

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO DE CASTRO FERREIRA FILHO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO COM USO DE REVESTIMENTO
ASFÁLTICO FRESADO**

São Luís
2018

EDUARDO DE CASTRO FERREIRA FILHO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO COM USO DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana

São Luís
2018

Ferreira Filho, Eduardo de Castro.

Estudo de misturas asfálticas a frio com uso de revestimento asfáltico fresado / Eduardo de Castro Ferreira Filho. – São Luís, 2018.
95 f.

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

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

1. Pavimento reciclado. 2. Material fresado.
3. Mistura asfáltica a frio. 4. Emulsão asfáltica. I. Título.

CDU 625.85

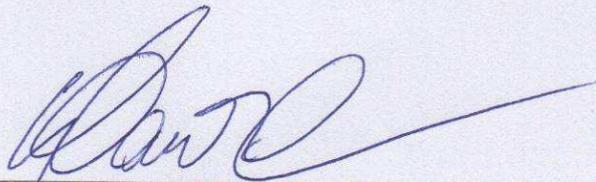
EDUARDO DE CASTRO FERREIRA FILHO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO COM USO DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO FRESADO**

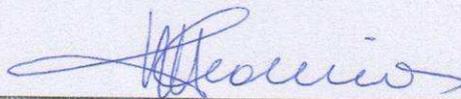
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 04 / 12 /2018

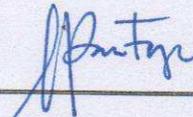
BANCA EXAMINADORA



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



1º membro: Prof.ª Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho
Universidade Estadual do Maranhão



2º membro: Prof. Me. Sérgio Roberto Guimarães Pantoja
Universidade Estadual do Maranhão

Dedico este trabalho ao meu grandioso Deus Jeová e à minha querida família pelo incentivo neste momento importante da minha carreira profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus Jeová por permitir que eu tivesse uma trajetória acadêmica repleta de aprendizado e experiências os quais levarei para o resto da minha vida e por guiar minhas decisões.

Aos meus pais, Eduardo de Castro Ferreira e Conceição de Maria Carvalho Ferreira, por estarem sempre me orientando a fazer as melhores escolhas e por me apoiarem em tudo. Por tudo que fizeram e fazem pela nossa família e por vibrarem nas minhas conquistas e me reerguerem nos meus momentos difíceis.

À minha irmã, Fernanda Grazielle de Carvalho Ferreira, por ser um exemplo de irmã e me ajudar sempre que necessito.

À empresa Asfaltos Nordeste, sediada em Fortaleza – CE, por fornecer a amostra de emulsão betuminosa que precisei para realizar este trabalho e à empresa Edeconsil por transportar a amostra para São Luís.

Aos meus amigos que adquiri durante o curso, principalmente Gabriel Araújo, Luccas Heluy, Davvi Heluy, Ana Caroline Rosa, André Luiz, Brendon Maia e Mateus Viana, que passaram pelas mesmas dificuldades que eu no decorrer da graduação e pelo fato de termos nos ajudado em trabalhos e estudos.

Aos meus grandes amigos e engenheiros formados na Universidade Estadual do Maranhão, Diogo Maluf e Carlos Damon Gomes, por terem me incentivado a fazer o curso de Engenharia Civil e por terem me apoiado durante toda a minha graduação.

Ao meu orientador, Walter Canales, por ter me ajudado a escolher o tema do meu trabalho de conclusão de curso e por ter me orientado durante todo o decorrer deste trabalho, tirando dúvidas e dando sugestões de melhorias.

À professora Maria Teresinha Coelho, por ter lecionado muito bem as cadeiras referentes à área de pavimentação, o que fez com que eu gostasse desta área, por ter também me dado boas orientações durante este trabalho e por ter me ajudado a conseguir o material que precisei para os ensaios.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão, a quem devo minha formação acadêmica e meu crescimento intelectual.

À minha querida avó, Dilucina de Castro Ferreira (*in memoriam*), por também ter me incentivado a fazer o curso de Engenharia Civil e por ser um exemplo de pessoa amorosa e carinhosa até o fim de sua vida.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo”.

Winston Churchill

RESUMO

A reciclagem de pavimentos tem sido cada vez mais executada nos últimos anos. No Brasil, algumas vias já foram feitas com pavimento totalmente reciclado em algumas de suas camadas, principalmente o revestimento e a base. Com a finalidade de ampliar os conhecimentos na área, a presente monografia pretende realizar um estudo de misturas asfálticas a frio com a utilização de emulsão asfáltica e de pavimento reciclado da Avenida José Sarney, em São Luís – MA, analisando seus comportamentos mecânicos através de ensaios laboratoriais presentes em normas. As misturas foram estudadas através do método Marshall para misturas asfálticas a frio. Foi feita uma comparação das misturas recicladas com misturas confeccionadas com agregados virgens e também com outros trabalhos da área. Concluiu-se que o material fresado utilizado não possui características adequadas para ser integralmente utilizado em um novo pavimento.

Palavras-chave: Pavimento reciclado. Material fresado. Mistura asfáltica a frio. Emulsão asfáltica. Ensaio de laboratório.

ABSTRACT

Pavement recycling has been increasingly being implemented in recent years. In Brazil, some roads have already been made with fully recycled pavement in some of its layers, mainly the flooring and the base. With the purpose of increasing the knowledge in the area, this monography intends to carry out a study of cold asphalt mixtures with the use of asphalt emulsion and recycled pavement of Avenida José Sarney, in São Luís - MA, analyzing its mechanical behavior through tests laboratories in standards. The mixtures were studied by the Marshall method for cold asphalt mixtures. A comparison of the recycled mixtures with mixtures made with virgin aggregates and with other works of the area was made. It was concluded that the milled material used does not have adequate characteristics to be fully used in a new pavement.

