

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JASMINA CUNHA BARBOSA DE SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A FRIO**

São Luís
2019

JASMINA CUNHA BARBOSA DE SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A FRIO**

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho

São Luís
2019

Sousa, Jasmina Cunha Barbosa de.

Utilização de revestimento asfáltico fresado em misturas asfálticas a frio /
Jasmina Cunha Barbosa de Sousa. – São Luís, 2019.

86 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade
Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1.Reciclagem. 2.Fresagem. 3.Mistura a frio. 4.Emulsão. I.Título

JASMINA CUNHA BARBOSA DE SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A FRIO**

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

Aprovado em: 05 / 07 / 2019

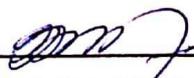
BANCA EXAMINADORA



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



1º membro: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana
Universidade Estadual do Maranhão



2º membro: Prof. Me. Marivaldo Costa Duarte
Universidade Estadual do Maranhão

Ao meu melhor amigo, Deus, por toda força e companhia durante todos os momentos de minha vida; e aos meus pais e irmã por todo apoio, incentivo e compreensão durante todo meu curso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pelo dom da vida; por ser meu melhor amigo e por sempre me fazer seguir firme nas minhas escolhas, por me fazer persistir nos meus sonhos e não desistir nas dificuldades.

À minha admirável professora orientadora Maria Teresinha de Medeiros Coelho, que aceitou fazer minha orientação, por toda paciência que teve comigo e pela nobre contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Benedita Cunha Barbosa e Leomar Moreira de Sousa, por todo amor e por serem minha base, inspiração e pela tranquilidade de saber que mesmo longe durante esses cinco anos, pra onde quer que eu vá sempre poderei voltar para casa. A minha amada irmã, Nayara, que muitas vezes é minha âncora e espelho por ter se tornado, mesmo longe de mim, uma mulher forte e independente de um pensamento só dela.

A minhas primas e a toda minha amada família, em especial à minha prima Lara que tem feito toda a diferença na minha vida depois que veio morar comigo em São Luís.

À querida Dona Lídia que foi meu anjo nesta vida, me dando um lar para morar sem querer nada em troca e me fazer acreditar na bondade do coração das pessoas. Aos pais que eu ganhei aqui em São Luís por intermédio dela, tio Neto e tia Joelma, que várias vezes foram um pai e uma mãe para mim quando mais precisei.

Aos meus amigos de turma, irmãos que Deus me deu ao longo do curso. Em especial àqueles que contribuíram de forma direta na conclusão deste trabalho: minha grande amiga e irmã Carla Eugênia; Renan, Andressa, Matheus Castro, Mateus Vidal. E, principalmente à minha amiga e irmã Gessiane Bezerra, pessoa que mais me apoiou e ajudou de todas as formas durante esses últimos meses de trabalho (nunca passamos tanto tempo juntas durante esses cinco anos de curso como nesses últimos dias de pré-entrega).

Meus sinceros agradecimentos ao seu José de Antonio, que me forneceu, de coração, um dos meus principais objetos de estudo neste trabalho, que é minha emulsão.

Serei eternamente grata a todos vocês, família e amigos!

“Não existe vitória sem sacrifício.”

Autor desconhecido

RESUMO

A reciclagem de pavimento é uma técnica que vem sendo bastante utilizada nos últimos anos, no entanto, existem poucos estudos sobre o assunto. O presente trabalho pretende realizar um estudo de misturas a frio com o uso de emulsão asfáltica do tipo RL-1C e de material obtido através de um processo de fresagem realizado na Avenida José Sarney, localizada na cidade de São Luís, fazendo uma análise de suas características mecânicas, através de ensaios realizados em laboratório para fins de utilização como camada de revestimento. As características das misturas foram estudadas através do método Marshall para misturas asfálticas a frio. Foram realizados ensaios de caracterização da emulsão asfáltica, do material fresado e dos novos agregados incorporados à mistura. As misturas foram preparadas com diferentes porcentagens de RAP (Reclaimed, Asphalt Paviment) às taxas de 25%, 50% e 75%. Foi feita também uma comparação com misturas confeccionadas com 100% de material fresado e também com outros trabalhos da área. Concluiu-se que as misturas asfálticas estudadas não possuem características adequadas para serem utilizadas como camada de revestimento do pavimento.

Palavras-chave: Reciclagem; Fresagem; Mistura a frio, Emulsão asfáltica.

ABSTRACT

The recycling of pavement is a technique that has been extensively used in recent years, however, there are few studies on the subject. The present research intends to accomplish a study of cold mixtures with the use of asphalt emulsion of type RL-1C and material obtained through a milling process accomplished at José Sarney avenue, located in the city of São Luís, analyzing its mechanical characteristics, through laboratory tests for use as a coating layer. The characteristics of the mixtures were studied by the Marshall method for cold asphalt mixtures. Characterization tests of the asphalt emulsion, the milled material and the new aggregates incorporated into the mixture were carried out. The mixtures were prepared with different percentages of RAP (Reclaimed, Asphalt Pavement) at rates of 25%, 50% and 75%. A comparison was also made with blends made from 100% milled material and also from other works in the area. It was concluded that the asphalt mixtures studied do not have adequate characteristics to be used as the floor covering layer.

Keywords: Recycling; Milling; Cold Blending, Asphalt Emulsion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquina Fresadora.....	24
Figura 2: Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas.....	28
Figura 3: Local da Fresagem e Coleta da Amostra.	31
Figura 4: Rua José Sarney antes da Fresagem	31
Figura 5: Superfície após Fresagem	32
Figura 6: Máquina Fresadora e Caminhão Basculante.....	32
Figura 7: Brita 1, Brita 0 e Pó de brita	33
Figura 8: Cimento e areia	33
Figura 9: Amostra da Emulsão RL-1C	34
Figura 10: Jogo de Peneiras	35
Figura 11: Tabela de Composição das Misturas Asfálticas.....	36
Figura 12: Máquina Los Angeles.....	37
Figura 13: Esferas de aço - Carga abrasiva.....	37
Figura 14: Brita logo após ser envolvida por ligante.....	38
Figura 15: Ensaio Equivalente de Areia.....	39
Figura 16: Ensaio Densidade e Absorção - Material fresado submerso	41
Figura 17: Frasco Chapman	42
Figura 18: Frasco Le Chatelier	43
Figura 19: Classificação de forma das partículas.....	44
Figura 20: Aparelho Rotarex.....	45
Figura 21: Viscosímetro Saybolt Furol	46
Figura 22: Ensaio de Peneiração	47
Figura 23: Compactador mecânico Marshall.....	49
Figura 24: Máquina Marshall	50
Figura 25: Molde com friso utilizado para ensaio RT.....	51
Figura 26: Brita envolvida por emulsão asfáltica	61
Figura 27: Requisitos para o projeto de mistura asfáltica reciclada com Emulsão.....	77
Figura 28: Fragmentos do corpo de prova após o Ensaio de Cântabro.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica da Brita 1	54
Gráfico 2: Curva granulométrica da Brita 0	55
Gráfico 3: Curva granulométrica do Pó de Brita	56
Gráfico 4: Curva granulométrica da Areia	57
Gráfico 5: Curva granulométrica do Fíler	58
Gráfico 6: Curvas granulométricas do RAP	59
Gráfico 7: Massa Específica Aparente - 25% RAP	71
Gráfico 8: Densidade Máxima Teórica - 25% RAP	71
Gráfico 9: Volume de Vazios - 25% RAP	72
Gráfico 10: Estabilidade - 25% RAP	72
Gráfico 11: Massa Específica Aparente - 50% RAP	73
Gráfico 12: Densidade Máxima Teórica - 50% RAP	73
Gráfico 13: Volume de Vazios - 50% RAP	74
Gráfico 14: Estabilidade - 50% RAP	74
Gráfico 15: Massa Específica Aparente para misturas com 75% de RAP	75
Gráfico 16: Densidade Máxima Teórica - 75% RAP	75
Gráfico 17: Volume de Vazios - 75% RAP	76
Gráfico 18: Estabilidade - 75% RAP	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Granulometria da Brita 1	53
Tabela 2: Granulometria da Brita 0	54
Tabela 3: Granulometria do Pó de Brita	55
Tabela 4: Granulometria da Areia	56
Tabela 5: Granulometria do Filer	57
Tabela 6: Granulometria do RAP	58
Tabela 7: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 1	59
Tabela 8: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 0	60
Tabela 9: Ensaio de Abrasão a Los Angeles do RAP	60
Tabela 10: Ensaio Equivalente de Areia	61
Tabela 11: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 1	62
Tabela 12: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 0	62
Tabela 13: Ensaio de Densidade e Absorção do RAP	63
Tabela 14: Ensaio de Massa Específica do Pó de Brita	63
Tabela 15: Ensaio de Massa Específica da Areia	63
Tabela 16: Ensaio de Massa Específica do RAP miúdo	63
Tabela 17: Ensaio de Resíduo por Evaporação	65
Tabela 18: Faixa Granulométrica da Mistura 1	67
Tabela 19: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 1	67
Tabela 20: Faixa Granulométrica da Mistura 2	68
Tabela 21: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 2	69
Tabela 22: Faixa Granulométrica da Mistura 3	69
Tabela 23: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 3	70
Tabela 24: Resistência a Tração da Mistura 1	78
Tabela 25: Resistência a Tração da Mistura 2	78
Tabela 26: Resistência a Tração da Mistura 3	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Energia

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CCT - Centro de Ciências Tecnológicas

cm - centímetro

cm³ - centímetro cúbico

CNT - Confederação Nacional de Transporte

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CP - Corpo de Prova

Dap - Massa específica aparente da mistura

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DMT - Densidade Máxima Teórica

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EAP - Emulsão Asfáltica de Petróleo

ES - Especificação de Serviço

g - gramas

g/cm³ - gramas por centímetros cúbico

h - horas

kgf - Quilograma-força

km - Quilômetros

LSP - Laboratório de Solos e Pavimentação

ME - Método de Ensaio

mm - milímetro

MPa - Mega Pascal

N - Newton

NBR - Norma Brasileira

RBV - Relação Betume/Vazios

RL - 1C - Emulsão Catiônica de Ruptura Lenta

SSF - Segundo Saybolt-Furol

UEMA - Universidade Estadual do Maranhão

VAM - Vazios do Agregado Mineral

VCB - Vazios Com Betume

Vv - Volume de Vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações Iniciais.....	16
1.2 Objetivos	18
1.3 Justificativa	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Pavimentos	20
2.2 Reciclagem de Pavimentos	21
2.3 Fresagem	23
2.4 Emulsões Asfálticas.....	26
2.5 Misturas asfálticas a frio.....	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Materiais utilizados nas misturas.....	30
3.2 Ensaios laboratoriais para agregados	34
3.3 Ensaios Laboratoriais para ligantes	46
3.4 Misturas Asfálticas.....	48
4 RESULTADOS	53
4.1 Ensaios Laboratoriais para Agregados	53
4.2 Ensaios Laboratoriais para Ligantes	64
4.3 Dosagem Marshall.....	65
4.4 Resultados obtidos pela Dosagem	70
4.5 Definição do Teor Ótimo.....	77
4.6 Resultados das misturas com Teor Ótimo	77
5 CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Na América Latina, o principal modal de transporte de pessoas e mercadorias é o rodoviário, segundo o Ministério do Planejamento. Para garantir boas condições de circulação, segurança e conforto na malha rodoviária são necessários altos investimentos na construção, manutenção e recuperação dessas vias.

O revestimento asfáltico na composição de pavimentos flexíveis é uma das soluções mais tradicionais e utilizadas na construção e recuperação de vias urbanas, vicinais e de rodovias. Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto - ABEDA (2010), mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimento asfáltico.

Para um bom desempenho dos revestimentos asfálticos faz-se necessária a utilização de alguns procedimentos e etapas, dentre elas destacam-se: projeto estrutural, escolha adequada de materiais e formulações de proporções ou misturas que atendam os condicionantes de uso do revestimento, e uso de técnicas adequadas de produção, distribuição e execução das camadas asfálticas na pista (BERNUCCI *et al.* 2006).

Segundo Bernucci *et al.* (2006), a estrutura do pavimento é composta por quatro camadas principais: revestimento de base asfáltica, base, sub-base e reforço do subleito. Dependendo da intensidade e do tipo de tráfego, do solo existente e da vida útil do projeto, o revestimento pode ser composto por uma camada de rolamento e camadas intermediárias ou de ligação.

Como toda a indústria, na área de pavimentação o mercado está sempre evoluindo e o engenheiro de pavimentação deve estar atento a esse fato. Sendo assim, o uso de agregados reciclados (RAP, do inglês Recycled Asphalt Pavement) surge como alternativa tecnologicamente viável e sustentável tanto do ponto de vista ambiental como econômico, podendo reduzir em até 45% o uso de material virgem (De Jesus, 2014).

Segundo De David (2006), a reciclagem a frio pode ser definida como um processo em que o RAP, material fresado, é combinado com ligante asfáltico novo e/ou agentes de reciclagem, agregado virgem (se necessário), produzindo misturas a

frio no local ou em usina. Enquanto que, a reciclagem a quente é definida como um método pelo qual o revestimento asfáltico fresado é misturado a quente com agregado virgem, asfalto e/ou agente rejuvenescedor e/ou agente de reciclagem para produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente, que pode ser produzida em usina ou *in situ*.

Segundo Bonfim (2007), a fresagem direcionada à restauração de pavimentos originou dois tipos de equipamentos e processos específicos para realização da mesma: “cold milling machine”, onde se faz o desbaste da estrutura por meio simples abrasivo; e processo a quente, que utiliza o pré-aquecimento da estrutura para facilitar o “desbaste” da mesma. Logo, a fresagem do pavimento pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura de ocorrência, ou seja, a frio ou a quente.

De acordo com a Norma DNIT 159/2011-ES, fresagem é uma operação em que é realizado o corte ou desbaste de uma ou mais camada(s) do pavimento asfáltico, por processo mecânico a frio. É realizada através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante.

A fresagem pode ter várias funções, dentre as quais se destacam: nivelamento do pavimento, conferir maior aderência ao pavimento e retirar antiga sinalização de pista. Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP, a fresagem é executada em áreas com ocorrência de remendos em mau estado, áreas adjacentes a panelas, rupturas plásticas e corrugações, áreas com grande concentração de trincas e outros defeitos.

Segundo estudos, ainda há a dúvida em relação à qualidade do material fresado que será reaproveitado no pavimento. Entretanto, como as características físicas e mecânicas dos agregados quase não se alteram e como não há dificuldades em lidar com o envelhecimento do ligante, o material pode ser usado como um componente de um novo pavimento asfáltico (BERNUCCI *et al.* 2007).

O presente trabalho se trata do estudo da utilização do RAP em um revestimento usinado a frio, onde utilizou a emulsão catiônica de ruptura lenta RL – 1C, visando gerar uma estabilização neste material, de modo a melhorar suas características físicas e mecânicas.

O RAP utilizado neste trabalho é um material obtido por meio de fresagem rasa, retirado do pavimento da Avenida José Sarney, em São Luis do Maranhão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Verificar a influência de revestimento asfáltico fresado (RAP) em misturas asfálticas usinadas a frio.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo são:

- Realizar a caracterização física e mecânica do RAP;
- Realizar a caracterização do ligante a ser utilizado.
- Estudar traços da mistura utilizando RAP
- Comparar as misturas produzidas com RAP com misturas feitas com materiais convencionais;
- Comparar os resultados obtidos com outros trabalhos semelhantes.

1.3 Justificativa

Com o RAP é possível fazer uma pavimentação ecológica, utilizando materiais fresados, os quais costumam ser descartados. Atualmente, esse material já pode ser produzido com um nível elevado de qualidade e por uma ampla gama de equipamentos (De Jesus, 2014).

O material obtido no processo da fresagem, como mencionado, é retirado do revestimento do pavimento asfáltico. Por não ser um material renovável, muitas das vezes é depositado em bota-fora, o que prejudica o meio ambiente.

Segundo David (2006), são vantagens da reciclagem dos pavimentos: o aproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorado, conservação da geometria e da espessura do pavimento existente, possibilidade de redução de custos, preservação do meio ambiente e redução do consumo de energia.

Apesar de todas essas vantagens, a utilização do RAP em projetos de pavimentação ainda é pouco comum no Brasil e demais países da América Latina. Isso se deve à ausência de exigências legais e também à abundância de recursos

naturais. Em outros países, cujas jazidas são escassas, essa é uma solução bastante sustentável do ponto de vista ambiental e econômico (De Jesus, 2014).

Ainda, de acordo com Dias *et al.* (2015), a utilização de emulsão asfáltica no material reciclado gera uma estabilização deste material, melhorando suas características físicas e mecânicas. Além disso, a emulsão asfáltica, por apresentar boa coesão inicial, permite a liberação do tráfego em poucas horas, reduzindo os transtornos gerados por uma manutenção de pavimento.

