciclagem de pavimentos, a fresagem é classificada em duas esferas: quanto à espessura do corte e quanto à rugosidade resultante na pista.

2.4.3.1 Quanto à Espessura do Corte

No quesito espessura do corte, as fresagens podem ser superficiais, rasas ou profundas.

A fresagem superficial, também conhecida como fresagem de regularização, possui o objetivo de sanar problemas superficiais no revestimento do pavimento, desprezando assim a necessidade de recapeamento após desbaste. O ponto negativo da falta do recapeamento é o conforto do rolamento, que dependendo do cilindro de corte da fresadora, pode ser aceitável ou não (BONFIM, 2007).

A fresagem rasa permite que o corte alcance até a camada de ligação do pavimento. Esse tipo de procedimento permite sanar defeitos funcionais e superficiais da rodovia, mantendo inalterado o greide da via com relação aos dispositivos de drenagem (BONFIM, 2007). Um ponto positivo para esse tipo de desbaste é que ele resulta numa textura superficial que favorece a resistência entre a camada envelhecida e a nova camada do pavimento.

Por fim, a fresagem profunda. Nesse tipo de fresagem o corte atinge grandes profundidades, podendo atingir, além do revestimento, camadas de base e sub-base. Esse desbaste é necessário quando o objetivo é a recuperação estrutural do pavimento em questão, visando restaurar a segurança e as condições de trafegabilidade da via, sendo possível também a correção do greide de projeto (BONFIM, 2007).

2.4.3.2 Quanto à Rugosidade Resultante na Pista

De acordo com Bonfim (2007), no tópico da superfície resultante na pista, existem as fresagens padrão, fina e microfresagem, como expõe a figura 11. A rugosidade é função apenas do tipo de cilindro acoplado a máquina fresadora e a velocidade que ele é operado.

A fresagem padrão é a que utiliza o cilindro original dos equipamentos, que possui uma distância lateral entre os dentes de corte de cerca de 15 mm.

A fresagem fina emprega cilindros com distância entre os dentes de corte de cerca de 8 mm, possibilitando menor rugosidade após fresagem, dispensando o recapeamento da via em alguns casos, como o de regularização de rodovias.

A microfresagem utiliza cilindro com distância entre os dentes de corte de 2 a 3 mm. A utilização dela se dá para adequação do perfil longitudinal, além da remoção da sinalização horizontal (BONFIM, 2007).

Figura 11: Tipos de fresagem quanto à rugosidade da superfície.



FRESAGEM PADRÃO

FRESAGEM FINA

MICROFRESAGEM

Fonte: Bonfim, 2007 (Adaptado).

3 METODOLOGIA

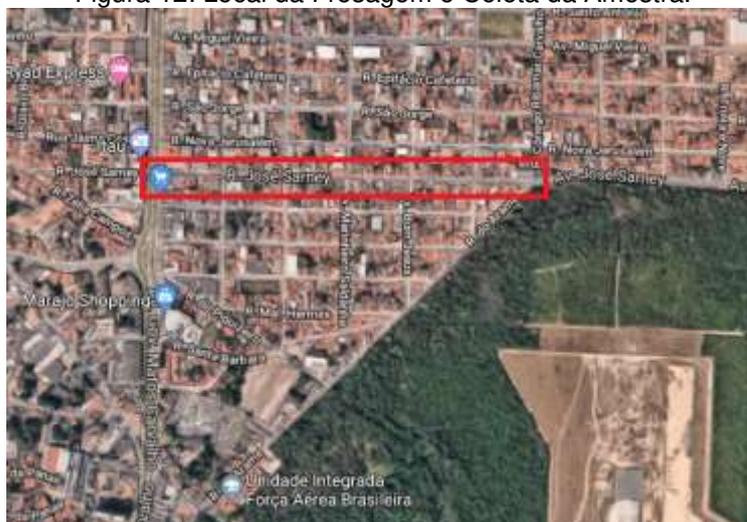
3.1 Coleta de Amostra

Para realização do estudo em questão foi necessário a coleta de alguns materiais, como o CAP, brita, areia e principalmente o RAP, proveniente da fresagem de pavimentos.

A amostra de RAP coletada é oriunda da Rua José Sarney, no bairro do Tirirical, zona metropolitana de São Luís, Maranhão. Ela foi extraída no trecho entre as Avenidas Guajajaras e Avenida José Sarney, com o auxílio de uma máquina fresadora contratada por uma empresa de engenharia local. Nas figuras 13 e 14 pode-se visualizar o estado da rua antes e após a realização da fresagem, respectivamente.

A fresadora usada é da marca Wirtgen (figura 15), uma empresa alemã especializada em equipamentos para construção e manutenção de estradas, modelo W200 projetada para fresagem a frio. Junto a ela está acoplado um cilindro com 1,50 m de comprimento, calibrado para uma fresagem com 3 cm de profundidade. Em complemento a esse equipamento trabalham também, simultaneamente, um caminhão basculante, com capacidade de 13 m³, que recebe o resíduo asfáltico, facilitando o transporte do mesmo, além de uma mini carregadeira com um acessório de escova acoplado, com a finalidade de capturar quaisquer resquícios de RAP deixados pela via, auxiliando na manutenção da limpeza do local.

Figura 12: Local da Fresagem e Coleta da Amostra.



Fonte: Google Maps, 2018.

Figura 13: Rua José Sarney, antes da Fresagem.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 14: Superfície após Fresagem.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 15: Máquina Fresadora e Caminhão Basculante.



Fonte: Autor, 2018.

Demais materiais agregados necessários, assim como o ligante utilizado, foram disponibilizados pelo LSP (Laboratório de Solos e Pavimentação) da UEMA (Universidade Estadual do Maranhão).

Na totalidade foram coletadas amostras de RAP, Brita 1, Brita 0, Pó de Brita, Areia, Cimento Portland e CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), em quantidades adequadas para realização de todos os ensaios fundamentais.

3.2 Ensaios Laboratoriais para Agregados

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP), localizado no Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), no campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Cada ensaio possui sua respectiva norma, estabelecendo e regulamentando equipamentos e procedimentos adequados para preparo, execução e conclusão dos ensaios laboratoriais.

Entretanto, para todas os ensaios que se fazem necessário a utilização de uma amostra, essas foram extraídas segundo a norma DNER-PRO 120/97 – Coleta de Amostras de Agregados e reduzidas pelo método B (por quarteamento) prescrito na norma DNER-PRO 199/96 – Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório.

3.2.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria tem como objetivo a determinação da composição granulométrica de uma amostra, bem como a determinação da sua dimensão máxima característica e seu módulo de finura. Esse ensaio é regulado pela norma DNER-ME 083/98, que estabelece aparelhos e procedimentos para realização do mesmo.

Um elemento primordial para esse ensaio são as peneiras utilizadas (figura 16). Em razão disto elas possuem uma norma específica que padroniza todos os conjuntos de peneiras de malha quadrada, a DNER-ME 035/95. O conjunto de peneiras utilizado foi determinado a partir do tópico 5.2 da norma DNIT 033/2005 - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina que regula os agregados utilizados em misturas asfálticas recicladas a quente.

Figura 16: Jogo de Peneiras Utilizado.



Fonte: Autor, 2018.

Todos os materiais utilizados no ensaio foram submetidos a granulometria para posterior enquadramento da composição da mistura gerada.

De acordo com a dimensão máxima característica do agregado determina-se a massa específica mínima para o ensaio. Para a brita 1, como dimensão máxima de 25 mm são necessários 10 kg. Para a brita 0, assim como pó

de brita e o RAP, são necessário 7 kg de cada material, visto que possuem dimensão máxima de 19 mm. Para os demais materiais, agregados miúdos, como areia e cimento Portland, são necessários apenas 1 kg para execução do ensaio.

Todas essas amostras são secas em estufa, calibradas a 110°C, até constância de massa. Em seguida as amostras são submetidas ao conjunto de peneiras selecionado, e agitadas vagarosamente. O material retido em cada uma das peneiras é registrado e dará origem a curva granulométrica do material ensaiado, concluindo assim o procedimento laboratorial.

3.2.2 Ensaio de Abrasão a Los Angeles

O ensaio de abrasão a Los Angeles tem como objetivo a determinação do valor da resistência a abrasão dos agregados. A norma que rege e ordena tanto os equipamentos quanto os procedimentos necessários para o experimento é a DNER-ME 035/98.

Esse valor é numericamente expresso em porcentagem, de acordo com o desgaste sofrido pela amostra após submissão ao equipamento denominado máquina “Los Angeles” (figura 17), juntamente com uma carga abrasiva, no caso são esferas de aço que pesam entre 390 g e 445 g, com dimensões diamétricas aproximadas de 47,6 mm.

Figura 17: Máquina de Abrasão a Los Angeles.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 18: Amostra e Esferas de Aço para ensaio de Abrasão.



Fonte: Autor, 2018.

A amostra a ser ensaiadas deve ser fixada e enquadrada em alguma das oito faixas granulométricas expostas na tabela 1 da norma regulamentadora. Previamente ela deve ser lavada e secada em estufa calibrada a 110°C até estabilidade da massa, e então segregada e pesada a amostra de acordo com a faixa granulométrica desejada. Essa graduação determina também a quantidade de esferas a serem utilizadas como carga abrasiva, conforme tabela 2 da referida norma.

A amostra juntamente com a carga abrasiva (figura 18) é submetida então a revoluções na máquina “Los Angeles” por 500 ciclos completos a uma velocidade de 30 a 33 rotações por minuto. Em seguida a amostra é segregada das esferas e levada sob a peneira 1,7 mm, para posterior secagem em estufa por um período mínimo de três horas.

Por fim, a abrasão a Los Angeles é calculada:

$$\text{Abrasão} = \frac{m_{\text{Final}} - m_{\text{Inicial}}}{m_{\text{Final}}} \cdot 100 \quad (1)$$

3.2.3 Ensaio de Durabilidade

O ensaio de durabilidade tem a finalidade de simular o desgaste sofrido pelo agregado no revestimento de uma rodovia, com o passar da sua vida útil de projeto. Ele é regulamentado pela DNER-ME 089/94.

Essa experimentação utiliza diversas soluções, como sulfato de sódio e sulfato de magnésio. A porção dos agregados miúdos a ser ensaiada é segregada de acordo com a granulometria, entre as peneiras de abertura 9,5 mm e 0,3 mm. Já os agregados graúdos são separados entre as peneiras de abertura 63,5 mm e 4,8 mm. A quantidade de cada fração está descrita no item 5 da referida norma técnica.

O ensaio consistente na imersão dos agregados em solução química durante um período de 16 h a 18 h, para posterior secagem em estufa, calibrada entre 105°C e 110°C. O material seca é, então, novamente peneirado.

O resultado do ensaio é função de dois exames finais. O primeiro é a observação do efeito da ação das soluções sobre os agregados. E o segundo exame é a verificação de quantos grãos foram afetados pelas soluções.

Por fim, é registrado a média ponderada da perda de cada fração das partículas.

Contudo, a partir de registros, trabalhos e pesquisas realizadas no LSP (Laboratório de Solos e Pavimentação) da UEMA, rotineiramente se verificou a aprovação dos agregados locais quanto a durabilidade. Esse fato aliado a questão de que o agregado atípico utilizado, o RAP, é recoberto por uma camada muitas vezes espessa de ligante envelhecido, auxiliando na proteção do agregado propriamente dito, nos deixa seguro para renunciar à realização desse ensaio, em prol da realização de ensaios mais importantes, críticos e significativos.

3.2.4 Ensaio de Adesividade

O objetivo desse ensaio é verificar a aderência dos materiais agregados ao ligante asfáltico, sendo esse experimento normatizado pelas DNER-ME 078/94, quando se trata de agregados graúdos, e DNER-ME 079/94, quando se trata de agregados miúdos.

Essa propriedade dos agregados pode garantir a efetiva utilização ou não desse material em revestimentos de rodovias, uma vez que, caso essa união com o ligante não seja satisfatória, o material não possui utilização aceitável na área.

Na verificação dos agregados graúdos, mais relevante no escopo do trabalho em questão, a norma de número 078 regula as amostras equipamentos, procedimentos e resultados. A amostra a ser ensaiada deve selecionada entre as

peneiras de abertura 19 mm e 12,7 mm, devidamente lavada, para posterior imersão em água destilada pelo período de um minuto. Em seguida a amostra é seca em estufa durante duas horas. O ligante, assim como o agregado em questão, é aquecido em estufa a, respectivamente, 120°C e 100°C. 17,5 gramas do CAP aquecido é unido a porção de agregados. Esse conjunto é submetido a temperatura de 40°C durante um período de 72 horas. Por fim, é realizado uma verificação visual da película betuminosa formada sobre a superfície do agregado. Caso essa película betuminosa estiver rompida ou deslocada, o resultado do ensaio é que o material é insatisfatório.

3.2.5 Ensaio de Densidade e Absorção

O ensaio de densidade e absorção tem como finalidade a obtenção dos valores da densidade aparente de agregados graúdos, bem como sua absorção de água. Esses valores são de suma importância para caracterização física desses materiais, sobretudo nos componentes de misturas asfálticas. Os valores de densidade auxiliarão no cálculo da densidade máxima teórica da mistura, grandeza necessária para determinação de parâmetros como volume de vazios, relação betume-vazios, entre outras. Esse experimento é normatizado pela DNER-ME 081/98, que descreve as amostras, equipamentos e mecanismos para realização do ensaio.

Como se trata de um teste para agregados graúdos, todas as amostras devem ser previamente submetidas a peneira com abertura de 4,8 mm, rejeitando a fração passante, denominada agregado miúdo, que deverá ser submetida a um ensaio particular para obtenção da densidade. Vale ressaltar que a amostra a ser estudada, assim como no ensaio de granulometria, possui um valor mínimo definido de acordo com a dimensão máxima característica do agregado, exposto na tabela 1 da referida norma.

Em síntese os equipamentos primordiais para realização do ensaio são uma balança com precisão de 1 g e capacidade de 20 kg e uma estufa precisada na temperatura de 110°C ($\pm 5^\circ\text{C}$).

Inicialmente a amostra deve ser lavada sobre a peneira com malha de 4,8 mm e seca em estufa até constância de massa. Após secagem e resfriamento do

material, ele é imerso em água (figura 19) para inicial cálculo da absorção de água, por um período de 24 horas (± 4 h).

Figura 19: Material agregado imerso em água.



Fonte: Autor, 2018.

Passado o período submerso, seca-se o material com auxílio de pano absorvente, de modo que a água superficial seca extinta dos grãos, para obtenção da massa da amostra na condição superfície seca (M_h).

A etapa seguinte é referente a obtenção da massa de água deslocada quando a amostra é submersa, obtida por pesagem hidrostática. Portanto, um recipiente com água e uma cesta vazada é mobilizado sobre a balança, e a amostra é então submersa. O valor registrado no leitor da balança é a massa de água deslocada (M_{Sub}) pelo volume do agregado.

Por fim a amostra deve ser novamente submetida a estufa para eliminação da água superficial e higroscópica, para então alcance do último parâmetro necessário, a massa do agregado seco em estufa (M_s), como ilustrado na figura 20.

Figura 20: Pesagem do agregado seco.



Fonte: Autor, 2018.

A densidade aparente a absorção são dadas pelas seguintes fórmulas, respectivamente, onde o primeiro valor expresso é adimensional e o segundo em porcentagem.

$$D_{ap} = \frac{M_S}{M_h - M_{Sub}} \quad (2)$$

$$\text{Absorção} = \frac{M_h - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad (3)$$

3.2.6 Ensaio de Densidade por meio do Frasco Chapman

Esse ensaio de densidade, de forma análoga ao item anterior, possui a finalidade de calcular a massa específica de agregados, porém dessa vez dos agregados miúdos. Os procedimentos e equipamentos são descritos na norma DNER-ME 194/98, que rege esse ensaio.

Além da necessidade de balança com precisão de 1 g e estufa calibrada a 110°C, esse experimento utiliza um frasco de vidro particular, denominado frasco Chapman, que possui dois bulbos esféricos e graduações entre 200 cm³ e 450 cm³, exibido na figura 21.

Figura 21: Materiais e amostras necessários para ensaio de densidade.



Fonte: Autor, 2018.

A amostra a ser estudada deve ser previamente seca em estufa até constância de massa. Apenas uma fração de 500 gramas será necessária. O experimento tem início com o preenchimento do frasco com água até a marca de 200 cm³. Posteriormente a fração da amostra é inserida no frasco com cautela para que não se formem bolhas de ar confinadas. Finalizando, é necessário ler a graduação atingida pela superfície da água (L) dentro do frasco.

A massa específica, em g/cm³, é calculada segundo a expressão:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (4)$$

3.2.7 Ensaio de Massa Específica Real para Material Pulverulento

De forma similar aos ensaios de densidade, esse ensaio também tem a finalidade de caracterizar algum material, no caso o material de enchimento que é finamente pulverizado. A norma técnica que rege esse ensaio, descrevendo materiais, amostras e equipamentos, é a DNER-ME 085/94.

É necessário a utilização do frasco Le Chatelier, querosene, termômetro e banho d'água.

Inicialmente o frasco é completo com querosene até o intervalo entre 0 ml e 1 ml, para posteriormente acrescentar 60 gramas do material ensaiado. Depois que for verificado a ausência de bolhas no material ensaiado é realizado a leitura final.

Logo, massa específica é dada pela relação:

$$\text{Massa Esp. Real} = \frac{\text{Massa do Material}}{\text{Volume de Líquido Deslocado}} \quad (5)$$

3.2.8 Ensaio de Índice de Forma

A obtenção do índice de forma visa estudar e analisar a estrutura dos grãos de determinado agregado, verificando através de suas dimensões o cálculo de um fator, que será necessário para aprovação do material para utilização na pavimentação. Esse fator consiste na relação entre as dimensões dos grãos, comprimento, largura e espessura, variando de 0 a 1, onde 1 significa ótima cubicidade e 0 significa grão lamelar. É determinado em normas que o valor mínimo do fator é de 0,5, para aceitação da forma do grão agregado.

Tabela 1: Classificação da Forma dos Grãos.

Média das Relações	Classificação
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-Lamelar

Fonte: Bernucci et al., 2006 (Adaptado).

A norma que rege esse ensaio, relatando de que forma de se da amostragem, procedimentos do experimento e equipamentos essenciais, é a NBR 7809/2006, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Inicialmente é necessário obter a granulometria do material agregado a ser estudado, para verificação da quantidade necessária de grãos para cada fração granulométrica. A fórmula para cálculo da fração necessária é:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} * F_i \quad (6)$$

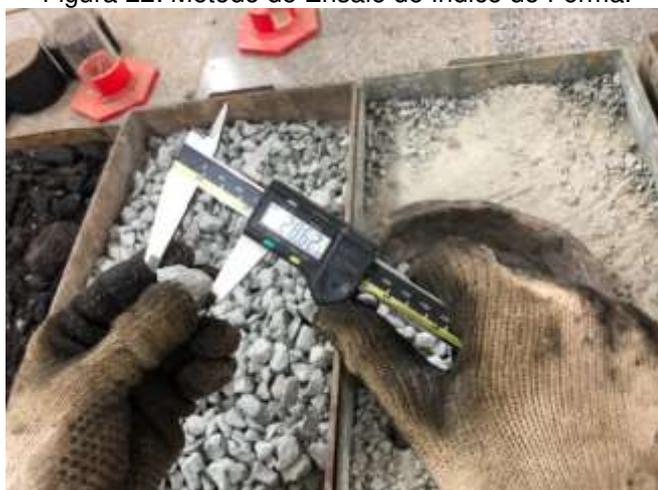
Onde N_i é o número de grão da fração i e F_i a porcentagem de massa retida na fração i .

De posse desses dados, só será necessário o emprego da estufa regulada a 110°C e um paquímetro, analógico ou digital.

A amostra mínima é definida, analogamente a outros ensaios, de acordo com a dimensão máxima do agregado. Essa informação está disponível na tabela 1 da norma regulamentadora em questão.

Após separada e devidamente seca, um total de 200 grãos medidos com auxílio do paquímetro, com precisão de décimos de milímetro. Os valores são então registrados (figura 22) e a relação é calculada para cada grão. A média ponderada desses fatores é obtida e o agregado é, dessa forma classificado.

Figura 22: Método de Ensaio de Índice de Forma.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.9 Ensaio de Teor de Betume (Rotarex)

Uma das características mais importantes e determinantes nas características de uma mistura asfáltica é seu teor de betume. O ensaio para determinação do teor de betume utiliza um equipamento especial para essa finalidade, a chamada máquina Rotarex (figura 23). Ela é equipada com um motor

que possibilita rotação de um prato interno, produzindo uma força centrífuga necessária para o experimento.

Figura 23: Máquina Rotarex com amostra.



Fonte: Autor, 2018.

A norma que regula esses procedimentos bem como os equipamentos e a amostra a ser analisada é a DNER-ME 053/94.

A amostra a ser ensaiada deve ser submetida a uma temperatura entre 100°C e 120°C durante uma hora, com o auxílio de uma estufa. Em seguida deve ser selecionado uma fração de 1000 gramas para ser submetido a máquina Rotarex. Além do equipamento e da amostra também é necessário um filtro de papel circular com um furo central.

O ensaio tem início com a inserção da amostra no prato do equipamento juntamente com 150 ml de solvente, que deve ficar durante 15 minutos em repouso. Posteriormente o papel filtro é inserido, a máquina é fechada e a amostra é submetida a rotação gradativa até que o solvente passe a escoar pelo tubo lateral. Quando terminar o solvente o equipamento é parado e adiciona-se novamente o solvente. Esse ciclo é repetido até que o solvente sai pelo tudo lateral com aspecto integro. Nesse ponto a amostra é retirada do Rotarex e levada para estufa, calibrada entre 80°C e 100°C, até constância de massa.

A massa final é então registrada, e o teor de betume é dado pela seguinte expressão:

$$\% \text{ Betume} = \frac{\text{Massa}_{\text{Inicial}} - \text{Massa}_{\text{Final}}}{\text{Massa}_{\text{Inicial}}} * 100 \quad (7)$$

3.3 Ensaio Laboratoriais para Ligante

3.3.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

Quando se trata de dosagem de misturas asfálticas, o ensaio para determinação da viscosidade é um dos mais importantes. Isso é devido ao comportamento viscoelástico que o ligante possui, variando significativamente sua viscosidade com acréscimo ou decréscimo da temperatura.

Esse ensaio, seus materiais e equipamentos, procedimentos e resultados são regulados pela ABNT NBR 14950/2003. Nela estão padronizadas sete temperaturas distintas para caracterização dos ligantes, são elas: 121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 177°C, 204°C, 232°C.

Os aparelhos necessários são a máquina de viscosidade (figura 24), termômetro, frasco receptor e cronometro. A amostra de cerca de 450 gramas de ligante é coletada e aquecida a temperatura de ensaio desejada acrescida de 10°C a 15°C, sob a placa de aquecimento. Após posicionamento da amostra no tubo de viscosidade, o cronometro é iniciado e a amostra é liberada para atravessar o orifício e cair sobre o frasco receptor. Quando este alcançar a marca de 60 ml, pausa-se o cronometro e esse valor de tempo é registrado.

Figura 24: Máquina de Viscosidade Saybolt-Furol.



Fonte: Autor, 2018.

De posse de diversas medidas de tempo, mensuradas em segundos Saybolt Furol, é traçado um gráfico, onde a linha intermediária de tendência define as temperaturas para determinadas viscosidades. Para elaboração de um corpo de prova de concreto asfáltico é necessário que se analise duas faixas principais, entre 75 sSF (Segundos Saybolt Furol), e 150 sSF (prioritariamente entre 75 sSF e 95 sSF), temperatura necessária para mistura dos componentes, e entre 125 sSF e 155 sSF, temperatura de compactação da mistura.

Por fim, é importante realçar que, para o preparo da mistura, a temperatura do ligante deve estar entre 107°C e 177°C e a temperatura do agregado cerca de 10°C a 15°C acima do ligante, sem ultrapassar a marca dos 177°C.

3.3.2 Ensaio de Penetração

O ensaio em questão tem o objetivo de determinar a penetração de um material sólido ou semissólido utilizados em rodovias, no caso do presente trabalho o material utilizado é o ligante CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), para sua tipificação. Os procedimentos desse experimento são normatizados pela DNIT 155/2010-ME, assim como sua aparelhagem e resultados.

Os aparelhos essenciais necessários são um penetrômetro calibrado (figura 25), onde a massa do conjunto haste e agulha deve pesar 100 gramas, e um recipiente cilíndrico, no caso em questão foi utilizado uma capsula com diâmetro interno médio de 60 mm.

Figura 25: Materiais e amostras necessários para ensaio de penetração.



Fonte: Autor, 2018.

Para execução do procedimento é necessário que a amostra do material a ser ensaiado seja colocada no recipiente cilíndrico, e este seja submetido ao banho maria a uma temperatura de 25°C. Evidencia-se o fato de que a temperatura deve ser rigorosamente controlada, visto que o comportamento da amostra pode variar significativamente sob qualquer variação da atmosfera laboratorial.

O ensaio tem prosseguimento com o posicionamento do recipiente sobre a agulha, que deve ser posicionada na superfície da amostra, sem penetrá-lo. Através de um acionador e com auxílio de um cronometro, o conjunto de penetração é liberado para penetrar na amostra durante 5 segundos. A penetração nesse intervalo é registrada. Esse processo deve ser repetido três vezes para cada amostra, ressaltando que a penetração não deve ocorrer a menos de 1 cm da borda e dos demais pontos já penetrados. Essas leituras não devem diferir de determinados valores, valores estes estabelecidos de acordo com a penetração base, evidenciado no item 6, tabela 3 da norma supracitada.

3.3.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento (Anel e Bola)

O ensaio para determinação do ponto de amolecimento é normatizado pela DNIT 131/2010. Essa norma apresenta procedimentos e equipamentos primordiais para determinação do ponto de amolecimento para materiais betuminosos.

Os aparelhos necessários para execução são a aparelhagem anel e bola (figura 26), assim como um Becker, uma fonte de calor e um termômetro. A amostra para ensaio é extraída conforme norma NBR 14883, aquecida a 135°C e disposta sobre o anel padrão. Após resfriamento do anel com ligante, uma bola é colocada sobre cada anel, e a aparelhagem, é colocada imersa em água e posicionada sobre a fonte de calor.

Figura 26: Ensaio de ponto de amolecimento (Anel e Bola).



Fonte: Autor, 2018.

Assim que a bola tocar a placa de ferro registra-se a temperatura, a chamada temperatura de amolecimento. Vale ressaltar ainda que existe uma diferença mínima entre as duas leituras, devendo sempre verificar a aparelhagem do ensaio.

3.4 Misturas Asfálticas

Conforme Bernucci et al. (2006, p.205) “A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimento experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante”. Contudo, existem diversos métodos para obtenção do referido teor de ligante, variando em diversos parâmetros como tipo de mistura, energia de compactação, temperatura de ensaio, entre outros.

Ao redor do mundo existem métodos de dosagem como o método Hubbard-Field, Marshall e o Superpave. O método Marshall, elaborado por Bruce Marshall na década de 1940, é o método com maior utilização e abrangência no Brasil, e, portanto, por esse fato foi o método adotado no presente trabalho.

3.4.1 Dosagem Marshall

Essa metodologia de dosagem é normatizada pela DNER-ME 043/95, que determina tanto o preparo dos corpos de prova quanto os procedimentos para obtenção de estabilidade e fluência.

Os dados iniciais da dosagem são as massas específicas reais tanto do cimento asfáltico de petróleo quanto de todos os outros agregados, como brita, areia, filler, pó de brita e, no caso, o RAP, assim como suas respectivas granulometrias, no caso dos materiais agregados.

Dessa forma a composição granulométrica da mistura pode ser traçada pelo método das tentativas até que ela atinja as especificações definidas em norma para a mistura desejada.

Outro ponto a ser analisado é a viscosidade Saybolt-Furol do ligante escolhido, para determinação das temperaturas de mistura e compactação dos diversos corpos de prova em estudo.

A partir de um teor de ligante escolhido, são definidos quatros outros grupos, com -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0% do material. A partir dessa porcentagem de ligante e do traço calculado para a mistura, partindo do ponto de que cada corpo de prova deve possuir em média 1200 gramas, são estabelecidos a frações de cada material agregados. Vale ressaltar que para cada grupo de estudo são necessários pelo menos 3 corpos de prova.

A mistura e moldagem dos corpos de prova é executada com a cautela e controle da temperatura dos componentes. Assim que os agregados e o ligante atingirem a temperatura adequada é feita a homogeneização dos mesmos e posterior compactação em moldes de aço, previamente aquecido em estufa, com dimensões aproximadas de 110 mm de diâmetro e 90 mm de altura. Cada corpo de prova recebe uma energia de compactação de 75 golpes em cada face, com pressão entre 7 kgf/cm² e 14 kgf/cm². Em seguida deve-se aguardar um período de no mínimo 12 horas a temperatura ambiente para desmolde dos mesmos.

Nesse ponto é possível a obtenção de grandezas para cálculo de parâmetros volumétricos necessários para a dosagem. São medidas a altura e diâmetro dos corpos moldados, assim como seu peso seco ao ar e seu peso submerso. Com esses resultados é possível calcular o volume dos corpos (V), massa específica aparente da mistura (Gmb), volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM) e a relação betume/vazios (RBV).

A partir de então os corpos de prova são submetidos ao banho maria calibrado a 60°C, por um período de 30 a 40 minutos, para posterior rompimento. É utilizada a máquina Marshall, munida de sensores e prensa automática, para determinação da estabilidade e fluência.

A estabilidade consiste na maior carga resistida antes da ruptura, entendida como a quebra do agregado que afeta a velocidade padrão de ensaio, de 0,8 mm por segundo. No momento da ruptura o deslocamento registrado é definido como a fluência do corpo ensaiado (BERNUCCI, 2006).

Dando prosseguimento a dosagem, de posse dos parâmetros volumétricos e mecânicos, são plotados gráficos para analisar a variação deles com o acréscimo ou decréscimo de ligante.