Keywords: Recycled pavement. Cold asphalt mix. Asphalt emulsion. Laboratory tests. Mechanical behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Cilindro fresador para fresagem padrão.....	22
Figura 2- Cilindro fresador para fresagem fina	23
Figura 3- Cilindro fresador para microfresagem	23
Figura 4- Rugosidade resultante da fresagem padrão.....	24
Figura 5- Rugosidade resultante da fresagem fina	24
Figura 6- Rugosidade resultante da microfresagem	24
Figura 7- Usina de reciclagem a frio	26
Figura 8- Esquema de reciclagem parcial.....	28
Figura 9 - Esquema de reciclagem total	28
Figura 10- Máquinas de pré-aquecimento	30
Figura 11 - Problemas relacionados à estabilização com cimento	38
Figura 12 - Especificação brasileira de emulsões asfálticas catiônicas.....	41
Figura 13 - Especificação brasileira para os agentes rejuvenescedores emulsionados ..	43
Figura 14 - Cilindro utilizado na fresagem da Avenida José Sarney	47
Figura 15 - Processo de fresagem com utilização de caminhão basculante	48
Figura 16 - Aspecto visual da pista logo após a fresagem.....	48
Figura 17 - Máquina de abrasão Los Angeles	50
Figura 18 - Agregado fresado após o ensaio de abrasão Los Angeles	51
Figura 19 – Rotarex: aparelho para extração de betume	52
Figura 20 - Pesagem hidrostática do agregado graúdo.....	53
Figura 21 – Frasco Chapman utilizado no ensaio.....	53
Figura 22 - Viscosímetro Saybolt-Furol.....	56
Figura 23 - Provetas com emulsão em repouso por cinco dias	56
Figura 24 - Ensaio de resíduo por evaporação	57
Figura 25 - Corpos de prova de baixo teor de ligante com pouca coesão.....	61
Figura 26 - Composição de um dos corpos de prova	62
Figura 27 - Compactador automático dos corpos de prova	64
Figura 28 - Corpos de prova com agregado virgem	67
Figura 29 - Corpos de prova com RAP após o ensaio Cantabro.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação dos métodos quanto à emissão de gases poluentes	33
Gráfico 2 - Massa específica aparente em função do teor de água.....	63
Gráfico 3 - Volume de vazios em função do teor de água	63
Gráfico 4 - Curvas granulométricas do RAP em diferentes estados	69
Gráfico 5 - Massa específica máxima teórica das misturas com RAP	75
Gráfico 6 - Massa específica aparente das misturas com RAP	76
Gráfico 7 - Volume de vazios das misturas com RAP	77
Gráfico 8 - Fluência das misturas com RAP	78
Gráfico 9 - Estabilidade x teor de emulsão nas misturas com RAP	79
Gráfico 10 - Massa específica máxima teórica das misturas com agregado virgem	80
Gráfico 11 - Massa específica aparente das misturas com agregado virgem	81
Gráfico 12 - Volume de vazios das misturas com agregado virgem	82
Gráfico 13: Fluência das misturas com agregado virgem	83
Gráfico 14 - Estabilidade das misturas com agregado virgem	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da forma das partículas	54
Tabela 2 - Granulometria do material de enchimento exigida pela ET-DE-P00/034	55
Tabela 3 - características dos corpos de prova moldados.....	61
Tabela 4 - Análise granulométrica do RAP natural.....	68
Tabela 5 - Análise granulométrica do RAP destorroadado manualmente	68
Tabela 6 - Análise granulométrica do RAP sem betume.....	69
Tabela 7 - análise granulométrica conforme jogo de peneiras da DNIT 031/2004: RAP destorroadado	70
Tabela 8 - Resultados dos parâmetros em três amostras	71
Tabela 9 - Resultados para massa específica do agregado miúdo do RAP	71
Tabela 10 - Granulometria do cimento Portland	72
Tabela 11 - Ensaio de sedimentação da emulsão	73
Tabela 12 - Resultados dos ensaios nos agregados virgens.....	74
Tabela 13 - Análise granulométrica por peneiramento dos agregados virgens	74
Tabela 14 - Traços das misturas com RAP.....	75
Tabela 15 - Traço das misturas com agregados virgens	80
Tabela 16 - Requisitos para o projeto de mistura asfáltica reciclada com emulsão	85
Tabela 17 - Resultados do ensaio Cantabro na mistura com RAP	86
Tabela 18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.1 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 HISTÓRICO	19
2.2 TIPOS DE FRESAGEM DE PAVIMENTOS	20
2.2.1 Quanto à espessura do corte	20
2.2.1.1 Fresagem superficial.....	20
2.2.1.2 Fresagem rasa	21
2.2.1.3 Fresagem profunda	21
2.2.2 Quanto à rugosidade resultante na pista	22
2.2.2.1 Fresagem padrão.....	22
2.2.2.2 Fresagem fina	22
2.2.2.3 Microfresagem.....	23
2.3 TIPOS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	25
2.3.1 Reciclagem a frio	25
2.3.1.1 Reciclagem a frio em central ou usina.....	25
2.3.1.2 Reciclagem a frio in situ	26
2.3.1.3 Reciclagem parcial	27
2.3.1.4 Reciclagem total	28
2.3.2 Reciclagem a quente	28
2.3.2.1 Reciclagem a quente em central ou usina.....	29
2.3.2.2 Reciclagem a quente in situ	30
2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE RECICLAGEM.....	31
2.4.1 Reciclagem em usina	31
2.4.1.1 Reciclagem a quente em usina.....	31
2.4.1.2 Reciclagem a frio em usina	31
2.4.2 Reciclagem in situ	32
2.4.2.1 Reciclagem a quente <i>in situ</i>	32

2.4.2.2 Reciclagem a frio <i>in situ</i>	32
2.4.3 Quadros comparativos quanto às vantagens e desvantagens	34
2.5 AGENTES ESTABILIZADORES	35
2.5.1 Cimento como agente estabilizador	36
2.5.1.1 Rachaduras por contração.....	36
2.5.1.2 Rachaduras causadas pelo trânsito	37
2.5.1.3 Fragmentação superficial.....	38
2.5.1.4 Carbonatação	39
2.5.2 Emulsão betuminosa como agente estabilizador	39
2.5.2.1 Emulsão betuminosa.....	39
2.5.3 Efeitos dos agentes estabilizadores nas misturas recicladas a frio	43
2.6 PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO	44
2.6.1 Métodos de projeto	45
3 METODOLOGIA, MATERIAIS E ENSAIOS.....	47
3.1 COLETA DA AMOSTRA DE RAP	47
3.2 COLETA DA AMOSTRA DE EMULSÃO BETUMINOSA	48
3.3 COLETA DA AMOSTRA DE MATERIAL DE ENCHIMENTO	49
3.4 COLETA DA AMOSTRA DE AGREGADOS VIRGENS.....	49
3.5 ENSAIOS REALIZADOS	49
3.5.1 Material fresado	49
3.5.1.1 Análise granulométrica por peneiramento.....	49
3.5.1.2 Análise granulométrica conforme especificação de serviço ET-DE-P00/034 ...	50
3.5.1.3 Abrasão Los Angeles.....	50
3.5.1.4 Equivalente de areia.....	51
3.5.1.5 Teor de asfalto envelhecido	51
3.5.1.6 Massa específica real e absorção	52
3.5.1.7 Índice de forma do agregado	54
3.5.2 Material adicional	54
3.5.2.1 Massa específica do cimento	54
3.5.2.2 Granulometria do cimento	55
3.5.3 Emulsão asfáltica	55
3.5.3.1 Viscosidade Saybolt-Furol	55
3.5.3.2 Sedimentação.....	56
3.5.3.3 Peneiração.....	57