Por fim, este trabalho foi realizado a fim de dar continuidade a trabalhos anteriores sobre o assunto, utilizando o material fresado estocado no Laboratório de Mecânica de Solos e Pavimentação da UEMA.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentos

Segundo Bernucci *et al.* (2006), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

2.1.1 Tipos de Pavimentos

O pavimento rodoviário é classificado tradicionalmente em dois tipos básicos: 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.*, 2010).

Ainda segundo Bernucci *et al.* 2010, os pavimentos de concreto são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes.

É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos.

De acordo com Bernucci *et al.*(2010), os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, que podem ser denominadas de binder, ainda que essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico.

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de materiais asfálticos, podendo ser de duas maneiras principais, por penetração ou

por mistura. Por penetração refere-se aos executados através de uma ou mais aplicações de material asfáltico e de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas. No revestimento por mistura, o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico, antes da compressão (BERNUCCI *et al.* 2006).

2.2 Reciclagem de Pavimentos

A pavimentação proporciona qualidade de vida e desenvolvimento dos meios urbanos. Segundo dados do DNIT, a malha rodoviária brasileira tem mais de 70% de suas rodovias pavimentadas com idade superior a 40 anos desde a sua construção.

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de restauração do revestimento asfáltico envelhecido e oxidado. O revestimento é total ou parcialmente retirado do pavimento e tratado com adição de agentes rejuvenescedores com ou sem incorporação de novos agregados, de forma a recuperar as propriedades do revestimento. Além do forte apelo ecológico, é especialmente indicada para evitar elevações de greide com recapeamentos sucessivos (TAVARES *et al.*, 2015).

A reciclagem de pavimentos trata-se da reutilização, após processamento, dos materiais componentes do pavimento deteriorado. É considerada uma alternativa tecnologicamente econômica, viável, prática e rápida, onde toda ou parte da estrutura do pavimento existente é reaproveitada para a construção de camadas, incorporando ou não novos materiais (SANTOS e DEMUELENAERE, 2018).

Segundo Tavares *et al.* (2015), os métodos convencionais de manutenção tapa-buracos e recapeamento custam caro e nem sempre conduzem as soluções mais adequadas do ponto de vista tanto da durabilidade quanto do conforto dos usuários. Recapeamentos sucessivos elevam o greide da superfície acabada do pavimento, obrigando a realização de outras obras tais como a elevação de bocas-de-lobo tampões de poços de visita, sarjetas e meios-fios além de interferir com a drenagem superficial, gerando risco para motoristas. Além disso, as sucessivas camadas do material asfáltico sobrecarregam viadutos e pontes.

Ainda segundo Tavares *et al.* (2015), a operação tapa-buracos trata-se de uma solução emergencial de durabilidade reduzida e, em geral o reparo não fica perfeitamente nivelado com o pavimento antigo, causando desconforto aos usuários.

A reciclagem do material evita o desperdício do pavimento envelhecido, permitindo manter e/ou corrigir o greide de forma original do projeto do pavimento. A questão da proteção ao meio ambiente também é resolvida, já que não há bota-fora desses materiais envelhecidos.

Para a realização de qualquer tipo de reciclagem é necessário a priori, a retirada de amostras representativas do pavimento a ser reciclado, para que seja feita uma análise físico-química do ligante asfáltico envelhecido, além de determinar o seu grau de envelhecimento e as quantidades de novo asfalto, o Agente Rejuvenescedor (AR) – e, quando necessário, o uso de DOPE para melhorar a adesividade dos agregados. Ao final o material reciclado também deverá ser analisado, visando confirmar o traço de projeto, já que esses materiais costumam ser muito heterogêneos. Porém, se a reciclagem for bem realizada, a heterogeneidade não será obstáculo ao bom desempenho do pavimento reciclado (TAVARES *et al.* 2015).

2.2.1 Tipos de Reciclagem

Existem duas principais técnicas de reciclagem, a quente ou a frio, estas podem ser realizadas tanto no local da obra, como em usinas estacionárias.

2.2.1.1 Reciclagem a quente

Segundo Tavares *et al.* (2015), a reciclagem a quente pode ser realizada em usina do tipo drum mixer, em que o material fresado é classificado granulometricamente e misturado ao asfalto novo, agregando novos fileres, agentes rejuvenescedores e, se necessário, agente melhorador de adesividade, respeitando sempre as especificações e traços do projeto.

Pode ainda ser feita no local, onde se realiza o corte de fresagem da capa asfáltica, em seguida a adição de material novo (asfalto, agregados e agente rejuvenescedor) e a mistura de reciclagem no equipamento móvel. Se for realizada aplicação a quente pode-se utilizar o material reciclado como camada de rolamento (TAVARES *et al.*, 2015).

2.2.1.2 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio pode ser realizada em usinas com misturador tipo pug mill, utilizadas também para pré-misturados a frio. Mistura-se o material fresado, já classificado granulometricamente, com uma emulsão de ruptura lenta que já deverá possuir o agente rejuvenescedor incorporado a agregados novos, seguindo sempre traço e especificações do projeto (TAVARES *et al.*, 2015).

Por sua vez, a reciclagem a frio feita no local, o corte é feito a frio e a mistura da emulsão e dos agregados novos é feita na fresadora recicladora.

A reciclagem feita no local é mais indicada para rodovias e vias expressas, ou seja, para áreas que permitam a operação de equipamentos de grande porte. Contudo atualmente já existem fresadoras recicladoras a frio para uso em vias urbanas (TAVARES *et al.*, 2015).

2.3 Fresagem

A fresagem é a primeira etapa do processo de reciclagem. Segundo, Tavares *et al.* (2015), consiste na remoção da capa asfáltica do pavimento envelhecido ou que apresentem problemas na espessura originalmente projetada. Pode ser feita a frio ou a quente, sendo a primeira mais comum pelo fato de não necessitar de placas aquecedoras que utilizem como combustível o “gás de cozinha”. Entretanto, há de se observar que a fresagem a frio é mais agressiva ao pavimento, devido ao maior esforço mecânico, que resulta em maior em geração de furos pela quebra dos agregados mais graúdos.

A fresagem remove as irregularidades do pavimento e os danos superficiais (fissuras, trincas, remendos e desagregações localizadas), corrigindo o greide e eliminando sobrecargas em pontes e viadutos. É uma técnica de remoção rápida, de baixo custo, que produz uma superfície regular e bem nivelada, com excelente aderência, além de permitir a intervenção restrita somente à seção envelhecida ou com problemas (TAVARES *et al.* 2015).

2.3.1 Equipamentos necessários

Segundo a Norma DNIT 159/2011–ES, deve-se utilizar os equipamentos mais adequados para realização da fresagem de revestimento asfáltico, são eles:

a) Máquina fresadora, com capacidade de nivelamento automático e precisão de corte que permitam o controle da conformação da inclinação transversal, para atender ao projeto geométrico e cilindro fresador, do tipo específico para a fresagem, construído em aço especial, para girar em alta rotação, onde são fixados os dentes de corte, conforme mostra a figura 1.

Figura 1: Máquina Fresadora



Fonte: Infraestrutura Urbana, 2014

b) Vassoura mecânica autopropulsionada e que disponha de caixa para recebimento do material, para promover a limpeza da superfície fresada;

c) Caminhão (ões) basculante(s), provido (s) de lona;

d) Caminhão tanque, para abastecimento do depósito de água da fresadora;

e) Compressor de ar;

f) Detector de metais;

g) Serra de disco e rompedor pneumático, que permitam execução de arremates e cortes perpendiculares;

h) Carreta equipada com prancha apropriada para transporte do equipamento de fresagem.

2.3.2 Tipos de fresagem

Segundo a Norma DNIT 159/2011 – ES, a fresagem pode ser executada nas seguintes modalidades:

- Fresagem contínua - consiste na execução da fresagem na largura total da pista com a utilização predominante de equipamento de grande porte, podendo ser empregados equipamentos de pequeno e médio porte para acabamentos, em áreas limitadas por canteiros, dispositivos de drenagem e outros.
- Fresagem descontínua - constitui fresagem descontínua aquela aplicada em áreas descontínuas, de comprimentos e larguras variáveis, podendo atingir a largura total de uma ou mais faixas de tráfego. Nas intervenções em remendos menores são indicados equipamentos de pequeno e médio porte.
- Fresagem em cunha ou fresagem de garra - designação da fresagem executada na borda da pista, junto à sarjeta, inclinando-se o cilindro fresador, com o objetivo de promover a ancoragem da nova camada de revestimento. Deve ser observado o abaulamento ou declividade transversal do pavimento existente antes da sua execução, a fim de evitar inclinações que podem causar desconforto ou risco ao usuário.
- Fresagem para correção da inclinação do pavimento - fresagem aplicada para correção ou alteração das inclinações transversal e longitudinal do pavimento existente, sendo frequente em obras de duplicação de rodovia
- Fresagem de arremate - é a fresagem do pavimento aplicada no entorno de interferências (boca de lobo, tampão de caixa de visita etc.), geralmente executada com equipamento de pequeno porte, em complementação à fresagem executada com equipamento de grande porte. Sua aplicação é mais frequente em segmentos de travessias urbanas.

2.4 Emulsões Asfálticas

Segundo a NORMA DNIT 165/2013-EM, emulsão asfáltica é um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, ou então de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica. Pode ser definida também, como uma dispersão estável de dois líquidos imiscíveis.

Nas emulsões betuminosas, os líquidos são o asfalto (em forma de pequenos glóbulos) e a água. Suas variações possuem coloração marrom e consistência líquida. Sendo que, após a ruptura elas passam a ter uma coloração mais voltada ao preto (BERNUCCI et al., 2007).

De acordo com De David (2006), a emulsão betuminosa pode ser utilizada em diversos serviços de pavimentação, como: estabilização de solos, pré-misturados a frio, reciclagem a frio de pavimentos, pintura de ligação, tratamentos superficiais, capas selantes, lama asfáltica, microrrevestimento asfáltico, areia-asfalto, dentre outros.

O uso de emulsão asfáltica em um pavimento gera benefícios ecológicos e relacionados aos custos. Elas podem ser aplicadas sem necessidade de aquecimento e sem necessidade de secagem dos agregados, o que demonstra uma grande economia de energia e combustíveis. Seu transporte e armazenamento são relativamente facilitados, tendo em vista que requerem instalações simples, o que ameniza a geração de vapores tóxicos e poluentes (ABEDA, 2010).

A mistura de água e dos glóbulos de asfalto não caracteriza uma emulsão asfáltica. Faz-se necessário, ainda, a inclusão de um agente emulsificante. Tal agente tem como objetivo proporcionar a dispersão da fase asfáltica na fase aquosa e revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora (DNER, 1996).

Segundo Senço (2007), os agentes emulsificantes podem ser do tipo não-ionizáveis, que geram emulsões eletricamente neutras, e do tipo ionizáveis, que geram emulsões catiônicas ou aniônicas ao conferir a elas cargas elétricas positivas ou negativas respectivamente.

As emulsões podem ter diferentes teores de agente emulsificante, asfalto e água emulsificante. Convencionalmente, a proporção de agente emulsificante está no intervalo entre 0,2% a 1,0%, chegando a no máximo 2% em peso. O teor de asfalto se encontra entre 60 e 70% e no restante da porcentagem se encaixa a água (SENÇO, 2007).

2.4.1 Ruptura

Com relação à ruptura de uma emulsão asfáltica, a Brasquímica (2018) a define como sendo o fenômeno que ocorre quando os glóbulos de asfalto da emulsão sofrem uma ionização por parte do agregado mineral em contato com eles, formando um composto insolúvel em água que se precipitará sobre o material pétreo ou pela evaporação da fase aquosa. A velocidade de ruptura é a velocidade em que se efetua a separação das fases de uma emulsão em presença de um agregado.

Conforme Abeda (2010), a velocidade de ruptura depende de quatro principais fatores: tipo de emulsão, reatividade dos agregados (relacionada à superfície específica e teor de umidade deles), temperatura ambiente e temperatura dos materiais.

A classificação das emulsões brasileiras é feita em função de três variáveis: tempo necessário para ruptura, teor de asfalto presente na própria emulsão e carga iônica. Uma emulsão RL-1C, por exemplo, indica que esta emulsão possui ruptura lenta, viscosidade enquadrada na faixa 1 e carga catiônica, enquanto uma emulsão RR-2C indica uma que possui ruptura rápida, viscosidade enquadrada na faixa 2 e carga catiônica também.

De acordo com Bernucci et al. (2007) as emulsões catiônicas são as de maior uso atualmente pelo seu melhor desempenho nos serviços ligados à pavimentação. A tabela da figura 2 fornece as especificações das rupturas catiônicas de acordo com a norma DNIT 165/2013 em conformidade com o Conselho Nacional de Petróleo (CNP) em sua resolução nº 7 de 06/09/1988.

Neste estudo foi utilizada a emulsão do tipo catiônica de ruptura lenta, RL-1C, por ser a recomendada para a execução de misturas a frio com material reciclado de granulometria densa.

Figura 2: Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE									MÉTODO DE ENSAIO (1)	
		Ruptura Rápida		Ruptura Média		Ruptura Lenta				Ruptura Controlada	ABNT NBR	DNIT
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C	LA-1C	LAN	EAI	LARC		
Ensaio para a emulsão												
Viscosidade Saybolt-Furol a 25°C, máx.	s	90	-	-	-	90	90	90	90	90	14491:2007	
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C	s	-	100 a 400	20 a 200	100 a 400	-	-	-	-	-	14491:2007	
Sedimentação, máx.	% m/m	5	5	5	5	5	5	5	10	5	6570:2010	
Peneiração (0,84 mm), máx.	% m/m	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	14393:2012	
Resistência à água (cobertura), mín. (2)	%	80	80	80	80	-	-	-	-	-	14249:2007	
Adesividade em agregado miúdo, mín.	%	-	-	-	-	-	75	-	-	75	14757:2001	
Carga da partícula	-	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	neutra	-	positiva	6567:2009	156/2011
pH, máx.	-	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5	6299:2012	
Destilação												
Solvente destilado	% v/v	-	-	0 a 12	0 a 12	-	-	-	0 a 15	-	6568:2005	
Resíduo seco, mín.	% m/m	62	67	62	65	60	60	60	45	60	14376:2007	
Desemulsibilidade												
Min.	% m/m	50	50	-	-	-	-	-	-	-	6569:2008	157/2011
Máx.		-	-	50	50	-	-	-	-	-		
Mistura com filler sílico	%	-	-	-	-	máx. 2,0	1,2 a 2,0	-	-	mín. 2,0	6302:2008	
Mistura com cimento	%	-	-	-	-	máx. 2,0	máx. 2,0	-	-	mín. 2,0	6293:2001	
Ensaio para o resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896:2012												
Penetração a 25°C (100 g e 5s)	mm	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	4,0 a 15,0	-	4,0 a 15,0	6576:2007	155/2010
Teor de betume, mín.	%	97	97	97	97	97	97	97	97	97	14855:2002	
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	40	40	40	40	40	40	40	40	40	6293:2001	

Fonte: DNIT 165/2013, 2013.

2.5 Misturas asfálticas a frio

Os revestimentos asfálticos são compostos por agregados minerais com ligante asfáltico misturados de acordo com suas propriedades, que desta forma, originam uma camada flexível, impermeável, resistente às solicitações do tráfego e às influências climáticas (SILVA *et al.* 2016).

Segundo Silva *et al.* (2016), além de proporcionar conforto e segurança aos usuários, um revestimento bem projetado, pode garantir maior vida útil ao pavimento, principalmente por proteger suas camadas subjacentes. Por isso, para que isto ocorra é de grande importância sempre analisar o material empregado nos revestimentos asfálticos, as suas características tecnológicas, bem como o comportamento mecânico das misturas.

Segundo (SILVA *et al.* 2016), as misturas asfálticas a frio necessitam de um controle rigoroso na dosagem, na mistura usinada e durante a execução na pista, devendo cumprir a exigências quanto à resistência, à flexibilidade e à durabilidade para resistirem às ações do tráfego e do clima que podem interferir no bom desempenho do pavimento.

Quanto aos tipos de revestimentos asfálticos produzidos por mistura a frio, destacam-se o pré-misturado a frio (PMF), a lama asfáltica, o microrrevestimento asfáltico e a mistura asfáltica reciclada (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para obtenção de misturas asfálticas recicladas a frio, o projeto de cálculo tem como objetivo determinar a quantidade necessária de agregado virgem para assegurar que sejam atendidos os quesitos necessários. Para isso, é necessário que se desenvolva um estudo em laboratório, onde são produzidas amostras de misturas contendo várias porcentagens de ligante asfáltico e por meio de diferentes ensaios, determinam-se suas propriedades. A mistura que obtiver os melhores resultados será a selecionada (DNER, 1994).