Por fim, através da análise dos dados obtidos, é determinado o teor de ligante. Um dos métodos de obtenção, muito usado no Brasil, é a utilização do teor de ligante correspondente a um volume de vazios de 4%, ou a média dos valores especificados em norma.

O método pela obtenção do teor do ligante é arbitrário ao projetista, e de acordo com a empresa ou órgão pode variar. Outra forma de obter o teor ótimo de ligante é a verificação de máxima estabilidade, máxima massa específica aparente e volume de vazios igual a 4%. A média dos teores para cada um desses quesitos é definido como teor ótimo segundo esse procedimento.

Uma última maneira para obtenção do teor ótimo segundo o método Marshall é a análise do volume de vazios juntamente com a relação betume/vazios. Esses dois parâmetros são plotados num gráfico de dispersão combinado, e com base nos extremos especificados em norma, as respectivas linhas de tendência linear indicam dois percentuais de ligante cada uma. A média dos dois teores intermediários é o percentual definido como ótimo.

Em posse do teor ótimo de ligante podem ser moldados os corpos de prova definitivos para obtenção de estabilidade Marshall e resistência a tração.

3.4.2 Estabilidade Marshall

A obtenção da estabilidade dos corpos de prova é regida pela DNER-ME 043/95, que determina desde os materiais e métodos da confecção até o rompimento dos corpos de prova.

Como supracitado no item 3.3.1, os corpos são dosados e moldados conforme uma série de procedimentos, até serem desmoldados. Após toda essa fase inicial de construção e desmolde, os corpos de provas estão prontos para serem rompidos. Para tanto eles são submetidos ao banho maria a uma temperatura de 60°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) por um período de 30 a 40 minutos. Em seguida, com auxílio da máquina Marshall automática, eles são posicionados no molde de compressão e prensados por um embolo padronizado. É importante frisar que o período entre a remoção do banho maria e a submissão a máquina Marshall não deve ser superior a 30 segundos.

A carga máxima necessária para ruptura do corpo de prova é registrada como estabilidade lida. A deformação no momento da ruptura é também registrada, como fluência. Vale ressaltar que a norma 043 determina que, de acordo com a altura do corpo de prova, a estabilidade deve ser corrigida por um fator (F), calculado de acordo com a fórmula:

$$F = 927,23 \cdot h^{-1,646} \quad (8)$$

O resultado da multiplicação da estabilidade lida por esse fator é o valor da estabilidade Marshall.

3.4.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral

O método para determinação da resistência a tração das misturas asfálticas é regido pela DNER-ME 138/94, que possui uma revisão datada de 2009 com algumas alterações. Ela descreve os procedimentos e materiais necessários para o experimento, bem como sua amostra.

O ensaio é realizado com um corpo de prova moldado através de dosagem Marshall, e auxílio de um molde de aço com friso e a máquina Marshall automática (figura 27). O corpo de prova a ser ensaiado é colocado na estufa até que atinja a temperatura de ensaio, variando entre 25°C e 60°C.

Figura 27: Marshall Automática para Ensaio.



Fonte: Autor, 2018.

A mistura asfáltica moldada é posicionada no molde de aço que é submetido a pressão na máquina automática, aplicada progressivamente a uma velocidade aproximada de 0,8 mm por segundo.

O valor da carga de ruptura (F) é registrado no equipamento. A resistência a tração por compressão diametral é então calculada pela seguinte fórmula:

$$R = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (9)$$

Onde R é a resistência a tração (kgf/cm²), F é a carga de ruptura lida (kgf), D é o diâmetro (cm) e H a altura (cm) do corpo de prova.

3.4.4 Desgaste Cantabro

O ensaio cantabro é um ensaio complementar essencial para medir o desgaste a abrasão das misturas asfálticas, simulando sua utilização no pavimento. O atrito entre o pneu e a camada de rolamento gera um desgaste elevado do pavimento, que é preciso ser mensurado.

A norma que regulamenta esse ensaio é a DNER-ME 383/99, assim como seus equipamentos e materiais necessários. Um equipamento imprescindível para realização do ensaio é a máquina de abrasão a Los Angeles.

A amostra a ser ensaiada é um corpo de prova moldado e dosado segundo metodologia Marshall, que é submetida a 300 revoluções a uma velocidade de 30 rpm na máquina Los Angeles, entretanto, não são necessárias adições de carga abrasiva, como as esferas no ensaio de abrasão a Los Angeles.

Após a simulação do desgaste o corpo de prova é retirado da máquina e o desgaste pode ser calculado pela expressão:

$$A = \frac{P - P'}{P} * 100 \quad (10)$$

Onde A é o desgaste da mistura, P é o peso inicial do corpo de prova, e P' o peso ao final do ensaio. O valor final do desgaste é a média da realização do ensaio com três corpos de prova distintos, do mesmo grupo de dosagem e teor de ligante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base em diversas normas regulamentadoras, especificações de serviço e métodos de ensaio, foram realizados inúmeros ensaios e experimentações nos materiais agregados, no ligante e também nas misturas asfálticas propostas. A seguir, serão apresentados os resultados obtidos e discussões acerca dos mesmos.

4.1 Ensaios Laboratoriais para Agregados

4.1.1 Ensaio de Granulometria

A análise granulométrica é necessária a todos os materiais que possam vir a compor as misturas asfálticas. Portanto, foram ensaiados a brita 1, brita 0, pó de brita, areia, filler e o revestimento asfáltico fresado.

4.1.1.1 Brita 1

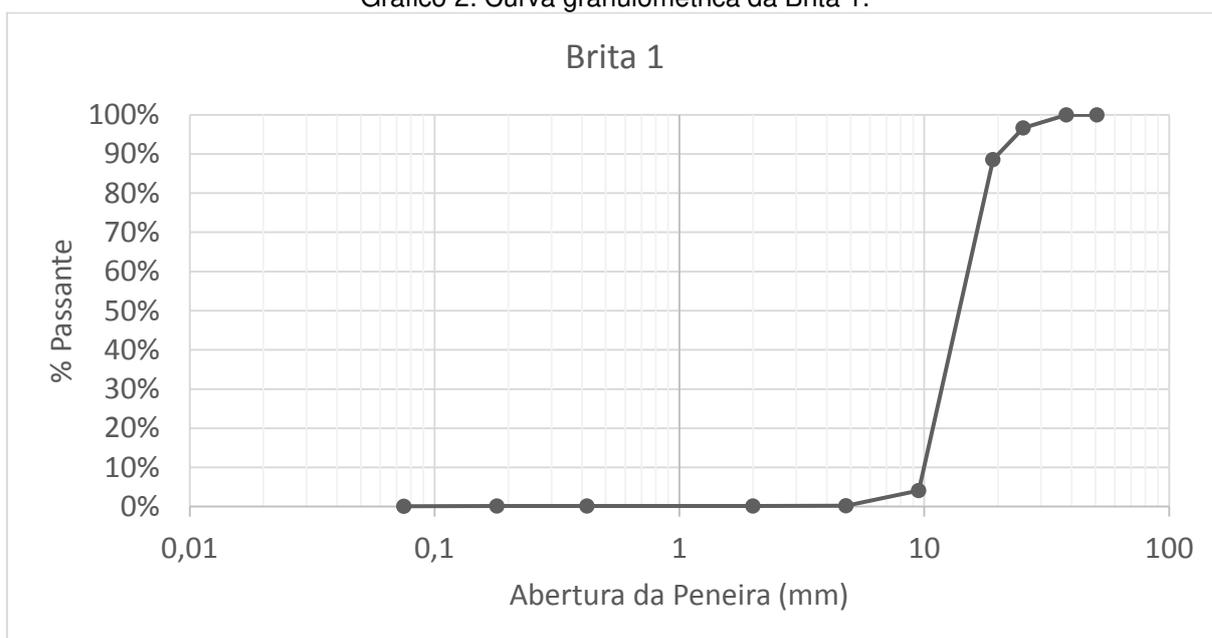
A curva granulométrica obtida para brita 1 está apresentada na tabela 10 e gráfico 6.

Tabela 2: Granulometria da Brita 1.

Brita 1		
Peneira	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100,00%
1 1/2"	38,1	100,00%
1"	25,4	96,65%
3/4"	19,1	88,57%
1/2"	12,7	-
3/8"	9,5	4,07%
4	4,8	0,21%
10	2	0,18%
40	0,42	0,17%
80	0,18	0,15%
200	0,075	0,08%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 2: Curva granulométrica da Brita 1.



Fonte: Autor, 2018.

Observando a curva obtida, percebe-se que a brita 1 possui granulometria uniforme, com grãos predominantemente do mesmo diâmetro.

4.1.1.2 Brita 0

A curva granulométrica obtida para brita 0 está apresentada na tabela 11 e gráfico 7.

Tabela 3: Granulometria da Brita 0.

Brita 0		
Peneira	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100,00%
1 1/2"	38,1	100,00%
1"	25,4	100,00%
3/4"	19,1	99,66%
1/2"	12,7	-
3/8"	9,5	77,12%
4	4,8	11,30%
10	2	0,59%
40	0,42	0,36%
80	0,18	0,26%
200	0,075	0,07%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 3: Curva granulométrica da Brita 0.



Fonte: Autor, 2018.

Observando a curva obtida, percebe-se que a brita 0 possui também granulometria aproximada a curva uniforme.

4.1.1.3 Pó de Brita

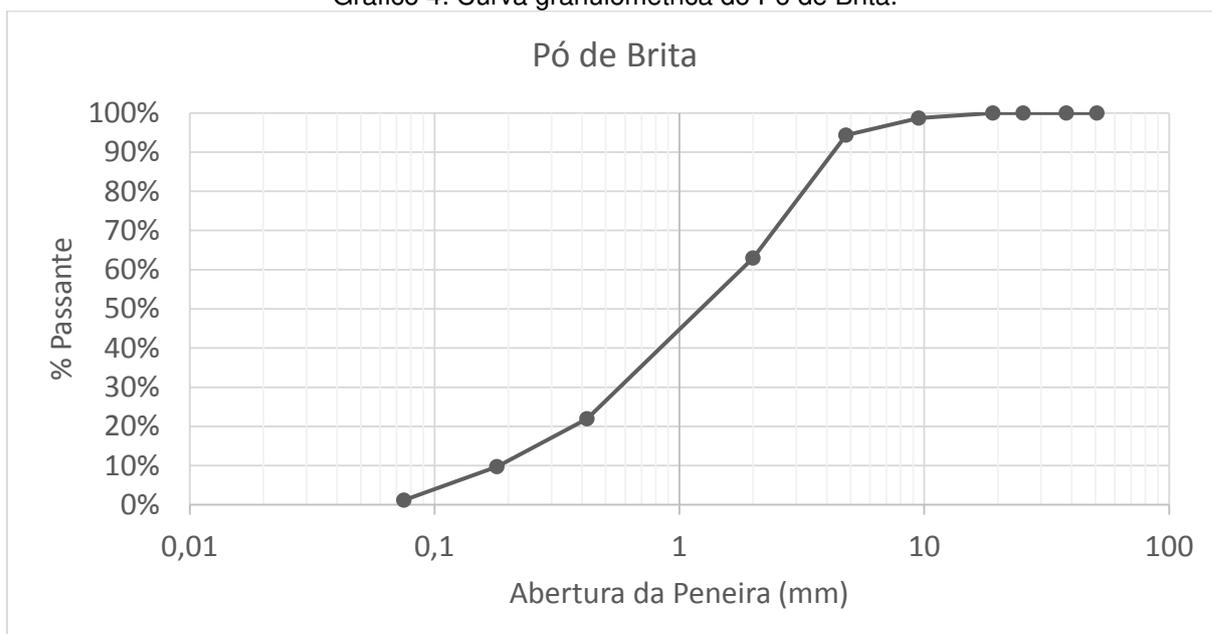
A curva granulométrica obtida para o pó de brita está apresentada na tabela 12 e gráfico 8.

Tabela 4: Granulometria do Pó de Brita.

Pó de Brita		
Peneira	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100,00%
1 1/2"	38,1	100,00%
1"	25,4	100,00%
3/4"	19,1	100,00%
1/2"	12,7	-
3/8"	9,5	98,66%
4	4,8	94,31%
10	2	62,95%
40	0,42	21,97%
80	0,18	9,74%
200	0,075	1,17%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 4: Curva granulométrica do Pó de Brita.



Fonte: Autor, 2018.

Verificando a curva obtida, conclui-se que o pó de brita possui uma granulação contínua, possuindo grãos de diversos diâmetros.

4.1.1.4 Areia

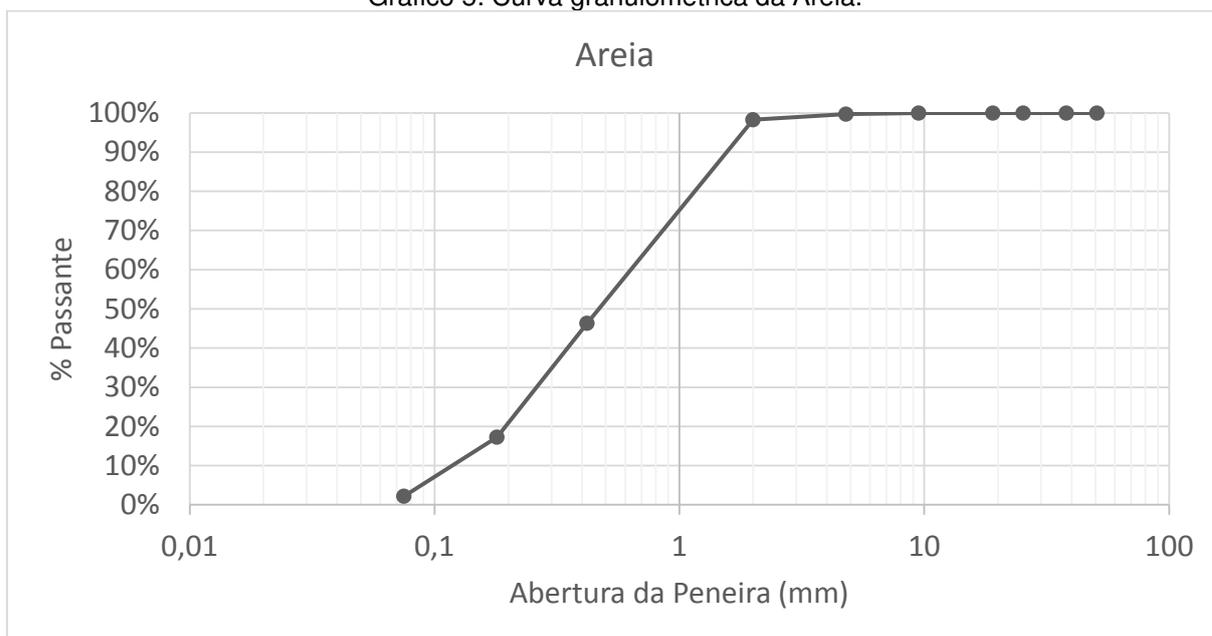
A curva granulométrica obtida para a areia está apresentada na tabela 13 e gráfico 9.

Tabela 5: Granulometria da Areia.

Areia		
Peneira	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100,00%
1 1/2"	38,1	100,00%
1"	25,4	100,00%
3/4"	19,1	100,00%
1/2"	12,7	-
3/8"	9,5	100,00%
4	4,8	99,68%
10	2	98,27%
40	0,42	46,35%
80	0,18	17,27%
200	0,075	2,20%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 5: Curva granulométrica da Areia.



Fonte: Autor, 2018.

Verificando a curva obtida, conclui-se que o pó de brita possui uma granulção próxima da contínua, possuindo grãos de diversos diâmetros.

4.1.1.5 Filler

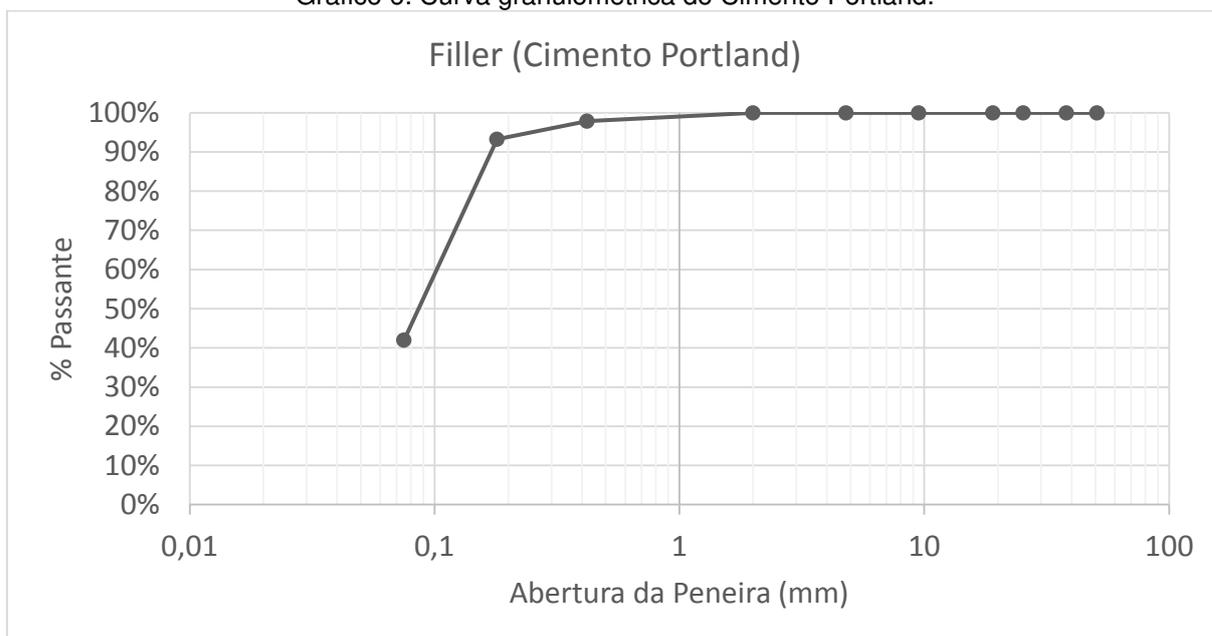
O material de enchimento utilizado foi o cimento Portland, e a curva granulométrica obtida para ele está apresentada na tabela 14 e gráfico 10.

Tabela 6: Granulometria do Cimento Portland.

Cimento Portland		
Peneira	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100,00%
1 1/2"	38,1	100,00%
1"	25,4	100,00%
3/4"	19,1	100,00%
1/2"	12,7	-
3/8"	9,5	100,00%
4	4,8	100,00%
10	2	100,00%
40	0,42	97,84%
80	0,18	93,25%
200	0,075	41,99%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 6: Curva granulométrica do Cimento Portland.



Fonte: Autor, 2018.

A partir da tabela e curva obtida é possível perceber que o cimento Portland possui uma quantidade predominante de materiais finos, com diâmetro máximo de 0,42 mm.

4.1.1.6 RAP

O resíduo da fresagem estudado foi analisado em dois estados, no estado natural, quando seus grãos possuem uma camada de cobertura de ligante, e após a execução do ensaio de extração do asfalto, conforme DNER-ME 053/94.

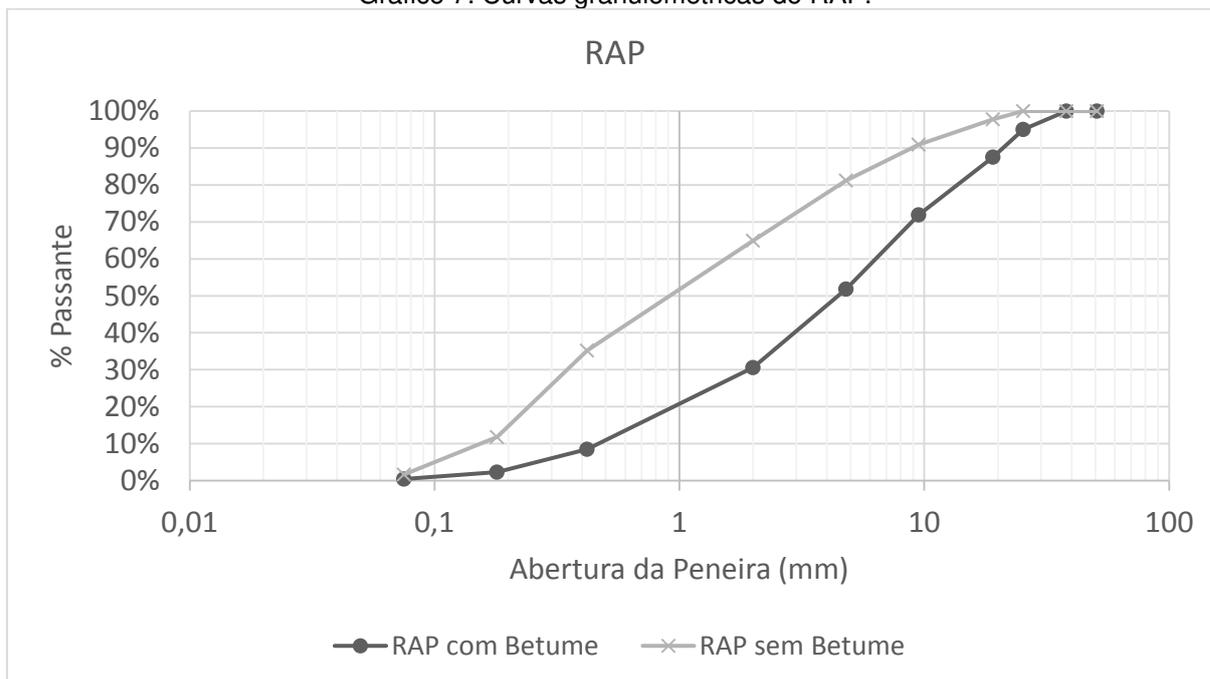
A granulometria obtida para o RAP, nas duas condições é apresentada na tabela 15 e gráfico 11.

Tabela 7: Granulometria do RAP.

RAP		Com Betume	Sem Betume
Peneira	Abertura (mm)	% Passante	% Passante
2"	50,8	100%	100%
1 1/2"	38,1	100%	100%
1"	25,4	95%	100%
3/4"	19,1	88%	98%
1/2"	12,7	-	-
3/8"	9,5	72%	91%
4	4,8	52%	81%
10	2	31%	65%
40	0,42	8%	35%
80	0,18	2%	12%
200	0,075	0%	2%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 7: Curvas granulométricas do RAP.



Fonte: Autor, 2018.

Analisando as curvas granulométricas encontradas, verifica-se que o RAP, tanto na condição natural quanto na condição sem betume, possui uma graduação contínua, possuindo desde grãos finos até os mais graúdos.

Comparando as duas curvas obtidas, confirma-se o esperado, a redução do diâmetro dos grãos de RAP, uma vez que a camada de ligante que os reveste é retirada.

4.1.2 Ensaio de Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles possui a finalidade de simular e mensurar o desgaste dos agregados graúdos. Sendo assim esse ensaio foi realizado com amostras de RAP, brita 1 e brita 0, possíveis materiais componentes das misturas asfálticas.

Para as amostras de RAP e brita 1 foram selecionadas frações de material na graduação A, segundo a norma DNER-ME 035/98. Conseqüentemente, devido a adoção dessa graduação, foi necessária uma carga abrasiva de 12 esferas de aço.

A fração de brita 0 ensaiada foi enquadrada na graduação C, que necessita de uma carga abrasiva de apenas 8 esferas de aço.

Vale ressaltar que todos os agregados foram ensaiados por três vezes, visando a obtenção de um valor mais preciso dos resultados.

4.1.2.1 RAP

O resultado de abrasão obtido para o RAP foi de 42,7% (Tabela 16), número satisfatório segundo as normas de revestimento asfáltico reciclado, DNIT 033/2005 e DNIT 034/2005, que fixam um valor máximo de 50% de desgaste.

Tabela 8: Ensaio de Abrasão a Los Angeles do RAP.

RAP			
Peso Amostra Inicial	Peso Amostra Final	Abrasão a Los Angeles	Média
4978	2889	42%	42,7%
5009	2856	43%	
4999	2842	43%	

Fonte: Autor, 2018.

4.1.2.2 Brita 1

A brita 1 ensaiada possui um desgaste de 18,9%, conforme a tabela 17. Logo, a brita 1 também possui desgaste satisfatório, podendo ser utilizada como agregado para misturas asfálticas.

Tabela 9: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 1.

Brita 1			
Peso Amostra Inicial (g)	Peso Amostra Final (g)	Abrasão a Los Angeles	Média
5004	4054	19%	18,9%
5000	4121	18%	
4992	3984	20%	

Fonte: Autor, 2018.

4.1.2.3 Brita 0

A abrasão da brita 0 encontrada foi de 19,4% (Tabela 18), valor aceitável tanto para normas de misturas asfálticas recicladas (DNIT 033/2005 E DNIT 034/2005) quanto para normas de misturas asfálticas convencionais (DNIT 031/2006). Em ambos os casos o desgaste deve ser igual ou inferior a 50%.

Tabela 10: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 0.

Brita 0			
Peso Amostra Inicial	Peso Amostra Final	Abrasão a Los Angeles	Média
5010	4063	19%	19,4%
5001	3999	20%	
5000	4043	19%	

Fonte: Autor, 2018.

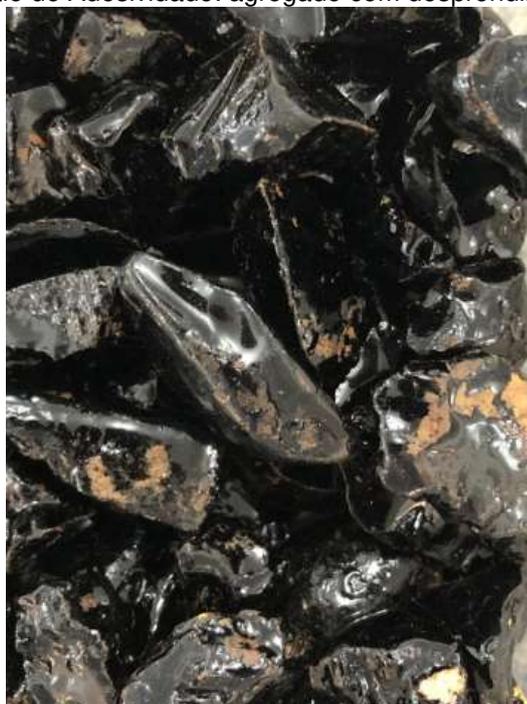
4.1.3 Ensaio de Adesividade

O ensaio de adesividade verifica a característica da ligação entre o ligante betuminoso a superfície do agregado. Para esse ensaio foram avaliadas amostras de brita 1 e brita 0.

Contudo, ambos os resultados obtidos foram insatisfatórios, visto que após o período de 72 horas previsto na DNER-ME 078/94, existiu desprendimento parcial de ligante da superfície dos grãos de brita. Nesse caso é necessário a adição de um aditivo melhorador de adesividade, como por exemplo o DOPE, modificando a característica da ligação ligante-agregado.

Através de uma análise local, concluiu-se que as jazidas da região não possuem agregados britados com adesividade aceitável segundo as normas. Entretanto, no que se refere aos ensaios volumétricos e mecânicos que são utilizados no trabalho para efeito de comparação entre as dosagens de RAP e de mistura convencional, não há influência significativa da insuficiência de adesividade nos seus resultados.

Figura 28: Ensaio de Adesividade: agregado com desprendimento de ligante.



Fonte: Autor, 2018.

4.1.4 Ensaio de Densidade e Absorção

Densidade e absorção são características significativas quando se trata de utilização de agregados para pavimentação. Todos os componentes da mistura devem ser devidamente estudados a fim de obter sua massa específica e absorção.

Os agregados submetidos a esse ensaio são os agregados graúdos, como a brita 1, brita 0 e o RAP. No caso específico do RAP, o material é dividido em dois, RAP como agregado graúdo e RAP como agregado miúdo, para posterior cálculo da densidade via média ponderada.

Os ensaios foram realizados duas vezes com o mesmo tipo de amostra, para maior precisão dos resultados.

4.1.4.1 Brita 1

Os resultados de densidade e absorção da brita 1 foram registrados na tabela 19.

Tabela 11: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 1.

Brita 1			
	1º Ensaio	2º Ensaio	
Massa Seca (g)	2304,1	1893,2	
Massa Superfície Seca (g)	2335,2	1906,6	
Massa Submersa (g)	850,2	701,0	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,710	2,701	2,705
Absorção (%)	1,35	0,71	1,03

Fonte: Autor, 2018.

4.1.4.2 Brita 0

Para brita 0, os valores de densidade e absorção foram registrados na tabela 20.

Tabela 12: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 0.

Brita 0			
	1º Ensaio	2º Ensaio	
Massa Seca (g)	2133,3	1797,7	
Massa Superfície Seca (g)	2156,4	1817,0	
Massa Submersa (g)	803,5	669,6	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,655	2,685	2,670
Absorção (%)	1,08	1,07	1,08

Fonte: Autor, 2018.

4.1.4.3 RAP

Por fim, para a amostra de agregado graúdo do RAP, os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 13: Ensaio de Densidade e Absorção do RAP Graúdo.

RAP			
	1º Ensaio	2º Ensaio	
Massa Seca (g)	1853,6	1935,8	
Massa Superfície Seca	1869,3	1946,0	
Massa Submersa (g)	740,5	781,8	Média
Massa Específica (g/cr)	2,503	2,476	2,490
Absorção	0,85%	0,53%	0,69%

Fonte: Autor, 2018.

4.1.5 Ensaio de Densidade por meio do Frasco Chapman

Esse é outro tipo de ensaio para determinação da densidade agregados, entretanto, esse ensaio utiliza uma amostragem de agregados miúdos. Os agregados ensaiados por esse método de ensaio são a areia, o pó de brita e a fração miúda do RAP.

4.1.5.1 Areia

O valor da leitura do frasco Chapman quando foi adicionado areia foi de 387 mm, densidade exposta na tabela 22.

Tabela 14: Ensaio de Densidade da Areia.

Areia	
Leitura (mm)	387
Massa Específica (g/cm ³)	2,674

Fonte: Autor, 2018.

4.1.5.2 Pó de Brita

Para o pó de brita, a leitura registrada foi de 379 mm, como disposto na tabela 23.

Tabela 15: Ensaio de Densidade do Pó de Brita.