3.5.3.4 Resíduo por evaporação.....	57
3.5.4 Agregados virgens.....	58
3.6 DOSAGEM DAS MISTURAS	58
3.6.1 Dosagem Marshall	58
3.6.2 Metodologia adotada para a dosagem	60
3.7 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	60
3.7.1 Moldagem dos corpos de prova com RAP.....	61
3.7.1.1 Secagem do material fresado.....	61
3.7.1.2 Pesagem dos materiais pétreos	62
3.7.1.3 Adição de água	62
3.7.1.4 Adição de emulsão asfáltica	64
3.7.1.5 Compactação dos corpos de prova	64
3.7.1.6 Massa específica aparente e volume de vazios.....	65
3.7.1.7 Estabilidade e fluência.....	65
3.7.2 Moldagem dos corpos de prova com agregados virgens.....	66
4 RESULTADOS E ANÁLISES	67
4.1 MATERIAL FRESADO	68
4.1.1 Análise granulométrica	68
4.1.2 Análise granulométrica conforme especificação de serviço ET-DE-P00/034.....	70
4.1.3 Abrasão Los Angeles	70
4.1.4 Equivalente de areia	70
4.1.5 Teor de asfalto envelhecido.....	71
4.1.6 Massa específica real e absorção	71
4.1.7 Índice de forma	72
4.2 MATERIAL ADICIONAL	72
4.2.1 Massa específica do cimento	72
4.2.2 Granulometria do cimento.....	72
4.3 EMULSÃO BETUMINOSA.....	72
4.3.1 Viscosidade Saybolt-Furol	72
4.3.2 Sedimentação	73
4.3.3 Peneiração	73
4.3.4 Resíduo por evaporação.....	73
4.4 AGREGADOS VIRGENS	74
4.5 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	74

4.5.1 Misturas com agregado fresado	74
4.5.1.1 Traço das misturas	74
4.5.1.2 Massa específica máxima teórica	75
4.5.1.3 Massa específica aparente	76
4.5.1.4 Volume de vazios	76
4.5.1.5 Fluência	77
4.5.1.6 Estabilidade	78
4.5.2 Misturas com agregado virgem	79
4.5.2.1 Traço das misturas	80
4.5.2.2 Massa específica máxima teórica	80
4.5.2.3 Massa específica aparente	81
4.5.2.4 Volume de vazios	82
4.5.2.5 Fluência	83
4.5.2.6 Estabilidade	84
4.5.3 Misturas com teor ótimo	85
4.5.3.1 Ensaio Cantabro.....	85
4.5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	87
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	89
5.1 CONCLUSÕES	89
5.2 SUGESTÕES.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

As cidades em geral têm experimentado um crescimento cada vez maior nos últimos anos, o que acarreta em aumento populacional e na quantidade de veículos nas vias. Isso gera a necessidade de se criar outras vias pavimentadas para atender à crescente demanda de veículos.

Contudo, as vias existentes também sofrem com esse fenômeno. Por isso, com o tempo, elas necessitam periodicamente de reparos, restaurações e recapeamentos. Este último processo, por exemplo, causa uma mudança de greide na via. Como ele não costuma ser realizado apenas uma vez, essa alteração no greide fica cada vez maior, o que causa transtornos como pavimento irregular, desconforto dos usuários e problemas de drenagem superficial.

Por conta desta situação e dos problemas citados, para corrigir os defeitos existentes nas vias pavimentadas, tem-se utilizado com mais frequência a técnica de fresagem do pavimento.

Segundo a Norma DNIT 159/2011-ES, a fresagem a frio é um processo mecânico que consiste na realização de um corte ou desbaste de uma ou mais camadas de um pavimento. É realizada através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante.

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 em áreas que apresentam outros defeitos.

Este processo também é muito utilizado em obras de arte especiais, como pontes, para regularizar o pavimento de encontros e para melhorar o coeficiente de atrito entre o pneu e o revestimento em locais de alto índice de derrapagem.

Há a dúvida em relação à qualidade do material fresado que será reutilizado no pavimento. Contudo, 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 sem problemas como um componente de um novo pavimento asfáltico (BERNUCCI *et al.* 2007). Este ponto, inclusive, foi um dos estudados na presente dissertação.

1.1 JUSTIFICATIVA

O material removido no processo da fresagem, como mencionado, é retirado do pavimento e colocado na caçamba do caminhão basculante. Entretanto, ele não é um material

renovável, sendo por vezes depositado em bota-fora, o que prejudica o meio ambiente e aumenta os custos.

Com base nisso, tem-se utilizado muito o material fresado em camadas do pavimento, formando o que se denomina como RAP (*recycled asphalt pavement*). Quando o material é inserido em uma camada que possui um solo ruim para pavimentação, por exemplo, isso aumenta as propriedades físicas e mecânicas deste solo, não se fazendo necessário o descarte ou substituição dele (BONFIM, 2007).

Assim, a reutilização do material fresado, além de ser benéfica para o meio ambiente, também traz reduções de custo, visto que diminui os gastos com transporte e não se faz mais necessário o uso integral de material virgem nem a exploração exacerbada da matéria prima que compõe o pavimento.

Ainda de acordo com Bonfim (2007), o uso de emulsão asfáltica no material reciclado gera uma estabilização deste material, aprimorando 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 possíveis transtornos gerados.

Portanto, este trabalho está sendo realizado por conta dos problemas de meio ambiente e dos altos custos que a não reutilização do material fresado pode causar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estudar misturas asfálticas a frio com uso de revestimento asfáltico fresado (RAP) e adição de emulsão betuminosa como ligante.

1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar ensaios em corpos de prova feitos com RAP e diferentes teores de emulsão betuminosa para posterior análise das características físicas e mecânicas;
- Realizar ensaios em corpos de prova feitos com agregados virgens e diferentes teores de emulsão betuminosa para posterior análise das características físicas e mecânicas;
- Comparar os dois tipos de corpos de prova ensaiados;
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com outros trabalhos semelhantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

A técnica de reciclagem de pavimentos foi iniciada no ano de 1915, nos Estados Unidos. Deste ano até meados da década de 30, relativamente muitos pavimentos foram reciclados e reutilizados. Contudo, após esse período, a oferta de asfalto no mercado aumentou consideravelmente, o que fez com que ficasse mais barato a construção de um novo pavimento do que sua reciclagem. Desta maneira, a reciclagem de pavimentos sofreu uma redução significativa (KANDHAL; MALLICK, 1997 apud CASTRO, 2003).

Porém, na década de 70, com a crise do petróleo e crise econômica internacional, os materiais asfálticos começaram a entrar em falta no mercado. Desta maneira, técnicos rodoviários internacionais e organismos de fomento começaram a dar ênfase novamente à reciclagem de pavimentos, reaproveitando os materiais existentes em pavimentos deteriorados (BONFIM, 2007).

Nos anos 80, os estudiosos da área constataram que as fontes de petróleo e outras matérias-primas não se renovam, o que gerava a escassez cada vez maior destas fontes. Assim, nessa época, a reciclagem de pavimentos passou a ser mais utilizada ainda devido a esse problema de cunho ambiental.

No Brasil, a reciclagem de pavimentos foi empregada pela primeira vez em 1960, pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro. A prefeitura providenciava a remoção dos revestimentos asfálticos de ruas deterioradas da cidade através do uso de marteletes e posterior transporte para serem misturados em usina. Contudo, estes resíduos eram utilizados para outros fins, e não para reutilização em outros pavimentos (CASTRO, 2003).