3 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa, iniciou-se com as pesquisas bibliográficas sobre o referido tema, com posterior realização de ensaios para definição e comparação de resultados.

Para este trabalho foram realizados os ensaios necessários para caracterização dos materiais, definição dos traços das diferentes misturas e análise dos resultados.

Definidas as misturas, foram realizados os ensaios com as mesmas para comparação com outros trabalhos e conclusão deste estudo.

Os ensaios de laboratório estão, a seguir, descritos de forma breve e sucinta acompanhados de suas respectivas normas que descrevem detalhadamente os procedimentos para realização de cada um.

3.1 Materiais utilizados nas misturas

3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho são: agregados virgens e material fresado proveniente de revestimento asfáltico envelhecido.

3.1.1.1 Material fresado

Foi utilizado o material fresado que já se encontrava estocado no Laboratório de Mecânica de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão, pois o mesmo tinha sido utilizado em pesquisas anteriores.

O material fresado – ou RAP- foi extraído pelo processo de fresagem realizado no pavimento da Avenida José Sarney, no trecho localizado entre os bairros do Tirirical e Jardim São Cristóvão, zona metropolitana de São Luís, Maranhão, conforme mostra nas figuras de 3 a 5.

Figura 5: Superfície após Fresagem



Fonte: Heluy, 2018.

Pela aparência do material estocado, percebe-se que ocorreu uma fresagem do tipo rasa.

Na figura 6, tem-se o equipamento utilizado no momento da retirada do material.

Figura 6: Máquina Fresadora e Caminhão Basculante.



Fonte: Heluy, 2018.

3.1.1.2 Agregados virgens

Os agregados virgens utilizados nas misturas foram a Brita 1, Brita 0, Pó de Brita (figura 7), Areia e Cimento Portland (figura 8). Todos foram disponibilizados pelo Laboratório de Mecânica de Solos e Pavimentação da UEMA.

Figura 7: Brita 1, Brita 0 e Pó de brita



Fonte: Autor, 2019.

Figura 8: Cimento e areia

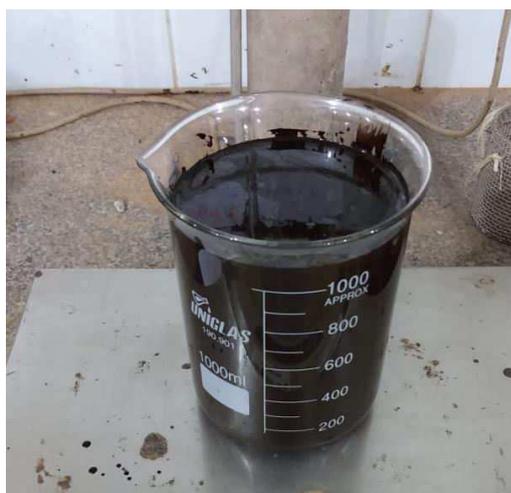


Fonte: Autor, 2019.

3.1.2 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa EMAM Asfaltos. Trata-se de uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL – 1C (figura 9).

Figura 9: Amostra da Emulsão RL-1C



Fonte: Autor, 2019.

3.2 Ensaios laboratoriais para agregados

3.2.1 Análise granulométrica por peneiramento para os agregados virgens

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 083/98 e tem como objetivo determinar a composição granulométrica de um material, além de definir sua dimensão máxima.

O ensaio consiste em basicamente tomar uma amostra mínima do agregado, determinada pela norma DNER – ME 083/98, e jogá-la no conjunto de peneiras justapostas agitando bastante para o material ser bem distribuído. O jogo de peneiras (figura 10) é padronizado pela DNER –ME 035/95 e é composto pelas peneiras de abertura: 50 – 38 – 25 – 19 – 9,5 – 4,8 – 2,0 – 1,2 – 0,6 – 0,42 – 0,30 – 0,15 – 0,075 mm, incluindo tampa e fundo.

Todos os agregados das misturas foram submetidos a este ensaio e a execução do mesmo foi igual para todos. Sendo que antes da realização do ensaio, todas as amostras foram secas em estufa a 110° C para a constância de peso.

O peso retido em cada peneira era pesado e anotado para posterior construção da curva granulométrica, de cada um dos agregados.

Figura 10: Jogo de Peneiras



Fonte: Autor, 2019.

3.2.2 Análise granulométrica para o RAP

Este ensaio foi realizado de acordo com a Especificação Técnica de Serviço para Reciclagem de Pavimentos com Emulsão Asfáltica - ET-DE-P00/034, utilizada para avaliar se há ou não necessidade de se acrescentar material virgem à mistura. O jogo de peneiras deste ensaio foi o apropriado para obter a análise granulométrica do RAP. O material seria acrescentado com o objetivo de enquadrá-la em uma das faixas da especificação. O RAP foi peneirado conforme o jogo de peneiras da faixa II (figura) da especificação de serviço pelo fato de possuir uma boa quantidade de finos.

Figura 11: Tabela de Composição das Misturas Asfálticas

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando		Tolerância
ASTM	mm	I	II	
1 1/4"	31,0	100	-	
1"	25,0	90 – 100	-	± 8
3/4"	19,0	80 – 100	100	± 8
1/2"	12,5	-	75 – 95	± 8
3/8"	9,5	45 – 80	70 – 90	± 8
Nº 4	4,75	28– 60	44 – 72	± 8
Nº 10	2,0	20 – 45	22 – 50	± 10
Nº 40	0,42	10 – 32	8 – 26	± 10
Nº 80	0,18	8 – 20	4 – 16	± 10
Nº 200	0,075	3 – 8	2 – 10	± 3

Fonte: Especificação de serviço ET-DE-P00/034, 2006.

3.2.3 Abrasão Los Angeles

Este ensaio é normatizado pela DNER-ME 035/98 e tem como objetivo determinar a resistência a abrasão dos agregados.

A amostra do ensaio é previamente lavada e seca em estufa a 110° C e então segregada até quantidade que atenda uma das 6 faixas propostas pela sua norma. Posteriormente o material é colocado no tambor de abrasão próprio do ensaio junto às cargas abrasivas (figura 12), que são esferas com diâmetro de aproximadamente 47,6mm e com peso que varia de 390g a 445g.

Após o material ser submetido a uma velocidade de 30 a 33 rotações por minuto na máquina de Los Angeles. Retira-se o mesmo do tambor, e este é peneirado na peneira de abertura de 1,7mm, excluindo o material passante. O peso do agregado é aferido na balança e usa-se a equação 1, para obter o resultado do ensaio:

$$An = \frac{Mn - M'n}{Mn} \quad (1)$$

Em que :

- A_n = abrasão los Angeles (%)
- M_n = massa total da amostra seca (g)
- M'_n = massa da amostra lavada e seca, retida na peneira de abertura 1,7mm após o ensaio (g).

A norma DNIT 153/2010 permite um valor máximo para o uso do agregado em misturas a frio.

Figura 12: Máquina Los Angeles



Fonte: Autor, 2019.

Figura 13: Esferas de aço - Carga abrasiva



Fonte: Autor, 2019.

3.2.4 Adesividade

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 078/94, quando se utiliza agregados graúdos, e pela norma DNER-ME 079/94 quando se utiliza agregados miúdos; e tem o objetivo de verificar a aderência destes agregados ao ligante asfáltico.

Na verificação dos agregados graúdos, a norma recomenda selecionar uma amostra de 500 gramas de material passando na peneira 19 mm e retido na 12,7 mm devidamente lavadas com posterior imersão em água destilada por tempo de 1 minuto. Posteriormente, a amostra deve ser seca em estufa a 120° C, e nela permanecer durante 2 (duas) horas.

Como o ensaio foi realizado com emulsão, o agregado e o ligante foram misturados à temperatura ambiente. Sobre o agregado foi colocado 17,5 g de emulsão, realizando de imediato o completo envolvimento do agregado com o ligante, conforme a Figura 13. O agregado envolvido pelo ligante foi colocado em uma superfície lisa para curar. Em seguida, colocado no béquer totalmente recoberto com água destilada. O frasco foi levado para estufa a 40° C e mantido em repouso durante 72 horas.

Figura 14: Brita logo após ser envolvida por ligante



Fonte: Autor, 2019.

Após esse tempo, o conjunto emulsão e agregado é retirado da estufa e é feito uma verificação visual da película de betume formada na superfície do agregado.

Se o material estiver totalmente coberto sem deslocamento da película, o resultado é satisfatório, caso contrário, o agregado não será adequado.

3.2.5 Equivalente de areia

Este ensaio tem como objetivo analisar a quantidade de material deletério presente no agregado miúdo. Os devidos procedimentos foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 054/97 (Figura 14).

O valor mínimo para o equivalente de areia é de 55%, este é delimitado pela Norma DNIT 153/2010. Esse limite mínimo permite que o agregado miúdo utilizado no revestimento seja de boa qualidade, não afetando a qualidade do revestimento.

A fórmula utilizada para determinar o percentual de equivalente areia é:

$$EA = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

H1 = Altura do agregado sedimentado (cm);

H2 = Altura da argila em suspensão (cm).

Figura 15: Ensaio Equivalente de Areia



Fonte: Autor, 2019.

3.2.6 Densidade e Absorção

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 081/98 e tem como objetivo obter valores de densidade aparente de agregados graúdos, além de sua capacidade de absorção.

Este ensaio é de suma importância para a determinação dos teores de materiais nas misturas, pois serão necessárias para o cálculo de densidade máxima teórica das mesmas, importante para determinar volume de vazios e a relação betume-vazios.

O ensaio é feito da seguinte forma: o material retido e já peneirado na peneira de malha 4,8 mm é lavado e seco em estufa. Após a secagem, o mesmo é posto em um recipiente com água por um período de 24 horas. Passado este período o material é retirado da água e levemente seco em um pano limpo apenas para retirar o excesso e pesado. Esta etapa do ensaio determina a absorção do agregado.

A seguinte etapa, que determina a densidade do agregado começa com a colocação da amostra em uma cesta vazada que é submerso em um recipiente com água em cima da balança previamente tarada. O valor registrado será a massa de água deslocada. Por fim o material é colocado na estufa e novamente pesado.

A figura 15 apresenta detalhes desse ensaio. Na equação 3, a fórmula para encontrar a densidade:

$$Dap = \frac{Ms}{Mh - L} \quad (3)$$

Onde :

- Dap = densidade aparente do material;
- Ms = massa do agregado seco em estufa (g);
- Mh = massa do agregado na condição saturada superfície seca (g);
- L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso (g).

Figura 16: Ensaio Densidade e Absorção - Material fresado submerso



Fonte: Autor, 2019.

3.2.7 Massa específica por meio do Frasco Chapman

Este ensaio tem por finalidade obter a densidade de agregados miúdos e é regido pela norma DNER-ME 194/98. Para este ensaio utilize-se um aparelho próprio, chamado frasco de Chapman (Figura 16).

O ensaio consiste em preencher o frasco com água destilada até a marca de 200cm³. Posterior a isso, toma-se uma mostra de 500 gramas do agregado previamente lavado e seco em estufa, e coloca-o cuidadosamente no frasco. O frasco é levemente agitado para a retirada de bolhas. Finalizado, faz-se a mistura. A fórmula para encontrar a densidade é:

$$d = \frac{500}{L_f - 200} \quad (4)$$

Em que L_f é a leitura feita no final do ensaio.

Figura 17: Frasco Chapman



Fonte: Autor, 2019.

3.2.8 Massa específica por meio do Frasco Le Chatelier

A norma utilizada para este ensaio é a DNER – ME 085/94, que indica a utilização do frasco volumétrico Le Chatelier (figura 17) para a determinação da massa específica do cimento e outros materiais em pó.

Inicialmente, coloca-se uma massa de aproximadamente 60 g de cimento no frasco Le Chatelier. Em seguida, coloca-se querosene no frasco até atingir a marca presente no pescoço dele que marca cerca de 0,0 cm³. Logo após, o cimento é inserido dentro do frasco com querosene com auxílio de um funil para não perder material no ensaio e é feita a leitura final que o material atinge.

Para calcular a massa específica do cimento (ρ), utiliza-se a equação 5, em que “m” é a massa de cimento inserida no frasco Le Chatelier e “v” é o volume deslocado por essa massa:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

Figura 18: Frasco Le Chatelier



Fonte: Autor, 2019.

3.2.9 Índice de forma

Este ensaio é normatizado pela NBR 7809/2006 e é importante para analisar a estrutura do grão do agregado através de um fator, que é calculado ao final do ensaio, que será necessário para aprovar se o material poderá ou não ser utilizado.

O ensaio consiste em selecionar 200 grãos de uma amostra do material que tenha sido retida da peneira de abertura de 9,5mm para cima.

O cálculo do número de grãos de cada fração é feito pela fórmula a seguir:

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

Onde :

200 = número de grãos necessários;

F_i = porcentagem de massa retida na fração i ;

N_i = quantidade de grãos da fração i necessária.

Após a seleção dos grãos mede-se cada um deles com o auxílio de um paquímetro (figura 18). Em cada um deles é medido o comprimento, a largura e espessura, representado pelas letras a , b e c respectivamente.

Após todas as medidas serem aferidas, calcula-se a relação b/a e c/b dos mesmos. A media dos valores irá classificá-lo, tendo como referência a tabela da figura 19:

Figura 18: Ensaio Índice de forma



Fonte: Autor, 2019.

Figura 19: Classificação de forma das partículas

Média das Relações b/a e c/b	Classificação da Forma
$b/a > 0,5$ 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.*, (2010).

3.2.10 Teor de betume

Este ensaio é regido pela norma DNER – ME 053/94 e tem por finalidade determinar o teor de betume na mistura asfáltica.

Para este experimento, usa-se um aparelho próprio chamado Rotarex (figura 20).

A amostra utilizada deve ser colocada na estufa a uma temperatura entre 100°C e 120°C durante uma hora. Posteriormente é selecionada uma porção de aproximadamente 1000 gramas do material que é colocado no prato que fica no interior do Rotarex. Junto com o agregado coloca-se uma certa quantidade de

solvente, e se espera aproximadamente 15 minutos para ligar a máquina e o agregado sofrer uma rotação gradativa que o aparelho faz.

O solvente “sujo” com o betume escoam por uma mangueira lateral sendo armazenado em um pequeno balde. O processo é repetido até o solvente sair com uma cor próxima a sua original. Por fim, o material é retirado e colocado na estufa para posteriormente ser pesado.

A porcentagem de betume é dada pela fórmula 7:

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \times 100 \quad (7)$$

Figura 20: Aparelho Rotarex



Fonte: Autor, 2019.

3.3 Ensaios Laboratoriais para ligantes

3.3.1 Ensaio de Viscosidade Saybolt Furol

A norma que padroniza o ensaio de viscosidade Saybolt-Furol (figura 21) para emulsão asfáltica é a DAER/RS-EL 202/01. O modo de realização deste ensaio tem uma certa diferença do ensaio realizado em um ligante asfáltico comum, como o CAP.

O principal parâmetro que define a trabalhabilidade e a consistência da emulsão é a viscosidade. Neste ensaio utiliza-se 450 gramas de ligante que é aquecido a temperatura de ensaio acrescido de 10° C a 15° C sob a placa de aquecimento. A amostra é colocada no tubo de viscosidade da máquina, o cronômetro é iniciado e a amostra é liberada atravessando o orifício e caindo em um frasco receptor. Quando o frasco alcança a marca de 60 ml, pausa-se o cronômetro e anota-se o valor registrado.

Com as medidas de tempo mensuradas em segundos Saybolt-Furol, traça-se um gráfico em que a linha intermediária define as temperaturas para determinadas viscosidades.

Figura 21: Viscosímetro Saybolt Furol



Fonte: Autor, 2019.

3.3.2 Resíduo por Evaporação

O ensaio de resíduo por evaporação determina a quantidade de resíduo seco existente em uma emulsão betuminosa após o aquecimento desta até a total evaporação da água, determinada por peso constante. Tal ensaio é padronizado pela DAER/RS-EL 210/01.

3.3.3 Peneiração

Para realização deste ensaio foram realizados os procedimentos descritos na norma DAER/RS-EL 207/01. O ensaio de peneiração (figura 23) consiste em determinar a porcentagem em peso de partículas de asfalto retidas na peneira de número 20 (0,84 mm) e serve para garantir a qualidade na fabricação da emulsão, observando se ela possui uma quantidade excessiva de asfalto em sua composição.

Segundo a norma, é necessário passar uma quantidade de 1000 ml de emulsão na peneira de número 20 e determinar, em peso, a porcentagem retida após o conjunto peneira e fundo ficar na estufa por duas horas em uma temperatura entre 105° C e 110° C.