Pó de Brita	
Leitura (mm)	379
Massa Específica (g/cm ³)	2,793

Fonte: Autor, 2018.

4.1.5.3 RAP

O RAP passante na peneira com abertura 4,8 mm, quando adicionado no frasco Chapman, apresentou uma leitura de 433 mm, resultando nos valores da tabela 24.

Tabela 16: Ensaio de Densidade do RAP Miúdo.

RAP	
Leitura (mm)	433
Massa Específica (g/cm ³)	2,146

Fonte: Autor, 2018.

A partir das densidades do RAP com granulometria de agregado graúdo e miúdo, bem como as porcentagens das respectivas frações, pode-se então obter a real densidade desse agregado. Os resultados estão dispostos na tabela 19:

Tabela 17: Densidade do RAP.

RAP		
	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
%	79,50	18,78
Densidade (g/cm ³)	2,146	2,490
Densidade Média (g/cm ³)	2,212	

Fonte: Autor, 2018.

4.1.6 Ensaio de Massa Específica Real para Material Pulverulento

O ensaio para massa específica real foi realizado com uma amostra de cimento Portland, material de enchimento para confecção e estudo dos corpos de prova.

As leituras realizadas bem como a massa específica obtida é explicitado na tabela 26.

Tabela 18: Massa Específica do cimento Portland.

Filler	
Cimento Portland	
Leitura Inicial (mm)	0,0
Leitura Final (mm)	20,8
Massa Específica (g/cm ³)	2,885

Fonte: Autor, 2018.

4.1.7 Ensaio de Índice de Forma

O ensaio de índice de forma busca avaliar a forma geométrica dos grãos dos agregados. Para utilização dos agregados para pavimentação, a brita 1 e o RAP precisam ser caracterizados segundo a forma.

Segundo as normas que regulamentam as misturas asfálticas convencionais e recicladas, o índice de forma para agregados graúdos de pavimentos deve ser superior a 0,5, classificando os grãos como cúbicos.

4.1.7.1 Brita 1

Foram ensaiados 200 grãos de brita 1, conforme granulometria obtida para o agregado. A tabela apresenta detalhadamente as dimensões obtidas no ensaio de todos os grãos, no apêndice B. O resumo das classificações obtidas está expresso na tabela abaixo:

Tabela 19: Resumo do Índice de Forma da Brita 1.

Brita 1		
	Quantidade	%
Lamelar	35	17,50
Cúbica	146	73,00
Alongada	16	8,00
Alongada-Lamelar	3	1,50
Média		
b/a	0,74	CÚBICA
c/b	0,67	

Fonte: Autor, 2018.

Somando um total de 146 grãos cúbicos, e verificando as relações calculadas, conclui-se que a brita 1 em sua maioria possui forma cúbica e pode ser utilizada em misturas asfálticas.

4.1.7.2 RAP

Para o RAP também foram analisadas as três dimensões de 200 grãos diferentes. Os resultados detalhados também estão disponíveis no apêndice A. A tabela a seguir mostra o resumo dos grãos ensaiados.

Tabela 20: Resumo do Índice de Forma do RAP.

RAP		
	Quantidade	%
Lamelar	75	37,50
Cúbica	109	54,50
Alongada	14	7,00
Alongada-Lamelar	2	1,00
Média		
b/a	0,74	CÚBICA
c/b	0,56	

Fonte: Autor, 2018.

Conclui-se, portanto, com 109 grãos cúbicos, que o RAP é predominantemente cúbico, resultado satisfatório para pavimentação.

4.1.8 Ensaio de Teor de Betume (Rotarex)

Esse ensaio possui significativa importância visto que a quantificação do betume no RAP estudado permitirá calcular o teor de ligante residual nas misturas asfálticas recicladas.

O RAP foi submetido ao equipamento Rotarex por três vezes, para determinação precisa do teor de betume. O resultado final foi um percentual de 5,10% de CAP no agregado coletado. Os valores obtidos estão detalhados na tabela 23.

Tabela 21: Ensaio de Teor de Betume (Rotarex).

Ensaio Rotarex					
Amostra 1 (g)	1018,6	Amostra 2 (g)	940,7	Amostra 3 (g)	1070,9
Bandeja (g)	1422,7	Bandeja (g)	1422,2	Bandeja (g)	1422,3
Filtro (g)	11,7	Filtro (g)	12,1	Filtro (g)	12,7
Ciclos	7	Ciclos	7	Ciclos	8
Peso Final Conjunto (g)	2399,8	Peso Final Conjunto (g)	2328,2	Peso Final Conjunto (g)	2451,4
Peso Amostra Final (g)	965,4	Peso Amostra Final (g)	893,9	Peso Amostra Final (g)	1016,4
Porcentagem de Betume	5,22%	Porcentagem de Betume	4,98%	Porcentagem de Betume	5,09%
Porcentagem de Betume Média				5,10%	

Fonte: Autor, 2018.

4.2 Ensaio Laboratoriais para Ligante

No presente trabalho foi definido a utilização do ligante cimento asfáltico de petróleo (CAP) do tipo 50/70. Dessa forma foram realizados ensaios para análise das características do ligante, verificando os parâmetros para aceitação e uso em misturas asfálticas.

4.2.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

A viscosidade é uma das características mais importantes do ligante, uma vez que é ela quem define as temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica.

Para caracterização do CAP 50/70 foram definidas as temperaturas de 135°C, 149°C, 163°C e 177°C para análise da viscosidade. Os resultados obtidos foram o seguinte:

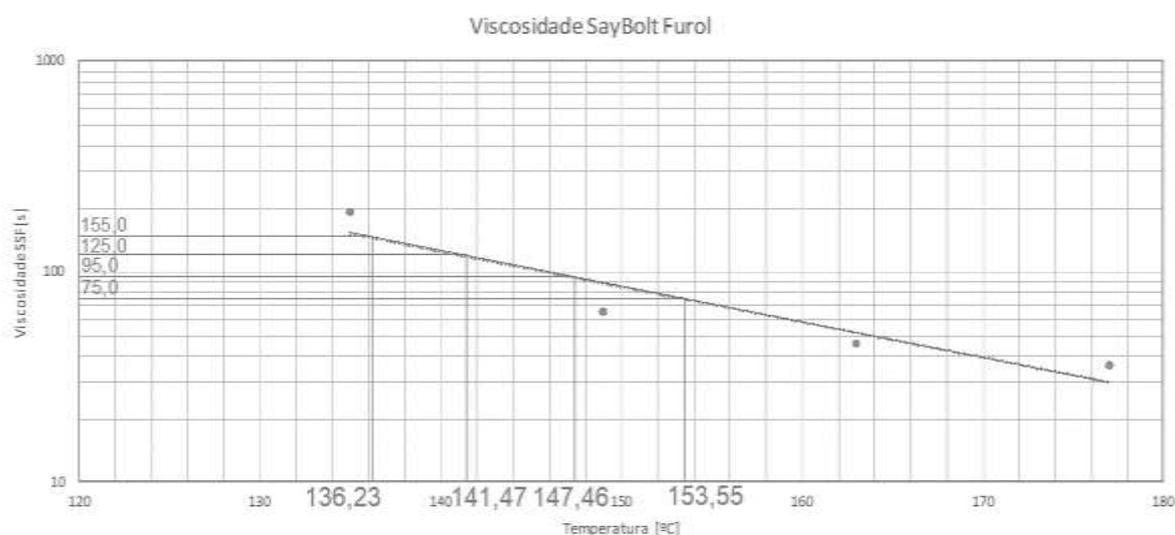
Quadro 2: Ensaio de Viscosidade do CAP.

Viscosidade Saybolt-Furol	
°C	sSF
135	194
149	65
163	46
177	36

Fonte: Autor, 2018.

Analisando os resultados segundo as especificações da Resolução ANP nº19/2005, os valores obtidos estão dentro dos padrões, para o CAP 50/70. Os valores acima, plotados, geram o gráfico 14.

Gráfico 8: Viscosidade Saybolt-Furol.



Fonte: Autor, 2018.

Concluindo, as faixas de temperatura definidas pelo ligante são apresentadas no quadro 3.

Quadro 3: Temperaturas de Mistura e Compactação das Misturas Asfálticas.

	CAP 50/70
Temperatura de Mistura	147,46°C a 153,55°C
Temperatura de Compactação	136,23°C a 141,47°C

Fonte: Autor, 2018.

4.2.2 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração foi realizado com o ligante CAP 50/70 em três cápsulas distintas, para verificação da penetração média.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, estando de acordo com as especificações fornecidas pela ANP (2005), variando entre 50 mm e 70 mm (Tabela 30).

Tabela 22: Ensaio de Penetração do CAP 50/70.

Ensaio de Penetração				
	Leitura Inicial	Leitura Final	Penetração (mm)	Penetração Média (mm)
Capsula 21	53	118	65	63,67
	118	181	63	
	88	151	63	
Capsula 07	99	162	63	62,33
	53	116	63	
	94	155	61	
Capsula 21	284	342	58	56,67
	231	287	56	
	84	140	56	

Fonte: Autor, 2018.

4.2.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado com três amostras distintas, registrando a temperatura em que cada bola atingia a placa metálica. Ainda segundo a ANP (2005), o ponto de amolecimento obtido é aceitável, visto que a temperatura mínima especificada é de 46°C.

Tabela 23: Ensaio de Ponto de Amolecimento do CAP.

CAP 50/70		
	Ponto de Amolecimento (°C)	Temperatura Média (°C)
1º Ensaio	51	51,33
2º Ensaio	52	
3º Ensaio	51	

Fonte: Autor, 2018.

4.3 Dosagem Marshall

Após confecção e moldagem das 20 misturas distintas e 60 corpos de prova, numerados de 1 a 60, cada um deles foi avaliado quanto suas dimensões, peso seco ao ar, peso submerso, estabilidade e fluência. Como cada mistura com seu respectivo teor de ligante foi moldado três vezes, os corpos de prova que afastarem-se do padrão serão desconsiderados, caso afetem a tendência das linhas dos gráficos.

Cada uma desses quesitos é utilizado para o cálculo de parâmetros como volume (V), densidade aparente (Gmb), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios (Vv), vazios preenchidos com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e a relação betume/vazios (RBV).

Todos esses parâmetros foram estudados e comparados com a variação de ligante dentro de cada mistura, resultando em diversos gráficos que podem ser utilizados para determinação do teor ótimo de ligante.

As misturas recicladas, misturas A, B e C, são reguladas pelas normas DNIT 033/2005 e DNIT 034/2005. Ao passo que a mistura asfáltica convencional, mistura D, é normatizada pela norma do DNIT 031/2006.

As características, bem como os parâmetros calculados para cada corpo de prova foram registrados em quatro tabelas, separadas por misturas A, B, C e D, que devido a grande proporção estão detalhadas no apêndice C.

Nos tópicos 4.4.1 a 4.4.4 seguem as curvas determinadas pelos parâmetros da dosagem Marshall, de todas as misturas, de acordo com a variação de ligante.

O teor ótimo de ligante foi definido por meio do método que relaciona os parâmetros de volume de vazios e relação betume/vazios, com auxílio de um gráfico combinado.

4.3.1 Misturas Asfálticas Estudadas

No presente trabalho foram definidas porcentagens base de RAP nas misturas asfálticas recicladas, tipo CAUQ, para análise da influência desse material na estabilidade e resistência do pavimento reciclado. As misturas com porcentagens

de 61% (Mistura A), 50% (Mistura B), 25% de RAP (Mistura C) foram enquadradas nas normas DNIT 033/2005 e DNIT 034/2005 pelo método das tentativas, com seus agregados virgens necessários para ajustamento na faixa granulométrica B, empregada tanto para camada de ligação quanto para camada de rolamento de pavimentos.

A determinação dos teores de CAP iniciais se deram a partir de cálculo e verificação das porcentagens de betume já presentes no RAP, além da necessidade de CAP novo adicional. Todos os corpos de prova em projeto para dosagem possuem teores iniciais entre 4,5% e 7,5% de CAP, como sugerem as normas regulamentadoras.

Além disso foi estudado também uma mistura asfáltica sem RAP (Mistura D), projetada conforme DNIT 031/2006 – ES, norma que regulamenta misturas de concreto asfáltico convencional, funcionando como um grupo controle, para análise e comparação dos parâmetros e características das misturas.

4.3.1.1 Mistura A – 61% RAP

4.3.1.1.1 Enquadramento Granulométrico

A mistura A possui o seguinte traço:

- 61% RAP;
- 24% Brita 1;
- 10% Brita 0;
- 5% Filler.

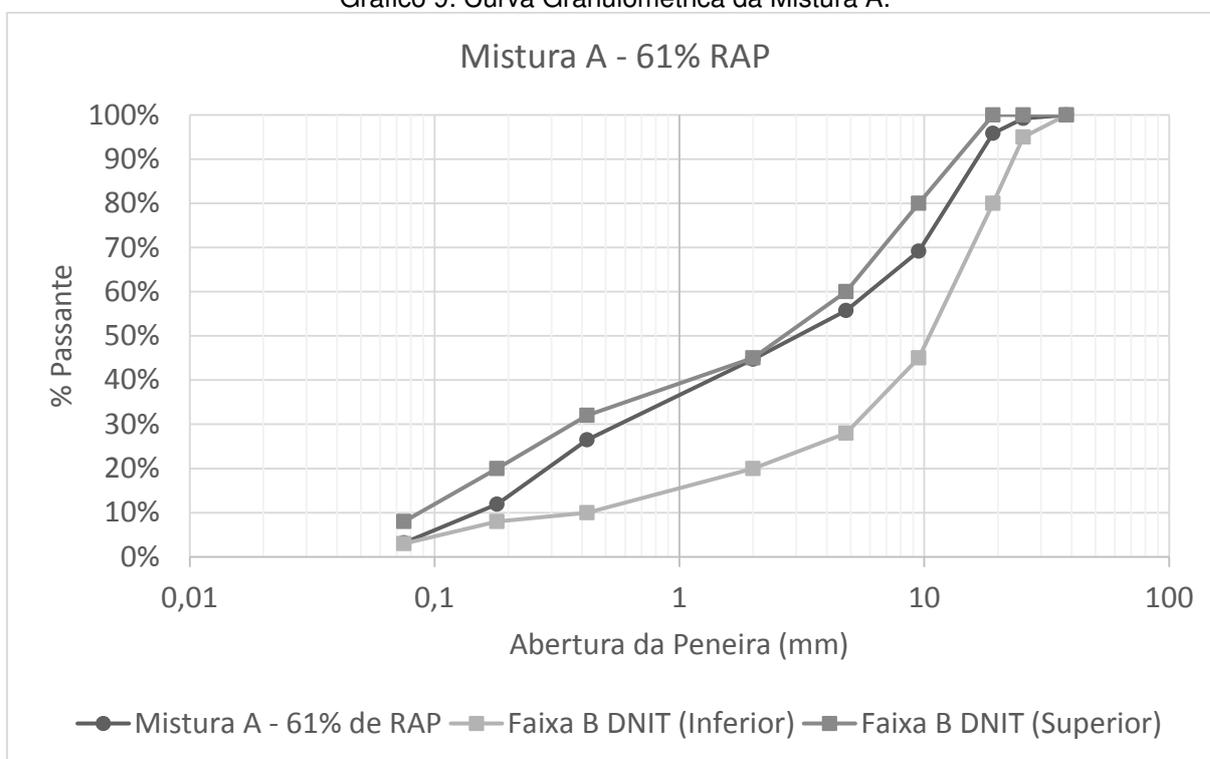
Segundo essa proporção é dada a granulometria da mistura:

Tabela 24: Faixa Granulométrica da Mistura A.

Mistura A - 61% de RAP											
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filler	Pó de Brita		Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa B DNIT		Granulometria do Traço
		% no Traço							% Min	% Máx	
		0,00%	5,00%	0,00%	10,00%	24,00%	61,00%				
% Passante											
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	-	-	-
1 1/2"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	96,65%	100,00%	95,00%	100,00%	99,20%
3/4"	19,1	100,00%	100,00%	100,00%	99,66%	88,57%	97,74%	97,74%	80,00%	100,00%	95,84%
1/2"	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	100,00%	100,00%	98,66%	77,12%	4,07%	90,93%	90,93%	45,00%	80,00%	69,15%
4	4,8	99,68%	100,00%	94,31%	11,30%	0,21%	81,22%	81,22%	28,00%	60,00%	55,72%
10	2	98,27%	100,00%	62,95%	0,59%	0,18%	64,95%	64,95%	20,00%	45,00%	44,73%
40	0,42	46,35%	97,84%	21,97%	0,36%	0,17%	35,21%	35,21%	10,00%	32,00%	26,45%
80	0,18	17,27%	93,25%	9,74%	0,26%	0,15%	11,81%	11,81%	8,00%	20,00%	11,93%
200	0,075	2,20%	41,99%	1,17%	0,07%	0,08%	1,72%	1,72%	3,00%	8,00%	3,17%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 9: Curva Granulométrica da Mistura A.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.1.1.2 Teor de Ligante Piloto

O teor de ligante piloto para a mistura A foi definido como 3% de CAP adicional (6,02% de CAP residual), de maneira que nenhum dos corpos de prova será moldado fora das especificações do DNIT (2005), que fixam o teor de ligante entre 4,5% e 7,5%.

Conforme procedimento de dosagem Marshall, os outros teores de CAP são definidos como -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0%, resultando em 5 grupos de corpos de prova.

Cada um desses grupos possui um conjunto de três corpos de prova distintos, que serão estudados um a um, para uma maior precisão na dosagem do teor ótimo de ligante de cada mistura. No total serão moldados 15 corpos de prova para cada mistura.

Tabela 25: Traço dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura A.

CP 61% RAP	Massa								
Ligante	-								
CAP	2,00% 24 g	CAP	2,50% 30 g	CAP	3,00% 36 g	CAP	3,50% 42 g	CAP	4,00% 48 g
Agregados	-								
Areia	0,00% g								
Filler	4,90% 59 g	Filler	4,88% 59 g	Filler	4,85% 58 g	Filler	4,83% 58 g	Filler	4,80% 58 g
Pó de Brita	0,00% g								
Brita 0	9,80% 118 g	Brita 0	9,75% 117 g	Brita 0	9,70% 116 g	Brita 0	9,65% 116 g	Brita 0	9,60% 115 g
Brita 1	23,52% 282 g	Brita 1	23,40% 281 g	Brita 1	23,28% 279 g	Brita 1	23,16% 278 g	Brita 1	23,04% 276 g
RAP	59,78% 717 g	RAP	59,48% 714 g	RAP	59,17% 710 g	RAP	58,87% 706 g	RAP	58,56% 703 g
CAP Total	5,05%	CAP Total	5,53%	CAP Total	6,02%	CAP Total	6,50%	CAP Total	6,98%

Fonte: Autor, 2018.

4.3.1.2 Mistura B – 50% RAP

4.3.1.2.1 Enquadramento Granulométrico

A mistura B possui o seguinte traço:

- 50% RAP;
- 30% Brita 1;
- 7% Brita 0;
- 5% Pó de Brita;
- 5% Filler;
- 3% Areia.

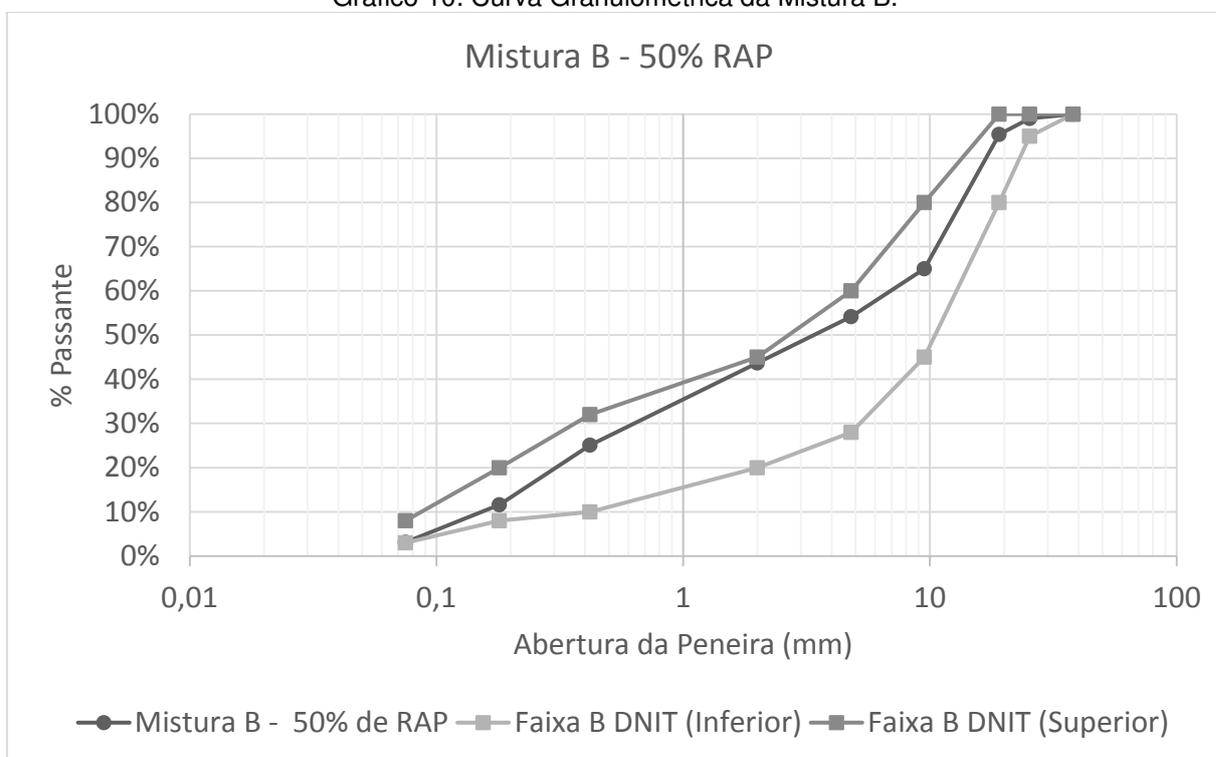
Segundo essa proporção é dada a granulometria da mistura:

Tabela 26: Faixa Granulométrica da Mistura B.

Mistura B - 50% de RAP										
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filler	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa B DNIT		Granulometria do Traço
		% no Traço						% Min	% Máx	
		3,00%	5,00%	5,00%	7,00%	30,00%	50,00%			
% Passante										
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	-	-	-
1 1/2"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	96,65%	100,00%	95,00%	100,00%	99,00%
3/4"	19,1	100,00%	100,00%	100,00%	99,66%	88,57%	97,74%	80,00%	100,00%	95,42%
1/2"	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	100,00%	100,00%	98,66%	77,12%	4,07%	90,93%	45,00%	80,00%	65,01%
4	4,8	99,68%	100,00%	94,31%	11,30%	0,21%	81,22%	28,00%	60,00%	54,17%
10	2	98,27%	100,00%	62,95%	0,59%	0,18%	64,95%	20,00%	45,00%	43,67%
40	0,42	46,35%	97,84%	21,97%	0,36%	0,17%	35,21%	10,00%	32,00%	25,06%
80	0,18	17,27%	93,25%	9,74%	0,26%	0,15%	11,81%	8,00%	20,00%	11,63%
200	0,075	2,20%	41,99%	1,17%	0,07%	0,08%	1,72%	3,00%	8,00%	3,11%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 10: Curva Granulométrica da Mistura B.



Fonte: Autor, 2018.

4.3.1.2.2 Teor de Ligante Piloto

Para a mistura B, o traço piloto possui 3,50% de ligante adicional, determinando os demais grupos de corpos de prova com 2,50%, 3,00%, 4,00% e 4,50% de CAP novo.

Os seguintes corpos de prova serão moldados para dosagem da mistura B:

Tabela 27: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura B.

CP 50% RAP	Massa								
Ligante	-								
CAP	2,50% 30 g	CAP	3,00% 36 g	CAP	3,50% 42 g	CAP	4,00% 48 g	CAP	4,50% 54 g
Agregados	-								
Areia	2,93% 35 g	Areia	2,91% 35 g	Areia	2,90% 35 g	Areia	2,88% 35 g	Areia	2,87% 34 g
Filler	4,88% 59 g	Filler	4,85% 58 g	Filler	4,83% 58 g	Filler	4,80% 58 g	Filler	4,78% 57 g
Pó de Brita	4,88% 59 g	Pó de Brita	4,85% 58 g	Pó de Brita	4,83% 58 g	Pó de Brita	4,80% 58 g	Pó de Brita	4,78% 57 g
Brita 0	6,83% 82 g	Brita 0	6,79% 81 g	Brita 0	6,76% 81 g	Brita 0	6,72% 81 g	Brita 0	6,69% 80 g
Brita 1	29,25% 351 g	Brita 1	29,10% 349 g	Brita 1	28,95% 347 g	Brita 1	28,80% 346 g	Brita 1	28,65% 344 g
RAP	48,75% 585 g	RAP	48,50% 582 g	RAP	48,25% 579 g	RAP	48,00% 576 g	RAP	47,75% 573 g
CAP Total	4,98%	CAP Total	5,47%	CAP Total	5,96%	CAP Total	6,45%	CAP Total	6,93%

Fonte: Autor, 2018.

4.3.1.3 Mistura C – 25% RAP

4.3.1.3.1 Enquadramento Granulométrico

A mistura C possui o seguinte traço:

- 25% RAP;
- 40% Brita 1;
- 10% Brita 0;
- 15% Pó de Brita;
- 7% Filler;
- 3% Areia.

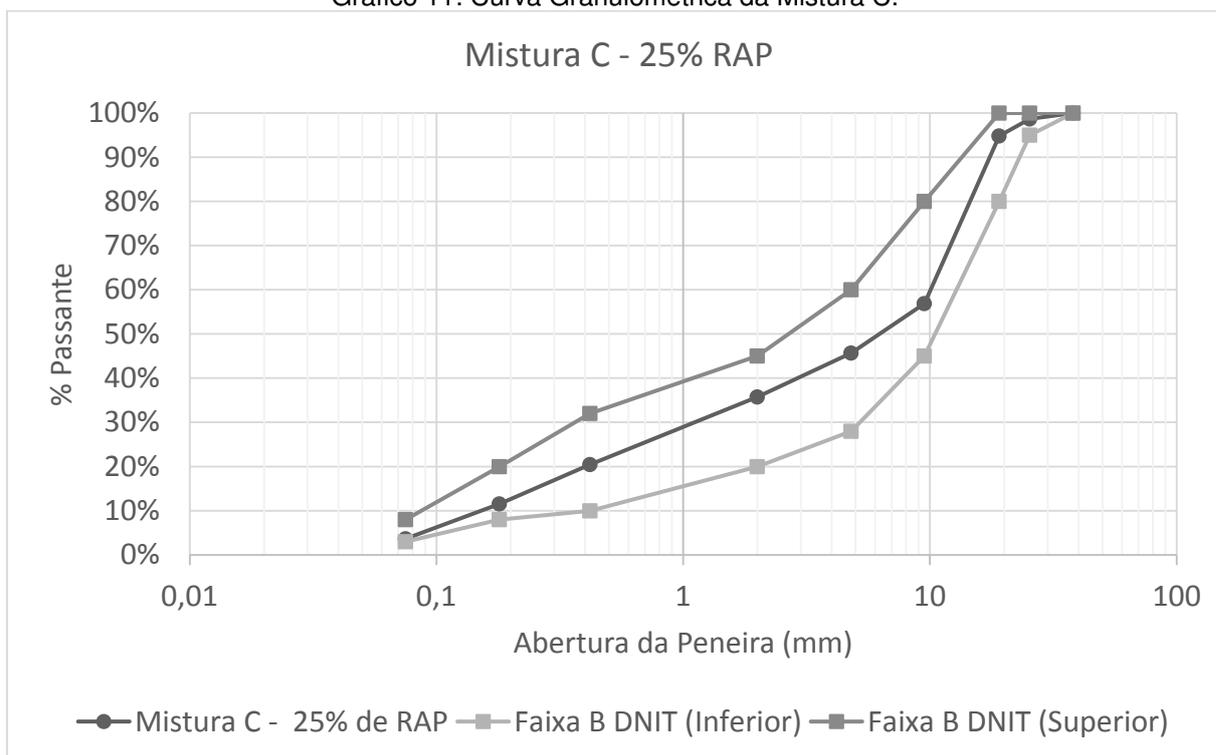
Segundo essa proporção é dada a granulometria da mistura:

Tabela 28: Faixa Granulométrica da Mistura C.

Mistura C - 25% de RAP										
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filler	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa B DNIT		Granulometria do Traço
		% no Traço						% Min	% Máx	
		3,00%	7,00%	15,00%	10,00%	40,00%	25,00%			
		% Passante								
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	-	-	-
1 1/2"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	96,65%	100,00%	95,00%	100,00%	98,66%
3/4"	19,1	100,00%	100,00%	100,00%	99,66%	88,57%	97,74%	80,00%	100,00%	94,83%
1/2"	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	100,00%	100,00%	98,66%	77,12%	4,07%	90,93%	45,00%	80,00%	56,87%
4	4,8	99,68%	100,00%	94,31%	11,30%	0,21%	81,22%	28,00%	60,00%	45,66%
10	2	98,27%	100,00%	62,95%	0,59%	0,18%	64,95%	20,00%	45,00%	35,76%
40	0,42	46,35%	97,84%	21,97%	0,36%	0,17%	35,21%	10,00%	32,00%	20,44%
80	0,18	17,27%	93,25%	9,74%	0,26%	0,15%	11,81%	8,00%	20,00%	11,54%
200	0,075	2,20%	41,99%	1,17%	0,07%	0,08%	1,72%	3,00%	8,00%	3,65%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 11: Curva Granulométrica da Mistura C.



4.3.1.3.2 Teor de Ligante Piloto

O teor de ligante piloto adicional para a mistura C é de 5,00%, totalizando um CAP residual de 6,21%. Os demais corpos de prova estão detalhados na tabela a seguir:

Tabela 29: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura C.