Vale a pena ressaltar que o primeiro equipamento especificamente de fresagem foi concebido na segunda metade da década de 70 simultaneamente na Europa e na América do Norte. Este equipamento simbolizou um avanço na área de reciclagem de pavimentos, pois ele passou a possibilitar e garantir o desgaste adequado do pavimento em profundidades pré-determinadas (BONFIM, 2007).

A primeira vez em que a reciclagem foi usada em rodovias no Brasil ocorreu em 1985, em um trecho de 100 km da Rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas. Nesta ocasião, foi executada a fresagem do pavimento e sua posterior reciclagem ocorreu numa usina *drum mixer* a quente (CAMPOS, 1987; MELLO; CAMERATO, 1995 apud BONFIM, 2007).

Ainda na década de 80 ocorreu a primeira reciclagem a quente *in situ*, em alguns trechos da Rodovia Presidente Dutra nos estados de Rio de Janeiro e São Paulo (DNER, 1996).

As primeiras experiências em reciclagem de pavimentos a frio foram coordenadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DNER-SP) e ocorreram na Rodovia Anchieta e na Rodovia do Açúcar, nos anos 80 e 90, respectivamente (PARANHOS; TUCHUMANTEL, 1992 *apud* DAVID, 2006).

Já a primeira reciclagem de pavimento a frio *in situ* no Brasil ocorreu em 1993 na BR/393, no estado do Rio de Janeiro. Este procedimento foi realizado com a adição de uma emulsão asfáltica especial (PINTO, *et al.*, 1994 *apud* DAVID, 2006).

Entre 1997 e 2000, de acordo com Wirtgen (2012), diferentes tipos de agentes de reciclagem foram utilizados em vários trechos de rodovias brasileiras com a técnica de reciclagem a frio *in situ*. Podemos citar: espuma de asfalto e cimento (RS/040 – Viamão – Pinhal), cal (SP/160 – Rodovia dos Imigrantes), cimento (BR/116 – Rodovia Presidente Dutra) e emulsão asfáltica rejuvenescedora (BR/381 – Rodovia Fernão Dias).

2.2 TIPOS DE FRESAGEM DE PAVIMENTOS

Segundo a Norma DNIT 159/2011-ES, como mencionado, a fresagem é um processo mecânico que consiste na realização de um corte ou desbaste de uma ou mais camadas de um pavimento. É realizada através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante.

As partículas de pequena dimensão resultantes do processo de fresagem dependem de alguns fatores como: profundidade do corte, velocidade de avanço da máquina, sentido de rotação do cilindro fresador, qualidade do material, teor de asfalto, condições da camada fresada e condições do ambiente (BONFIM, 2007; DNER, 1998).

2.2.1 Quanto à espessura do corte

2.2.1.1 Fresagem superficial

A fresagem superficial é destinada apenas para a correção de defeitos existentes na superfície do pavimento, principalmente os defeitos do tipo exsudação e deformação plástica. Por isso, é chamada também de fresagem de regularização (BONFIM, 2007).

Este tipo de fresagem dispensa o posterior recapeamento da pista, já que não compromete a segurança do rolamento, embora comprometa um pouco o conforto. Contudo, a troca do cilindro fresador por um que possua maior densidade de dentes de corte gera superfícies mais confortáveis ao rolamento. (BONFIM, 2007).

Segundo o DNER, a fresagem superficial melhora a textura de superfície da rodovia (macrotextura) e da superfície exposta do agregado (microtextura), o que aumenta a resistência à derrapagem.

2.2.1.2 Fresagem rasa

Conforme Bonfim (2007), a fresagem rasa é um pouco mais profunda que a superficial, atingindo em média 5cm de profundidade, podendo chegar até a camada de ligação. Esse tipo de serviço é muito utilizado para corrigir defeitos funcionais e em remendos superficiais.

Este tipo de fresagem também é muito utilizado para corrigir o greide do pavimento, buscando manter o original a fim de não comprometer a drenagem superficial e as obras de arte correntes. Por isso, é muito recorrente em vias urbanas.

De acordo com o DNER (1996), a fresagem rasa gera uma textura resultante que aumenta a ligação ou a resistência ao cisalhamento entre o antigo pavimento e a nova camada de revestimento.

2.2.1.3 Fresagem profunda

Bonfim (2007) afirma que a fresagem profunda é utilizada geralmente quando há defeitos relacionados à estrutura do pavimento, sendo necessária uma correção estrutural. Ela pode atingir níveis consideráveis, alcançando, além do revestimento, as camadas de ligação, base e até mesmo da sub-base em casos mais raros.

Contudo, a fresagem profunda também pode ser utilizada levando em consideração aspectos funcionais, como a melhoria na segurança da via e o restabelecimento das condições ideais de drenagem, corrigindo os greides da via.

De acordo com o mesmo autor citado, este tipo de fresagem é muito comum na execução de serviços de pequenos remendos e para requadramento de buracos.

2.2.2 Quanto à rugosidade resultante na pista

A rugosidade resultante na pista depende da velocidade de operação e do tipo de cilindro fresador, também conhecido como rolo ou tambor fresador.

2.2.2.1 Fresagem padrão

Tipo de fresagem inicialmente utilizada e introduzida no mercado. A distância lateral entre os dentes de corte do cilindro fresador é de 15 mm. Quando executada, é necessária a posterior aplicação de uma nova camada de revestimento. (BONFIM, 2007). A figura 1 mostra um cilindro fresador encontrado no mercado para a fresagem padrão.

Figura 1- Cilindro fresador para fresagem padrão



Fonte: DVS, 2018

2.2.2.2 Fresagem fina

Fresagem resultante de um cilindro fresador com espaçamento lateral de 8 mm entre seus dentes. Ela foi introduzida após a fresagem padrão, resultando em sulcos menores e menor rugosidade na pista (BONFIM, 2007).

O mesmo autor afirma que a fresagem fina é muito utilizada para regularizar vias por permitir uma maior trafegabilidade. Pode ou não haver a necessidade de fazer um novo recapeamento após a execução dessa fresagem, ficando a critério do projetista. A figura 2 mostra um cilindro fresador encontrado no mercado para a fresagem fina.

Figura 2- Cilindro fresador para fresagem fina



Fonte: DVS, 2018

2.2.2.3 Microfresagem

É resultante de um cilindro fresador com espaçamento lateral de cerca de 2 a 3 mm entre seus dentes e muito utilizada para adequar o perfil longitudinal da via e para alterar o layout viário, removendo faixas de sinalização horizontal. Como remove uma camada muito fina do pavimento, não há necessidade de uma posterior aplicação de nova camada de revestimento. (BONFIM, 2007). A figura 3 mostra um cilindro fresador encontrado no mercado para a microfresagem.

Figura 3- Cilindro fresador para microfresagem



Fonte: DVS, 2018

As figuras 4, 5 e 6 a seguir apresentam uma comparação entre os três tipos de fresagem quanto à rugosidade resultante na pista.