Figura 22: Ensaio de Peneiração



Fonte: Autor, 2019.

3.4 Misturas Asfálticas

Segundo Bernucci *et al.* (2006, p. 205) “A dosagem de uma mistura asfáltica tem consistido até hoje na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante”. Porém, existem vários métodos para se encontrar o referido teor de ligante, com variação em diversos parâmetros como temperatura de ensaio, tipo de mistura, energia de compactação, entre outros.

Atualmente, existem vários métodos de dosagem de misturas asfálticas, como o Superpave, o Hubbard-Field e o Marshall (HELUY, 2018). Este último por ser o método mais utilizado e de maior abrangência no Brasil, foi o método escolhido para o presente trabalho.

3.4.1 Dosagem Marshall

Segundo De David (2006), o método Marshall consiste na moldagem de corpos de prova padronizados com composição de agregados e ligante asfáltico para posterior determinação das propriedades físicas (massa específica aparente, volume de vazios, vazios no agregado mineral e a relação de vazios do agregado mineral preenchidos com asfalto) e propriedades mecânicas (estabilidade e fluência).

3.4.1.1 Moldagem

Para moldagem seguiu-se os procedimentos para realização do método Marshall para misturas a frio, normalizado pelo DNER-ME 107/94.

Foram moldados três corpos-de-prova para cada teor de ligante asfáltico, cada com variadas porcentagens de material para cada mistura, cada um pesando aproximadamente 1200 g e com 63,5 cm de altura. Os teores variaram para cada porcentagem de RAP. Estes teores foram escolhidos baseados nas literaturas do referencial teórico deste trabalho.

Para a moldagem, foram realizados os procedimentos de secagem, separação das amostras e pesagem dos materiais pétreos, bem como, adição de água; mistura e adição de ligante; umidade de compactação e, por fim, compactação dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram compactados à temperatura ambiente com o compactador mecânico Marshall (figura 23), com aplicação de 75 golpes em cada face.

Após a compactação com 75 golpes de cada lado do corpo de, os corpos de prova foram levados para estufa durante 24 hs a uma temperatura de 60° C. Depois de ser retirado da estufa, aguardou-se mais duas horas para, então, serem desmoldados.

Figura 23: Compactador mecânico Marshall



Fonte: Autor, 2019.

3.4.2 Estabilidade Marshall

Segundo Bernucci *et al.* (2007), a estabilidade é a carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura.

Para este ensaio, os corpos de prova foram mantidos durante duas horas na estufa a uma temperatura de 40 °C. A norma DNER-ME 107/94 pede que o intervalo de tempo entre a retirada do corpo de prova da estufa a 40 °C e a realização dos ensaios de estabilidade e fluência não exceda 30 segundos.

Os corpos de prova foram colocados no molde de compressão da prensa e foi realizado o ensaio Marshall. Segundo a norma, é necessário que o êmbolo da prensa se eleve a uma velocidade de 50 mm por minuto até que o corpo se rompa. A

máquina Marshall (figura 24) fornece os valores da estabilidade, em kgf, e da fluência, em mm⁻².

Figura 24: Máquina Marshall



Fonte: Autor, 2019.

Para determinar o valor real da estabilidade, a leitura obtida na máquina deve ser multiplicada por um fator de correção “f” que depende da espessura “h” do corpo de prova. O fator de correção é determinado pela expressão:

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

3.4.3 Resistência a tração por compressão diametral

Esse ensaio é regulado pela norma DNER-ME 138/94, a qual descreve os métodos e equipamentos para a determinar a resistência à tração através do ensaio de compressão diametral. Ele consistem em aplicar um carga vertical, distribuída em um molde que contém um friso (figura 25) com o corpo de prova cilíndrico, até que ocorra o rompimento no plano diametral vertical, devido à tensão de tração.

Resistência à tração é calculada através da seguinte fórmula:

$$RT = \frac{2F_R}{100 \times \pi \times D_{cp} \times h_{cp}} \quad (9)$$

Onde:

- RT = Resistência à tração, Mpa;
- F_R = Carga de ruptura, N;
- D_{cp} = Diâmetro do corpo de prova em cm;
- h_{cp} = Altura do corpo de prova, em cm;

Figura 25: Molde com friso utilizado para ensaio RT



Fonte: Autor, 2019.

3.4.4 Desgaste Cântabro

Segundo Bernucci *et al.* (2006, p.327), o ensaio de desgaste cântabro é realizado para determinar a resistência à desagregação dos componentes presente no concreto asfáltico. O ensaio está padronizado no método DNER-ME 383/99. Ele consiste em analisar os corpos de prova na máquina Los Angeles, onde cada CP, com os diferentes teores de emulsão e RAP são submetidos à 300 revoluções em uma velocidade 30 r.p.m, sem adição de cargas abrasivas. As amostras são pesadas antes e depois de serem colocadas na máquina. Com isso é calculado o desgaste através da fórmula:

$$A = \frac{P - P_f}{P} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

- A= Desgaste da mistura (%);
- P= Peso inicial do corpo de prova (g);
- P'= Peso após o ensaio (g).

Segundo à norma do DNER, o desgaste máximo admitido é de 25%.

4 RESULTADOS

Conforme o exposto na metodologia deste trabalho, foram realizados diversos ensaios nos agregados, ligante e nas misturas asfálticas escolhidas para estudo. Os resultados obtidos estão apresentados neste capítulo, baseados em normas regulamentadoras, especificações de serviço e métodos de ensaio, conforme exposto no item anterior.

4.1 Ensaios Laboratoriais para Agregados

4.1.1 Granulometria

A granulometria dos materiais é de grande importância na análise da característica e comportamento dos agregados nas misturas. A seguir estão dispostas as tabelas 1 a 6 e gráficos 1 a 6, obtidos a partir das granulometrias realizadas em todos os materiais que irão compor as misturas asfálticas deste trabalho.

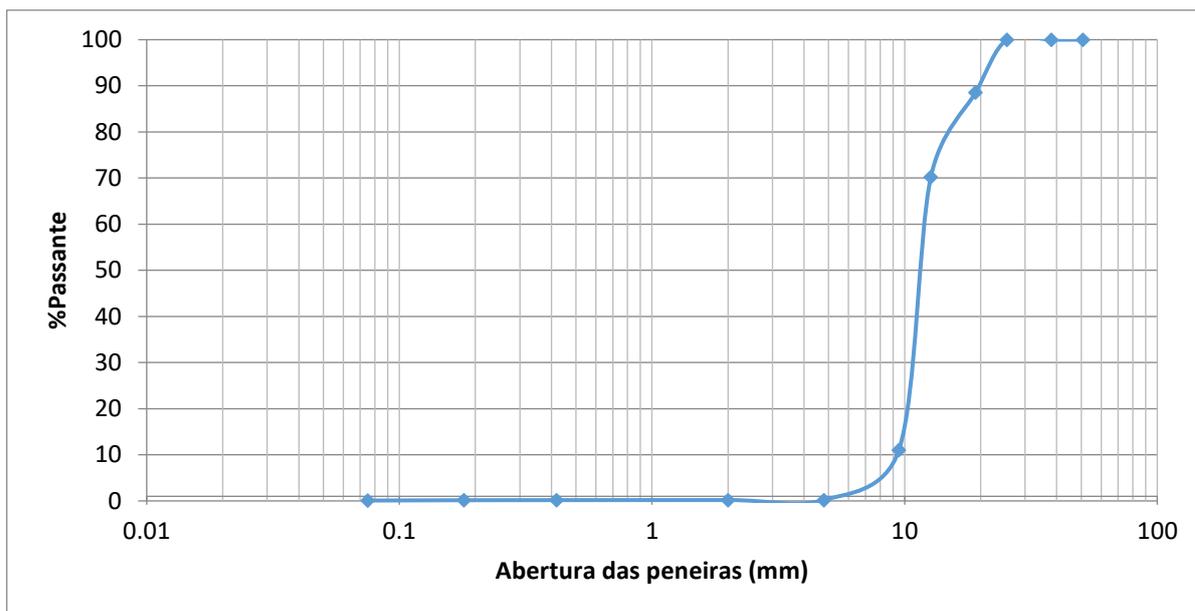
4.1.1.1 Brita 1

Tabela 1: Granulometria da Brita 1

Peneiras	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100
1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,1	88,57
1/2"	12,7	70,23
3/8"	9,5	11,07
4	4,8	0,21
10	2	0,19
40	0,42	0,17
80	0,18	0,15
200	0,075	0,08

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 1: Curva granulométrica da Brita 1



Fonte: Autor, 2019.

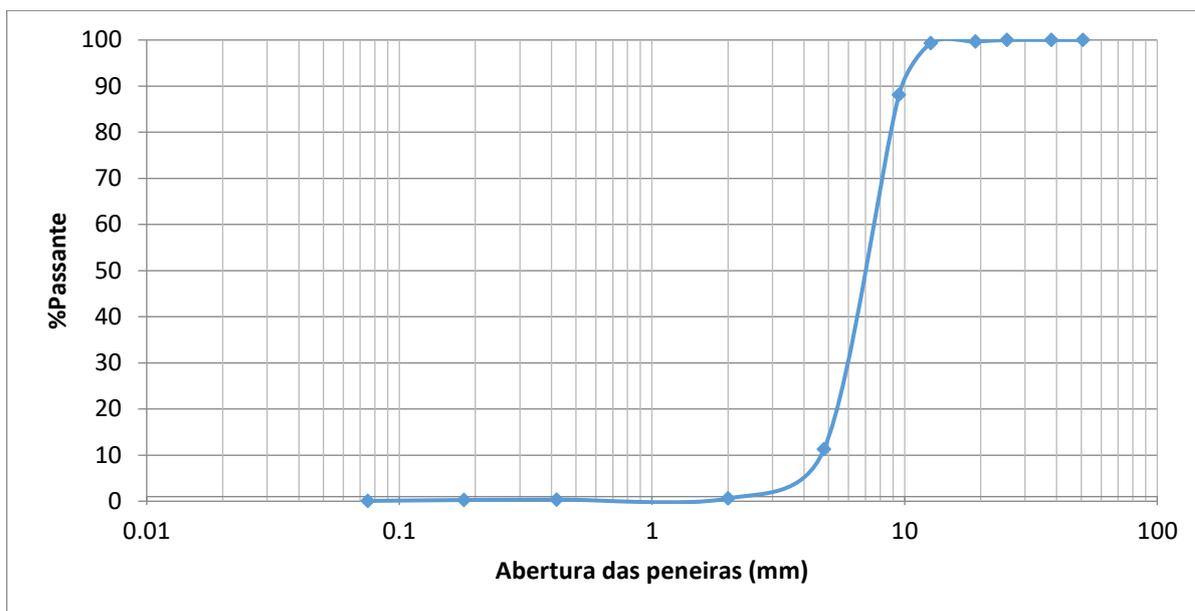
4.1.1.2 Brita 0

Tabela 2: Granulometria da Brita 0

Peneiras	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100
1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,1	99,66
1/2"	12,7	99,34
3/8"	9,5	88,12
4	4,8	11,3
10	2	0,6
40	0,42	0,36
80	0,18	0,26
200	0,075	0,07

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 2: Curva granulométrica da Brita 0



Fonte: Autor, 2019.

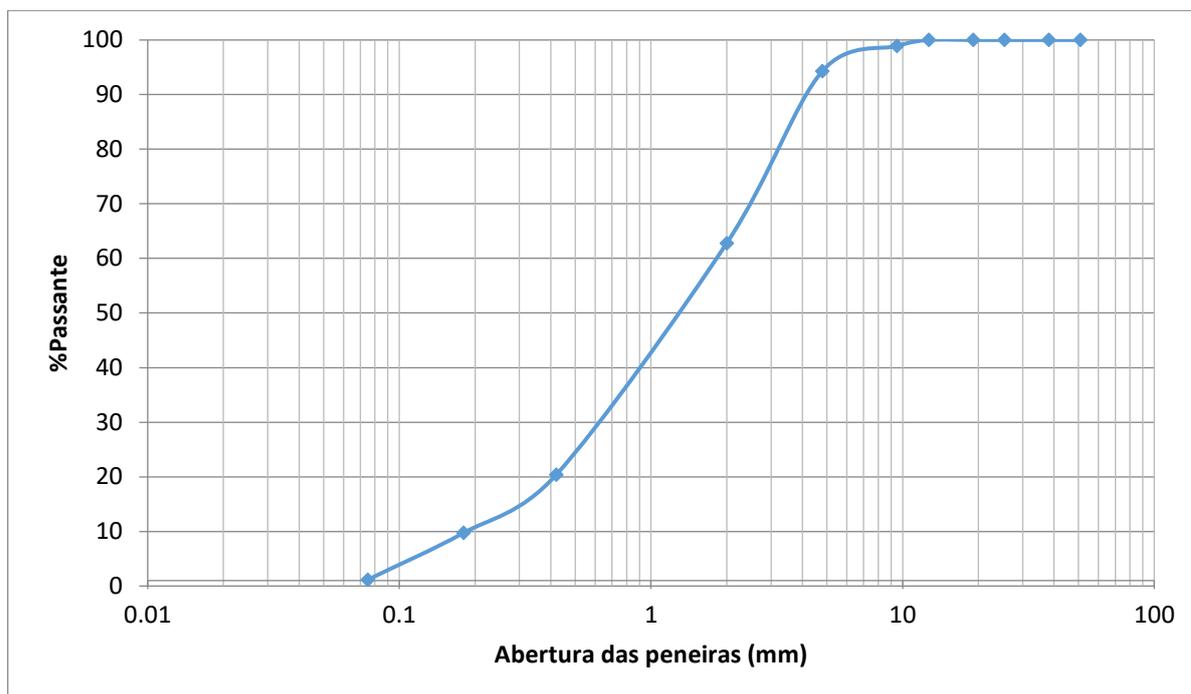
4.1.1.3 Pó de Brita

Tabela 3: Granulometria do Pó de Brita

Peneiras	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100
1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	100
3/8"	9,5	98,91
4	4,8	94,31
10	2	62,8
40	0,42	20,37
80	0,18	9,74
200	0,075	1,17

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 3: Curva granulométrica do Pó de Brita



Fonte: Autor, 2019.

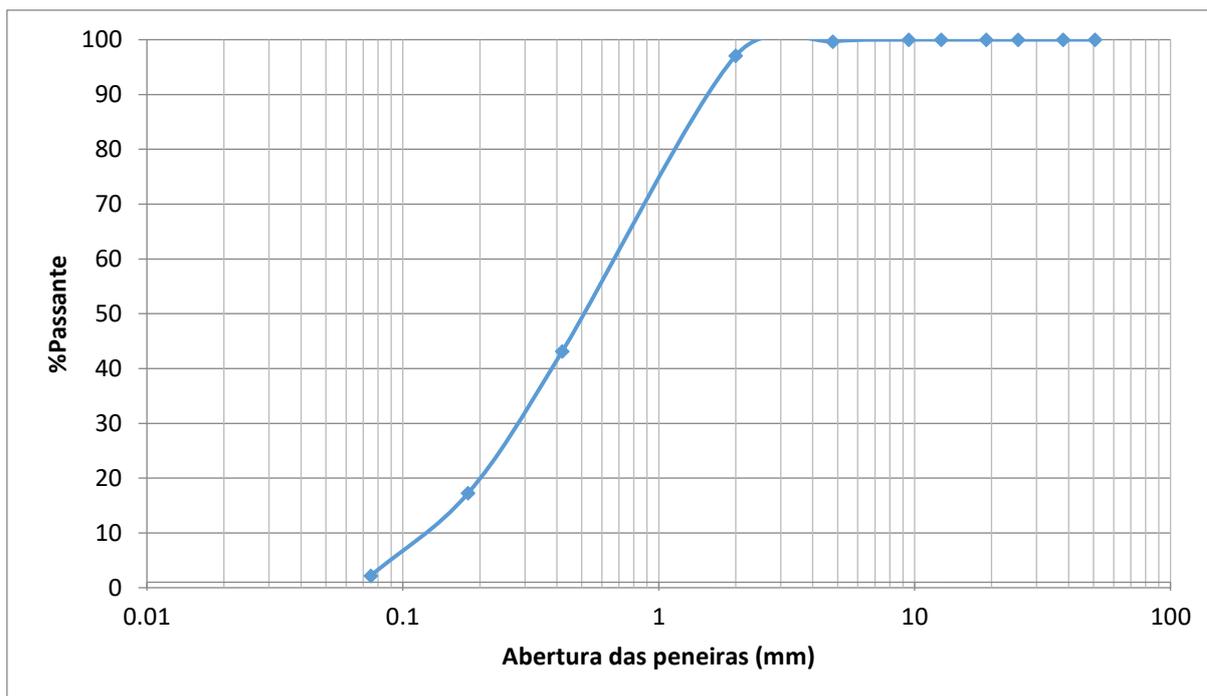
4.1.1.4 Areia

Tabela 4: Granulometria da Areia

Peneiras	Abertura (mm)	% Passante
2"	50,8	100
1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	100
3/8"	9,5	100
4	4,8	99,68
10	2	97,1
40	0,42	43,15
80	0,18	17,27
200	0,075	2,2

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4: Curva granulométrica da Areia



Fonte: Autor, 2019.