CP	Massa								
25% RAP									
Ligante	-								
CAP	4,00% 48 g	CAP	4,50% 54 g	CAP	5,00% 60 g	CAP	5,50% 66 g	CAP	6,00% 72 g
Agregados	-								
Areia	2,88% 35 g	Areia	2,87% 34 g	Areia	2,85% 34 g	Areia	2,84% 34 g	Areia	2,82% 34 g
Filler	6,72% 81 g	Filler	6,69% 80 g	Filler	6,65% 80 g	Filler	6,62% 79 g	Filler	6,58% 79 g
Pó de Brita	14,40% 173 g	Pó de Brita	14,33% 172 g	Pó de Brita	14,25% 171 g	Pó de Brita	14,18% 170 g	Pó de Brita	14,10% 169 g
Brita 0	9,60% 115 g	Brita 0	9,55% 115 g	Brita 0	9,50% 114 g	Brita 0	9,45% 113 g	Brita 0	9,40% 113 g
Brita 1	38,40% 461 g	Brita 1	38,20% 458 g	Brita 1	38,00% 456 g	Brita 1	37,80% 454 g	Brita 1	37,60% 451 g
RAP	24,00% 288 g	RAP	23,88% 287 g	RAP	23,75% 285 g	RAP	23,63% 284 g	RAP	23,50% 282 g
CAP Total	5,22%	CAP Total	5,72%	CAP Total	6,21%	CAP Total	6,70%	CAP Total	7,20%

Fonte: Autor, 2018.

4.3.1.4 Mistura D – 0% RAP

4.3.1.4.1 Enquadramento Granulométrico

A mistura D possui o seguinte traço:

- 0% RAP;
- 30% Brita 1;
- 25% Brita 0;
- 20% Pó de Brita;
- 10% Filler;
- 15% Areia.

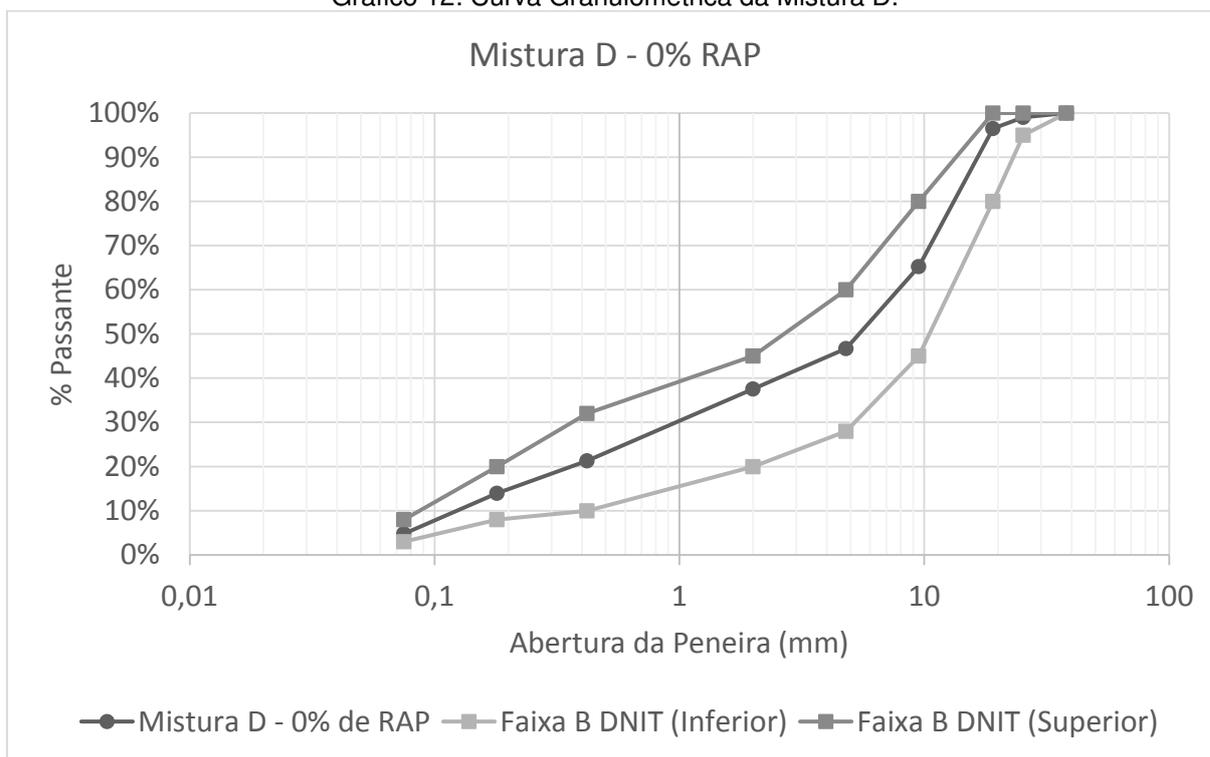
Segundo essa proporção é dada a granulometria da mistura:

Tabela 30: Faixa Granulométrica da Mistura D.

Mistura D - 0% de RAP										
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filler	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa B DNIT		Granulometria do Traço
		% no Traço						% Min	% Máx	
		15,00%	10,00%	20,00%	25,00%	30,00%	0,00%			
		% Passante								
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	-	-	-
1 1/2"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	96,65%	100,00%	95,00%	100,00%	99,00%
3/4"	19,1	100,00%	100,00%	100,00%	99,66%	88,57%	97,74%	80,00%	100,00%	96,48%
1/2"	12,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	100,00%	100,00%	98,66%	77,12%	4,07%	90,93%	45,00%	80,00%	65,23%
4	4,8	99,68%	100,00%	94,31%	11,30%	0,21%	81,22%	28,00%	60,00%	46,70%
10	2	98,27%	100,00%	62,95%	0,59%	0,18%	64,95%	20,00%	45,00%	37,53%
40	0,42	46,35%	97,84%	21,97%	0,36%	0,17%	35,21%	10,00%	32,00%	21,27%
80	0,18	17,27%	93,25%	9,74%	0,26%	0,15%	11,81%	8,00%	20,00%	13,97%
200	0,075	2,20%	41,99%	1,17%	0,07%	0,08%	1,72%	3,00%	8,00%	4,81%

Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 12: Curva Granulométrica da Mistura D.



4.3.1.4.2 Teor de Ligante Piloto

Por fim, a mistura D é orientada pelo teor de 6,00% de CAP, fazendo variar de 5,00% a 7,00% os outros grupos de corpos de prova, discriminados abaixo:

Tabela 31: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura D.

CP	Massa								
0% RAP									
Ligante	-								
CAP	5,00% 60 g	CAP	5,50% 66 g	CAP	6,00% 72 g	CAP	6,50% 78 g	CAP	7,00% 84 g
Agregados	-								
Areia	14,25% 171 g	Areia	14,18% 170 g	Areia	14,10% 169 g	Areia	14,03% 168 g	Areia	13,95% 167 g
Filler	9,50% 114 g	Filler	9,45% 113 g	Filler	9,40% 113 g	Filler	9,35% 112 g	Filler	9,30% 112 g
Pó de Brita	19,00% 228 g	Pó de Brita	18,90% 227 g	Pó de Brita	18,80% 226 g	Pó de Brita	18,70% 224 g	Pó de Brita	18,60% 223 g
Brita 0	23,75% 285 g	Brita 0	23,63% 284 g	Brita 0	23,50% 282 g	Brita 0	23,38% 281 g	Brita 0	23,25% 279 g
Brita 1	28,50% 342 g	Brita 1	28,35% 340 g	Brita 1	28,20% 338 g	Brita 1	28,05% 337 g	Brita 1	27,90% 335 g
RAP	0,00% g								
CAP Total	5,00%	CAP Total	5,50%	CAP Total	6,00%	CAP Total	6,50%	CAP Total	7,00%

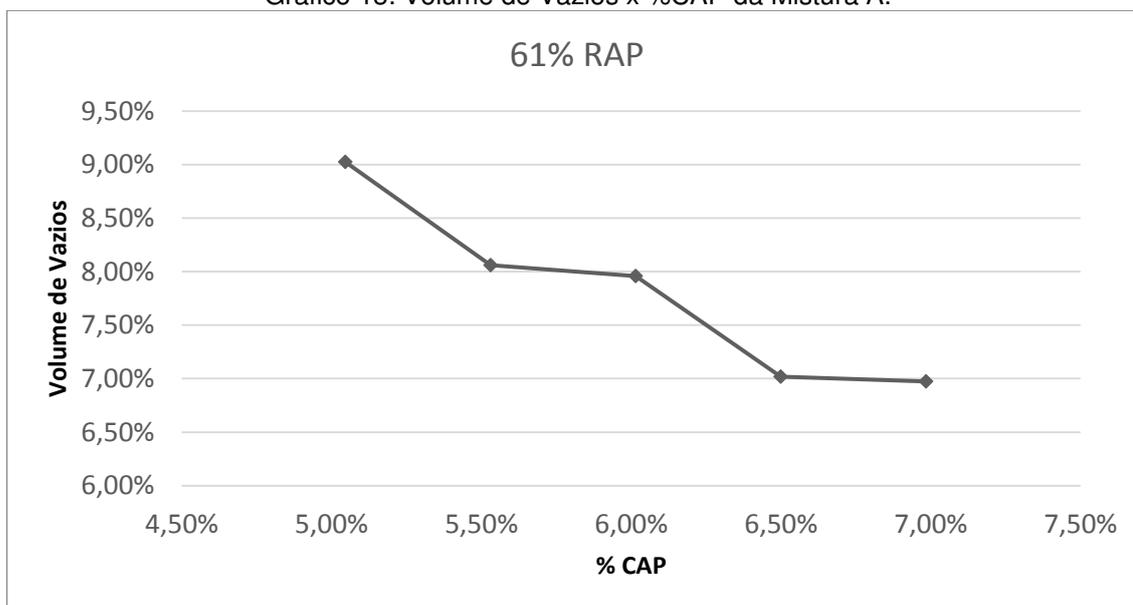
Fonte: Autor, 2018.

4.3.2 Resultados da Dosagem

4.3.2.1 Mistura A – 61% RAP

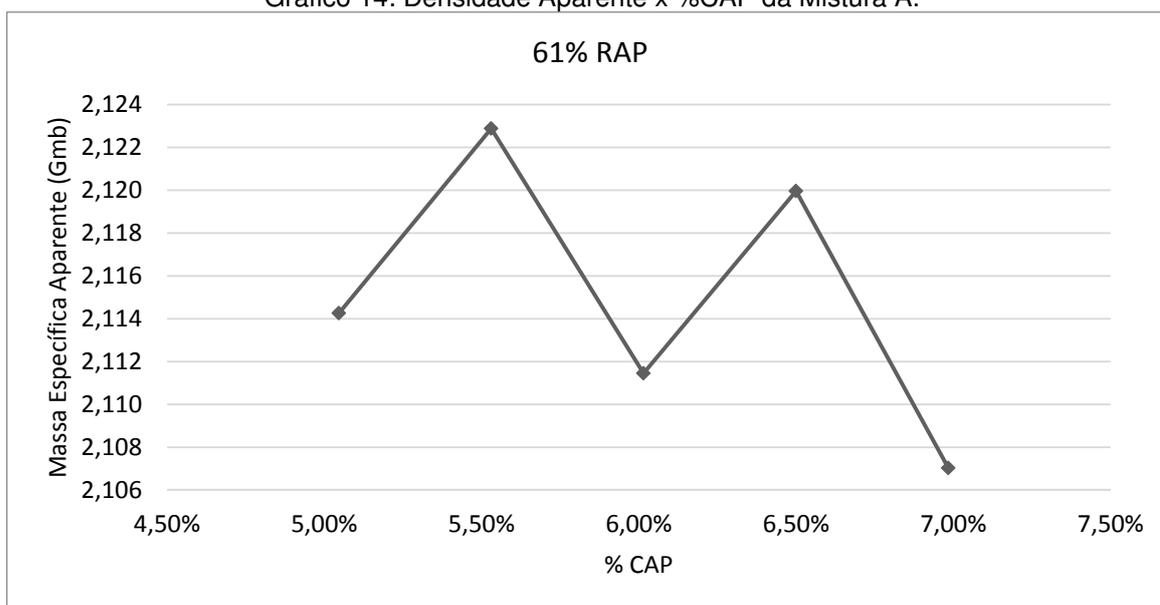
4.3.2.1.1 Curvas Parâmetros x %CAP

Gráfico 13: Volume de Vazios x %CAP da Mistura A.



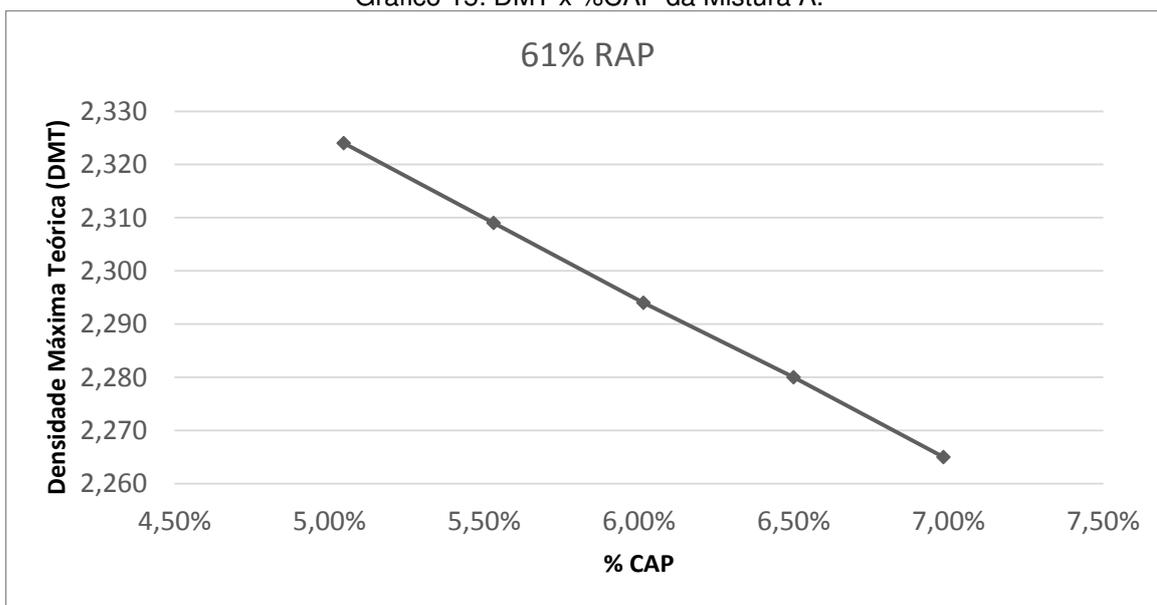
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 14: Densidade Aparente x %CAP da Mistura A.



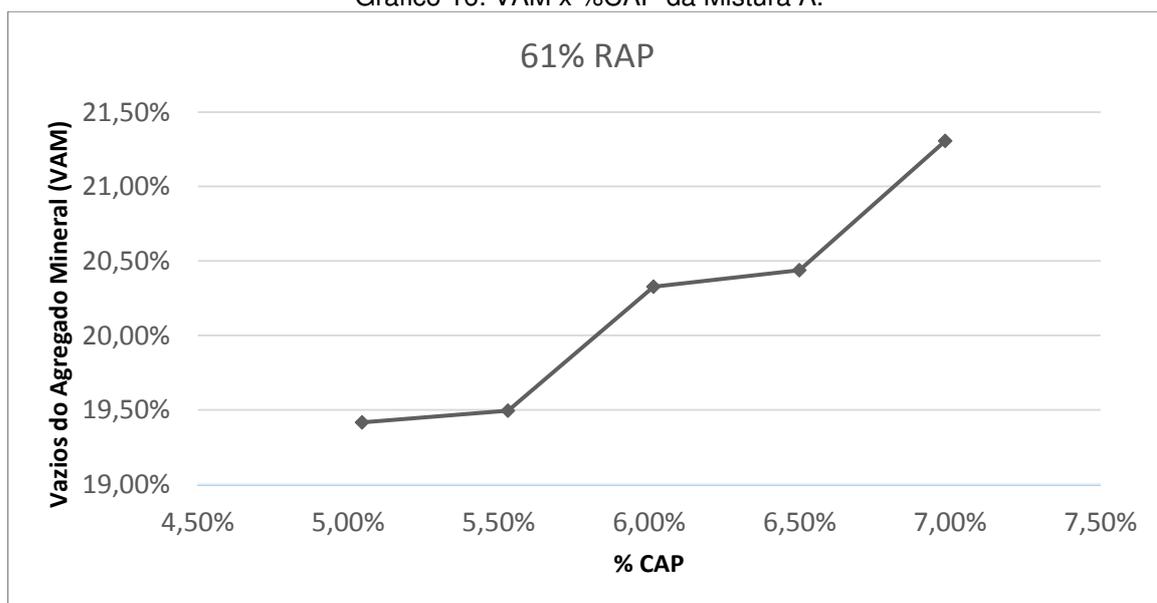
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 15: DMT x %CAP da Mistura A.



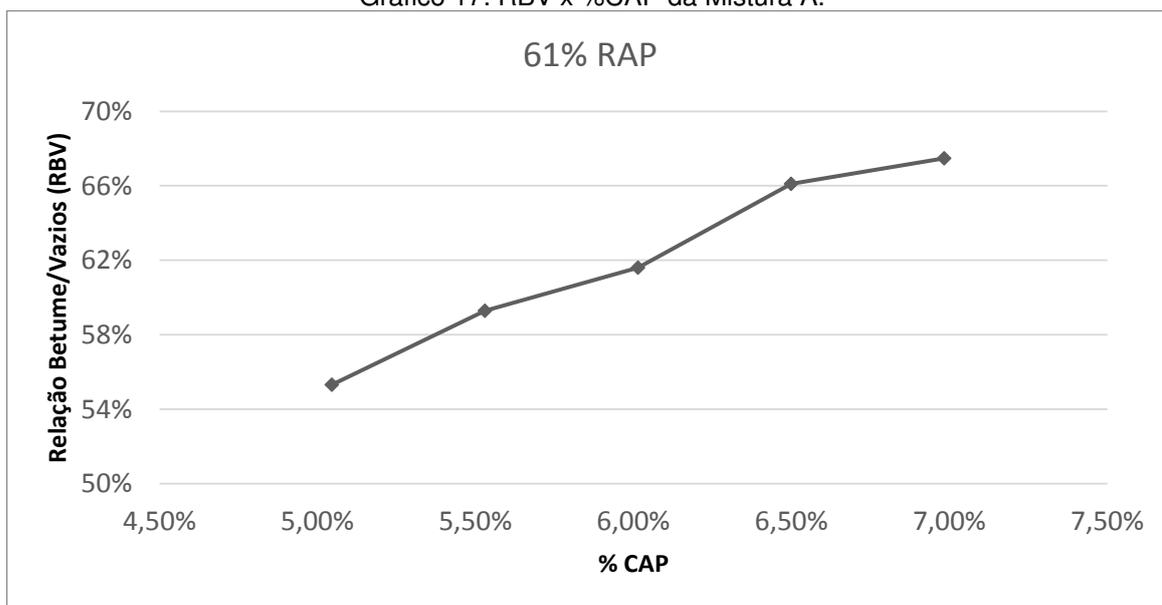
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 16: VAM x %CAP da Mistura A.



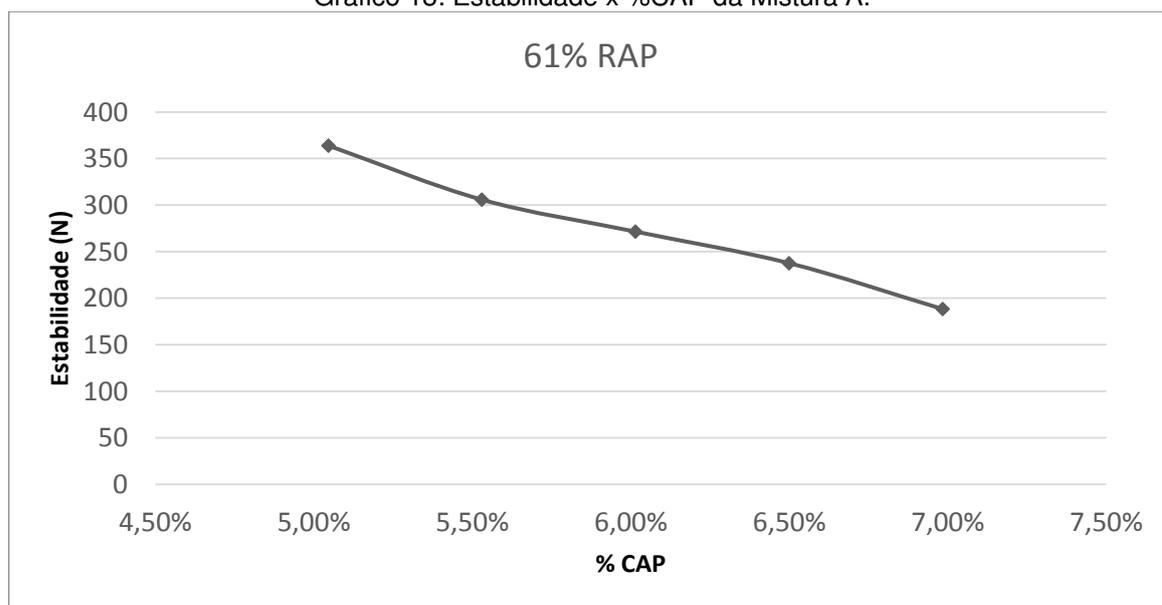
Fonte: Autor, 2018

Gráfico 17: RBV x %CAP da Mistura A.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 18: Estabilidade x %CAP da Mistura A.



Fonte: Autor, 2018.

Quadro 4: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura A.

Mistura A - 61% RAP						
% CAP	Vv	Gmb (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VAM	RBV	Est. (kgf)
5,05%	9,02%	2,114	2,324	19,42%	55,31%	363,89
5,53%	8,06%	2,123	2,309	19,49%	59,28%	305,82
6,02%	7,96%	2,111	2,294	20,33%	61,60%	271,51
6,50%	7,02%	2,120	2,280	20,44%	66,11%	237,60
6,98%	6,97%	2,107	2,265	21,31%	67,48%	188,32

Fonte: Autor, 2018.

4.3.2.1.2 Determinação do Teor Ótimo de Ligante

A partir do gráfico de dispersão combinado dos dados de volume de vazios e relação betume/vazios, suas respectivas linhas de tendência, além das especificações máximas e mínimas desses dois parâmetros, através da média dos valores internos (X2 e X3) é calculado o teor ótimo de ligante.

Para a mistura A, tem-se X1 = 6,69; X2 = 7,72; X3 = 9,13; e X4 está externo ao eixo das abcissas. Logo:

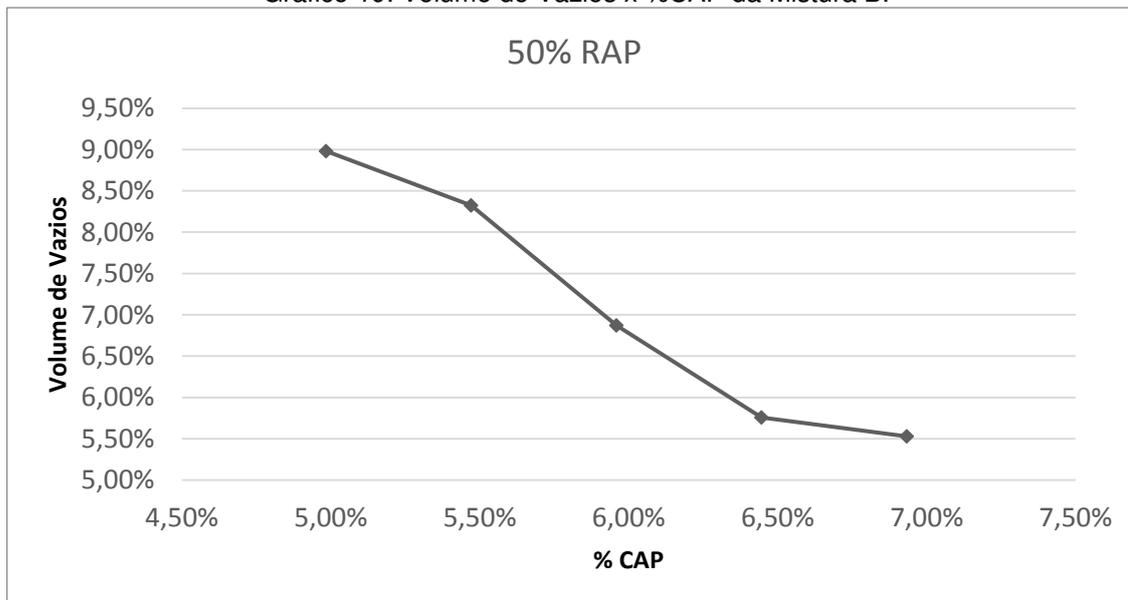
$$\% \text{ CAP} = \frac{X2 + X3}{2} = \frac{7,72 + 9,13}{2} = 8,43 \quad (11)$$

O gráfico que permitiu essa análise está disposto no apêndice D.

4.3.2.2 Mistura B – 50% RAP

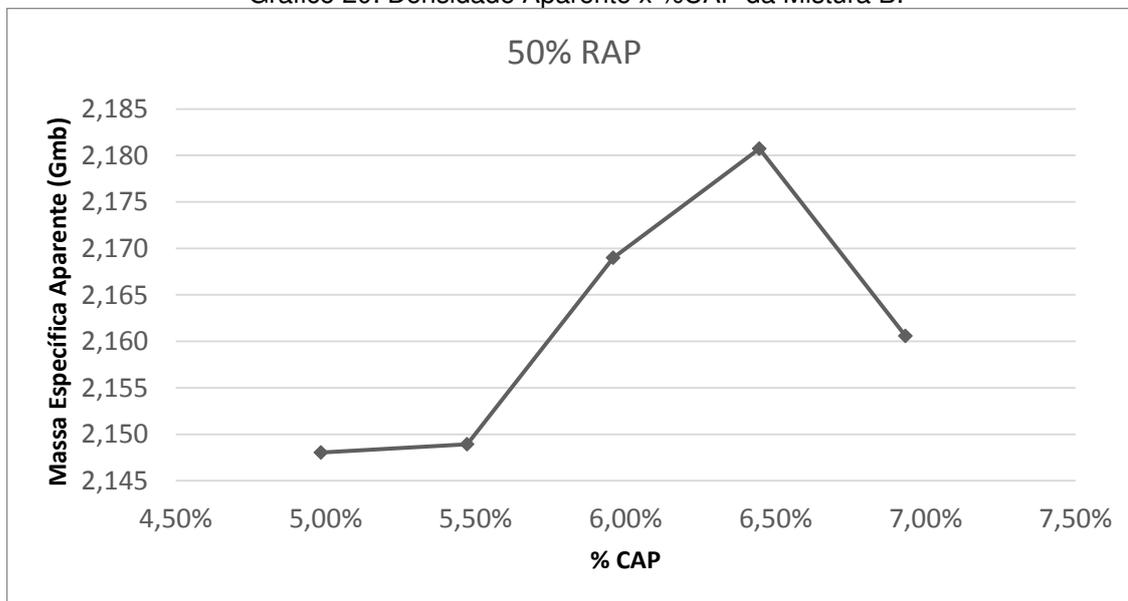
4.3.2.2.1 Curvas Parâmetros x %CAP

Gráfico 19: Volume de Vazios x %CAP da Mistura B.



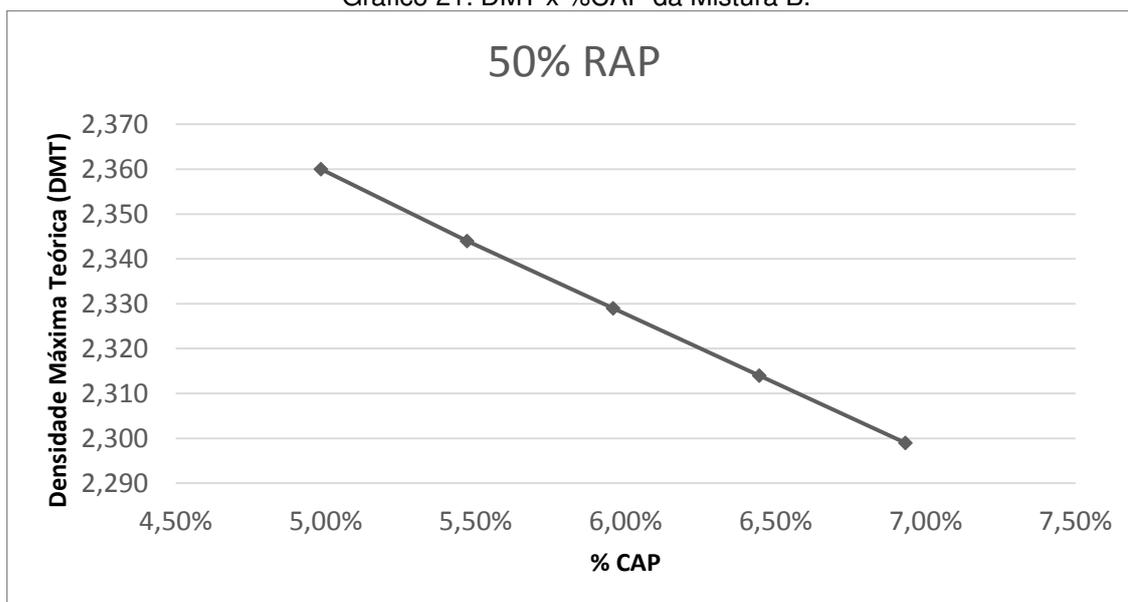
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 20: Densidade Aparente x %CAP da Mistura B.