Figura 4- Rugosidade resultante da fresagem padrão



Fonte: Bonfim, 2007

Figura 5- Rugosidade resultante da fresagem fina



Fonte: Bonfim, 2007

Figura 6- Rugosidade resultante da microfresagem



Fonte: Bonfim, 2007

2.3 TIPOS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

2.3.1 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio é o processo em que o material removido do pavimento antigo é combinado com ligante novo, agente(s) de reciclagem e, quando necessário, agregado virgem, produzindo misturas a frio no local ou em uma central.

Normalmente, essa mistura é utilizada em camadas de base, sendo necessário um posterior tratamento superficial sobre a camada para proteger contra danos causados pela água e a abrasão provocada pelo tráfego. (KANDHAL; MALLICK, 1997).

2.3.1.1 Reciclagem a frio em central ou usina

Na reciclagem feita em usina, o material fresado é retirado do local da obra para ser transportado a uma central, sendo posteriormente incorporado a uma mistura betuminosa.

De acordo com Cunha (2010), normalmente, as usinas que trabalham com material fresado são as mesmas que trabalham com misturas convencionais. Porém, elas devem estar tecnicamente preparadas para receber e tratar corretamente o material proveniente de pavimentos antigos.

Nesta técnica, a usina mais utilizada é a descontínua, na qual a mistura do material reciclado com ligante e/ou agregados novos é feita em uma unidade específica denominada misturador. O material reciclado é misturado sem ser aquecido e o ligante presente na mistura encontra-se em temperatura ambiente.

Depois de produzida, a mistura é transportada até os silos de armazenamento e depois para o local em que será utilizada como restauração do pavimento. No local, ela é espalhada e logo após compactada.

Com relação ao armazenamento e estoque de pilhas de mistura reciclada, a empresa Wirtgen afirma que devem ser tomados alguns cuidados com o tempo de estocagem, principalmente em misturas realizadas com cimento Portland.

Nesta técnica, os ligantes mais utilizados são a emulsão asfáltica e a espuma de asfalto. Os processos para obtenção da mistura reciclada são basicamente os mesmos para estes dois tipos de ligante. Contudo, a espuma de asfalto é mais usada por conta da economia (devido à taxa de expansão da espuma que reduz o consumo), da praticidade e da boa adesão a materiais frios e úmidos (CUNHA, 2010).

De acordo com Gewehr (2013), no Brasil existem poucas usinas de reciclagem a frio, sendo todas elas localizadas no estado de São Paulo. Na capital do estado, este processo já foi utilizado algumas vezes para recuperação de vias públicas, sendo adicionado pó de brita e 1% de cimento Portland ao material fresado.

A reciclagem a frio em usina, vista na figura 7, demanda um alto custo de transporte, pois o material fresado deve ser levado à usina e depois a mistura deve ser levada à obra. Além disso, a porcentagem de aproveitamento do material fresado nas usinas descontínuas pelo método a frio não passa de 30%. Por isso, Gomes (2005) afirma que esta técnica não é muito utilizada, sendo as técnicas de reciclagem a frio *in situ* bem mais recorrentes.

Figura 7- Usina de reciclagem a frio



Fonte: Wirtgen Group, 2018

2.3.1.2 Reciclagem a frio *in situ*

Na reciclagem *in situ*, o material fresado é utilizado no mesmo local em que houve a fresagem, sem a necessidade de levá-lo a uma usina de reciclagem. A reciclagem é feita por uma máquina recicladora, especializada nesta técnica. A máquina tem capacidade de reciclar uma camada espessa do pavimento em apenas uma passada (CUNHA, 2010).

Conforme Khandal e Mallick (1997) e USACE (2005), a reciclagem a frio *in situ* pode ser realizada de duas maneiras: parcial e total. Na reciclagem parcial, ocorre a fresagem e posterior reciclagem apenas do revestimento asfáltico, enquanto que na total o procedimento é realizado no revestimento e em camada(s) abaixo dele. Em ambos os procedimentos, há a necessidade de utilização de algum tipo de agente de reciclagem como, por exemplo, emulsão

asfáltica, espuma de asfalto, cal hidratada e cimento Portland. Deve haver a verificação da necessidade ou não de adição de agregados virgens.

A reciclagem a frio *in situ* deve sempre ser complementada com a colocação de camadas superiores em misturas betuminosas fabricadas a quente em central. Isso deve ocorrer para que o pavimento seja dotado de características superficiais necessárias à circulação do tráfego. Por isso, este tipo de reciclagem, além de reabilitar estruturalmente o pavimento, possibilita também a melhoria das características superficiais (CUNHA, 2010).

2.3.1.3 Reciclagem parcial

A reciclagem parcial pode ser aplicada quando o pavimento apresenta defeitos apenas no revestimento asfáltico, como trincamento por fadiga, irregularidade superficial, desgaste e baixa resistência à derrapagem, não havendo problemas estruturais de base ou subleito. (O'LEARY; WILLIAMS, 1993).

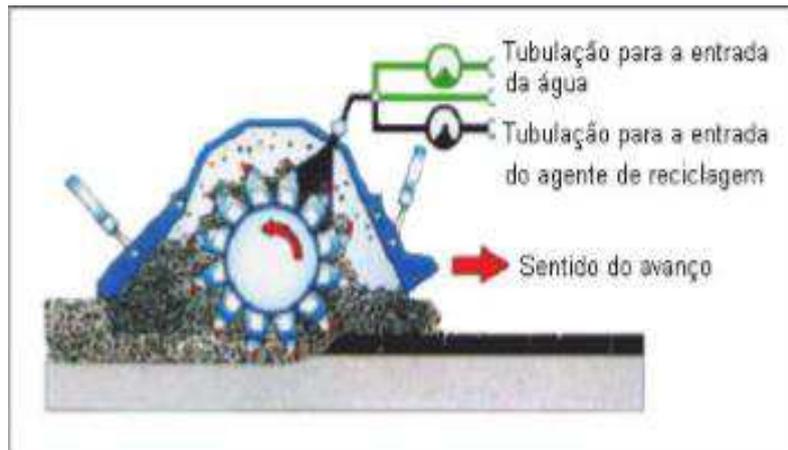
Conforme Rogge *et al.* (2003), não se recomenda utilizá-la nas seguintes situações: quando houver problemas de subleito, incompatibilidade ao volume de tráfego, falta de adesividade, excesso de ligante, condições severas de frio e umidade e espessuras de revestimento inferior a 4 cm.

Nesta técnica, conforme David (2006), o material removido é misturado com um agente de reciclagem que complementa a quantidade de ligante da mistura, se necessário, possibilitando o reaproveitamento. Caso necessário também, pode ser adicionado agregado virgem à mistura, que é espalhado previamente na pista. Após a mistura, ocorre o espalhamento e compactação da mesma na pista.

Esta técnica geralmente ocorre em profundidades de 75 a 100 mm (KHANDAL; MALLICK, 1997). Contudo, Rogge *et al.* (1993) afirma que a profundidade de fresagem para a reciclagem parcial pode ser empregada de 50 a 100 mm.