4.1.1.5 Filer

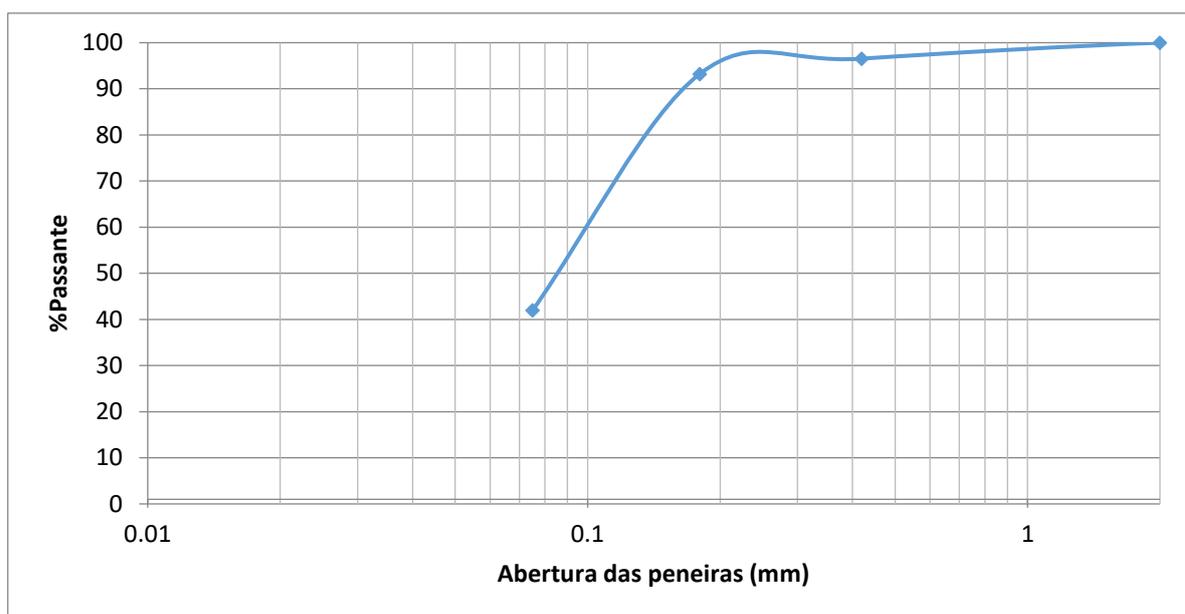
De acordo com os resultados de granulometria apresentados na tabela 5, observa-se que o filer utilizado não atendeu aos requisitos da especificação de serviço ET-DE-P00/034 que exige um valor mínimo de 65% de material passante na peneira nº 200.

Tabela 5: Granulometria do Filer

Peneiras	Abertura (mm)	% Passante
40	0,42	96,54
80	0,18	93,25
200	0,075	41,99

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 5: Curva granulométrica do Fíler



Fonte: Autor, 2019.

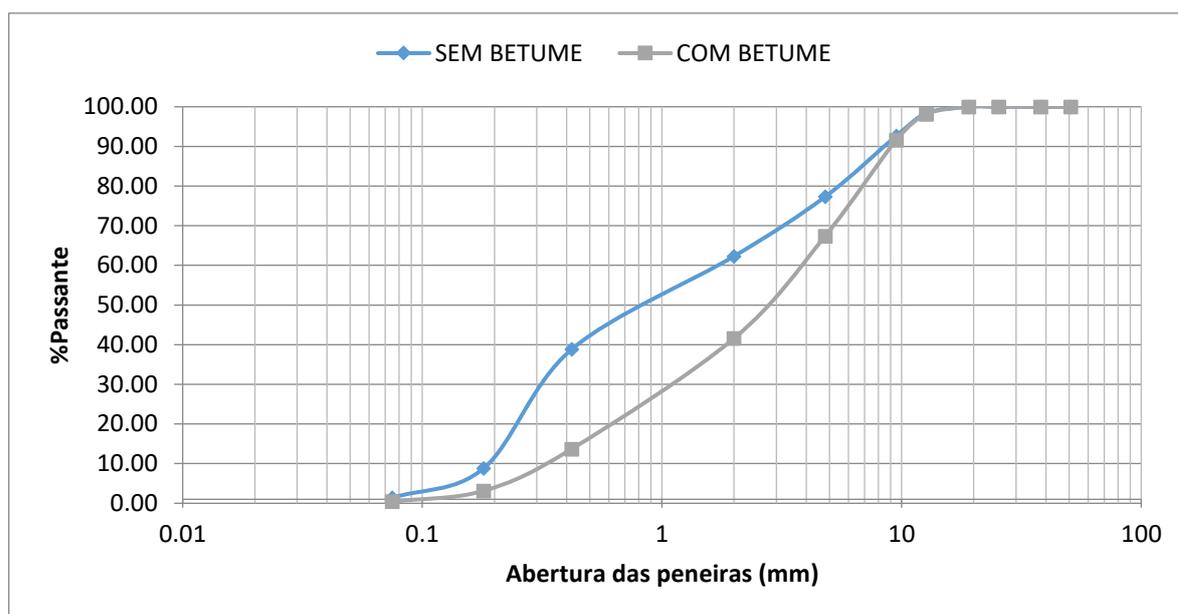
4.1.1.6 RAP

Tabela 6: Granulometria do RAP

Peneiras	Abertura (mm)	SEM BETUME	COM BETUME
		% Passante	% Passante
2"	50,8	100	100
1 1/2"	38,1	100	100
1"	25,4	100	100
3/4"	19,1	100	97,74
1/2"	12,7	98,38	98,16
3/8"	9,5	92,65	91,62
4	4,8	77,32	67,40
10	2	62,31	41,61
40	0,42	38,83	13,69
80	0,18	8,79	3,14
200	0,075	1,38	0,43

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 6: Curvas granulométricas do RAP



Fonte: Autor, 2019.

4.1.2 Abrasão a Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado três vezes para cada tipo de agregado graúdo utilizado nas misturas. De acordo com a especificação de serviço ET-DE-P00/034, para fins de utilização do material fresado em uma mistura betuminosa, sua abrasão máxima deve ser de 50%, enquanto a norma DNIT 153/2010 exige um valor máximo de 40% para o uso do agregado em misturas a frio.

4.1.2.1 Brita 1

A abrasão da brita 1 foi de 17,93% como mostra a tabela 7, tal valor é aceitável pois encontra-se dentro do exigido pelas normas mencionadas anteriormente.

Tabela 7: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 1

Peso Amostra Inicial	Peso Amostra Final	Abrasão a Los Angeles	Média
4999	4102,3	17,94%	17,93%
5004	4092,3	18,22%	
5000	4118,6	17,63%	

Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.2 Brita 0

Tabela 8: Ensaio de Abrasão a Los Angeles da Brita 0

Peso Amostra Inicial	Peso Amostra Final	Abrasão a Los Angeles	Média
5001	4000,3	20,01%	19,45%
5000	4056,2	18,88%	
5003	4029,4	19,46%	

Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.3 RAP

Quanto aos agregados que compõem o RAP, a tabela 9 apresenta o valor do ensaio de abrasão Los Angeles, logo, este atendeu os limites da norma para mistura a frio, ou seja, um valor máximo de 40%.

Tabela 9: Ensaio de Abrasão a Los Angeles do RAP

Peso Amostra Inicial	Peso Amostra Final	Abrasão a Los Angeles	Média
5007	3167,7	36,73%	37,09%
5000	3195,3	36,09%	
4998	3076,5	38,45%	

Fonte: Autor, 2019.

4.1.3 Adesividade

Os resultados dos ensaios de adesividade realizados com a brita 1 e brita 0 mostraram-se satisfatórios, pois após o período de 72 horas que recomenda a norma DNER-ME 078/94 não houve desprendimento de ligante da superfície dos grãos de brita, como pode-se observar na Figura 26.

Figura 26: Brita envolvida por emulsão asfáltica



Fonte: Autor, 2019.

4.1.4 Equivalente de Areia

Os resultados do ensaio de equivalente de areia se mostrou satisfatório para cada um dos tipos de agregados miúdos, segundo a norma DNIT 153/2010 e a especificação de serviço ET – DE – P0034. Pode-se observar na tabela 10, que os valores encontrados estão acima do valor mínimo, de 55%.

Tabela 10: Ensaio Equivalente de Areia

	Pó de Brita	Areia	RAP
H1 (cm)	8,23	8,32	12,4
H2 (cm)	5,65	6,56	11,5
Equivalente de Areia	68,7%	78,8%	92,7%

Fonte: Autor, 2019.

4.1.5 Densidade e Absorção

Para estes ensaios foram utilizados os agregados graúdos, como a brita 1, brita 0 e RAP. No entanto, para o RAP o material foi dividido em agregado graúdo e agregado miúdo, para cálculo da densidade por meio da média ponderada.

4.1.5.1 Brita 1

Os resultados do ensaio de densidade e absorção para brita 1 estão dispostos na tabela 11.

Tabela 11: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 1

Brita 1			
Parâmetros:	Amostra 1	Amostra 2	
Ms (g)	1978,3	1988,7	
Mh (g)	2002,5	2000,3	
L (g)	1302,4	1230,6	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,826	2,584	2,705
Absorção (%)	1,22%	0,58%	1,00%

Fonte: Autor, 2019.

4.1.5.2 Brita 0

Para brita 0, os valores obtidos estão dispostos na tabela 12:

Tabela 12: Ensaio de Densidade e Absorção da Brita 0

Brita 0			
Parâmetros:	Amostra 1	Amostra 2	
Ms (g)	2001,5	1997,4	
Mh (g)	2018,6	2000,6	
L (g)	1258	1263,2	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,631	2,709	2,670
Absorção (%)	0,85%	0,16%	0,51%

Fonte: Autor, 2019.

4.1.5.3 RAP

Para o material fresado, os valores de densidade e absorção foram, respectivamente, 2,490 g/cm³ e 1,30%.

Tabela 13: Ensaio de Densidade e Absorção do RAP

RAP			
Parâmetros:	Amostra 1	Amostra 2	
Ms (g)	1983,6	1966,8	
Mh (g)	2002,9	1998,8	
L (g)	1143,2	1263,1	Média
Massa Específica (g/cm ³)	2,307	2,673	2,490
Absorção (%)	0,97%	1,63%	1,30%

Fonte: Autor, 2019.

4.1.6 Massa Específica por meio do Frasco Chapman

Para se obter a massa específica dos agregados miúdos, utilizou-se o frasco Chapman. Os resultados estão apresentados nas tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14: Ensaio de Massa Específica do Pó de Brita

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

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 15: Ensaio de Massa Específica da Areia

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

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 16: Ensaio de Massa Específica do RAP miúdo

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

Fonte: Autor, 2019.

A partir das massas específicas do RAP graúdo e miúdo, fez-se a média ponderada para determinar a massa específica do RAP no geral. O valor obtido foi de **2,212 g/cm³**.

4.1.7 Massa Específica por meio do Frasco Le Chatelier

As leituras realizadas neste ensaio definiram a massa específica do Cimento Portland utilizado nas misturas. As leituras inicial e final deste ensaio foram de 0,00 mm e 20,88 mm, obtendo assim, a massa específica com o valor de 2,885 g/cm³.

4.1.8 Índice de forma

Feito o ensaio de índice de forma, o resultado das média das relações b/a e c/a foram, respectivamente 0,8 e 0,75, para o RAP. Para a brita 1 estes valores, foram, respectivamente, 0,73 e 0,67. Sendo, desta forma, classificados como **cúbicos** segundo a ABNT NBR 6954/1989.

4.1.9 Ensaio de Teor de Betume

A média dos resultados obtidos durante as três vezes que se realizou este ensaio foi de 5,1% de teor de ligante. Tal valor encontra-se dentro das especificações da norma DNIT 031/2006. Esta norma estabelece um intervalo entre 4,0% a 9,0% de teor de ligante em CAUQ.

4.2 Ensaio Laboratoriais para Ligantes

4.2.1 Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol

Este ensaio foi realizado com uma temperatura de 25 °C para a emulsão e obteve-se uma média de 64,3 sSF. Na norma DNIT 165/2013 o limite máximo de viscosidade para emulsões de ruptura lenta se aplica apenas para o ensaio com esta temperatura e mostra que o valor não deve exceder 90 sSF.

4.2.2 Resíduo por evaporação

Os resultados obtidos neste ensaio foram:

Tabela 17: Ensaio de Resíduo por Evaporação

	Amostra 1	Amostra 2	
Peso recipiente e bastão	312,3	312,5	
Peso recipiente, bastão e amostra	362,5	362,7	
Peso recipiente e resíduo	344,7	344,7	Média
% Resíduo	64,5%	64,1%	64,3%

Fonte: Autor, 2019.

De acordo com a fórmula determinada pela DAER/RS - EL 210/01, a porcentagem de **64,3%** de resíduo contido na amostra de emulsão as fáltica RL - 1C encontra-se de acordo com a norma DNIT 165/2013, que estabelece um valor mínimo de 60,0%.

4.2.3 Peneiração

Os resultados obtidos a partir da realização dos procedimentos exigidos pela norma DAER/RS-EL 207/01 foram:

- Peso da amostra: 1000,0 g;
- Peso do conjunto peneira e fundo: 771,6 g;
- Peso do conjunto peneira, fundo e resíduo: 772,9 g.

A partir desses valores, encontrou-se uma porcentagem de resíduo de **0,13%**, valor que está além do permitido pela norma que é de no máximo 0,1%.

4.3 Dosagem Marshall

Após a produção e moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram avaliados quanto suas dimensões, peso seco ao ar, peso submerso e estabilidade, visto que são misturas de CAUQ, logo não foi necessário para este estudo, avaliar

quanto a fluência. Estes dados foram utilizados para calcular parâmetros como densidade aparente (Gmb), densidade máxima teórica (DMT) e volume de vazios (Vv).

4.3.1 Misturas Asfálticas estudadas

As seguintes misturas com porcentagens de 25% (Mistura 1), 50% (Mistura 2) e 75% de RAP (Mistura 3) foram devidamente enquadradas pelo método das tentativas, com seus respectivos agregados virgens necessários para ajustamento na faixa granulométrica II da especificação de serviço ET-DE-P0034.

Segundo Filho (2018), a maioria das pesquisas com RAP sugerem teores de ligante entre 0,5% e 4,5%, por conta de já haver o ligante envelhecido do material fresado. Contudo, observou-se que estes teores baixos com material virgem não oferecem coesão aos corpos de prova.

Observou-se que Filho (2018), utilizou o teor 4% de ligante e que este foi comum aos dois tipos de misturas, de 0% e 100% de RAP. Logo, utilizou-se 4% como ligante piloto da mistura intermediária deste estudo, de 50% (mistura 2).

4.3.1.1 Mistura 1 - 25% RAP

4.3.1.1.1 Enquadramento granulométrico

A mistura 1 possui o traço:

- 25% de RAP;
- 28% de Brita 1;
- 19% de Brita 0;
- 16% de Pó de Brita;
- 9% de Fíler;
- 3% de Areia.

De acordo com essa proporção a granulometria da mistura é:

Tabela 18: Faixa Granulométrica da Mistura 1

Mistura 1 - 25% de RAP											
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filer	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa II DNER		Tolerância	Granulometria do traço
		% no Traço						% Mín	% Máx		
		3,00%	9,00%	16,00%	19,00%	28,00%	25,00%				
% 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
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	± 8	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	99,66	88,57	97,74	-	100,00	± 8	96,17
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	99,34	70,23	98,16	75,00	95,00	± 8	91,08
3/8"	9,5	100,00	100,00	98,91	88,12	11,07	91,62	70,00	90,00	± 8	70,57
4	4,8	99,68	100,00	94,31	11,30	0,21	67,40	44,00	72,00	± 8	46,14
10	2	97,10	100,00	62,80	0,60	0,19	41,61	22,00	50,00	± 8	32,53
40	0,42	43,15	96,54	20,37	0,36	0,17	13,69	8,00	26,00	± 8	16,78
80	0,18	17,27	93,25	9,74	0,26	0,15	3,14	4,00	16,00	± 8	11,35
200	0,075	2,20	41,99	1,17	0,07	0,08	0,43	2,00%	10,00%	± 8	4,18

Fonte: Autor, 2019.