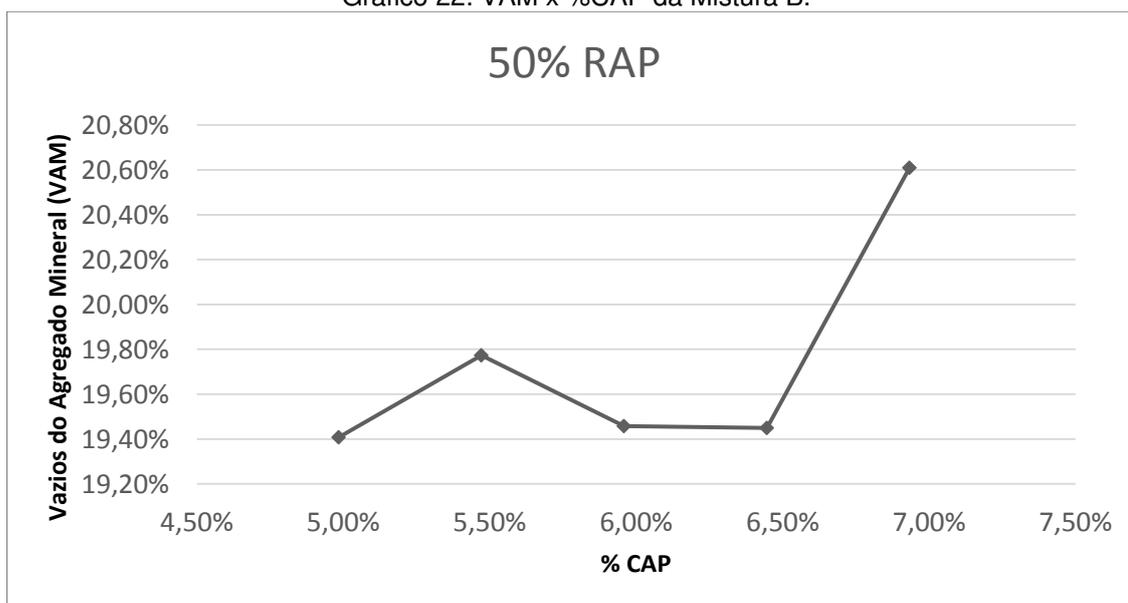
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 21: DMT x %CAP da Mistura B.



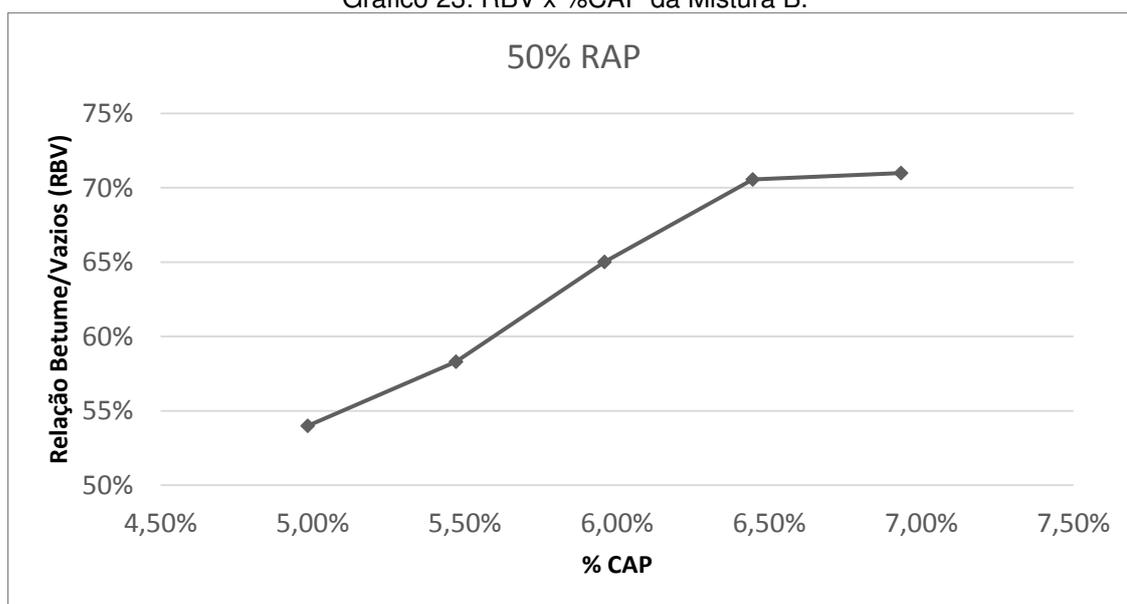
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 22: VAM x %CAP da Mistura B.



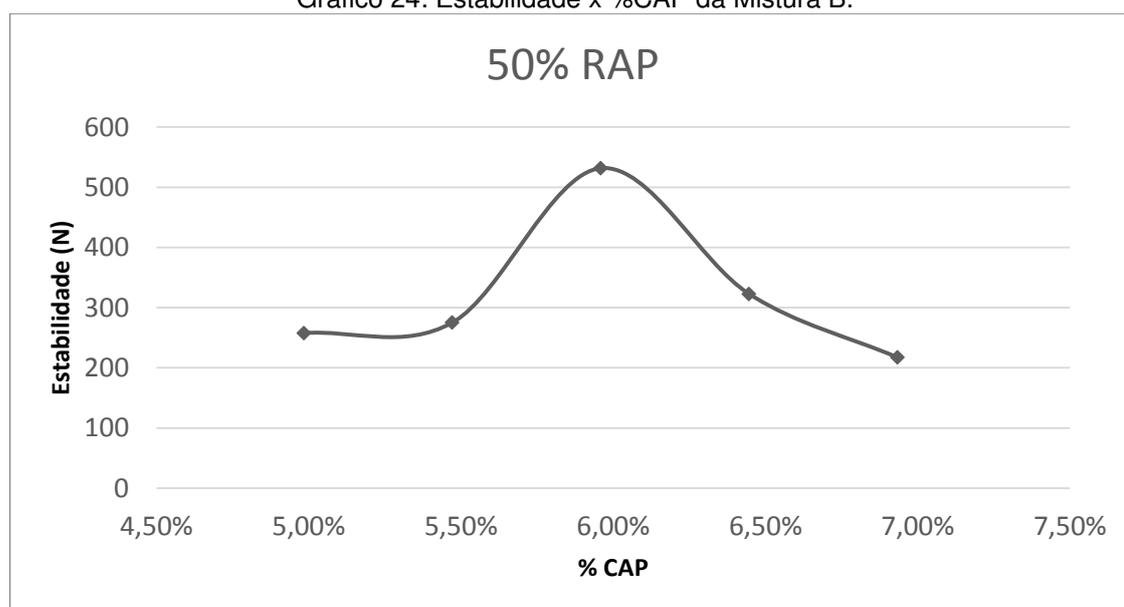
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 23: RBV x %CAP da Mistura B.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 24: Estabilidade x %CAP da Mistura B.



Fonte: Autor, 2018.

Quadro 5: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura B.

Mistura B - 50% RAP						
% CAP	Vv	Gmb (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VAM	RBV	Est.
4,98%	8,98%	2,148	2,360	19,41%	54,00%	257,70
5,47%	8,32%	2,149	2,344	19,77%	58,31%	275,11
5,96%	6,87%	2,169	2,329	19,46%	65,01%	531,64
6,45%	5,76%	2,181	2,314	19,45%	70,56%	322,77
6,93%	5,53%	2,161	2,299	20,61%	70,99%	217,29

Fonte: Autor, 2018.

4.3.2.2.2 Determinação do Teor Ótimo de Ligante

Para a mistura B, os valores de volume de vazios e relação betume/vazios geram um gráfico disponível no apêndice D do presente trabalho, apresentando valor de X1 = 6,08; X2 = 6,63; X3 = 7,87; e X4 = 8,35.

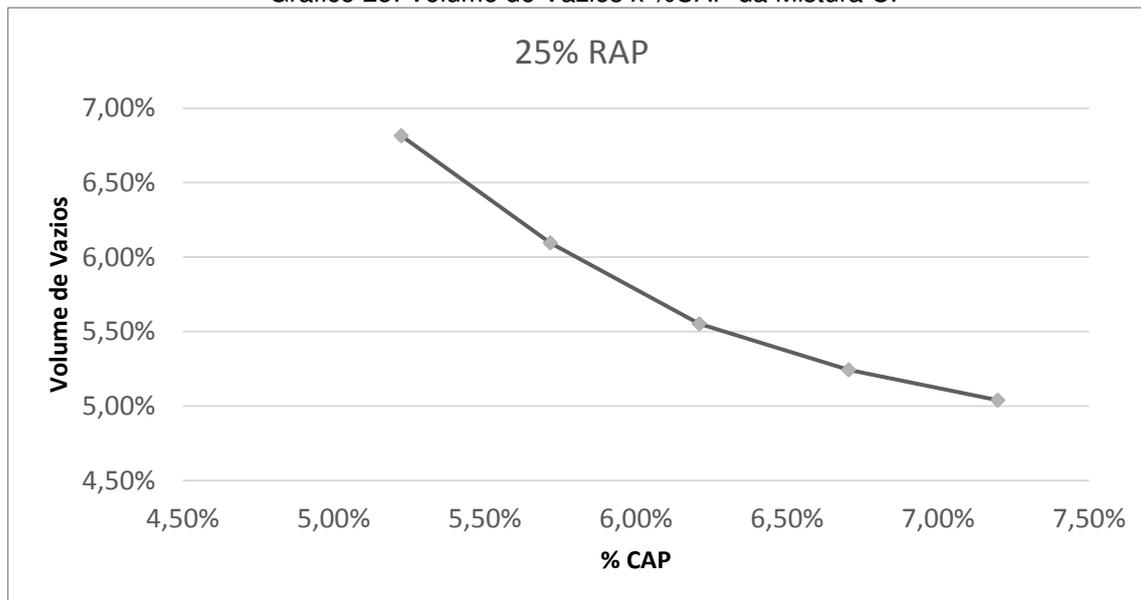
Conclui-se:

$$\% \text{ CAP} = \frac{X2 + X3}{2} = \frac{6,63 + 7,87}{2} = 7,25 \quad (12)$$

4.3.2.3 Mistura C – 25% RAP

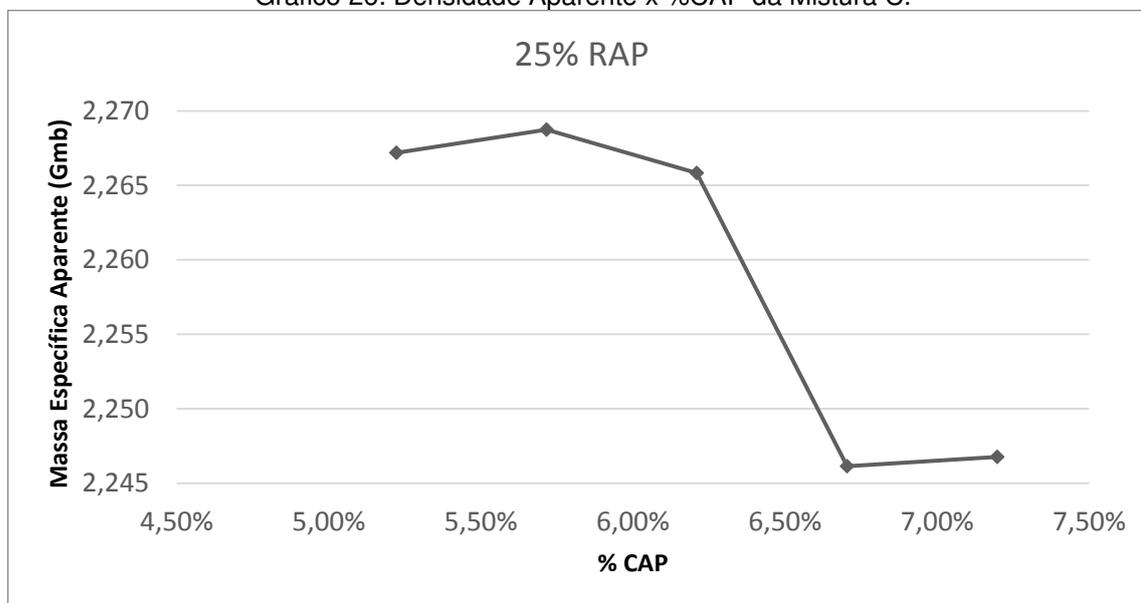
4.3.2.3.1 Curvas Parâmetros x %CAP

Gráfico 25: Volume de Vazios x %CAP da Mistura C.



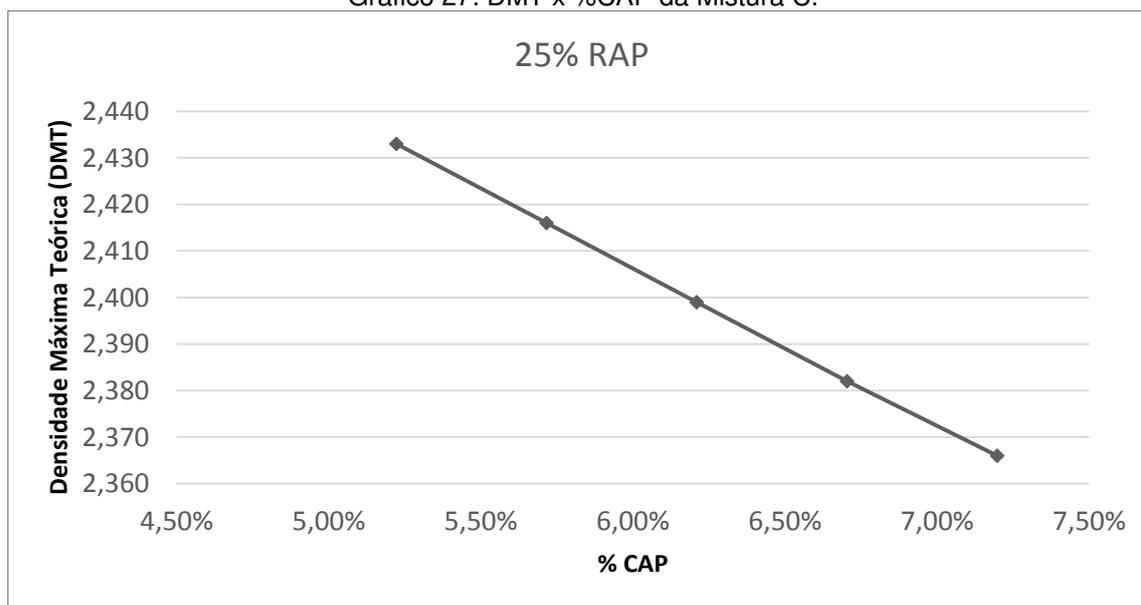
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 26: Densidade Aparente x %CAP da Mistura C.



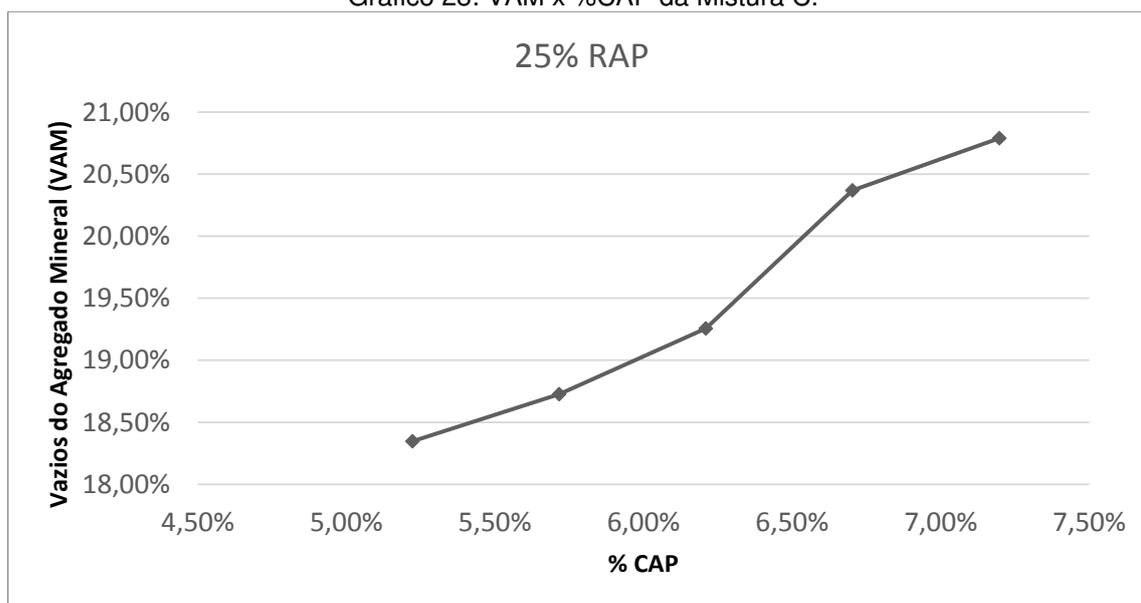
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 27: DMT x %CAP da Mistura C.



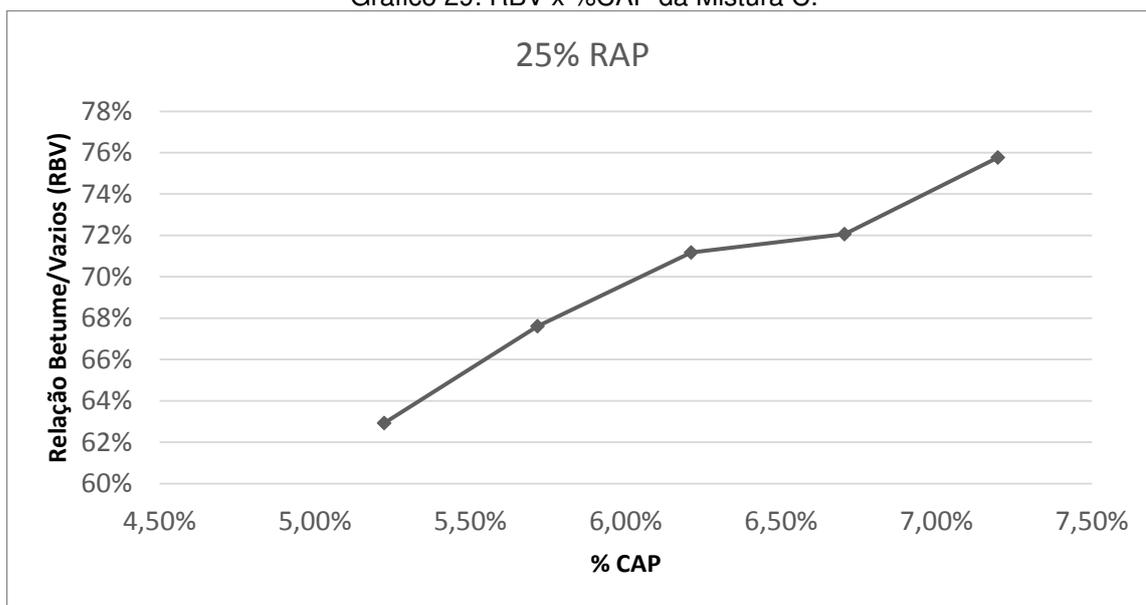
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 28: VAM x %CAP da Mistura C.



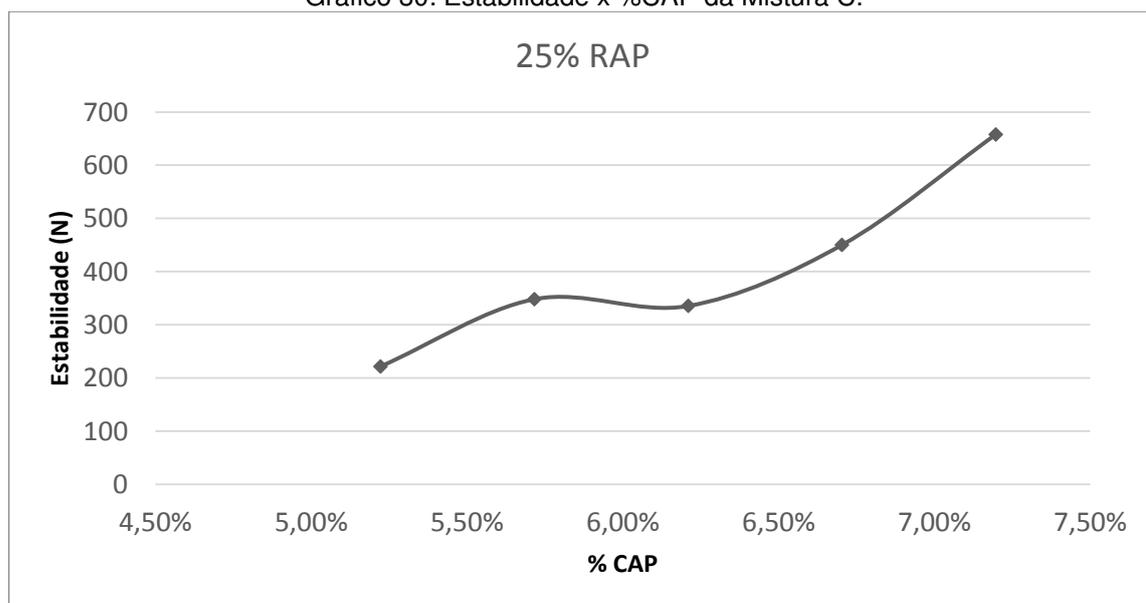
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 29: RBV x %CAP da Mistura C.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 30: Estabilidade x %CAP da Mistura C.



Fonte: Autor, 2018.

Quadro 6: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura C.

Mistura C - 25% RAP						
% CAP	Vv	Gmb (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VAM	RBV	Est.
5,22%	6,82%	2,267	2,433	18,35%	62,93%	221,71
5,72%	6,09%	2,269	2,416	18,73%	67,61%	348,09
6,21%	5,55%	2,266	2,399	19,26%	71,18%	335,34
6,70%	5,24%	2,246	2,382	20,37%	72,06%	450,20
7,20%	5,04%	2,247	2,366	20,79%	75,77%	657,89

Fonte: Autor, 2018.

4.3.2.3.2 Determinação do Teor Ótimo de Ligante

O teor ótimo de ligante é encontrado através da média dos valores internos (X2 e X3) do gráfico presente no apêndice D, de dispersão com linhas de tendência entre volume de vazios e relação betume vazios.

De acordo com o gráfico: X1 = 5,40; X2 = 6,01; X3 = 8,19; e X4 encontra-se externo ao eixo das abcissas.

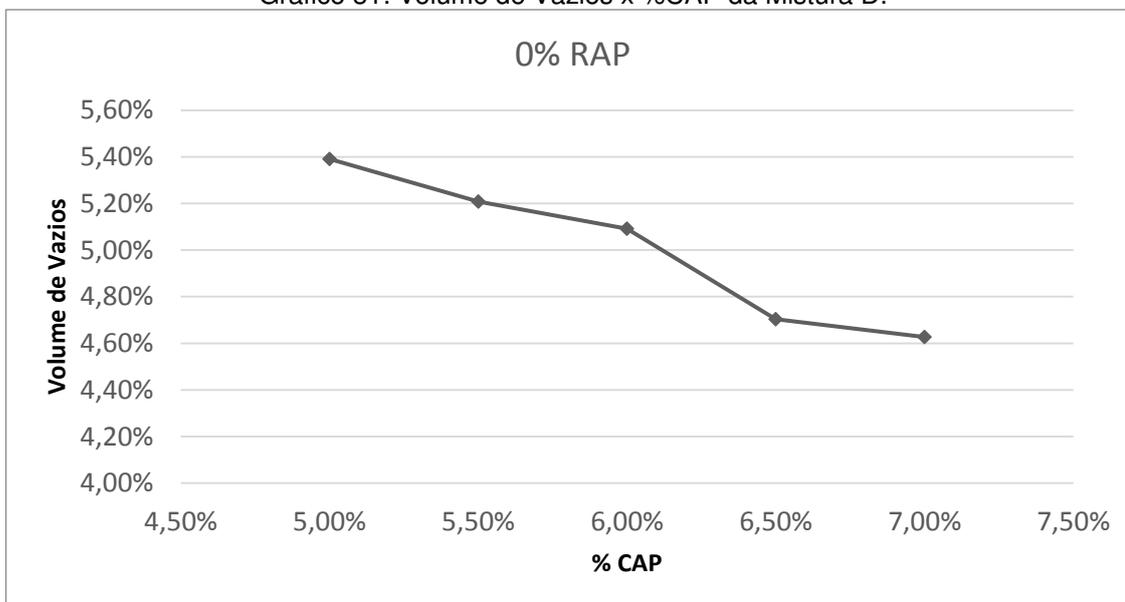
Portanto:

$$\% \text{ CAP} = \frac{X2 + X3}{2} = \frac{6,01 + 8,19}{2} = 7,10 \quad (13)$$

4.3.2.4 Mistura D – 0% RAP

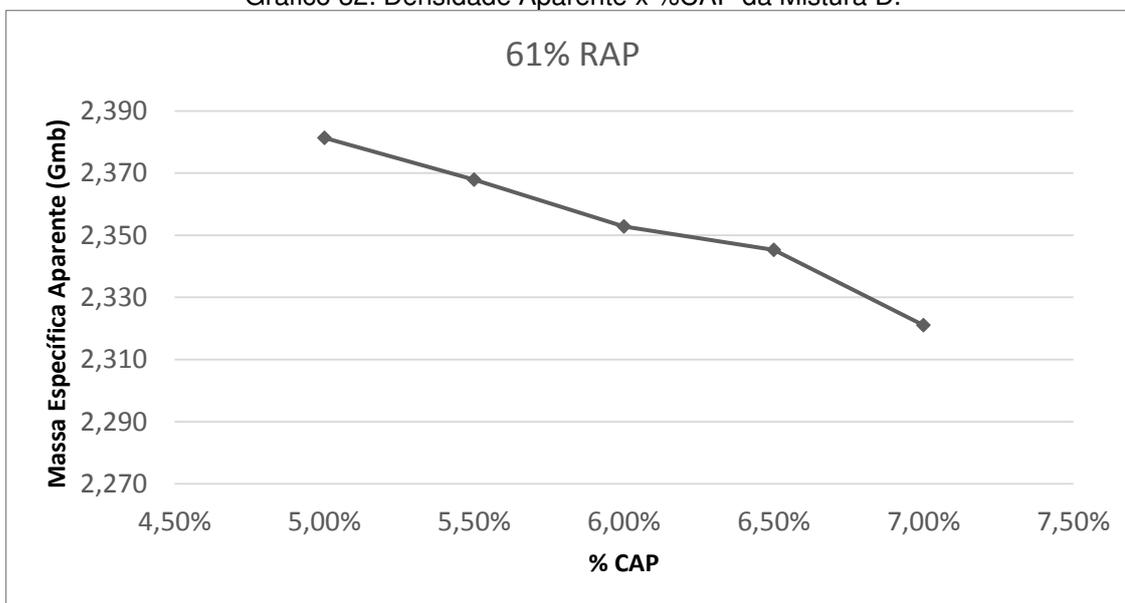
4.3.2.4.1 Curvas Parâmetros x %CAP

Gráfico 31: Volume de Vazios x %CAP da Mistura D.



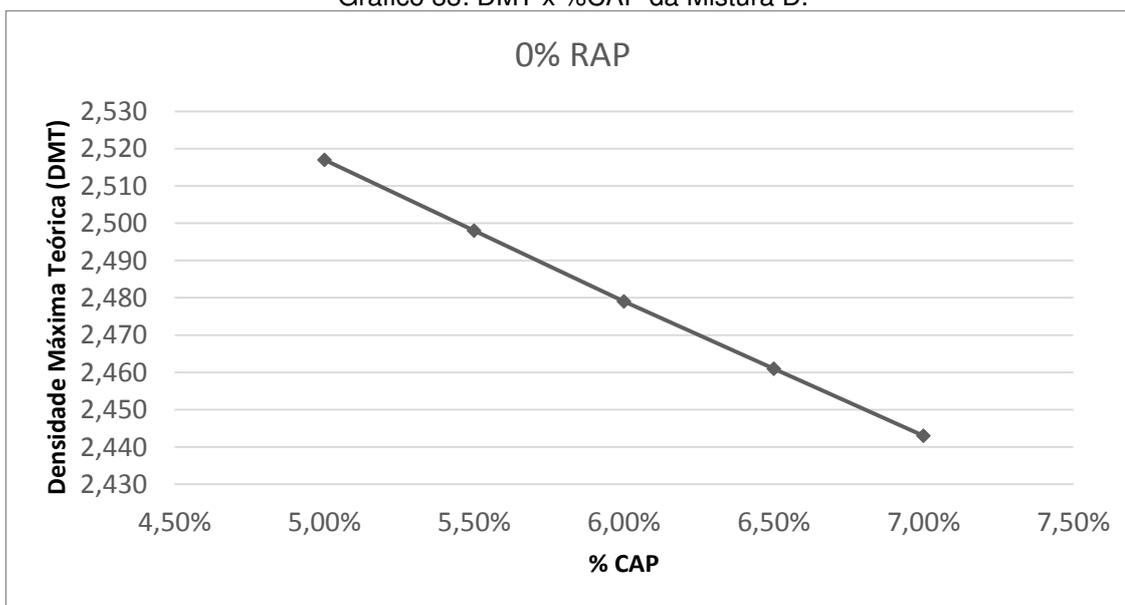
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 32: Densidade Aparente x %CAP da Mistura D.



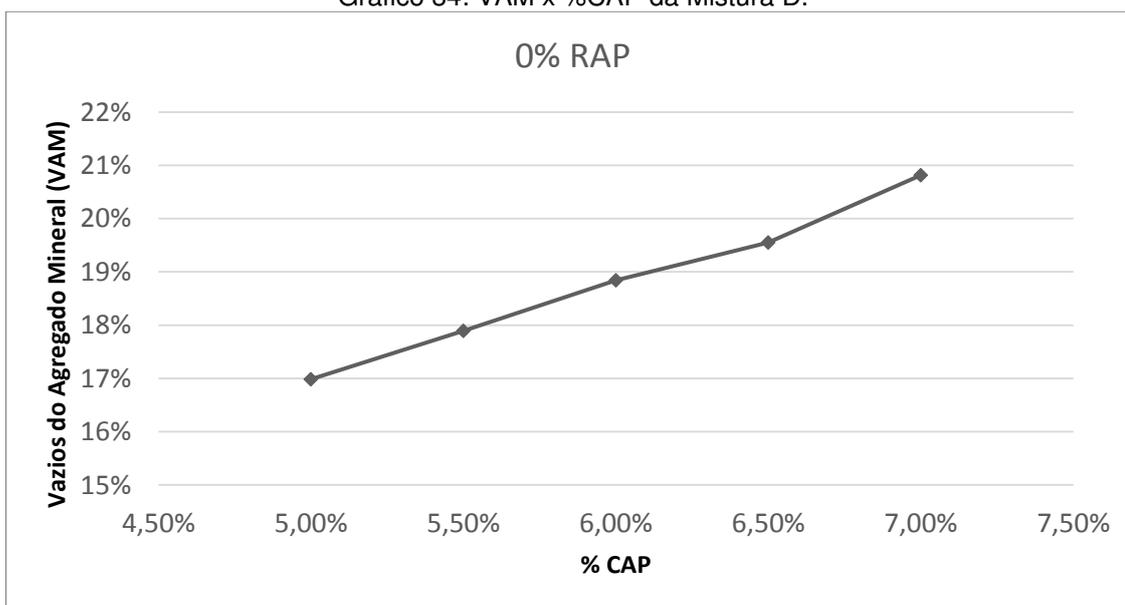
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 33: DMT x %CAP da Mistura D.