O processo de reciclagem parcial, observado na figura 8, pode ser realizado por uma unidade simples, que fresa e mistura o material, ou por uma unidade múltipla, composta por máquinas diferentes para cada estágio da reciclagem, como fresagem, peneiramento, britagem e mistura (KANDHAL; MALLICK, 1997).

Figura 8- Esquema de reciclagem parcial

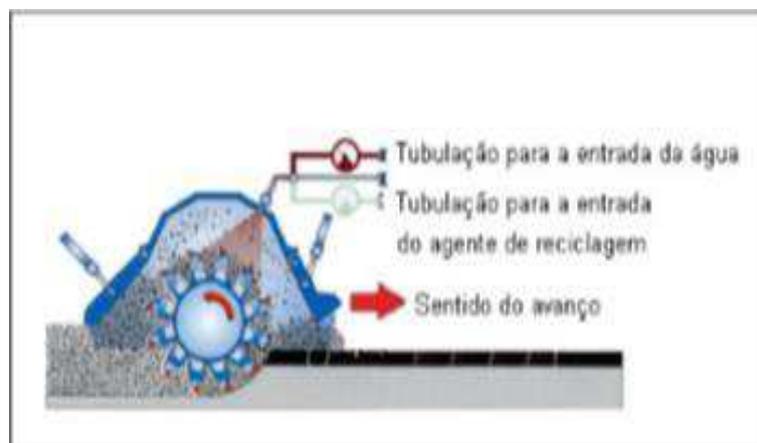


Fonte: Wirtgen Group, 2012

2.3.1.4 Reciclagem total

A reciclagem total, vista na figura 9, envolve basicamente os mesmos procedimentos da reciclagem parcial. No entanto, ela atinge profundidades maiores (entre 100 a 300 mm), chegando à base granular ou parte dela. Pode ser aplicada quando a base e o revestimento asfáltico apresentam problemas, já que o objetivo deste tipo de reciclagem é obter uma base estabilizada (DAVID, 2006).

Figura 9 - Esquema de reciclagem total



Fonte: Wirtgen Group, 2012

2.3.2 Reciclagem a quente

A reciclagem de pavimentos a quente é definida como um método pelo qual o revestimento asfáltico fresado é misturado a quente com agregado virgem, asfalto e/ou agente

rejuvenecedor e/ou agente de reciclagem para produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente. O processo pode ser realizado em usina ou *in situ* (KHANDAL; MALLICK, 1997).

2.3.2.1 Reciclagem a quente em central ou usina

De acordo com USDD (2001) *apud* Cunha (2010), as misturas betuminosas recicladas em central a quente apresentam um desempenho semelhante ao verificado em misturas com materiais novos. A mesma fonte afirma ainda que estas misturas podem ser utilizadas em um novo pavimento como camada de base, de regularização ou em camadas de desgaste.

Os procedimentos adotados para a realização desta técnica são semelhantes aos utilizados no processo a frio em usina, ou seja, o pavimento sofre primeiro a fresagem para posterior transporte do material fresado a uma central de produção de misturas betuminosas.

A mistura reciclada pode ser produzida em usinas gravimétricas ou do tipo *drum mixer*. Segundo Khandal e Mallick (1997), nas usinas gravimétricas, geralmente uma porcentagem de 10 a 35% do material removido do pavimento é utilizada para composição das misturas recicladas, enquanto que nas usinas *drum mixer* essa porcentagem pode atingir até 70%. Essa limitação de uso do material está relacionada com problemas gerados no aquecimento da mistura.

Cunha (2010) afirma que alguns cuidados importantes devem ser tomados ao reciclar um material no processo a quente independentemente do tipo de usina. Os agregados provenientes do processo de fresagem, por exemplo, não devem entrar em contato direto com a chama do queimador, visto que isso produziria altos níveis de poluição ambiental indo de encontro a um dos principais objetivos da utilização de material reciclado, que é a redução de impactos ambientais negativos. Outro cuidado está relacionado à temperatura de aquecimento. Tal temperatura não deve ser baixa demais ao ponto de não amolecer o ligante, mas também não deve ser muito alta, pois acarretaria no envelhecimento rápido e precoce do ligante já envelhecido por conta das intempéries as quais sofreu durante o tempo em que fazia parte do revestimento asfáltico.

O ligante mais utilizado na reciclagem a quente em usina é o CAP. Deve-se atentar ao fato de que este deve ser um menos duro para que a temperatura de amolecimento não seja tão alta, causando possíveis transtornos (CUNHA, 2010).

2.3.2.2 Reciclagem a quente *in situ*

Segundo Cunha (2010), o que difere este tipo de reciclagem das outras é o fato de que ela não permite a reabilitação das características estruturais de pavimentos flexíveis degradados, permitindo somente a reabilitação das características funcionais do pavimento ao nível da camada de desgaste. Assim, tal técnica não pode ser executada em casos nos quais ocorre algum tipo de defeito estrutural, mas é muito utilizada para diminuir a permeabilidade do pavimento, melhorar as propriedades do ligante envelhecido e aumentar a resistência à derrapagem.

A reciclagem a quente *in situ* necessita quase sempre da adição de um agente rejuvenescedor à mistura para devolver ao betume suas características físicas e químicas iniciais (CUNHA, 2010).

O DNER (1998) cita dois tipos de procedimentos na reciclagem a quente *in situ*. O primeiro se caracteriza quando a fresagem ocorre a frio e é processada a quente. O segundo se dá quando ocorre um pré-aquecimento da pista antes da fresagem. Assim, ela ocorre a quente, juntamente com o posterior processamento também a quente. Em ambos os casos, após a mistura dos materiais, deve ser realizado espalhamento e compactação da mistura reciclada. A figura 10 mostra uma máquina de pré-aquecimento usada no segundo procedimento citado anteriormente.

Figura 10- Máquinas de pré-aquecimento



Fonte: Martec, 2009

2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE RECICLAGEM

Percebe-se que os diferentes métodos de reciclagem vistos anteriormente possuem diversas características que os diferem entre si. Com isso, há também vantagens e desvantagens existentes em cada um deles, sendo necessários os devidos cuidados antes de se escolher a melhor técnica de reciclagem.

2.4.1 Reciclagem em usina

A reciclagem realizada em uma central ou usina permite um maior controle de qualidade da mistura obtida em comparação com a técnica feita *in situ*. Além disso, vale lembrar que na usina não há influência do clima e do tempo, o que é uma grande vantagem principalmente em locais onde o tempo é muito instável.

No entanto, o principal inconveniente das técnicas de reciclagem em usina é o fato de haver a necessidade de transporte do material logo após a fresagem, o que aumenta os custos. Também vale a pena lembrar que não é possível aproveitar 100% do material fresado nas usinas. O aproveitamento máximo é de 70% (CUNHA, 2010).

2.4.1.1 Reciclagem a quente em usina

Falando especificamente da reciclagem a quente em usina, destaca-se o fato de que a qualidade da mistura reciclada se equipara com uma mistura nova, podendo ser empregada principalmente em camada de base.