4.3.1.1.2 Teor de ligante piloto

Para a mistura 1, foi definido 4,5% de emulsão como teor piloto, por possuir menor quantidade de ligante envelhecido que as outras misturas.

De acordo com as recomendações de dosagem Marshall, os outros teores são definidos como -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0%, totalizando 5 grupos de corpos de prova, como pode-se observar na tabela 19.

Tabela 19: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 1

CP 25% RAP - Teor 1			CP 25% RAP - Teor 2			CP 25% RAP - Teor 3			CP 25% RAP - Teor 4			CP 25% RAP - Teor 5		
Ligante	Massa (g)													
Emulsão	3,5%	42	Emulsão	4,0%	48	Emulsão	4,50%	54	Emulsão	5,0%	60	Emulsão	5,5%	66
Agregados			Agregados			Agregados			Agregados			Agregados		
Areia	2,90%	35	Areia	2,88%	35	Areia	2,87%	34	Areia	2,85%	34	Areia	2,84%	34
Filer	8,69%	104	Filer	8,64%	104	Filer	8,60%	103	Filer	8,55%	103	Filer	8,51%	102
Pó de Brita	15,44%	185	Pó de Brita	15,36%	184	Pó de Brita	15,28%	183	Pó de Brita	15,20%	182	Pó de Brita	15,12%	181
Brita 0	18,34%	220	Brita 0	18,24%	219	Brita 0	18,15%	218	Brita 0	18,05%	217	Brita 0	17,96%	215
Brita 1	27,02%	324	Brita 1	26,88%	323	Brita 1	26,74%	321	Brita 1	26,60%	319	Brita 1	26,46%	318
RAP	24,13%	290	RAP	24,00%	288	RAP	23,88%	287	RAP	23,75%	285	RAP	23,63%	284

Fonte: Autor, 2019.

4.3.1.3 Mistura 2 - 50% RAP

4.3.1.3.1 Enquadramento granulométrico

A mistura 2 possui o traço:

- 50% de RAP;
- 29% de Brita 1;
- 8% de Brita 0;
- 7% de Pó de Brita;
- 4% de Fíler;
- 2% de Areia.

De acordo com essa proporção a granulometria da mistura é:

Tabela 20: Faixa Granulométrica da Mistura 2

Mistura 2 - 50% de RAP											
Peneira	Abertura peneira	Areia	Fíler	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa II DNER		Tolerância	Granulometria do traço
		% no Traço						% Mín	% Máx		
		2,00%	4,00%	7,00%	8,00%	29,00%	50,00%				
		% 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
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	± 8	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	99,66	88,57	97,74	-	100,00	± 8	95,53
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	99,34	70,23	98,16	75,00	95,00	± 8	90,39
3/8"	9,5	100,00	100,00	98,91	88,12	11,07	91,62	70,00	90,00	± 8	68,99
4	4,8	99,68	100,00	94,31	11,30	0,21	67,40	44,00	72,00	± 8	47,26
10	2	97,10	100,00	62,80	0,60	0,19	41,61	22,00	50,00	± 8	31,25
40	0,42	43,15	96,54	20,37	0,36	0,17	13,69	8,00	26,00	± 8	13,07
80	0,18	17,27	93,25	9,74	0,26	0,15	3,14	4,00	16,00	± 8	6,39
200	0,075	2,20	41,99	1,17	0,07	0,08	0,43	2,00	10,00	± 8	2,05

Fonte: Autor, 2019.

4.3.1.3.2 Teor de ligante piloto

O traço piloto para a mistura 2 possui 4,0% de teor de ligante. Os dados para confecção dos corpos de prova estão na tabela 21:

Tabela 21: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 2

CP 50% RAP - Teor 1			CP 50% RAP - Teor 2			CP 50% RAP - Teor 3			CP 50% RAP - Teor 4			CP 50% RAP - Teor 5		
Ligante	Massa (g)													
Emulsão	3%	36	Emulsão	3,5%	42	Emulsão	4,00%	48	Emulsão	4,5%	54	Emulsão	5%	60
Agregados	-		Agregados	-		Agregados %	-		Agregados	-		Agregados	-	
Areia	1,94%	23	Areia	1,93%	23	Areia	1,92%	23	Areia	1,91%	23	Areia	1,90%	23
Filer	3,88%	47	Filer	3,86%	46	Filer	3,84%	46	Filer	3,82%	46	Filer	3,80%	46
Pó de Brita	6,79%	81	Pó de Brita	6,76%	81	Pó de Brita	6,72%	81	Pó de Brita	6,69%	80	Pó de Brita	6,65%	80
Brita 0	7,76%	93	Brita 0	7,72%	93	Brita 0	7,68%	92	Brita 0	7,64%	92	Brita 0	7,60%	91
Brita 1	28,13%	338	Brita 1	27,99%	336	Brita 1	27,84%	334	Brita 1	27,70%	332	Brita 1	27,55%	331
RAP	48,50%	582	RAP	48,25%	579	RAP	48,00%	576	RAP	47,75%	573	RAP	47,50%	570

Fonte: Autor, 2019

4.3.1.4 Mistura 3 - 75% RAP

4.3.1.4.1 Enquadramento granulométrico

A mistura 3 possui o traço:

- 75% de RAP;
- 16% de Brita 1;
- 7% de Brita 0;
- 2% de Filer.

De acordo com essa proporção a granulometria da mistura é:

Tabela 22: Faixa Granulométrica da Mistura 3

Mistura 3 - 75% de RAP												
Peneira	Abertura peneira	Areia	Filer	Pó de Brita	Brita 0	Brita 1	RAP	Faixa II DNER		Tolerância	Granulometria do traço	
		% no Traço							% Mín			% Máx
		0,00%	2,00%	0,00%	7,00%	16,00%	75,00%					
% 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	
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	± 8	100,00	
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	99,66	88,57	97,74	-	100,00	± 8	96,45	
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	99,34	70,23	98,16	75,00	95,00	± 8	93,81	
3/8"	9,5	100,00	100,00	98,91	88,12	11,07	91,62	70,00	90,00	± 8	78,65	
4	4,8	99,68	100,00	94,31	11,30	0,21	67,40	44,00	72,00	± 8	53,37	
10	2	97,10	100,00	62,80	0,60	0,19	41,61	22,00	50,00	± 8	33,28	
40	0,42	43,15	96,54	20,37	0,36	0,17	13,69	8,00	26,00	± 8	12,25	
80	0,18	17,27	93,25	9,74	0,26	0,15	3,14	4,00	16,00	± 8	4,26	
200	0,075	2,20	41,99	1,17	0,07	0,08	0,43	2,00	10,00	± 8	1,18	

Fonte: Autor, 2019.

4.3.1.4.2 Teor de ligante piloto

Para a mistura 3, o traço possui teor de ligante piloto de 3,5%, desta forma os demais grupos de corpos de prova possuem 2,5%, 3,0%, 4,0% e 4,5% de emulsão asfáltica.

Os traços dos corpos de prova a serem moldados serão os seguintes:

Tabela 23: Traços dos Grupos de Corpos de Prova da Mistura 3

CP 75% RAP - Teor 1			CP 75% RAP - Teor 2			CP 75% RAP - Teor 3			CP 75% RAP - Teor 4			CP 75% RAP - Teor 5		
Ligante	Massa (g)													
Emulsão	2,5%	30	Emulsão	3%	36	Emulsão	3,50%	42	Emulsão	4%	48	Emulsão	4,5%	54
Agregados	-		Agregados	-		Agregados %	-		Agregados	-		Agregados	-	
Areia	0,00%	0												
Filer	1,95%	23	Filer	1,94%	23	Filer	1,93%	23	Filer	1,92%	23	Filer	1,90%	23
Pó de Brita	0,00%	0												
Brita 0	6,83%	82	Brita 0	6,79%	81	Brita 0	6,76%	81	Brita 0	6,72%	81	Brita 0	6,65%	80
Brita 1	15,60%	187	Brita 1	15,52%	186	Brita 1	15,44%	185	Brita 1	15,36%	184	Brita 1	15,20%	182
RAP	73,13%	878	RAP	72,75%	873	RAP	72,38%	869	RAP	72,00%	864	RAP	71,25%	855

Fonte: Autor, 2019.

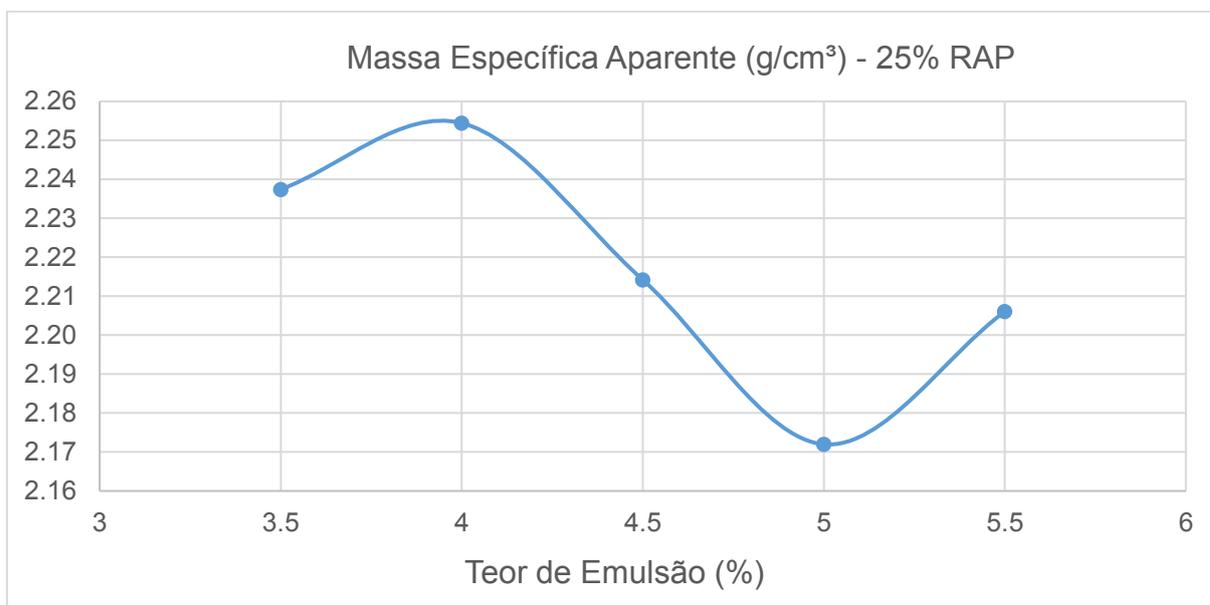
4.4 Resultados obtidos pela Dosagem

Após a confecção dos corpos de provas, foram realizados ensaios com os mesmos, de volumetria, estabilidade, fluência e resistência a tração. A partir destes resultados foram gerados os gráficos de Densidade Máxima teórica, Massa específica Aparente e Volume de Vazios. Estes estão dispostos do gráfico 7 ao 18.

4.4.1 Mistura 1 – 25% RAP

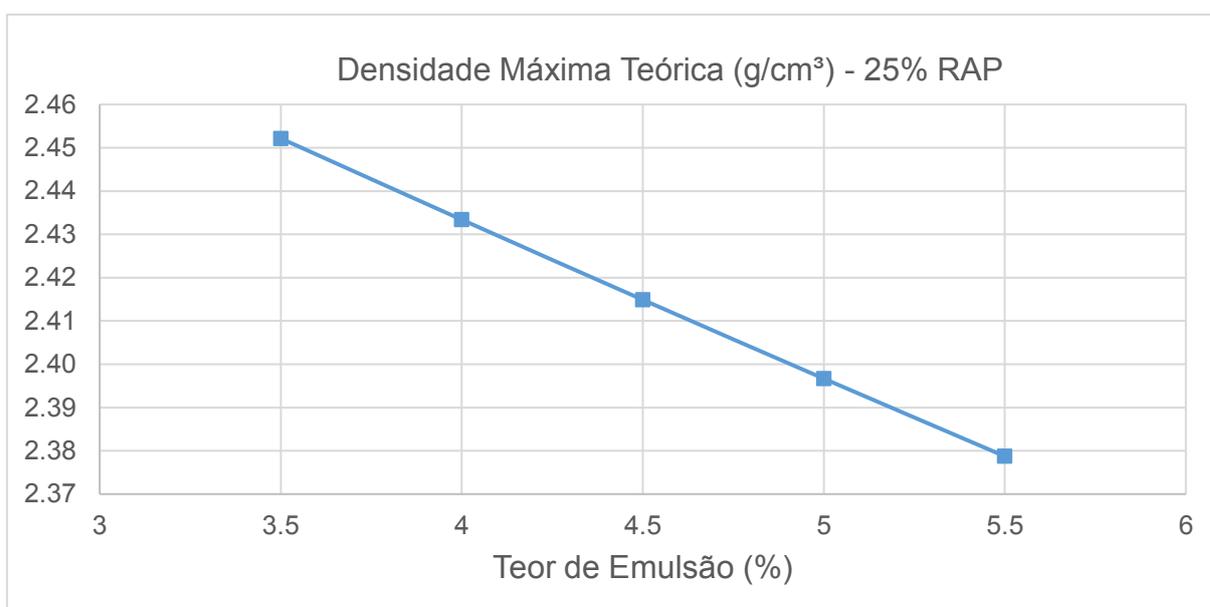
4.4.1.1 Curvas Parâmetro x % Emulsão RL-1C

Gráfico 7: Massa Específica Aparente - 25% RAP



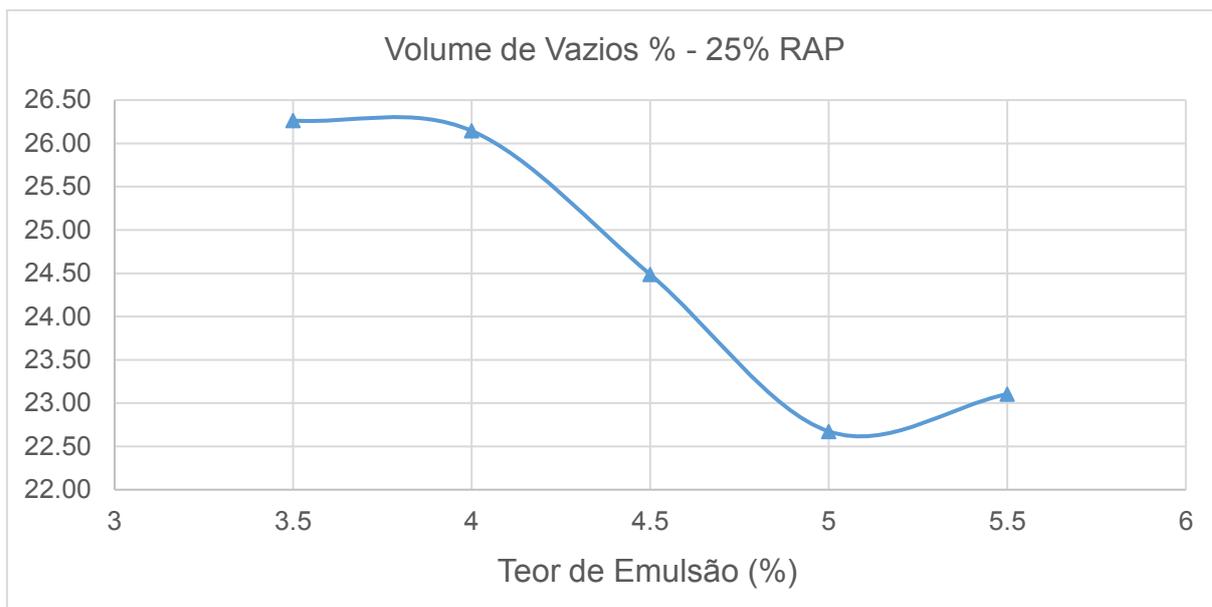
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 8: Densidade Máxima Teórica - 25% RAP