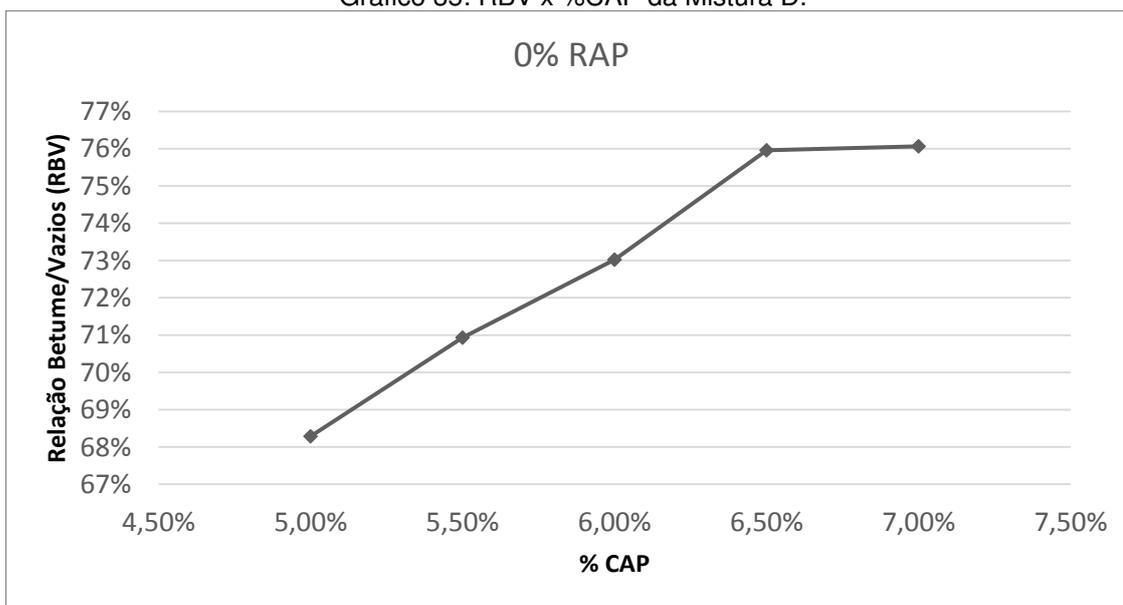
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 34: VAM x %CAP da Mistura D.



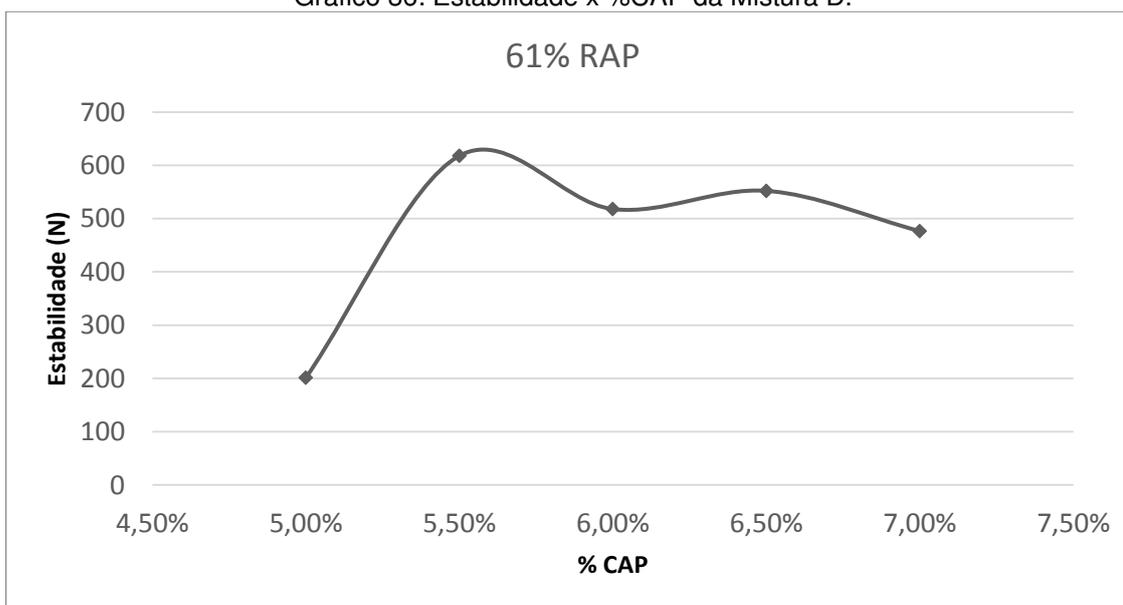
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 35: RBV x %CAP da Mistura D.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 36: Estabilidade x %CAP da Mistura D.



Fonte: Autor, 2018.

Quadro 7: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura D.

Resumo - Mistura D - 0% RAP						
% CAP	Vv	Gmb (g/cm ³)	DMT (g/cm ³)	VAM	RBV	Est.
5,00%	5,39%	2,381	2,517	16,99%	68,29%	201,20
5,50%	5,21%	2,368	2,498	17,89%	70,94%	617,83
6,00%	5,09%	2,353	2,479	18,84%	73,02%	517,79
6,50%	4,70%	2,345	2,461	19,55%	75,95%	552,10
7,00%	4,63%	2,321	2,443	20,82%	76,06%	476,56

Fonte: Autor,2018

4.3.2.4.2 Determinação do Teor Ótimo de Ligante

A partir do gráfico localizado no apêndice D, calcula-se o teor ótimo de ligante, pela média aritmética dos valores internos do eixo das abcissas, descartando os dois valores extremos.

Os valores plotados no gráfico são: X2 = 4,10; X3 = 8,22; X1 e X4 estão externos ao eixo das abcissas.

Prontamente:

$$\% \text{ CAP} = \frac{X2 + X3}{2} = \frac{4,10 + 8,22}{2} = 6,16 \quad (14)$$

4.4 Parâmetros Volumétricos

De posse dos teores ótimos de ligante para todas as misturas, são devidamente confeccionados os corpos de prova para resultados finais. O primeiro dos resultados obtidos são os parâmetros volumétricos, que possibilitam análise do volume de vazios, vazios preenchidos com betume, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios.

Para essa análise foram utilizados 9 corpos de prova de cada mistura, que posteriormente foram utilizados para ensaios de estabilidade Marshall, resistência a tração por compressão diametral e ensaio Cantabro, visto que todos os parâmetros são calculados apenas com medidas de peso e dimensões dos corpos moldados.

A análise de nove corpos de prova para cada mistura representa um valor expressivo, que agrega precisão aos resultados. Na maioria das pesquisas é exigido

uma repetição mínima de três vezes para determinado ensaio. Esse fato dá margem a presente pesquisa para desconsiderar corpos de prova que se afastem do padrão restando ainda oito corpos de prova para obtenção dos resultados. Logo, caso necessário, alguns corpos de prova podem ser desconsiderados para obtenção de determinados resultados.

Em suma, os parâmetros volumétricos encontrados foram afastando-se do desejável com o incremento do RAP na mistura asfáltica. Esse fato possui causa desconhecida, mas, sem dúvida, devido alguma característica do RAP que afeta a volumetria da amostra. Em comparação com Ferreira (2012), indicadores de volume de vazios e relação betume/vazios também variaram dentro e fora dos valores especificados em norma. Entretanto, essas variações não afetaram significativamente a resistência ou estabilidade da amostra, mostrando que o RAP possui condições aceitáveis de utilização no revestimento de pavimentos.

4.4.1 Mistura A – 61% RAP

Os valores encontrados em ensaio laboratorial para cálculo dos parâmetros da mistura A podem ser encontrados no apêndice E. Contudo, um quadro resumo é exposto a seguir:

Quadro 8: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura A com Teor Ótimo de Ligante.

Mistura A - 61% RAP						
Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Vv	VCB	VAM	RBV
61,00%	5,49%	8,43%	7,71%	16,85%	24,55%	68,71%
Limites	Ligação (%)	4 - 6	-	>14	65 - 72	
DNIT	Rolamento (%)	3 - 5	-	>14	75 - 82	

Fonte: Autor, 2018

Verificando as faixas para cada indicador volumétrico encontrado, de acordo com as normas de revestimentos asfálticos reciclados a quente, percebe-se

que o volume de vazios da mistura A está fora dos padrões tanto para camada de rolamento quanto para camada de ligação.

Os demais parâmetros estão dentro do especificado. Vale ressaltar que o valor encontrado para o quesito relação betume/vazios é indicado por norma apenas para camada de ligação.

4.4.2 Mistura B – 50% RAP

Os parâmetros para mistura B foram calculados segundo uma serie de dados coletados em laboratório, que podem ser encontrados no apêndice E. Um quadro resumo desses valores é exposto a seguir.

Quadro 9: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura B com Teor Ótimo de Ligante.

Mistura B - 50% RAP						
Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Vv	VCB	VAM	RBV
50,00%	4,89%	7,25%	6,77%	15,07%	21,83%	69,03%
Limites	Ligação (%)		4 - 6	-	>14	65 - 72
DNIT	Rolamento (%)		3 - 5	-	>14	75 - 82

Fonte: Autor,2018

Em comparação com a mistura A, o volume de vazios da mistura B é inferior, mas é ainda superior aos limites fixados em norma. Os vazios do agregado mineral, VAM, estão acima do limite mínimo e as relações volumétricas para o betume, VCB e RBV, analogamente ao caso da mistura A, são indicados apenas para camada de ligação.

4.4.3 Mistura C – 25% RAP

Os valores mensurados de peso e dimensões dos corpos de prova da mistura C estão dispostos no apêndice E. A síntese desses valores está exposta a seguir.

Quadro 10: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura C com Teor Ótimo de Ligante.

Mistura C - 25% RAP						
Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Vv	VCB	VAM	RBV
25,00%	5,90%	7,10%	4,90%	15,58%	20,47%	76,11%
Limites	Ligação (%)		4 - 6	-	>14	65 - 72
DNIT	Rolamento (%)		3 - 5	-	>14	75 - 82

Fonte: Autor,2018

A mistura C possui os melhores indicadores das misturas asfálticas recicladas. O volume de vazios encontrado é aceitável segundo a DNIT 033/2005 e DNIT 034/2005, mas apenas para camada de rolamento. O valor para os vazios do agregado mineral também são aceitáveis, assim como os vazios com ligante e a relação betume/vazios.

4.4.4 Mistura D – 0% RAP

Todos os valores mensurados e encontrados referentes aso corpos de prova da mistura D estão arranados no apêndice E, e resumidos no quadro abaixo.

Quadro 11: Resumo dos Parâmetros Volumétricos da Mistura D com Teor Ótimo de Ligante.

Mistura D - 0% RAP						
Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Vv	VCB	VAM	RBV
0,00%	6,16%	6,16%	5,00%	15,94%	20,95%	76,08%
Limites	Ligação (%)		4 - 6	-	>14	65 - 72
DNIT	Rolamento (%)		3 - 5	-	>14	75 - 82

Fonte: Autor,2018

A mistura asfáltica convencional D possui todos os parâmetros enquadrados nas especificações normatizadas.

4.5 Estabilidade Marshall

A partir dos teores de betume encontrados via dosagem Marshall, foram moldados mais 3 exemplares de corpos de prova para cada traço estudado, visando a obtenção da estabilidade de cada mistura.

De modo geral, as misturas apresentaram acréscimo de estabilidade com o decréscimo de RAP na mistura asfáltica, de forma que apenas as misturas C e D, com menores teores de RAP, apresentaram resultados satisfatórios.

Lima (2003) também utilizou teores de RAP similares aos utilizados no presente trabalho, variando entre 0% e 50%, entretanto obteve resultados mais satisfatórios nas misturas recicladas com maior taxa de reciclagem. Esse fato pode se dar devido a utilização de outros ensaios laboratoriais para obtenção do quesito estabilidade, como o ensaio de módulo de resiliência, que não foi realizado na pesquisa atual devido a carência de equipamentos sofisticados.

4.5.1 Mistura A – 61% RAP

Tabela 32: Estabilidade Marshall da Mistura A.

Mistura A - 61% RAP											
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.mm)	Fluência Média (c.mm)
61				62,51	64,02	X	0,99	X		X	
				64,65							
				64,89							
62	61,00%	5,49%	8,43%	61,26	61,90	X	1,04	X	X	X	X
				62,01							
				62,42							
63				61,40	61,86	X	1,04	X		X	
				62,20							
				61,97							

Fonte: Autor, 2018.

A tabela 32, acima, não apresenta valores de estabilidade lidos para os corpos de prova da mistura A. Isso ocorreu devido o ensaio realizado ter sido inconclusivo, por fatores até então desconhecidos. A prensa da máquina Marshall automática inicia o ensaio, mas a pressão é realizada sobre o corpo ensaiado até

que a máquina impõe sua pressão máxima de 5000 kgf, e então finaliza o ensaio sem um resultado.

Analisando as possíveis causas, e verificando que apenas corpos com alto índice de ligante apresentaram esse inconveniente, sugere-se que o ocorrido é função do elevado teor de CAP utilizado, excedendo até mesmo os valores permitidos e especificados em norma técnica.

Outro ponto a ser levantado é a verificação mais precisa de temperatura de ensaio, uma vez que a viscosidade do ligante é extremamente sensível a temperatura.

Portanto, a conclusão a respeito da estabilidade para a mistura A com 8,49% de ligante se mostrou insatisfatória.

4.5.2 Mistura B – 50% RAP

Tabela 33: Estabilidade Marshall da Mistura B.

Mistura B - 50% RAP											
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.mm)	Fluência Média (c.mm)
70				63,50	62,85	192,00	1,02	195,18		209,000	
				62,85							
				62,21							
71	50,00%	4,89%	7,25%	61,79	62,49	X	1,03	X	232,68	X	323,500
				62,50							
				63,19							
72				63,45	62,31	262,00	1,03	270,18		438,000	
				61,91							
				61,57							

Fonte: Autor, 2018.

Para as misturas do tipo B, a estabilidade foi obtida através de apenas dois corpos de prova, pois um dos corpos moldados para esse traço apresentou o mesmo inconveniente dos corpos da mistura A. Entretanto, esse fato não invalida nem inviabiliza a análise ou utilização dessa mistura asfáltica.

O valor para estabilidade Marshall obtido foi de 232,68 kgf. Esse valor ainda é insuficiente para o enquadramento normatizado, tornando a mistura B insatisfatória para utilização no revestimento.

4.5.3 Mistura C – 25% RAP

Tabela 34: Estabilidade Marshall da Mistura C.

Mistura C - 25% RAP											
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.mm)	Fluência Média (c.mm)
79	25,00%	5,90%	7,10%	61,12	61,28	472,00	1,06	500,27	504,19	434,000	502,000
				61,18							
				61,54							
80				61,61	60,86	586,00	1,07	628,11		648,000	
				60,27							
				60,71							
81				61,69	61,64	366,00	1,05	384,20		424,000	
				61,77							
				61,46							

Fonte: Autor, 2018.

A estabilidade Marshall obtida para a mistura C foi de 504,19 kgf, a partir de 3 corpos de prova. Segundo as normas DNIT 033/2005 e DNIT 034/2005, que regem a utilização de misturas asfáltica recicladas a quente, o valor mínimo aceitável é de 500 kgf, fato que torna a mistura C, com 25% de RAP, satisfatória e aceitável no quesito estabilidade.

4.5.4 Mistura D – 0% RAP

Tabela 35: Estabilidade Marshall da Mistura D.

Mistura D - 0% RAP											
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.mm)	Fluência Média (c.mm)
88	0,00%	6,16%	6,16%	60,78	59,94	521,00	1,10	572,62	705,99	1466,00	1640,67
				60,34							
				58,71							
89				58,45	59,75	675,00	1,11	745,90		1492,00	
				59,84							
				60,95							
90				59,95	60,52	739,00	1,08	799,44		1964,00	
				60,82							
				60,80							

Fonte: Autor, 2018.

Para o traço calculado e dosado para mistura asfáltica convencional o resultado coletado para estabilidade média foi de 705,99 kgf, número 41% superior aos 500 kgf mínimos estabelecidos pela DNIT 031/2006. Logo, a mistura D, sem a utilização de RAP, também é considerada satisfatória no quesito estabilidade.

4.6 Resistência a Tração por Compressão Diametral

Assim como na determinação da estabilidade Marshall, para resistência a tração, também foram confeccionados outros 3 corpos de prova para cada traço em estudo, resultando num total de 12 corpos para ensaio e determinação da tração.

Após realização do ensaio, os corpos de prova foram rompidos e foi possível a verificação interna da mistura asfáltica.

Figura 29: Corpo de Prova Rompido a Tração.



Fonte: Autor, 2018.

4.6.1 Mistura A – 61% RAP

Tabela 36: Resistência a Tração da Mistura A.

Mistura A - 61% RAP										
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	D (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	Resistência a Tração Média (Mpa)
64	61,00%	5,49%	8,43%	64,60	64,49	101,25	101,23	X	X	0,631
				63,80						
				65,07						
65				64,05	64,41	101,32	101,24	782,00	0,749	
				65,00						
				64,18						
66				63,05	62,78	101,12	100,90	521,00	0,514	
				62,15						
				63,14						

Fonte: Autor, 2018.

Quando se analisou a resistência a tração da mistura A, de 0,631 MPa, foi verificado um valor inferior ao desejável, de 0,65 MPa, especificado em norma, mais uma vez reprovando a mistura A para utilização no pavimento.

4.6.2 Mistura B – 50% RAP

Tabela 37: Resistência a Tração da Mistura B.

Mistura B - 50% RAP										
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	D (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	Resistência a Tração Média (Mpa)
73	50,00%	4,89%	7,25%	61,58	61,54	101,30	101,38	713,00	0,714	0,696
				61,15						
				61,88						
74				60,19	60,46	101,98	101,56	679,00	0,691	
				61,20						
				60,00						
75				61,30	61,71	101,41	101,26	683,00	0,683	
				61,98						
				61,84						

Fonte: Autor, 2018.

A mistura B se mostrou capaz de resistir os esforços mínimos especificados na norma. Com 0,696 Mpa de resistência a tração, conclui-se que sua utilização para camada de um pavimento reciclado é aceitável.

4.6.3 Mistura C – 25% RAP

Tabela 38: Resistência a Tração da Mistura C.

Mistura C - 25% RAP										
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	D (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	Resistência a Tração Média (Mpa)
82	25,00%	5,90%	7,10%	61,09	61,09	101,50	101,53	804,00	0,810	0,826
				62,14						
				60,04						
83				63,11	62,54	101,44	101,45	931,00	0,916	
				61,68						
				62,84						
84				61,30	61,28	101,28	100,94	744,00	0,751	
				61,37						
				61,16						

Fonte: Autor, 2018.

A resistência a tração encontrada para a mistura C foi de 0,826 MPa. Esse valor é superior aos valores resistidos pelas misturas A e B, e 27% superior ao especificado em norma. Portanto, a mistura C se mostra satisfatória no quesito resistência a tração por compressão diametral.

4.6.4 Mistura D – 0% RAP

Tabela 39: Resistência a Tração da Mistura D.

Mistura D - 0% RAP										
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	D (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	Resistência a Tração Média (Mpa)
91	0,00%	6,16%	6,16%	62,97	62,23	101,35	101,49	693,00	0,685	0,846
				61,56						
				62,17						
92				61,96	62,20	101,15	101,09	829,00	0,823	
				62,94						
				61,70						
93				61,32	61,05	101,58	101,52	1022,00	1,030	
				60,47						
				61,37						

Fonte: Autor, 2018.

A mistura asfáltica convencional D apresentou resistência a tração satisfatória. O resultado encontrado para essa mistura foi de 0,846 Mpa valor

superior ao especificado em norma. Logo, a resistência da mistura D a tração se mostra aceitável segundo as especificações.

4.7 Ensaio Cantabro

Três novos corpos de prova foram moldados para realização do ensaio cantabro, para cada mistura estudada, visando a obtenção da resistência ao desgaste de cada uma delas.

Figura 30: Corpos de Prova após Ensaio Cantabro.



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados encontrados foram sintetizados na tabela 40:

Tabela 40: Desgaste Cantabro das Misturas Estudadas.

	CP	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Desgaste	Média
Mistura A	67	1155,3	1126,0	2,54%	2,10%
61%	68	1177,4	1138,5	3,30%	
	69	1192,9	1187,4	0,46%	
Mistura B	76	1175,6	1152,5	1,96%	2,95%
50%	77	1178,7	1145,3	2,83%	
	78	1180,1	1132,4	4,04%	
Mistura C	85	1185,4	1133,7	4,36%	3,19%
25%	86	1169,1	1139,1	2,57%	
	87	1171,2	1140,4	2,63%	
Mistura D	94	1107,6	1086,8	1,88%	2,04%
0%	95	1165,0	1137,3	2,38%	
	96	1167,4	1145,6	1,87%	

Fonte: Autor, 2018.

Com base nos dados obtidos, verifica-se que os valores estão dentro do aceitável, conforme o DNIT, que fixa um desgaste máximo limite de 25%, para todas as misturas asfálticas. Logo, conclui-se que todas as misturas estão aptas para utilização no quesito desgaste Cantabro.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou a verificação da viabilidade de utilização de revestimento asfáltico fresado na construção de novos pavimentos asfálticos, elaborados com misturas a quente. Foram confeccionados, analisados e estudados 96 corpos de prova com diferentes teores de RAP e CAP, bem como diferentes proporções de agregados, buscando encontrar a melhor combinação para utilização no pavimento.

No entanto, por meio da realização de ensaios laboratoriais e análise dos dados obtidos, dentre as misturas asfálticas recicladas, apenas a mistura C – 25% de RAP atendeu as especificações técnicas exigidas. Além dela, a mistura asfáltica convencional, mistura D – 0% de RAP, também superou os indicadores necessários. Esse resultado positivo indica uma redução de 25% na utilização de agregados virgens que deixam de ser extraídos da natureza e deixam de significar um gasto extra para a obra de manutenção do pavimento.

As misturas A e B, através de resultados de estabilidade já se mostraram insuficientemente resistentes, fato consumado no teste de tração por compressão diametral. O quesito desgaste Cantabro não representou obstáculo para nenhum das amostras.

Conclui-se que o acréscimo do revestimento asfáltico fresado afeta as características das misturas asfálticas. A utilização de elevadas taxas de RAP, acima de 25% representa uma grande adversidade (GENNESSEAU, 2015). Todavia, se faz essencial o estudo desse resíduo fresado, para que maiores taxas de reciclagem sejam atingidas nas misturas asfálticas com fresado.

Notavelmente o incremento do RAP nas misturas elevou parâmetros volumétricos de vazios e reduziu parâmetros de resistência e estabilidade. Todavia, não significa que a utilização de qualquer fresado diminua a resistência de um pavimento reciclado. O que pode ser concluído é que o fresado coletado a partir da fresagem da avenida José Sarney não se mostrou um agregado de máxima qualidade, ainda que aprovado por ensaios e indicadores de forma, desgaste, volumetria e absorção. A afirmativa se justifica em trabalhos como de Filho (2018) e Matos (2018), que coletaram o mesmo material fresado e também não obtiveram os resultados esperados em suas respectivas pesquisas. Trabalhos como de Santiago (2016) conseguiram atingir valores de resistência e estabilidade satisfatórios com

taxas de reciclagem de 50% e 70%, superiores aos 25% alcançados na presente pesquisa.

A referida avenida apresentava um pavimento inquestionavelmente danificado e ultrapassado. Como pode ser visualizado na figura 13, o trecho fresado possuía inúmeros indícios de recuperações pontuais do pavimento, além de trincas, fissuras e até mesmo panelas com uma série de materiais diversos como vidro, tijolos, plásticos e outros. Todo esse material na pista, quando acontece a passagem da máquina fresadora, é misturado e coletado juntamente ao resíduo asfáltico. Unindo os remendos da pista, que muitas vezes são realizados sem a supervisão e materiais adequados, com as impurezas, pode significar um fator primordial para qualidade do RAP.

Não obstante, levando em consideração uma série de resultados positivos obtidos em ensaios do RAP, assim como com as misturas asfálticas, é necessário um aprofundamento maior na questão da volumetria e quantidade de ligante utilizado, assim como na seleção do resíduo asfáltico coletado. Com um maior controle de qualidade, sem dúvida os resultados tendem a ser mais positivos.

Um dos parâmetros que pode ser aprimorado é a utilização da Densidade Máxima Medida (DMM) em substituição a Densidade Máxima Teórica (DMT), por meio da realização do ensaio do método Rice, segundo norma estrangeira AASHTO T 209, que fornece valores mais precisos a respeito das misturas estudadas.

Recomenda-se para futuros trabalhos a utilização de agentes rejuvenescedores, visando a recuperação do CAP envelhecido que pode alterar substancialmente as características do RAP. Sugere-se também a repetição do presente trabalho com o material proveniente da fresagem de outras vias, para que se confirme a qualidade ou não do fresado utilizado.

Outro ponto a ser analisado é a execução de um ensaio de módulo de resiliência dos corpos de prova das misturas asfálticas estudadas. Esse ensaio é normatizado pela DNIT 135/2010, e permite a obtenção de um parâmetro essencial para análise da utilização da mistura no pavimento, mesmo no caso de algum outro parâmetro se afastar das faixas especificadas nas normas.

Resultados positivos com a utilização de resíduo de fresagem podem representar profundas economias no serviço de recuperação e manutenção de rodovias, tanto para a empresa de engenharia, que poupa dinheiro, quanto para o meio ambiente, que poupa matéria prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **RAPN 19 – 2005**: Resolução ANP Nº 19 de 11 de julho de 2005. Rio de Janeiro: ANP, 2005, 6p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO T 209**: Standard method test of theoretical maximum specific gravity (G_{mm}) and density of hot mix asphalt (HMA). Washington, DC, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. 2008.

_____. **NBR 14950**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007).

BBC. **Da Eco-92 à Rio+20: Duas décadas de debate ambiental**. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2012/06/120612_grafico_eco92_rio20_pai. Acesso em: 04 de julho de 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BONFIM, Valmir, **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**, 3ªed., São Paulo, Exceção Editorial, 2010.

CAT, 2018. **Catálogos de Produtos CAT**. Disponível em: https://www.sotreq.com.br/sites/default/files/sotreq_folder-unco-v12.pdf. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2017**: relatório gerencial – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017. 403p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98**: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998, 8p.

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

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

_____. **DNER-ME 089/94**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994, 6p.

- _____. **DNER-PRO 120/97**: Coleta de amostras de agregados. [S.I.], 1997, 5 p.
- _____. **DNER-PRO 199/96**: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório – Procedimento. 1996, 5p.
- _____. **DNER-ME 043**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, DNER, 1995.
- _____. **DNER-ME 053**: Misturas betuminosas – Percentagem de Betume. Rio de Janeiro, DNER, 1994.
- _____. **DNER-ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, DNER, 1997.
- _____. **DNER-ME 078**: Agregados – Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro DNER, 1994.
- _____. **DNER-ME 081**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado. Rio de Janeiro DNER, 1998.
- _____. **DNER-ME 085**: Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, DNER, 1994.
- _____. **DNER-ME 138/94**: Misturas betuminosas - determinação da resistência a tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, DNER, 1994.
- _____. **DNER-ME 194**: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, DNER, 1998.
- _____. **DNER-ME 367**: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, DNER, 1997.
- _____. **DNER-ME 383**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, DNER, 1999.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2º ed. Rio de Janeiro, 2006, 314p.
- _____. **DNIT-ES 031**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- _____. **DNIT-ES 033**: Pavimentação flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.
- _____. **DNIT-ES 034**: Pavimentação flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.
- _____. **DNIT-ME 131**: Ponto de amolecimento: método anel e bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. **DNIT-ME 135:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. **DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

_____. **DNIT-ME 155:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Ensaio de penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

FERREIRA, Elane Gomes. **Estudo de misturas asfálticas a quente utilizando material fresado de revestimento.** 2012. Universidade Estadual do Maranhão.

FILHO, Eduardo de Castro Ferreira. **Utilização de revestimento asfáltico fresado em misturas asfálticas a frio para camadas de pavimentos.** 2018. Tese de Graduação. Universidade Estadual do Maranhão.

FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, junho de 2018. ISSN: 2448-0959

GENNESSEAUX, Manuela de Mesquita Lopes. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HOJE EM DIA, 2017. **BR-040 passa por manutenção em 15 pontos entre BH e Brasília.** Disponível em: <https://www.hojeemdia.com.br/horizontes/br-040-passa-por-manuten%C3%A7%C3%A3o-em-15-pontos-entre-bh-e-bras%C3%ADlia-veja-cronograma-1.586166>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente.** 2003. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.

MATOS, Ana Caroline Rosa. **Estabilização de solos com utilização de revestimento asfáltico fresado em camadas de pavimentos.** 2018. Tese de Graduação. Universidade Estadual do Maranhão.

SANTIAGO, João Victor Pestana. **Análise da viabilidade técnica da reutilização de material fresado proveniente da BR-135.** Tese de Graduação. Universidade Estadual do Maranhão.