O problema, porém, é que este tipo de reciclagem emite muitas substâncias nocivas para a atmosfera e exige um consumo muito grande de energia se comparado aos demais métodos de reciclagem, o que atinge negativamente o meio ambiente e acaba também encarecendo o processo.

2.4.1.2 Reciclagem a frio em usina

Esta técnica está sendo cada vez menos executada atualmente, levando em conta que sua principal desvantagem é que ela apresenta uma mistura de baixa qualidade. Contudo, a reciclagem a frio *in situ*, com máquinas cada vez mais tecnológicas, permite que a mistura apresente qualidade tão boa quanto a reciclagem a frio em usina.

2.4.2 Reciclagem *in situ*

A reciclagem *in situ* tem como principal vantagem o fato de não ser necessário o transporte do material fresado para posterior utilização. Isso diminui consideravelmente os custos e possibilita ainda a execução mais dinâmica dos serviços, liberando o tráfego mais rapidamente e evitando assim possíveis transtornos. Esta técnica possibilita ainda a utilização de 100% do material fresado em uma nova mistura. Isso evita o uso de zonas de vazadouro e de bota-fora, o que também diminui os custos e é benéfico para o meio ambiente (CUNHA, 2010).

Por outro lado, o mesmo autor afirma ainda que a reciclagem *in situ* dificulta o controle preciso do material reciclado e da mistura se comparado com as técnicas realizadas em usina. Além disso, depende também das condições climáticas. No entanto, as máquinas utilizadas para executar a reciclagem *in situ* se tornam cada vez mais eficientes e buscam reduzir as desvantagens citadas acima.

2.4.2.1 Reciclagem a quente *in situ*

Conforme Cunha (2010), a principal vantagem desta técnica decorre do fato de ser possível reaproveitar os materiais do antigo pavimento, diminuindo a necessidade da criação de zonas de vazadouro para depósito de materiais e reduzindo também a exploração nas pedreiras. Ela também permite a melhoria das características funcionais do pavimento. Contudo, essas vantagens também podem ser observadas nas outras técnicas de reciclagem.

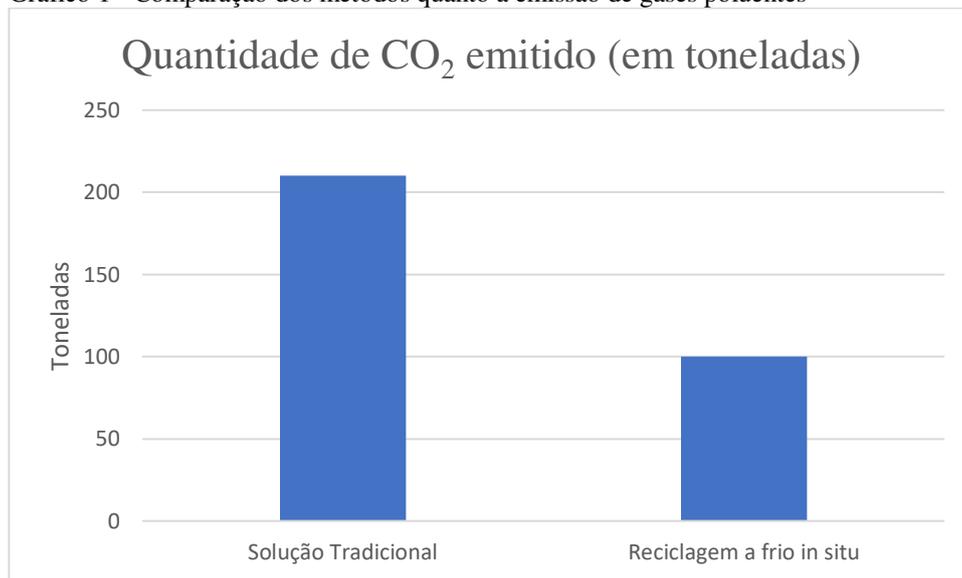
Além disso, a reciclagem a quente *in situ*, assim como a realizada na usina, emite diversas substâncias nocivas à atmosfera gerando impactos ambientais nocivos. Ela também demanda um alto consumo de energia, não pode ser executada quando há problemas estruturais no pavimento e exige a utilização de equipamentos muito caros e complexos, o que inviabiliza a execução da técnica em diversas ocasiões (CUNHA, 2010).

2.4.2.2 Reciclagem a frio *in situ*

Uma grande vantagem da técnica de reciclagem a frio *in situ* é a conservação de energia, já que não é necessário aquecer o material e nem requer secagem. Conforme relatado por Davidson, Blais e Croteau (2004), a energia consumida na produção da mistura reciclada a frio *in situ* equivale a aproximadamente 20% da energia necessária para produzir novas misturas asfálticas a quente, considerando a mesma quantidade (CUNHA, 2010).

Outra vantagem se encontra na diminuição da emissão de gases tóxicos à atmosfera. Um estudo feito por Alkins, Lane e Kazmierowski (2008), que comparou a quantidade de dióxido de carbono libertado num processo de reabilitação de um pavimento por métodos tradicionais e pela reciclagem a frio *in situ*, concluiu que a quantidade de gases emitidos é diminuída pela metade quando utilizada esta segunda técnica. O gráfico 1 ilustra isso, mostrando o resultado obtido pelo estudo.

Gráfico 1 - Comparação dos métodos quanto à emissão de gases poluentes



Fonte: Adaptado de Alkins, Lane e Kazmierowski, 2008

A reciclagem a frio *in situ* auxilia também na atenuação da reflexão das trincas. Segundo Davidson, Blais e Croteau (2004), o elevado volume de vazios das misturas asfálticas recicladas a frio provoca tal consequência. Pinto *et al.* (1994) *apud* David (2006) afirma que a reconstrução da camada asfáltica através do processo de reciclagem *in situ* a frio permite criar uma camada intermediária com características mecânicas que inibem o mecanismo de propagação das trincas do revestimento antigo para a camada de rolamento.

Ainda outra vantagem da técnica de reciclagem a frio *in situ* se dá pelo fato de que ela aumenta a capacidade estrutural do pavimento, fazendo com que as novas misturas sejam empregadas principalmente na camada de base do pavimento.

Por outro lado, esse método possui as mesmas desvantagens que se encontram em uma reciclagem *in situ* em geral, como, por exemplo, a alta dependência de fatores climáticos e a dificuldade em manter um controle rigoroso da mistura. Ele também fica inviável de ser aplicado em casos os quais se encontra um pavimento com alta heterogeneidade de materiais utilizados na sua confecção.