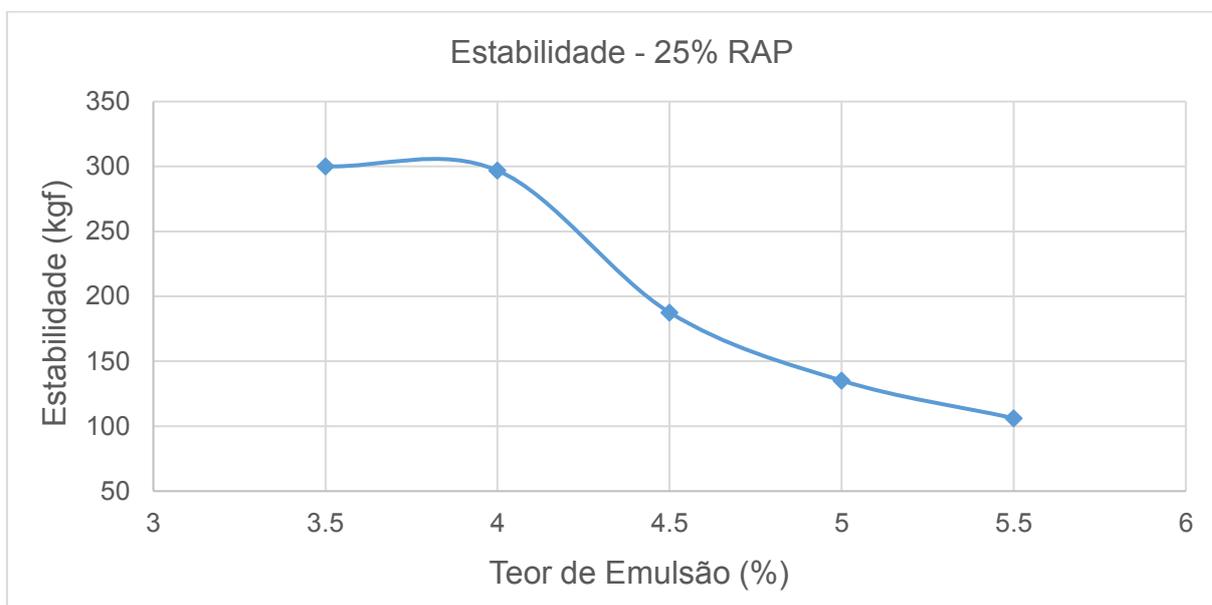
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 9: Volume de Vazios - 25% RAP



Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 10: Estabilidade - 25% RAP

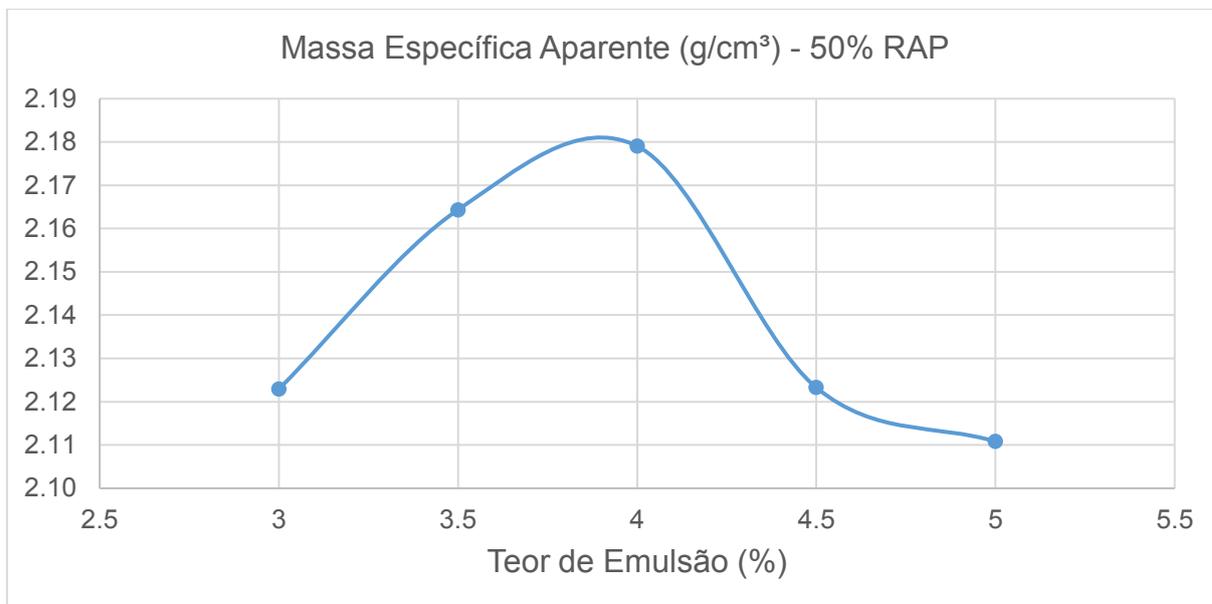


Fonte: Autor, 2019.

4.4.2 Mistura 2 – 50% RAP

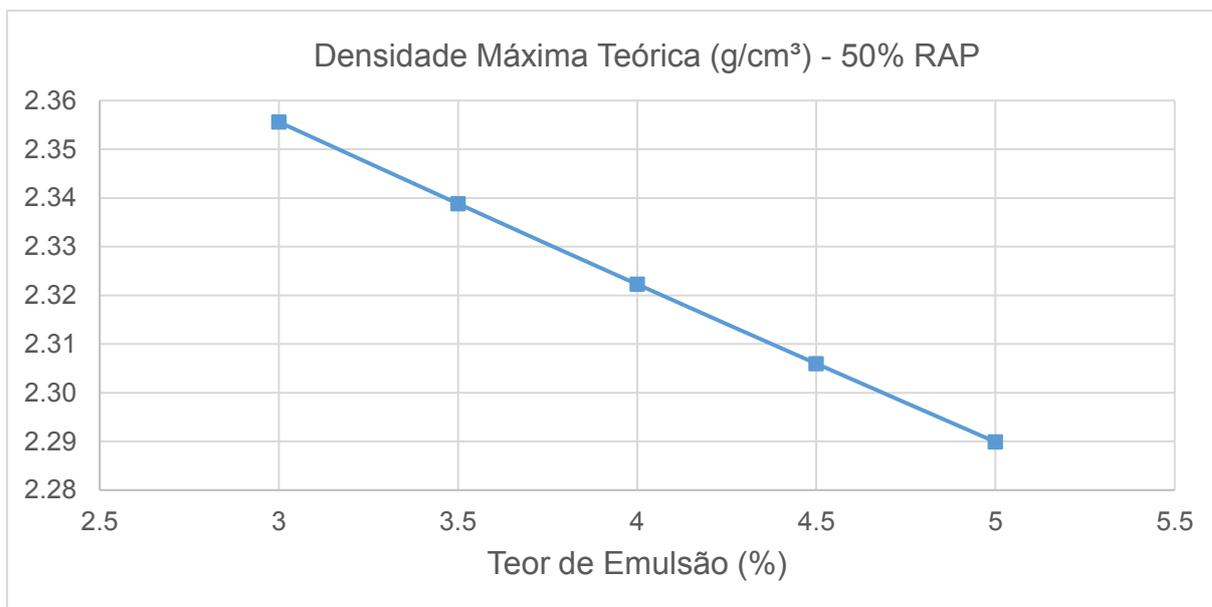
4.4.2.1 Curvas Parâmetro x % Emulsão RL-1C

Gráfico 11: Massa Específica Aparente - 50% RAP



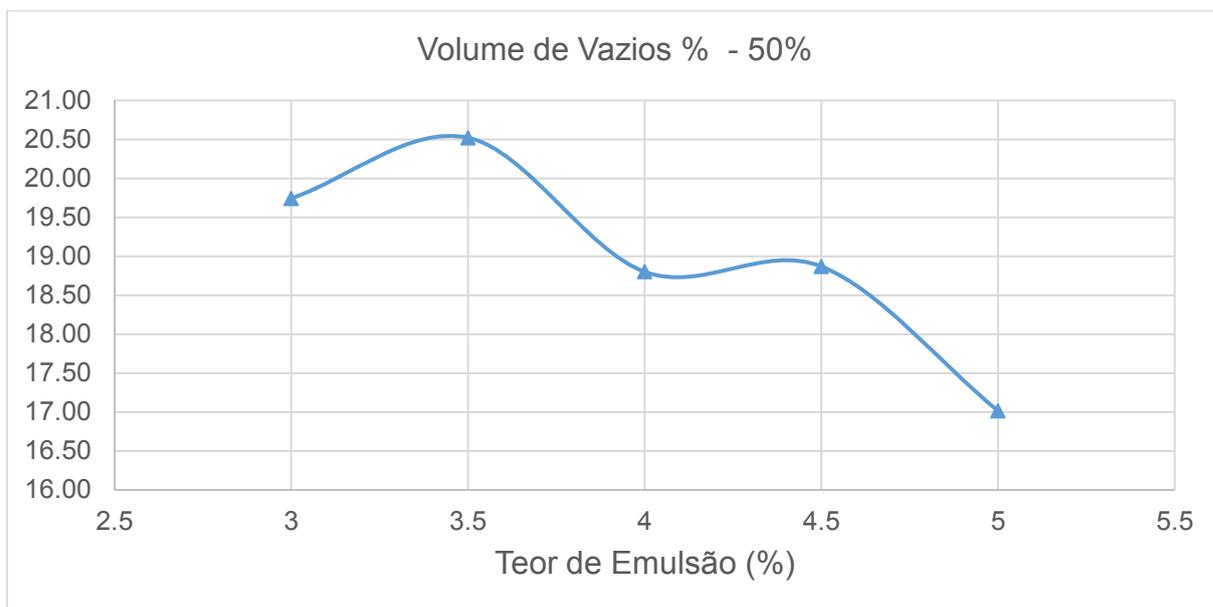
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 12: Densidade Máxima Teórica - 50% RAP



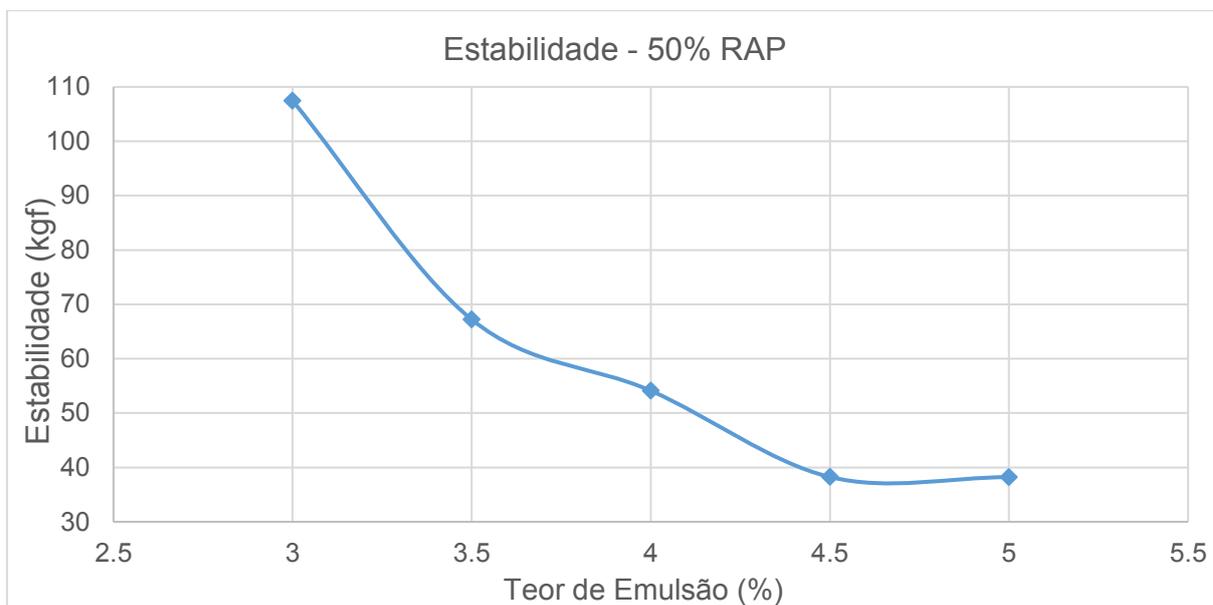
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 13: Volume de Vazios - 50% RAP



Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 14: Estabilidade - 50% RAP

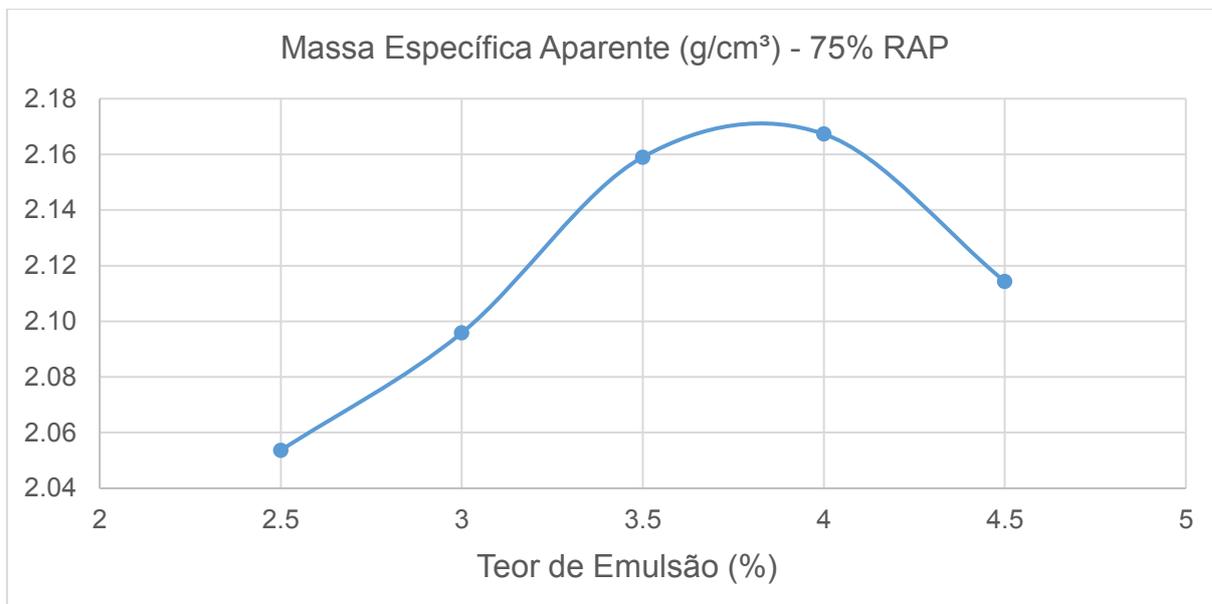


Fonte: Autor, 2019.

4.4.3 Mistura 3 – 75% RAP

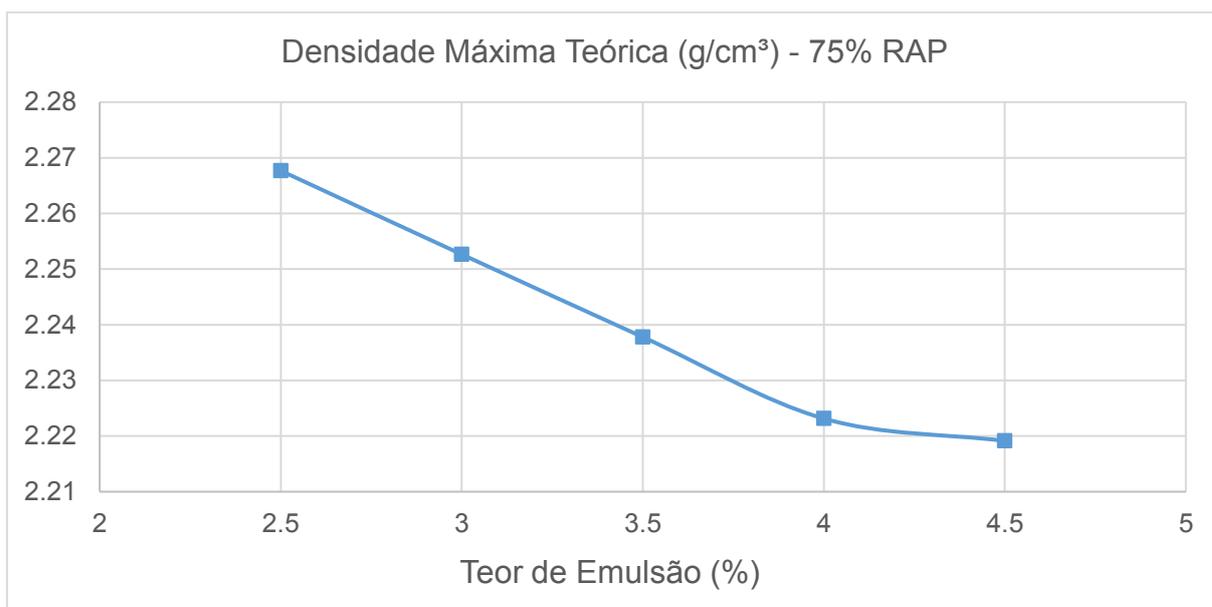
4.4.3.1 Curvas Parâmetro x % Emulsão RL-1C