SENÇO, Wlastermiller de. 1929. **Manual de técnicas de pavimentação:** volume 1. 2ª ed. ampliada. São Paulo: Pini, 2007.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Keeping Track of Our Changing Environment:** From Rio to Rio+20 (1992-2012). Nairobi, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA DO RAP

Tabela 41: Ensaio de Índice de Forma do RAP.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
1	46,26	34,26	15,62	0,74	0,46	LAMELAR
2	52,36	32,65	30,26	0,62	0,93	CÚBICA
3	42,46	37,86	20,23	0,89	0,53	CÚBICA
4	59,06	42,02	35,69	0,71	0,85	CÚBICA
5	61,02	38,46	36,29	0,63	0,94	CÚBICA
6	64,35	35,26	26,31	0,55	0,75	CÚBICA
7	71,69	42,36	16,3	0,59	0,38	LAMELAR
8	49,25	43,56	29,24	0,88	0,67	CÚBICA
9	41,69	36,48	16,84	0,88	0,46	LAMELAR
10	48,69	38,91	25,09	0,80	0,64	CÚBICA
11	47,9	41,05	13,22	0,86	0,32	LAMELAR
12	91,68	34,92	33,41	0,38	0,96	ALONGADA
13	42,65	40,22	16,52	0,94	0,41	LAMELAR
14	41,3	40,36	40,26	0,98	1,00	CÚBICA
15	47,36	40,69	23,39	0,86	0,57	CÚBICA
16	59,32	39,56	37,56	0,67	0,95	CÚBICA
17	51,69	43,25	33,54	0,84	0,78	CÚBICA
18	42,56	37,21	34,09	0,87	0,92	CÚBICA
19	66,35	28,06	13,92	0,42	0,50	ALONGADA-LAMELAR
20	43,69	39,99	17,96	0,92	0,45	LAMELAR
21	67,24	39,65	21,99	0,59	0,55	CÚBICA
22	45,84	40,26	21,06	0,88	0,52	CÚBICA
23	43,65	31,69	12,68	0,73	0,40	LAMELAR
24	51,26	39,65	26,35	0,77	0,66	CÚBICA
25	43,28	19,63	15,96	0,45	0,81	ALONGADA
26	31,69	23,51	13,48	0,74	0,57	CÚBICA
27	46,58	22,99	15,67	0,49	0,68	ALONGADA
28	62,35	38,65	14,38	0,62	0,37	LAMELAR
29	52,06	37,36	16,82	0,72	0,45	LAMELAR
30	63,59	39,49	12,34	0,62	0,31	LAMELAR
31	43,28	26,04	12,56	0,60	0,48	LAMELAR
32	42,6	34,26	16,08	0,80	0,47	LAMELAR
33	47,28	30,26	26,59	0,64	0,88	CÚBICA
34	43,15	32,05	16,38	0,74	0,51	CÚBICA
35	43,15	36,95	13,27	0,86	0,36	LAMELAR
36	31,26	20,15	13,65	0,64	0,68	CÚBICA
37	53,28	34,06	19,38	0,64	0,57	CÚBICA
38	50,21	28,81	20,36	0,57	0,71	CÚBICA
39	37,16	34,25	9,65	0,92	0,28	LAMELAR
40	45,69	27,36	16,57	0,60	0,61	CÚBICA
41	24,15	16,54	8,38	0,68	0,51	CÚBICA
42	37,24	22,39	19,65	0,60	0,88	CÚBICA
43	45,96	33,59	26,67	0,73	0,79	CÚBICA

(Continuação) Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma do RAP.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
44	42,36	30,56	28,56	0,72	0,93	CÚBICA
45	31,28	28,09	19,34	0,90	0,69	CÚBICA
46	33,95	29,73	20,67	0,88	0,70	CÚBICA
47	32,01	23,48	15,62	0,73	0,67	CÚBICA
48	46,22	39,68	24,13	0,86	0,61	CÚBICA
49	27,06	19,47	16,59	0,72	0,85	CÚBICA
50	27,04	18,25	9,37	0,67	0,51	CÚBICA
51	41,25	38,32	26,79	0,93	0,70	CÚBICA
52	34,06	23,15	16,34	0,68	0,71	CÚBICA
53	32,05	27,26	12,67	0,85	0,46	LAMELAR
54	28,62	22,91	9,85	0,80	0,43	LAMELAR
55	27,91	15,26	14,36	0,55	0,94	CÚBICA
56	70,2	23,59	21,62	0,34	0,92	ALONGADA
57	37,24	29,48	14,75	0,79	0,50	CÚBICA
58	24,95	22,06	8,96	0,88	0,41	LAMELAR
59	30,26	16,25	9,65	0,54	0,59	CÚBICA
60	32,05	27,36	12,68	0,85	0,46	LAMELAR
61	32,06	23,48	15,63	0,73	0,67	CÚBICA
62	22,57	22,06	21,62	0,98	0,98	CÚBICA
63	27,63	24,85	10,35	0,90	0,42	LAMELAR
64	35	19,2	6,35	0,55	0,33	LAMELAR
65	24,09	21	12,65	0,87	0,60	CÚBICA
66	27,45	22,62	8,36	0,82	0,37	LAMELAR
67	34,21	19,48	15,34	0,57	0,79	CÚBICA
68	29,46	15,96	9,84	0,54	0,62	CÚBICA
69	31,44	22,5	9,62	0,72	0,43	LAMELAR
70	40,25	26,33	8,32	0,65	0,32	LAMELAR
71	32,59	14,2	8,39	0,44	0,59	ALONGADA
72	28,46	27,03	7,64	0,95	0,28	LAMELAR
73	31,47	18,24	9,25	0,58	0,51	CÚBICA
74	24,33	20,48	9,63	0,84	0,47	LAMELAR
75	22,99	22,68	5,2	0,99	0,23	LAMELAR
76	24,16	19,54	12,88	0,81	0,66	CÚBICA
77	24,11	20,43	6,95	0,85	0,34	LAMELAR
78	24,18	14,06	10,84	0,58	0,77	CÚBICA
79	21,47	18,24	7,63	0,85	0,42	LAMELAR
80	24,69	15,56	8,64	0,63	0,56	CÚBICA
81	21,05	19,36	7,68	0,92	0,40	LAMELAR
82	41,58	21,17	12,09	0,51	0,57	CÚBICA
83	22,47	21,09	10,86	0,94	0,51	CÚBICA
84	23,95	18,06	12,42	0,75	0,69	CÚBICA
85	24,51	15,66	8,36	0,64	0,53	CÚBICA
86	24,59	24,09	8,24	0,98	0,34	LAMELAR

(Continuação) Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma do RAP.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
87	27,59	19,06	9,43	0,69	0,49	LAMELAR
88	34,05	23,18	6,84	0,68	0,30	LAMELAR
89	28,66	24,59	6,84	0,86	0,28	LAMELAR
90	28,69	24,58	9,35	0,86	0,38	LAMELAR
91	22,47	16,33	8,75	0,73	0,54	CÚBICA
92	25,44	17,24	6,84	0,68	0,40	LAMELAR
93	26,57	20,69	8,36	0,78	0,40	LAMELAR
94	27,56	24,39	9,37	0,88	0,38	LAMELAR
95	16,53	12,57	6,81	0,76	0,54	CÚBICA
96	19,63	16,33	13,69	0,83	0,84	CÚBICA
97	27,8	24,33	11,54	0,88	0,47	LAMELAR
98	28,39	22,66	10,84	0,80	0,48	LAMELAR
99	27,44	22,48	8,39	0,82	0,37	LAMELAR
100	24,36	23,24	8,74	0,95	0,38	LAMELAR
101	23,69	22,51	7,63	0,95	0,34	LAMELAR
102	20,45	19,84	6,84	0,97	0,34	LAMELAR
103	23,57	22,84	0,23	0,97	0,01	LAMELAR
104	1826	19,46	6,65	0,01	0,34	ALONGADA-LAMELAR
105	27,63	21,33	12,59	0,77	0,59	CÚBICA
106	22,64	14,65	7,57	0,65	0,52	CÚBICA
107	28,99	15,26	9,86	0,53	0,65	CÚBICA
108	21,54	15,96	10,63	0,74	0,67	CÚBICA
109	19,48	5,31	4,99	0,27	0,94	ALONGADA
110	23,66	20,39	10,2	0,86	0,50	CÚBICA
111	19,47	13,25	10,43	0,68	0,79	CÚBICA
112	18,54	13,69	7,9	0,74	0,58	CÚBICA
113	21,06	13,44	4,82	0,64	0,36	LAMELAR
114	24,26	15,66	3,56	0,65	0,23	LAMELAR
115	26,27	25,39	8,23	0,97	0,32	LAMELAR
116	22,94	17,48	12,69	0,76	0,73	CÚBICA
117	16,53	13,68	13,6	0,83	0,99	CÚBICA
118	17,59	16,84	6,94	0,96	0,41	LAMELAR
119	24,15	23,18	8,36	0,96	0,36	LAMELAR
120	26,19	20,39	7,68	0,78	0,38	LAMELAR
121	24,36	19,47	8,59	0,80	0,44	LAMELAR
122	32,36	16,23	7,34	0,50	0,45	LAMELAR
123	29,54	18,7	8,69	0,63	0,46	LAMELAR
124	23,65	18,96	8,65	0,80	0,46	LAMELAR
125	18,94	12,66	7,39	0,67	0,58	CÚBICA
126	21,66	13,47	6,81	0,62	0,51	CÚBICA
127	25,33	9,69	8,61	0,38	0,89	ALONGADA
128	24,52	11,35	5,69	0,46	0,50	ALONGADA
129	18,6	16,28	6,25	0,88	0,38	LAMELAR

(Continuação) Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma do RAP.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
130	32,4	15,3	9,25	0,47	0,60	ALONGADA
131	28,47	15,26	3,65	0,54	0,24	LAMELAR
132	21,03	12,57	8,14	0,60	0,65	CÚBICA
133	20,56	9,36	5,39	0,46	0,58	ALONGADA
134	23,65	19,1	6,19	0,81	0,32	LAMELAR
135	21,35	15,3	4,86	0,72	0,32	LAMELAR
136	25,65	14,2	5,67	0,55	0,40	LAMELAR
137	15,24	13,57	8,44	0,89	0,62	CÚBICA
138	19,5	14,08	4,96	0,72	0,35	LAMELAR
139	26,44	13,59	6,84	0,51	0,50	CÚBICA
140	23,48	19,26	8,39	0,82	0,44	LAMELAR
141	20,57	19,77	7,39	0,96	0,37	LAMELAR
142	21,05	16,38	9,62	0,78	0,59	CÚBICA
143	20,84	19,91	12,35	0,96	0,62	CÚBICA
144	20,65	16,36	7,68	0,79	0,47	LAMELAR
145	20,48	14,35	9,58	0,70	0,67	CÚBICA
146	19,62	9,88	6,38	0,50	0,65	CÚBICA
147	15,47	14,29	7,39	0,92	0,52	CÚBICA
148	21,22	14,72	12,56	0,69	0,85	CÚBICA
149	20,54	16,95	9,58	0,83	0,57	CÚBICA
150	19,52	14,68	7,39	0,75	0,50	CÚBICA
151	28,43	13,69	7,58	0,48	0,55	ALONGADA
152	24,6	15,2	9,68	0,62	0,64	CÚBICA
153	19,88	14,99	5,05	0,75	0,34	LAMELAR
154	20,35	13,52	4,39	0,66	0,32	LAMELAR
155	24,33	12,4	6,84	0,51	0,55	CÚBICA
156	16,45	13,09	6,59	0,80	0,50	CÚBICA
157	13,25	11,82	8,36	0,89	0,71	CÚBICA
158	19,8	12,38	12,07	0,63	0,97	CÚBICA
159	16,22	14,36	7,39	0,89	0,51	CÚBICA
160	15,62	13,06	10,29	0,84	0,79	CÚBICA
161	12,57	11	8,65	0,88	0,79	CÚBICA
162	14,58	7,2	6,95	0,49	0,97	ALONGADA
163	15,03	12,08	8,96	0,80	0,74	CÚBICA
164	15,96	14,37	8,39	0,90	0,58	CÚBICA
165	15,08	12,09	9,29	0,80	0,77	CÚBICA
166	14,07	12,06	9,33	0,86	0,77	CÚBICA
167	15,26	10,22	9,81	0,67	0,96	CÚBICA
168	16,3	14,67	5,93	0,90	0,40	LAMELAR
169	17,85	14,35	6,75	0,80	0,47	LAMELAR
170	16	14,93	8,29	0,93	0,56	CÚBICA
171	15,22	12,9	7,26	0,85	0,56	CÚBICA
172	18,2	14,53	8,59	0,80	0,59	CÚBICA

(Continuação) Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma do RAP.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
173	13,69	12,45	8,27	0,91	0,66	CÚBICA
174	15,82	13,25	6,59	0,84	0,50	LAMELAR
175	15,24	15,08	8,39	0,99	0,56	CÚBICA
176	15	11,13	6,84	0,74	0,61	CÚBICA
177	13,26	12,29	5,53	0,93	0,45	LAMELAR
178	13,58	10,53	6,59	0,78	0,63	CÚBICA
179	12,84	12,69	4,69	0,99	0,37	LAMELAR
180	15,26	13,67	8,35	0,90	0,61	CÚBICA
181	33,12	15,41	8,39	0,47	0,54	ALONGADA
182	14,26	8,32	6,85	0,58	0,82	CÚBICA
183	15,84	12,64	9,56	0,80	0,76	CÚBICA
184	20,48	13,25	9,27	0,65	0,70	CÚBICA
185	16,34	12,67	7,82	0,78	0,62	CÚBICA
186	12,65	10,54	9,18	0,83	0,87	CÚBICA
187	13,85	12,69	6,52	0,92	0,51	CÚBICA
188	17,23	14,36	9,36	0,83	0,65	CÚBICA
189	12,69	12,67	8,17	1,00	0,64	CÚBICA
190	20,34	15,29	8,29	0,75	0,54	CÚBICA
191	14,75	14,23	3,68	0,96	0,26	LAMELAR
192	18,06	16,28	9,35	0,90	0,57	CÚBICA
193	18,42	13,52	8,16	0,01	0,60	ALONGADA
194	16,03	15,34	6,35	0,96	0,41	LAMELAR
195	15,23	14,28	5,99	0,94	0,42	LAMELAR
196	17,05	12,63	7,59	0,74	0,60	CÚBICA
197	15,68	11,04	6,59	0,70	0,60	CÚBICA
198	17,26	14,27	5,68	0,83	0,40	LAMELAR
199	18,09	16,34	8,56	0,90	0,52	CÚBICA
200	15,64	15,26	7,44	0,98	0,49	LAMELAR

Fonte: Autor,2018

APÊNDICE B – ENSAIO DE ÍNDICE DE FORMA DA BRITA 1

Tabela 42: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
1	29,96	13,56	6,56	0,45	0,48	ALONGADA-LAMELAR
2	41,96	25,3	16,2	0,60	0,64	CÚBICA
3	21,87	14,56	11,79	0,67	0,81	CÚBICA
4	24,88	19,65	9,2	0,79	0,47	LAMELAR
5	29,77	13,5	11,69	0,45	0,87	ALONGADA
6	31,33	27,42	16,78	0,88	0,61	CÚBICA
7	22,89	14,2	13,44	0,62	0,95	CÚBICA
8	27,13	27,13	14,91	1,00	0,55	CÚBICA
9	26,9	23,54	11,49	0,88	0,49	LAMELAR
10	26,87	26,84	14,98	1,00	0,56	CÚBICA
11	26,31	20,11	13,89	0,76	0,69	CÚBICA
12	30,42	20,36	13,32	0,67	0,65	CÚBICA
13	26,12	15,26	12,69	0,58	0,83	CÚBICA
14	21,17	18,99	14,09	0,90	0,74	CÚBICA
15	31,46	30,47	16,83	0,97	0,55	CÚBICA
16	29,86	28,46	13,91	0,95	0,49	LAMELAR
17	32,33	22,89	14,9	0,71	0,65	CÚBICA
18	26,17	14	10,67	0,53	0,76	CÚBICA
19	29,94	14,57	11,02	0,49	0,76	ALONGADA
20	23,49	13,73	7,57	0,58	0,55	CÚBICA
21	26,95	18,46	14,61	0,68	0,79	CÚBICA
22	30,84	18,94	14,41	0,61	0,76	CÚBICA
23	19,4	19,22	16,34	0,99	0,85	CÚBICA
24	23,64	20,46	10,88	0,87	0,53	CÚBICA
25	26,84	16,31	13,12	0,61	0,80	CÚBICA
26	30,09	22,08	18,18	0,73	0,82	CÚBICA
27	24,1	17,98	16,6	0,75	0,92	CÚBICA
28	25,88	15	12,31	0,58	0,82	CÚBICA
29	41	26,29	17,8	0,64	0,68	CÚBICA
30	30,9	25,33	15,2	0,82	0,60	CÚBICA
31	31,42	17,04	16,07	0,54	0,94	CÚBICA
32	22,47	14,29	10,68	0,64	0,75	CÚBICA
33	24,55	15,64	8,71	0,64	0,56	CÚBICA
34	28,14	19,84	17,72	0,71	0,89	CÚBICA
35	20,53	16,01	13,04	0,78	0,81	CÚBICA
36	23,49	23,13	10,95	0,98	0,47	LAMELAR
37	20,62	13,57	9,07	0,66	0,67	CÚBICA
38	31,71	21,69	17,73	0,68	0,82	CÚBICA
39	17,22	12,14	10,37	0,70	0,85	CÚBICA
40	32,24	17,68	10,78	0,55	0,61	CÚBICA
41	27,17	20,48	5,56	0,75	0,27	LAMELAR
42	26,36	14,28	12	0,54	0,84	CÚBICA
43	24,34	13,95	9,33	0,57	0,67	CÚBICA
44	21,47	21,03	13,35	0,98	0,63	CÚBICA
45	26,46	26,18	12,81	0,99	0,49	LAMELAR
46	21,84	8,1	7,28	0,37	0,90	ALONGADA

(Continuação) Tabela 43: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
47	29,92	25,04	7,13	0,84	0,28	LAMELAR
48	26,42	17,74	9,32	0,67	0,53	CÚBICA
49	33,58	31,49	17,04	0,94	0,54	CÚBICA
50	20,07	17,24	13,96	0,86	0,81	CÚBICA
51	22,17	22,05	12,09	0,99	0,55	CÚBICA
52	20,95	10,69	7,39	0,51	0,69	CÚBICA
53	21,1	19,48	12,56	0,92	0,64	CÚBICA
54	20,9	15,5	9,52	0,74	0,61	CÚBICA
55	24,18	18,41	13,71	0,76	0,74	CÚBICA
56	28,46	28,36	11,18	1,00	0,39	LAMELAR
57	16,8	11,09	4,5	0,66	0,41	LAMELAR
58	27,9	16	10,92	0,57	0,68	CÚBICA
59	20,98	12,45	10,51	0,59	0,84	CÚBICA
60	25,4	21,49	14,1	0,85	0,66	CÚBICA
61	28,35	8,21	7,06	0,29	0,86	ALONGADA
62	18,96	12	9,78	0,63	0,82	CÚBICA
63	49	28,3	12,75	0,58	0,45	LAMELAR
64	24,08	18,47	6,37	0,77	0,34	LAMELAR
65	15,75	14,69	12,43	0,93	0,85	CÚBICA
66	36,14	23,19	17,48	0,64	0,75	CÚBICA
67	20,1	16,49	13,92	0,82	0,84	CÚBICA
68	23,35	18,47	11,25	0,79	0,61	CÚBICA
69	25,75	14,69	7,83	0,57	0,53	CÚBICA
70	22,36	18,04	14,08	0,81	0,78	CÚBICA
71	20,19	19,85	14,64	0,98	0,74	CÚBICA
72	25,35	11,09	8,9	0,44	0,80	ALONGADA
73	33,33	24,57	12,42	0,74	0,51	CÚBICA
74	24,33	20,59	11,68	0,85	0,57	CÚBICA
75	25,56	12,57	6	0,49	0,48	ALONGADA-LAMELAR
76	21,91	17,06	12,88	0,78	0,75	CÚBICA
77	39,53	30,18	7,38	0,76	0,24	LAMELAR
78	32,1	32,08	10,76	1,00	0,34	LAMELAR
79	26,93	16,29	15,52	0,60	0,95	CÚBICA
80	28,11	21,77	19,22	0,77	0,88	CÚBICA
81	20,02	18,57	10,22	0,93	0,55	CÚBICA
82	23,01	17,09	14,2	0,74	0,83	CÚBICA
83	25,99	13,05	7,78	0,50	0,60	CÚBICA
84	33,36	17,08	10,95	0,51	0,64	CÚBICA
85	33,97	29,08	11,1	0,86	0,38	LAMELAR
86	17,21	15,28	8,72	0,89	0,57	CÚBICA
87	34,83	34,09	18,58	0,98	0,55	CÚBICA
88	24,65	13,04	11,29	0,53	0,87	CÚBICA
89	24,81	22,99	13,35	0,93	0,58	CÚBICA
90	29,23	17,08	5,96	0,58	0,35	LAMELAR
91	33,43	32,07	12,72	0,96	0,40	LAMELAR
92	22,87	13,08	12,76	0,57	0,98	CÚBICA

(Continuação) Tabela 43: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
93	33,69	33,42	15,82	0,99	0,47	LAMELAR
94	29,33	20,48	13,55	0,70	0,66	CÚBICA
95	16,88	12,07	7,78	0,72	0,64	CÚBICA
96	28,61	27,08	10,55	0,95	0,39	LAMELAR
97	24,13	16,05	6,11	0,67	0,38	LAMELAR
98	23,13	20,28	13,71	0,88	0,68	CÚBICA
99	23,99	21,06	16,46	0,88	0,78	CÚBICA
100	28,39	19,54	11,24	0,69	0,58	CÚBICA
101	29,22	26,26	9,54	0,90	0,36	LAMELAR
102	24,65	21,25	12,75	0,86	0,60	CÚBICA
103	31,58	23,84	18,24	0,75	0,77	CÚBICA
104	30,87	24,59	12,1	0,80	0,49	LAMELAR
105	29,68	22,54	18,86	0,76	0,84	CÚBICA
106	24,18	21,05	16,62	0,87	0,79	CÚBICA
107	24,46	9,41	8,89	0,38	0,94	ALONGADA
108	28,79	17,06	11,75	0,59	0,69	CÚBICA
109	29,77	24,59	17,3	0,83	0,70	CÚBICA
110	24,69	16,75	12,69	0,68	0,76	CÚBICA
111	32,22	18,91	17,7	0,59	0,94	CÚBICA
112	26,99	17,43	14,9	0,65	0,85	CÚBICA
113	29,32	23,59	17,91	0,80	0,76	CÚBICA
114	31,33	21,4	11,88	0,68	0,56	CÚBICA
115	23,39	20,65	10,45	0,88	0,51	CÚBICA
116	42,54	15,4	8,9	0,36	0,58	ALONGADA
117	22	21,48	15,36	0,98	0,72	CÚBICA
118	17,27	12,09	11,03	0,70	0,91	CÚBICA
119	26,22	16,08	14,82	0,61	0,92	CÚBICA
120	29,11	14,07	13,06	0,48	0,93	ALONGADA
121	22,05	17,88	10,68	0,81	0,60	CÚBICA
122	29,5	25,49	11,06	0,86	0,43	LAMELAR
123	22,16	19,47	8,81	0,88	0,45	LAMELAR
124	27,94	13,6	9,08	0,49	0,67	ALONGADA
125	24,63	15,5	11,68	0,63	0,75	CÚBICA
126	28,9	17,49	14,82	0,61	0,85	CÚBICA
127	22,91	6,22	5,67	0,27	0,91	ALONGADA
128	26,34	8,41	5,31	0,32	0,63	ALONGADA
129	25,86	20,47	16,61	0,79	0,81	CÚBICA
130	18,42	16,58	9,73	0,90	0,59	CÚBICA
131	20,37	18,07	14,2	0,89	0,79	CÚBICA
132	25,22	13,82	11,23	0,55	0,81	CÚBICA
133	24,55	15,57	9,8	0,63	0,63	CÚBICA
134	18,63	18,59	15,53	1,00	0,84	CÚBICA
135	23,04	16,07	13,46	0,70	0,84	CÚBICA
136	21,41	19,58	7,69	0,91	0,39	LAMELAR
137	23,26	19,72	17,07	0,85	0,87	CÚBICA
138	33,6	15,29	11,3	0,46	0,74	ALONGADA

(Continuação) Tabela 43: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
139	23,68	19,08	17,99	0,81	0,94	CÚBICA
140	22,04	16,1	11,09	0,73	0,69	CÚBICA
141	18,59	14,51	10,84	0,78	0,75	CÚBICA
142	20,65	12,48	11,54	0,60	0,92	CÚBICA
143	21,03	12,07	11,04	0,57	0,91	CÚBICA
144	30,2	27,29	7	0,90	0,26	LAMELAR
145	22,2	13,54	10,19	0,61	0,75	CÚBICA
146	30,81	28,72	12,39	0,93	0,43	LAMELAR
147	21,9	15,55	14,92	0,71	0,96	CÚBICA
148	21,17	18,69	5,2	0,88	0,28	LAMELAR
149	17,86	14,27	11,74	0,80	0,82	CÚBICA
150	27,95	27,05	7,43	0,97	0,27	LAMELAR
151	23,48	20,27	9,42	0,86	0,46	LAMELAR
152	21,87	18,57	14,42	0,85	0,78	CÚBICA
153	25,5	11,89	11,69	0,47	0,98	ALONGADA
154	22,51	8,19	4,93	0,36	0,60	ALONGADA
155	20,79	19,75	10,82	0,95	0,55	CÚBICA
156	25,32	25,24	11,68	1,00	0,46	LAMELAR
157	23,93	18,56	10,92	0,78	0,59	CÚBICA
158	20,64	13,4	6,89	0,65	0,51	CÚBICA
159	21,18	13,55	12,86	0,64	0,95	CÚBICA
160	29,87	25,49	10,98	0,85	0,43	LAMELAR
161	23,97	18,7	9,95	0,78	0,53	CÚBICA
162	23,83	14,06	7,66	0,59	0,54	CÚBICA
163	16,46	15,59	14,22	0,95	0,91	CÚBICA
164	34,32	23,54	7	0,69	0,30	LAMELAR
165	28,09	21,62	7,97	0,77	0,37	LAMELAR
166	19,08	11	8,24	0,58	0,75	CÚBICA
167	28,25	22,46	7,07	0,80	0,31	LAMELAR
168	24,54	14,05	11,42	0,57	0,81	CÚBICA
169	30,39	24,19	18,48	0,80	0,76	CÚBICA
170	24,28	23,07	13,19	0,95	0,57	CÚBICA
171	17,89	12,33	11,02	0,69	0,89	CÚBICA
172	23,01	17,28	9,63	0,75	0,56	CÚBICA
173	19,73	11,95	7,14	0,61	0,60	CÚBICA
174	20,93	7,27	5,66	0,35	0,78	ALONGADA
175	16,38	14,56	11,3	0,89	0,78	CÚBICA
176	21,52	20,46	12,85	0,95	0,63	CÚBICA
177	20,88	20,45	13,16	0,98	0,64	CÚBICA
178	26,9	25,78	13,52	0,96	0,52	CÚBICA
179	23,18	13,29	11,95	0,57	0,90	CÚBICA
180	17,9	9,36	8,43	0,52	0,90	CÚBICA
181	15,24	15,12	14,3	0,99	0,95	CÚBICA
182	27,05	23,56	13,87	0,87	0,59	CÚBICA
183	19,85	14,02	13,16	0,71	0,94	CÚBICA
184	26,87	16,49	15,23	0,61	0,92	CÚBICA

(Continuação) Tabela 43: Ensaio de Índice de Forma da Brita 1.

Grãos	Dimensões			Relações		
	a	b	c	b/a	c/b	0,5
185	19,87	18,16	15,18	0,91	0,84	CÚBICA
186	24,39	14,05	8,95	0,58	0,64	CÚBICA
187	31,68	15,48	6,16	0,49	0,40	ALONGADA-LAMELAR
188	20,86	19,55	15,1	0,94	0,77	CÚBICA
189	22,33	7,56	6,27	0,34	0,83	ALONGADA
190	26,82	26,13	14,26	0,97	0,55	CÚBICA
191	18,2	16,58	10,88	0,91	0,66	CÚBICA
192	20,45	18,21	15,18	0,89	0,83	CÚBICA
193	20,3	12,36	11,38	0,61	0,92	CÚBICA
194	17,93	14,25	11,5	0,79	0,81	CÚBICA
195	26	20	9,07	0,77	0,45	LAMELAR
196	18,99	17,65	13,79	0,93	0,78	CÚBICA
197	21,97	18,24	11,35	0,83	0,62	CÚBICA
198	21,38	20,99	14,7	0,98	0,70	CÚBICA
199	15,62	15,46	14,14	0,99	0,91	CÚBICA
200	32,16	24,15	17,97	0,75	0,74	CÚBICA

Fonte: Autor, 2018.

APÊNDICE C – TABELAS DE DOSAGEM MARSHALL

Tabela 43: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura A.