Gráfico 15: Massa Específica Aparente para misturas com 75% de RAP



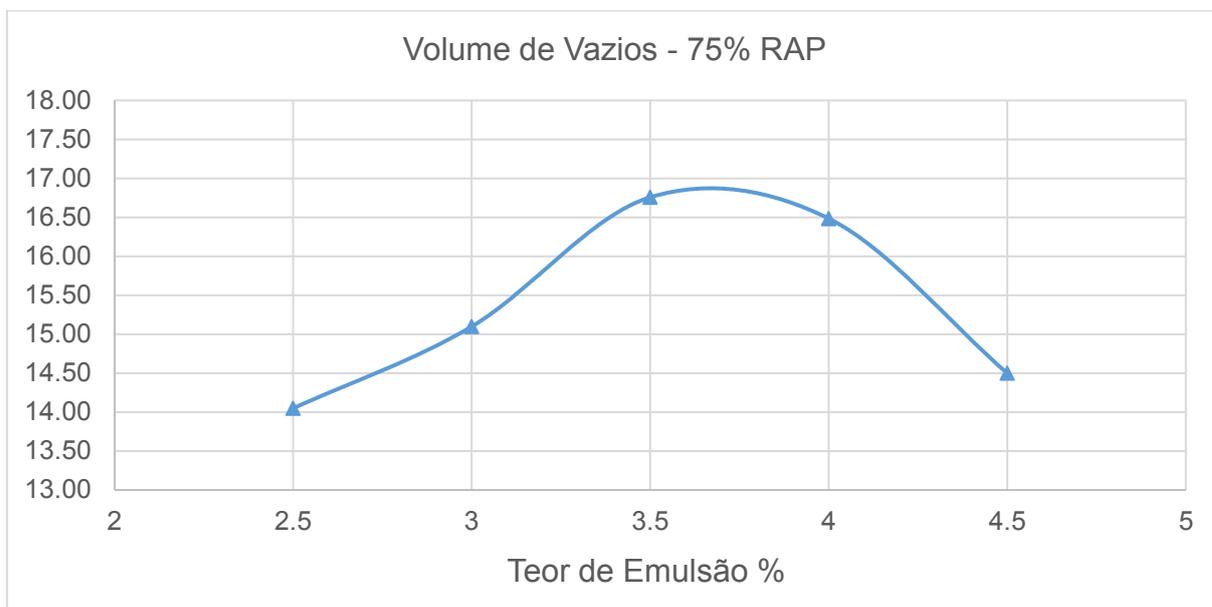
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 16: Densidade Máxima Teórica - 75% RAP



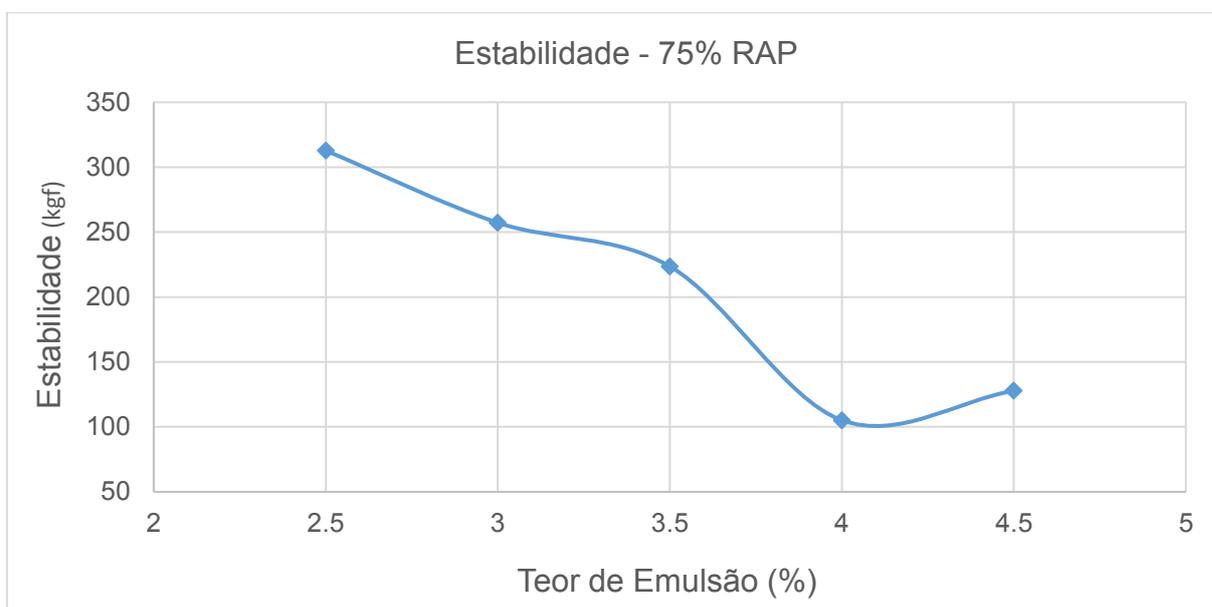
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 17: Volume de Vazios - 75% RAP



Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 18: Estabilidade - 75% RAP



Fonte: Autor, 2019.

4.5 Definição do Teor Ótimo

A especificação de serviço ET-DE-P00/034 estabelece o teor ótimo de uma mistura reciclada a frio como aquela que atende aos seguintes requisitos da tabela da figura 27.

Figura 27: Requisitos para o projeto de mistura asfáltica reciclada com Emulsão

Características	Método de Em-saio	Exigência
Estabilidade mínima, kN, a 40°C (75 golpes no ensaio Marshall)	NBR 12891 ⁽⁷⁾	5
% de Vazios Totais		Máximo de 18
Razão da estabilidade, antes e após a imersão, mínima (%)	AASHTO T 283 ⁽⁸⁾	70

Fonte: Especificação de serviço ET-DE-P00/034, 2006.

Tendo que os resultados de estabilidade com as misturas recicladas deste trabalho se mostraram inferiores ao valor de exigência mínima de 5 kN, o teor ótimo de emulsão foi então estabelecido com base naquele que obteve o maior valor de massa específica aparente. Santana (1993) apud Bernucci et al. (2007) também sugere a mesma metodologia para definição deste teor ótimo, não apenas nas misturas recicladas, mas nas misturas a frio em geral.

Desse modo, o teor ótimo de emulsão foi estabelecido com base nos corpos de prova que obtiveram o maior valor de massa específica aparente. Neste caso, o teor ótimo das misturas 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 3,95%, 3,90% e 3,85%.

4.6 Resultados das misturas com Teor Ótimo

4.6.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral foram produzidos três corpos de prova para cada cada traço obtido a partir dos novos teores ótimos.

Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 136/2010 e os resultados se encontram nas tabelas 24, 25 e 26.

Tabela 24: Resistência a Tração da Mistura 1

Mistura 1 - 25% RAP						
CP	Teor Ótimo de Emulsão	h Médio (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	RT Média (Mpa)
A	3,95%	67,35	101,39	586	0,536	0,549
B		66,36	102,45	597	0,549	
C		65,37	103,51	608	0,561	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 25: Resistência a Tração da Mistura 2

Mistura 2 - 50% RAP						
CP	Teor de Emulsão	h Médio (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	RT Média (Mpa)
A	3,90%	75,46	102,50	452	0,365	0,395
B		73,07	101,51	468	0,394	
C		70,68	100,52	484	0,426	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 26: Resistência a Tração da Mistura 3

Mistura 3 - 75% RAP						
CP	Teor de Emulsão	h Médio (mm)	D Médio (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração (Mpa)	RT Média (Mpa)
A	3,85%	78,45	102,95	450	0,348	0,386
B		74,71	101,81	468	0,384	
C		70,96	100,68	486	0,425	

Fonte: Autor, 2019.

As normas e especificações citadas neste trabalho para ensaios com misturas a frio, sejam elas recicladas ou não, não possuem um limite inferior para a resistência à tração por compressão diametral. Logo, os resultados foram comparados com trabalhos de pesquisas semelhantes, e com a norma DNIT 166/2013, que trata de misturas recicladas a frio com adição de espuma de asfalto.

A norma DNIT 166/2013 exige um valor mínimo de resistência à tração de 0,25 MPa, o que torna as misturas com RAP e agregado virgem realizadas neste trabalho, adequadas para uso. David (2006) observou resultados entre 0,24 MPa e 0,38 MPa para misturas com 100% RAP e emulsão do tipo RL-1C.

4.6.3 Ensaio Cântabro

Também para este ensaio foram confeccionados mais três corpos de prova para cada traço de teor ótimo, com o objetivo de avaliar o desgaste dos mesmos quando submetidos a 300 rotações na máquina Los Angeles sem carga abrasiva.

O desgaste é calculado a partir da massa que o corpo de prova perde em relação a sua massa inicial.

Os corpos de prova das misturas com 25%, 50% e 75% de RAP tiveram perda total de sua massa inicial. O mesmo resultado deste ensaio, foi observado em trabalhos anteriores para misturas com 0% de RAP, como aponta Filho (2018). Um dos motivos para tal ocorrido, talvez tenha se dado por uma má compactação dos corpos de prova devido a defeitos na máquina de compactação.

Figura 28: Fragmentos do corpo de prova após o Ensaio de Cântabro



Fonte: Autor, 2019.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo analisar os parâmetros necessários para verificar a viabilidade da utilização de revestimento asfáltico fresado com acréscimo de material virgem na construção de novos pavimentos, elaborados com mistura a frio. Foram confeccionados corpos de prova para diferentes teores de emulsão asfáltica para analisar seu comportamento e características tendo como base as normas rodoviárias vigentes.

Percebe-se pelos resultados, que as misturas apresentam uma diminuição nos valores da massa específica teórica com o aumento do teor de ligante. Isto ocorre, pois ao adicionar ligante, conseqüentemente, ocorre um aumento de volume, bem como uma redução na massa específica teórica. Este fato também pode ser observado nas amostras produzidas com 0% e 100% de RAP que foram objeto de estudo no trabalho de Filho (2018).

Quanto à estabilidade, notou-se certa divergência de valores, fato que não permitiu uma conclusão a respeito deste parâmetro. Ao comparar os valores de estabilidade deste trabalho aos de Filho (2018), percebe-se que nos valores das misturas de 0% e 100% de RAP, ocorre o mesmo problema.

Em relação à resistência a tração, observou-se que quanto maior a quantidade de revestimento asfáltico fresado na mistura, menor a resistência dos corpos de prova produzidos com teor ótimo.

Quanto ao volume de vazios das misturas com 25% e 50% de RAP, este parâmetro encontra-se além do valor máximo exigido pela especificação de serviço ET-DE-P00/034 que é de 18%; pois apenas as misturas com 75% ficaram de acordo com a norma. Isto também pode ser constatado no estudo de Filho (2018).

Deve-se ressaltar, que alguns resultados podem ter sofrido grandes variações devido alguns problemas técnicos e mecânicos e portanto, não se obteve uma conclusão adequada para o acréscimo de revestimento asfáltico fresado em misturas a frio. Um dos problemas técnicos foi relacionado à máquina Marshall que apresentou vários defeitos durante as compactações. Não obstante, por possuir poucas estufas no laboratório e muitas pessoas utilizando as mesmas, ocorreram algumas variações de temperatura durante o período de cura dos corpos de prova.

Além disso, nota-se que o RAP utilizado neste trabalho, apesar de ter apresentado alguns resultados satisfatórios, apresenta certa quantidade de materiais

que podem ter afetado a qualidade do mesmo, como pedaços de sacola, restos de tijolo, galhos, pedaços de vidro e outros.

Para os trabalhos futuros, sugere-se:

- A utilização de melhoradores de adesividade, como cal, dope e outros;
- Utilização de agente estabilizador no material fresado, como espuma de asfalto ou agente rejuvenescedor;
- Estudo de parâmetros estruturais e funcionais de pavimentos reciclados ao longo dos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**: Soluções para Pavimentar sua Cidade. Rio de Janeiro, 2 ed., 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for classifying emulsified recycling agents**. D 5505-05. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, v 04.03, 8p. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. ABNT/NBR 7809/2005. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. ABNT/NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lastro-padrão – Determinação da forma do material**. ABNT/NBR 6954/1989. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas**. ABNT NBR 6570/2016. Rio de Janeiro, 3 ed, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2007.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. São Paulo: Exceção, 2007.

BRASQUÍMICA. **Emulsões asfálticas para pavimentação**. Candeias, 2018. Disponível em: <https://www.brasquimica.com.br/informacoestecnicas/prg_pub_det.cfm/emulsoes-asfalticas-para-pavimentacao> Acesso em: 19.05.2019.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio *in situ* com espuma de asfalto**. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 156p.

CUNHA, Célia Melo. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Diferentes Tipos de Reciclagem**. Portugal, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 110p.

DAVID, Daniela de.; **Misturas asfálticas recicladas a frio**: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. Porto Alegre, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 128p.

DAVIDSON, J. K.; BLAIS, C.; CROTEAU, J. **A review of in-place cold recycling/reclamation in Canada**. In: Transportation Association of Canada Fall 2004 Meeting. Canadá, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da viscosidade Saybolt-Furol de emulsões asfálticas**. DAER/RS-EL 202/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação do resíduo por evaporação para emulsões asfálticas**. DAER/RS-EL 210/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Peneiramento de emulsões asfálticas**. DAER/RS-EL 207/01. Porto Alegre, 2001.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. DNER-ME 194/98. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Equivalente de areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação**: DNER. Rio de Janeiro, 2 ed., 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**: DNER. Rio de Janeiro, 1998, 242p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Material betuminoso – Determinação da penetração**. DNER-ME 003/99. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. DNER-ME 085/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. DNER-ME 117/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall**. DNER-ME 107/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa a quente – ensaio Marshall**. DNER-ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – percentagem de betume**. DNER-ME 053/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material**. DNIT 165/2013 – EM. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com adição de espuma de asfalto – Especificação de serviço**. DNIT 166/2013 – ES. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço**. DNIT 153/2010 – ES. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. DNIT 159/2011 – ES. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. DNIT 031/2006 – ES. Rio de Janeiro, 2006.

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.

GEWEHR, J.; **Asfalto de Qualidade**: Usina de Reciclagem a frio. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2013/01/usina-de-reciclagem-frio.html>> Acesso em: 13.05.2019.

GOMES, Luís Filipe de Sousa. **Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central**. Portugal, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 250p.

HELUY, Davi Lacerda. **Utilização de revestimento asfáltico fresado em misturas asfálticas a quente para camadas de pavimentos**. 2018. Tese de Graduação, Universidade Estadual do Maranhão

INFRAESTRUTURA Urbana: **Pavimentação**. 2014. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/43/sua-duvida-327127-1.aspx>>. Acesso em: 06 maio 2019.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

LEE, K. W.; BRYTON, T. E; HUSTON, M.. **Development of performance based mix design for cold in-place recycling (CIR) of bituminous pavements based fundamental properties.** Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA- IF-05-014. Washington, 2002.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S.; TUCHUMANTEL JR.. **Cold in situ recycling - Reciflex® - at SP/147. A brand new experience.** In: International. Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

O'LEARY, M. D.; WILLIAMS, R. D. **In situ cold recycling of bituminous pavements with polymer-modified high float emulsions.** Transportation Research Record. Washington, n.1342, p.20-25. 1993.

ROGGE, D. F. Et al. **Use of asphalt emulsions in-place recycling: Oregon experience.** Transportation Research Record. Washington, n.1342, p. 1-8. 1993.

SALOMON, A.; NEWCOMB, D. E. **Cold in place recycling literature review and preliminary mixture design procedure.** Minnesota Department of Transportation - Final Report MMN/RC - 2000-21. Minncapolis, 2000.

SANTIAGO, João Victor Pestana. **Análise da viabilidade técnica da reutilização de material fresado proveniente da BR-135.** São Luís, 2016. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão.

SANTOS, Mariana dos Reis; DEMUELENAERE, Rafael Gerard de Almeida. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico a Quente *In Situ*.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 02, Vol. 01, pp. 5-16, Janeiro de 2018.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2 ed. São Paulo: Editora PINI, 2007.

SILVA, Amanda Helena Marcandali. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero.** São Paulo, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, Tamyres Karla da et al. **DOSAGEM DE MISTURA BETUMINOSA A FRIO E SEU ESTUDO SOB EFEITOS DE CARGAS ESTÁTICAS E REPETIDAS.** Revista Árvore, [s.l.], v. 40, n. 1, p.97-106, fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

TAVARES, Ronaldo Rodrigues Starling et al. **DRENAGEM, PAVIMENTAÇÃO E URBANIZAÇÃO DE VIAS:** Composição de Custos Unitários. Brasília: Cidade Gráfica e Editora Ltda, 2015. 280 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **Standard Practice Manual for Flexible Pavements.** USA, 2001.

WIRTGEN GROUP. **Manual de reciclagem a frio:** Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. Alemanha, 2012.

WIRTGEN GROUP. **Transporting the old road to the cold recycling mixing plant.** Alemanha, 2018. Disponível em: <<https://www.wirtgen-group.com/en/technologies/road-rehabilitation/cold-recycling-plant/>> Acesso em: 04.05.2019.