DOSAGEM MARSHALL - Mistura A - 61% RAP																				
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	h (mm)	h Médio (mm)	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm³)	Gmb (g/cm³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV	Leitura e Estabilidade (kgf)	Fator de Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Líquida (c.m.m)	Fluência Média (c.m.m)
1				62,37	62,53	1197,40	541,60	2,211			4,87%	10,87%	15,73%	69,06%	427	1,03	437,82		257,00	
				62,84																
				62,37																
				65,20																
21	2,00%	5,05%		64,42	65,27	1197,40	563,70	2,124	2,32	2,32	8,60%	10,44%	19,04%	54,84%	447	0,96	427,01	363,89	143,00	201,67
				66,20																
				68,59																
41				68,98	66,65	1191,20	593,30	2,008			13,61%	9,87%	23,47%	42,03%	258	0,88	226,85		205,00	
				68,37																
2				62,53	62,34	1182,80	547,20	2,162			6,39%	11,64%	18,03%	64,56%	X	1,03	X	X		
				62,74																
				61,75																
				63,00																
22	2,50%	5,53%		64,12	63,54	1197,80	556,20	2,154	2,31	2,31	6,73%	11,60%	18,33%	63,27%	382	1,00	381,45	305,82	142,00	130,00
				63,50																
				69,77																
42				66,54	69,31	1192,30	580,60	2,054			11,06%	11,06%	22,12%	50,00%	266	0,87	230,19		118,00	
				69,63																
3				60,84	61,53	1196,50	551,70	2,169			5,46%	12,70%	18,16%	69,94%	267	1,05	281,10		209,00	
				61,81																
				64,51																
23	3,00%	6,02%		64,29	64,27	1196,60	562,70	2,127	2,29	2,29	7,30%	12,46%	19,76%	63,05%	294	0,98	288,11	271,51	195,00	178,67
				64,01																
				67,90																
43				68,99	66,05	1185,50	581,40	2,039			11,11%	11,94%	23,06%	51,80%	275	0,89	245,31		132,00	
				67,25																
4				61,22	61,60	1185,50	551,10	2,151			5,65%	13,62%	19,27%	70,67%	190	1,05	199,66		175,00	
				62,16																
				61,42																
				62,70																
24	3,50%	6,50%		62,36	62,39	1192,90	555,60	2,147	2,28	2,28	5,83%	13,59%	19,42%	69,98%	255	1,03	262,43	237,60	239,00	173,67
				62,10																
				66,55																
44				66,78	67,00	1203,40	583,70	2,062			9,58%	13,05%	22,63%	57,68%	274	0,92	250,72		107,00	
				67,68																
5				61,04	61,70	1185,70	553,80	2,141			5,47%	14,56%	20,04%	72,68%	X	1,05	X	X		
				62,28																
				61,78																
				64,35																
25	4,00%	6,98%		64,80	64,90	1191,80	565,00	2,109	2,27	2,27	6,87%	14,35%	21,22%	67,62%	189	0,96	182,26	188,32	170,00	132,00
				63,55																
				66,44																
45				66,19	66,54	1198,50	578,80	2,071			8,58%	14,08%	22,66%	62,14%	210	0,93	194,38		94,00	
				66,98																

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 44: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura B.

DOSAGEM MARSHALL - Mistura B - 50% RAP																			
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP To _{total}	h (mm)	h Médio (mm)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator de Correção	Estabilidade e Comigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.mir ³)	Fluência Média (c.mir ³)
6				64,51 64,09 64,47 64,25 65,25 68,03 68,69 69,10	64,36	1185,40	548,90	2,160		8,49%	10,48%	18,97%	55,25%	296	0,98	289,42		208,00	
26	2,50%	4,98%		64,11 65,25 68,03 68,69 69,10	64,54	1191,80	546,20	2,182	2,36	7,54%	10,59%	18,13%	58,41%	298	0,97	290,04	257,70	170,00	157,00
46				63,13 64,98 65,61 62,03 62,74 61,96 66,62 67,97 65,86	68,61	1199,50	570,50	2,103		10,91%	10,21%	21,12%	48,33%	220	0,88	193,62		93,00	
7				61,00 61,68 62,58 62,47 63,11 66,28 66,14 65,78	64,57	1201,60	558,40	2,152		8,20%	11,47%	19,66%	58,31%	282	0,97	274,21		434,00	
27	3,00%	5,47%		62,03 62,74 61,96 66,62 67,97 65,86	62,24	1197,40	545,40	2,195	2,34	6,34%	11,70%	18,04%	64,86%	279	1,03	288,21	275,11	268,00	281,00
47				61,99 62,46 62,85 62,33 61,26 62,25 66,35 64,09 64,66	66,82	1183,90	563,90	2,099		10,43%	11,19%	21,62%	51,75%	286	0,92	262,90		141,00	
8				61,99 62,46 62,85 62,33 61,26 62,25 66,35 64,09 64,66	61,33	1200,60	545,70	2,200		5,53%	12,77%	18,30%	69,76%	882	1,06	944,15		1505,00	
28	50,00%	3,50%	5,96%	62,58 62,47 63,11 66,28 66,14 65,78	62,72	1190,60	544,90	2,185	2,33	6,18%	12,68%	18,86%	67,22%	290	1,02	295,84	531,64	211,00	622,33
48				61,99 62,46 62,85 62,33 61,26 62,25 66,35 64,09 64,66	66,07	1189,94	560,80	2,122		8,89%	12,31%	21,21%	58,06%	379	0,94	354,92		151,00	
9				61,99 62,46 62,85 62,33 61,26 62,25 66,35 64,09 64,66	62,43	1190,20	542,20	2,195		5,14%	13,78%	18,92%	72,85%	X	1,03	X	X	X	X
29	4,00%	6,45%		62,33 61,26 62,25 66,35 64,09 64,66	61,95	1181,10	537,00	2,199	2,31	4,95%	13,81%	18,76%	73,61%	248	1,04	258,21	322,77	327,00	264,50
49				65,84 65,72 65,92 60,94 60,26 61,73 65,90 66,08 65,52	65,03	1187,00	552,70	2,148		7,19%	13,48%	20,67%	65,22%	403	0,96	387,32		202,00	
10				65,84 65,72 65,92 60,94 60,26 61,73 65,90 66,08 65,52	65,83	1200,00	561,30	2,138		7,01%	14,44%	21,44%	67,32%	161	0,94	151,68		29,00	
30	4,50%	6,93%		60,94 60,26 61,73 65,90 66,08 65,52	60,98	1180,10	536,90	2,198	2,30	4,39%	14,84%	19,24%	77,16%	186	1,07	198,76	217,29	438,00	218,00
50				65,84 65,72 65,92 60,94 60,26 61,73 65,90 66,08 65,52	65,83	1191,80	555,40	2,146		6,66%	14,49%	21,15%	68,50%	320	0,94	301,42		187,00	

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 45: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura C.

DOSAGEM MARSHALL - Mistura C - 25% RAP																				
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Tot	h (mm)	h Médio (mm)	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm³)	Gmb (g/cm³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator de Correção	Estabilidade e Corrigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c.nm)	Fluência Média (c.nm)
11				67,34 66,79 66,78 63,04	66,97	1284,10	560,90	560,90	2,289		5,90%	11,65%	17,55%	66,36%	262	0,92	239,93		142,00	
31	4,00%	5,22%		63,48 63,66 63,99 63,58 64,45	63,39	1186,30	527,00	527,00	2,251	2,43	7,48%	11,45%	18,93%	60,49%	186	1,00	186,44	221,71	148,00	146,67
51				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	64,01	1194,80	528,40	528,40	2,261		7,06%	11,50%	18,56%	61,96%	242	0,99	238,76		150,00	
12				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	62,38	1233,00	536,20	536,20	2,300		4,82%	12,80%	17,62%	72,64%	594	1,03	611,46		1224,00	
32	4,50%	5,72%		62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	63,15	1197,40	529,70	529,70	2,261	2,42	6,44%	12,59%	19,02%	66,17%	198	1,01	199,74	348,09	244,00	545,33
52				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	62,81	1169,60	520,70	520,70	2,246		7,03%	12,51%	19,53%	64,02%	229	1,02	233,06		168,00	
13				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	62,95	1220,00	536,70	536,70	2,273		5,25%	13,75%	18,99%	72,38%	565	1,01	572,91		1318,00	
33	25,00%	5,00%	6,21%	62,52 62,66 62,18 62,58 62,41	62,41	1191,30	526,80	526,80	2,261	2,40	5,74%	13,68%	19,41%	70,45%	204	1,03	209,81	335,34	239,00	609,67
53				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	62,39	1180,80	521,80	521,80	2,263		5,67%	13,69%	19,86%	70,70%	217	1,03	223,30		272,00	
14				73,80 73,55 73,79 61,31 61,11 61,35 57,76 57,66 57,84	73,71	1452,70	642,70	642,70	2,260		5,11%	14,76%	19,87%	74,28%	X	0,78	X	X	X	
34	5,50%	6,70%		61,31 61,11 61,35 57,76 57,66 57,84	61,26	1183,30	525,00	525,00	2,254	2,38	5,38%	14,72%	20,09%	73,24%	546	1,06	579,06	450,20	1967,00	783,00
54				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	57,75	1080,30	485,70	485,70	2,224		6,62%	14,52%	21,15%	68,67%	275	1,17	321,34		199,00	
15				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	62,44	1193,60	530,40	530,40	2,250		4,89%	15,77%	20,66%	76,35%	560	1,03	575,50		1601,00	
35	6,00%	7,20%		61,97 61,70 63,32 64,37 64,14	61,75	1173,00	520,40	520,40	2,254	2,37	4,73%	15,80%	20,53%	76,95%	184	1,05	192,57	657,89	208,00	1304,00
55				62,59 62,24 62,30 63,64 62,70 63,10 63,30 62,37 62,76	63,94	1190,60	532,50	532,50	2,236		5,50%	15,67%	21,17%	74,02%	1220	0,99	1205,61		2103,00	

Fonte: Autor, 2018.

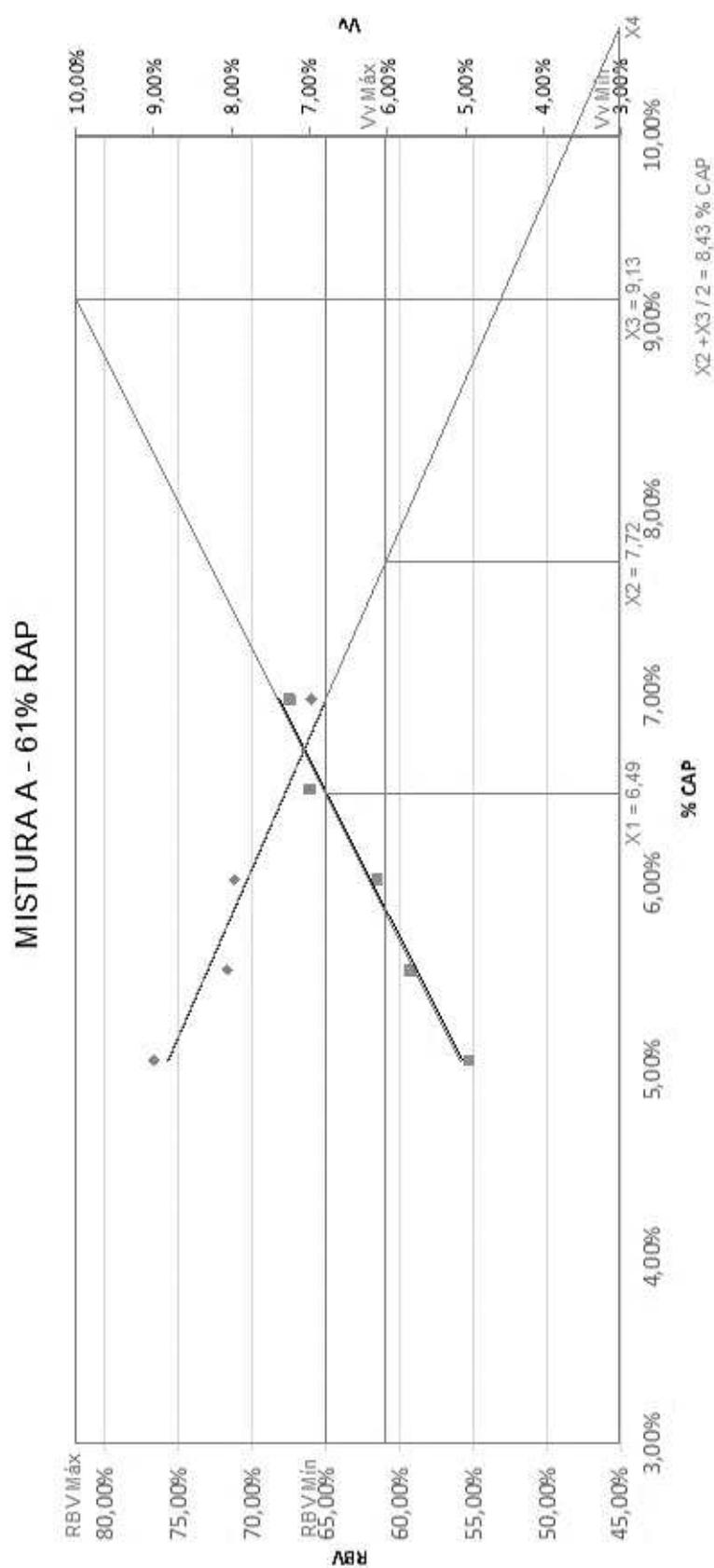
Tabela 46: Tabela de Dosagem Marshall para Mistura D.

DOSAGEM MARSHALL - Mistura D - 0% RAP																				
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP To _{total}	h (mm)	h Médio (mm)	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV	Leitura Estabilidade e (kgf)	Fator Correção	Estabilidade e Comigida (kgf)	Estabilidade e Média (kgf)	Fluência Lida (c:mm)	Fluência Média (c:mm)
16				61,39	61,87	1200,30	502,10	2,391			5,02%	11,64%	16,66%	69,85%	170	1,04	177,36		161,00	
				61,42																
36	5,00%	5,00%		60,14	60,29	1187,30	498,30	2,383		2,52	5,34%	11,60%	16,94%	68,50%	164	1,09	178,54	201,20	246,00	204,00
				60,16																
56				61,13	61,01	1199,10	505,80	2,371			5,81%	11,54%	17,36%	66,51%	232	1,07	247,69		205,00	
				61,12																
17				59,33	59,68	1189,40	499,00	2,384			4,58%	12,77%	17,35%	73,59%	829	1,11	917,84		1689,00	
				59,51																
37	5,50%	5,50%		61,60	61,42	1201,50	508,20	2,364		2,50	5,36%	12,66%	18,02%	70,28%	165	1,06	174,21	617,83	338,00	1201,67
				61,43																
57				60,42	60,69	1188,10	504,30	2,356			5,69%	12,62%	18,31%	68,93%	707	1,08	761,44		1578,00	
				61,34																
18				59,21	59,93	1164,30	493,00	2,362			4,73%	13,80%	18,53%	74,46%	439	1,10	482,71		1643,00	
				60,73																
38	0,00%	6,00%		61,13	60,45	1186,60	502,30	2,362		2,48	4,71%	13,80%	18,51%	74,58%	510	1,08	552,86	517,79	1709,00	1676,00
				59,47																
58				59,33	59,74	1166,70	499,80	2,334			5,84%	13,64%	19,48%	70,04%	X	1,11	X		-	
				60,10																
19				61,10	59,63	1168,10	500,10	2,336			5,09%	14,79%	19,88%	74,39%	324	1,11	359,22		1379,00	
				58,20																
39	6,50%	6,50%		59,58	58,11	1148,20	489,10	2,348		2,46	4,61%	14,86%	19,47%	76,33%	540	1,16	624,57	552,10	1856,00	1655,67
				58,18																
59				58,03	62,24	1167,50	496,30	2,352			4,41%	14,89%	19,30%	77,14%	651	1,03	672,50		1732,00	
				62,37																
20				62,64	62,72	1147,30	493,50	2,325			4,84%	15,85%	20,69%	76,62%	463	1,02	472,36		1472,00	
				62,17																
40	7,00%	7,00%		63,47	60,82	1137,20	487,00	2,335		2,44	4,42%	15,92%	20,34%	78,28%	448	1,07	480,76	476,56	1462,00	1467,00
				62,51																
60				60,69	65,10	1151,80	500,10	2,303			5,72%	15,70%	21,43%	73,28%	X	0,96	X		-	
				61,55																
				60,22																
				63,89																
				65,84																
				65,56																

Fonte: Autor, 2018.

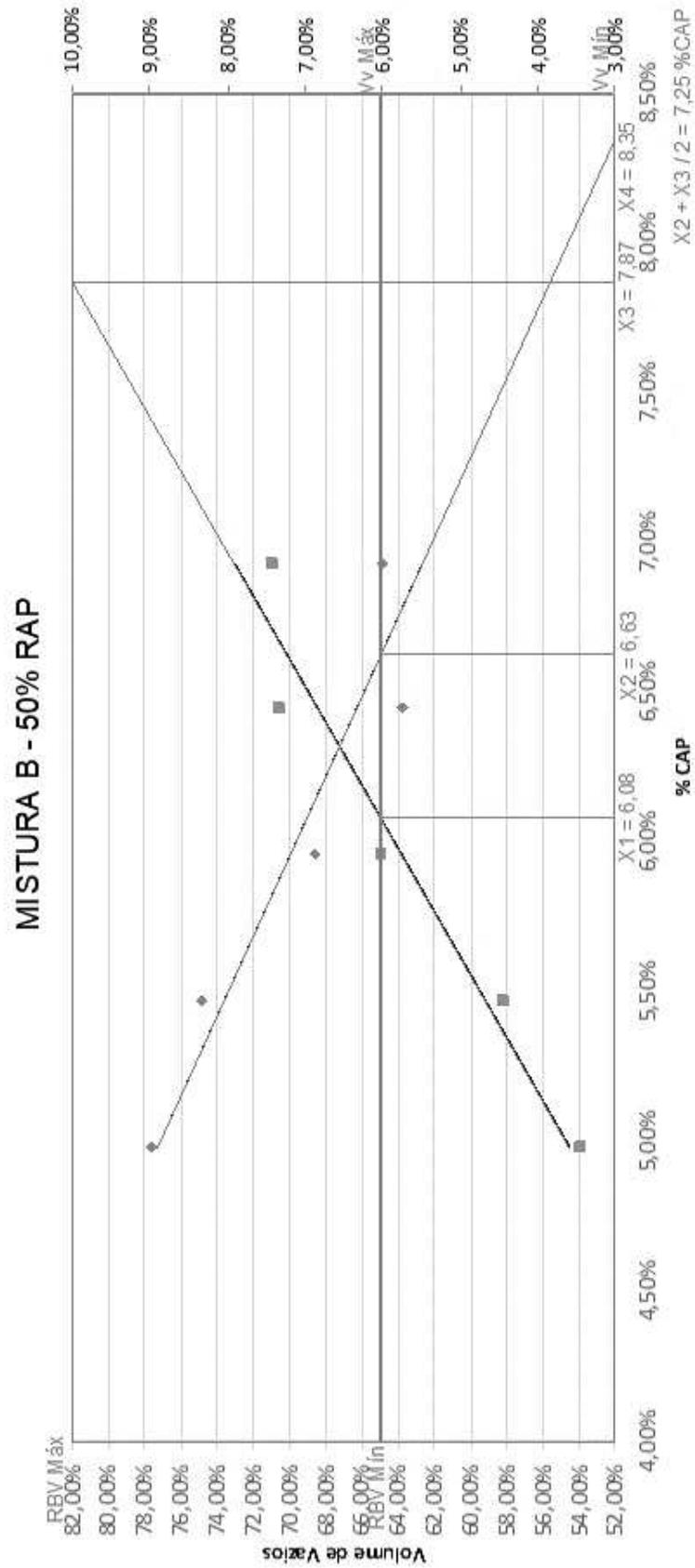
APÊNDICE D – GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE

Gráfico 37: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura A.



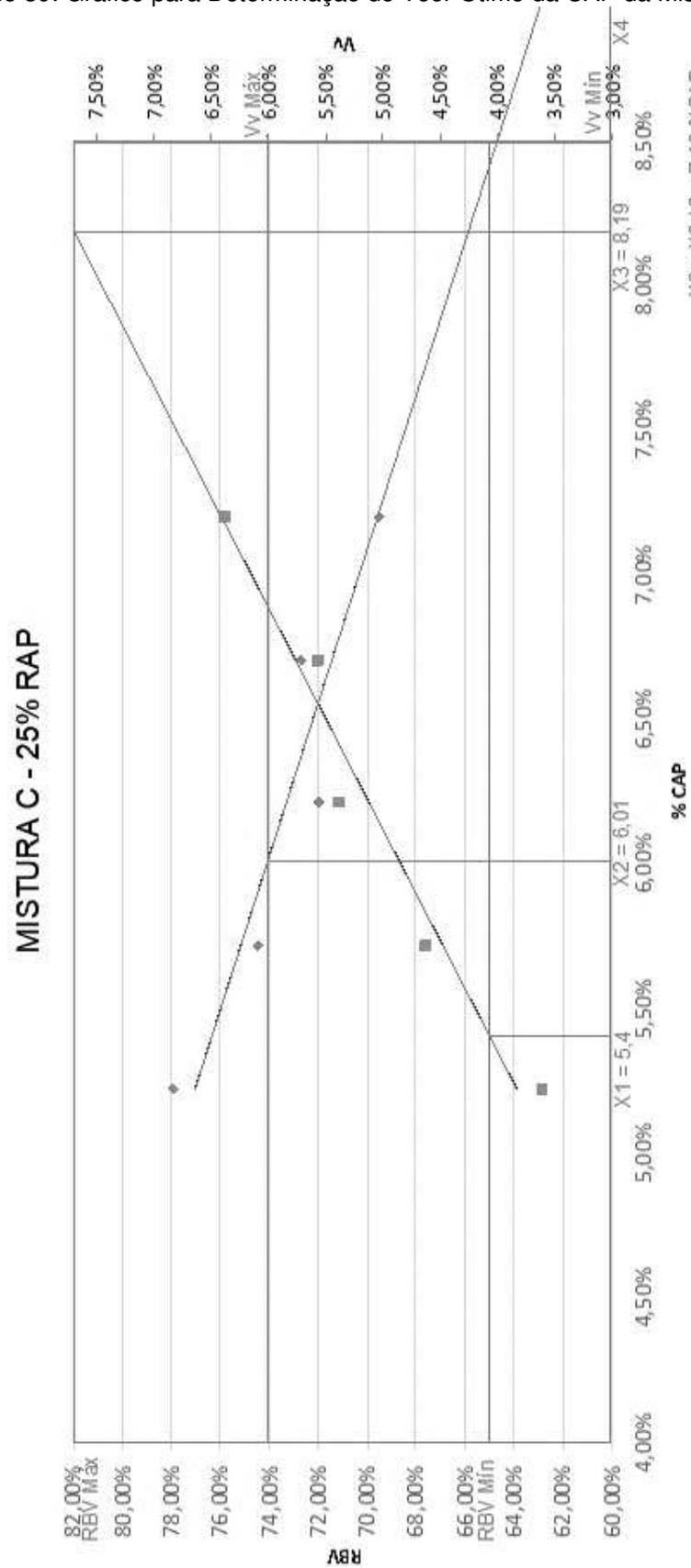
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 38: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura B.



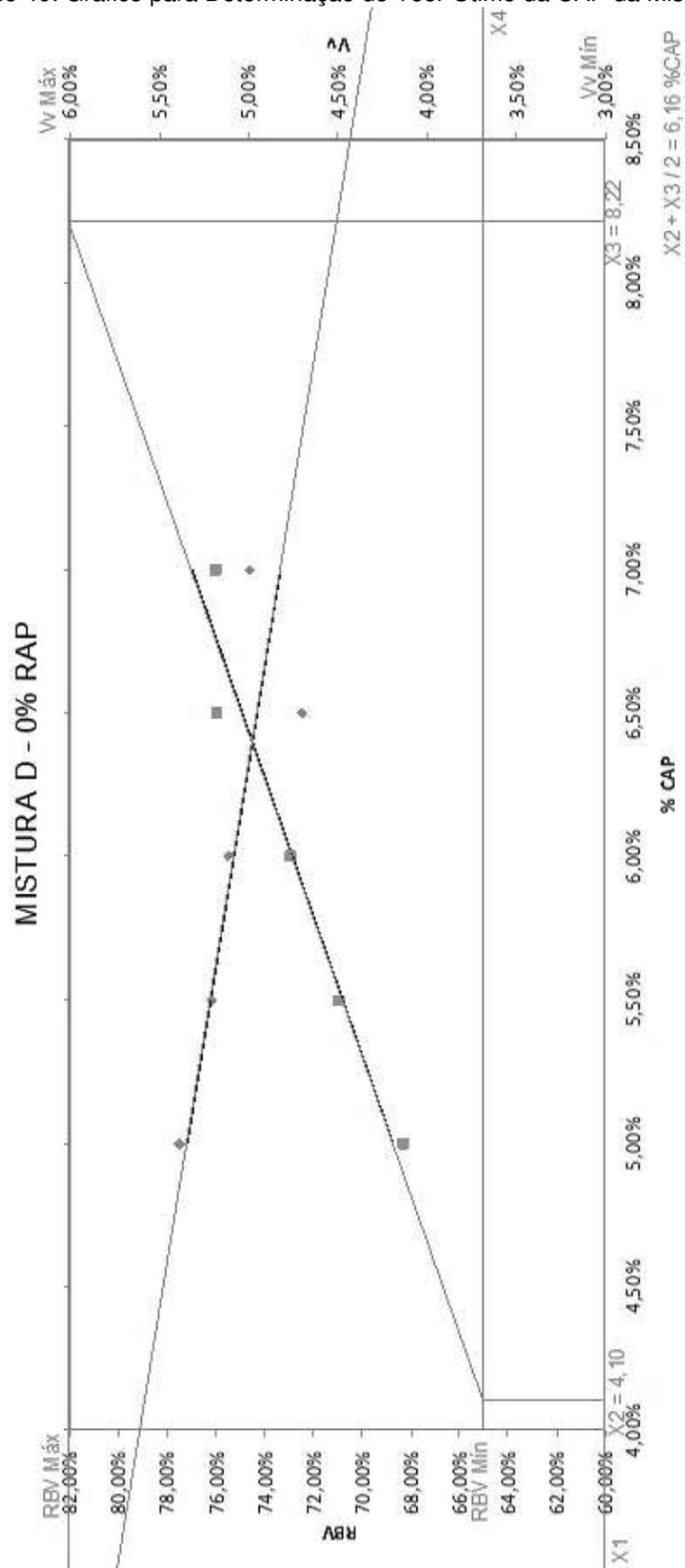
Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 39: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura C.



Fonte: Autor, 2018.

Gráfico 40: Gráfico para Determinação do Teor Ótimo da CAP da Mistura D.



Fonte: Autor, 2018.

APÊNDICE E – TABELAS DOS PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DOS CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM TEORES ÓTIMOS DE LIGANTE

Tabela 47: Parâmetros Volumétricos da Mistura A com Teor Ótimo de CAP.

Mistura A - 61% RAP												
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV
61	61,00%	5,49%	8,43%	1177,80	570,50	570,50	2,065	2,224	7,17%	16,95%	24,12%	70,26%
62				1163,70	561,50	561,50	2,072		6,81%	17,01%	23,82%	71,40%
63				1159,60	560,70	560,70	2,068		7,01%	16,98%	23,98%	70,78%
64				1180,00	579,00	579,00	2,038		8,36%	16,73%	25,09%	66,67%
65				1184,10	579,00	579,00	2,045		8,05%	16,79%	24,83%	67,60%
66				1163,90	564,50	564,50	2,062		7,29%	16,92%	24,22%	69,89%
67				1160,50	560,50	560,50	2,070		6,90%	17,00%	23,90%	71,11%
68				1182,40	575,50	575,50	2,055		7,62%	16,86%	24,48%	68,88%
69				1196,10	598,50	598,50	1,998		10,14%	16,40%	26,54%	61,80%

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 48: Parâmetros Volumétricos da Mistura B com Teor Ótimo de CAP.

Mistura B - 50% RAP												
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV
70				1197,00	559,70	559,70	2,139		6,57%	15,10%	21,67%	69,68%
71				1171,30	551,30	551,30	2,125		7,18%	15,00%	22,18%	67,62%
72				1180,10	553,70	553,70	2,131		6,89%	15,05%	21,94%	68,59%
73				1176,80	551,00	551,00	2,136		6,69%	15,08%	21,77%	69,25%
74	50,00%	4,89%	7,25%	1181,00	550,30	550,30	2,146	2,289	6,24%	15,15%	21,39%	70,82%
75				1181,00	549,20	549,20	2,150		6,06%	15,18%	21,24%	71,49%
76				1179,50	557,00	557,00	2,118		7,49%	14,95%	22,44%	66,63%
77				1182,50	555,50	555,50	2,129		7,00%	15,03%	22,03%	68,21%
78				1184,00	554,80	554,80	2,134		6,77%	15,07%	21,83%	69,00%

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 49: Parâmetros Volumétricos da Mistura C com Teor Ótimo de CAP.

Mistura C - 25% RAP												
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV
79	25,00%	5,90%	7,10%	1175,70	521,60	521,60	2,254	2,369	4,85%	15,58%	20,44%	76,25%
80				1174,50	520,50	520,50	2,256		4,75%	15,60%	20,35%	76,66%
81				1167,20	517,50	517,50	2,255		4,79%	15,59%	20,39%	76,49%
82				1173,00	519,30	519,30	2,259		4,65%	15,62%	20,27%	77,05%
83				1192,80	532,30	532,30	2,241		5,41%	15,49%	20,90%	74,12%
84				1176,20	519,70	519,70	2,263		4,46%	15,65%	20,11%	77,80%
85				1189,10	531,50	531,50	2,237		5,56%	15,47%	21,03%	73,55%
86				1143,00	517,50	517,50	2,209		6,77%	15,27%	22,04%	69,29%
87				1175,10	520,40	520,40	2,258		4,68%	15,61%	20,29%	76,93%

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 50: Parâmetros Volumétricos da Mistura D com Teor Ótimo de CAP.

Mistura D - 0% RAP												
CP	Teor de RAP	Teor de CAP	Teor de CAP Total	Peso Seco ao Ar (g)	Peso Submerso (g)	Volume do CP (cm ³)	Gmb (g/cm ³)	DMT	Vv	VCB	VAM	RBV
88	0,00%	6,16%	6,16%	1161,30	494,30	494,30	2,349	2,474	5,04%	14,09%	19,13%	73,67%
89				1163,30	492,60	492,60	2,362		4,55%	16,33%	20,87%	78,22%
90				1172,90	499,60	499,60	2,348		5,11%	16,23%	21,34%	76,07%
91				1173,00	499,80	499,80	2,347		5,14%	16,23%	21,36%	75,96%
92				1163,70	496,80	496,80	2,342		5,32%	16,19%	21,51%	75,27%
93				1153,40	491,70	491,70	2,346		5,18%	16,22%	21,40%	75,78%
94				1111,00	477,80	477,80	2,325		6,01%	16,08%	22,09%	72,78%
95				1169,00	497,50	497,50	2,350		5,02%	16,24%	21,27%	76,38%
96				1171,60	498,50	498,50	2,350		5,00%	16,25%	21,25%	76,46%

Fonte: Autor, 2018.