2.4.3 Quadros comparativos quanto às vantagens e desvantagens

Quadro 1 – Vantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Técnica de reciclagem		Vantagens
<i>In situ</i>	A frio	Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado Dispensa uso de bota-fora Menor consumo de energia Aumenta a capacidade estrutural Retrai as reflexões por trinca
	A quente	Possibilidade de incorporação de 100% do material fresado Dispensa uso de bota-fora Melhora as características funcionais Diminui a permeabilidade do pavimento
Em central	A frio	Aumenta a capacidade estrutural Qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos Maior controle de qualidade das misturas Serve bem como camada de base
	A quente	Qualidade da mistura não é afetada por fatores climáticos Maior controle de qualidade das misturas Serve bem como camada de base Qualidade da mistura comparada a uma mistura nova

Fonte: Autor, 2018

Quadro 2 – Desvantagens das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Técnica de reciclagem		Desvantagens
<i>In situ</i>	A frio	Dificuldade em manter o rigor ao longo da obra Alta dependência climática Interferência no tráfego Necessita muitas vezes de uma camada de sobreposição Não pode ser executada em pavimentos heterogêneos
	A quente	Demanda um alto consumo de energia Não pode ser executada em pavimentos com problemas estruturais Emite muitos poluentes na atmosfera Necessita de equipamentos caros e complexos
Em central	A frio	Necessidade de transporte do material até a central Impossibilidade de incorporar 100% do material fresado Necessita muitas vezes de uma camada de sobreposição Qualidade semelhante às misturas <i>in situ</i> a frio
	A quente	Necessidade de transporte do material até a central Técnica que mais consome energia Técnica que mais emite gases nocivos para a atmosfera Demanda altos custos

Fonte: Autor, 2018

2.5 AGENTES ESTABILIZADORES

Conforme Momm e Domingues (1995, *apud* Cunha, 2010), os agentes estabilizadores (também denominados agentes de reciclagem) são materiais acrescidos à mistura reciclada para conceder características físicas apropriadas à transformação da camada deteriorada em uma nova camada com qualidade adequada.

Ainda de acordo com a Wirtgen Group (2012), esses agentes têm como objetivo ligar partículas de agregados individuais para aumentar as características de resistência e rigidez do material, melhorando também a durabilidade e a resistência aos efeitos da água e do meio ambiente. Eles podem ser utilizados em misturas novas e devem ser utilizados em misturas recicladas.

O autor citado menciona que há uma grande variedade de agentes estabilizadores sendo usados no mercado no mundo todo, dentre os quais se pode citar:

- Agentes úmidos ou surfactantes (agentes superficiais ativos), como os óleos sulfonados;
- Sais higroscópicos, como o cloreto de cálcio;
- Polímeros naturais ou sintéticos;
- Ceras modificadas;
- Resinas de petróleo;
- Agentes betuminosos, como a emulsão asfáltica e agentes de reciclagem emulsionados;
- Agentes cimentados, como cimento, cal e cinzas volantes.

Dentre os agentes citados, os mais utilizados no mundo são os betuminosos e cimentados. Isso se dá pelo fato de que há uma grande disponibilidade destes comparados aos demais, além do fato de já haver mais pesquisas e padrões de execução referentes aos dois. Por conta do que foi exposto, a presente monografia dará um enfoque aos agentes betuminosos, com destaque ainda para agentes cimentados.

De acordo com a Wirtgen Group (2012), a escolha de determinado agente estabilizador depende de vários fatores, os quais estão citados abaixo:

- Preço: costuma ser a preocupação primária;
- Disponibilidade: diversas regiões não dispõem de determinados agentes. Por exemplo, alguns países não possuem produção de emulsão asfáltica;

- Características do material: alguns agentes são mais eficazes se utilizados com determinado material. Por exemplo, a cal é bem mais eficaz que o cimento para a estabilização de solos com alta plasticidade;
- Durabilidade: os efeitos desejados devem permanecer eficazes pelo período de serviço;
- Política: por conta principalmente de experiências passadas, alguns órgãos responsáveis por estradas possuem uma certa resistência ao uso de determinados agentes de estabilização.

2.5.1 Cimento como agente estabilizador

Conforme dito pela Wirtgen Group (2012), o agente estabilizador mais utilizado no mundo é o cimento, chegando ao ponto de ser mais usado do que a soma de todos os outros agentes em conjunto. Isso se dá principalmente pelo relativo preço baixo do cimento e pela facilidade de aquisição no mundo todo. Outro motivo é seu histórico comprovado como material de construção, fato que propiciou o desenvolvimento de ensaios e padrões de execução já bastante pesquisados.

A principal função da adição de cimento Portland é o ganho de resistência, e este ganho está diretamente relacionado com o teor de cimento adicionado. Geralmente, a resistência do material cimentado aumenta em uma relação linear com o teor de cimento. Vale a pena lembrar também que a resistência aumenta com o tempo, assim como se observa no concreto convencional.

Contudo, a adição de cimento à mistura reciclada pode gerar rachaduras no pavimento. De acordo com a Wirtgen Group (2012), existem dois tipos de rachaduras relacionadas às misturas tratadas com cimento: por contração e as causadas pelo tráfego. Elas serão tratadas posteriormente junto com outros problemas e cuidados necessários oriundos da adição de cimento como agente estabilizador.

2.5.1.1 Rachaduras por contração

A Wirtgen Group (2012, p. 112) faz a seguinte descrição a respeito da rachadura por contração:

À medida que o cimento se hidrata, cristais de silicato de cálcio em “forma de dedos” se formam, ligando as partículas do material. Além da geração de calor, inúmeras outras mudanças ocorrem durante essa reação química. Com o desenvolvimento das ligações, o material passa por uma alteração de volume

e se contrai, causando rachaduras normalmente chamadas de rachaduras por contração. Essas rachaduras por contração são inevitáveis, sendo uma das características do trabalho com cimento.

Contudo, apesar de ser inevitável, este tipo de rachadura pode ser controlado, levando-se em consideração que os principais fatores que influenciam na magnitude delas, de acordo com o mesmo autor, são:

- Teor de cimento: a contração que ocorre durante a hidratação é uma função da quantidade de cimento presente. Quanto maior o teor, maior o grau de rachadura. Por conta disso, deve haver um equilíbrio no teor de cimento adicionado. Não se pode adicionar muito por conta do risco maior de rachaduras, mas não se pode adicionar pouco porque a mistura não irá atingir os requisitos de resistência e durabilidade.
- Tipo de material a ser estabilizado: alguns materiais tendem a se contrair mais do que outros quando são tratados com cimento. Materiais com índice de plasticidade maior que 10, por exemplo, devem ter também a adição de cal para reduzir a plasticidade.
- Teor de umidade da compactação e proporção de cimento: a restrição do teor de umidade no momento da compactação a um nível inferior a 75% de teor de umidade saturado pode reduzir consideravelmente o grau da rachadura por contração.
- Velocidade da secagem: se o material secar rapidamente, as tensões de contração serão maiores que o desenvolvimento da resistência do material e as rachaduras serão intensas. Por isso, é melhor optar por uma secagem lenta, e ela pode ser alcançada com uma cura adequada da camada.

2.5.1.2 Rachaduras causadas pelo trânsito

Como o próprio nome sugere, estas rachaduras são causadas por conta das tensões repetidas de tração induzidas por cargas de tráfego na camada estabilizada com cimento. Como as tensões de tração são máximas na parte inferior da camada, é nela que as rachaduras aparecem em maior quantidade e intensidade por conta da deformação máxima. (WIRTGEN GROUP, 2012).

Conforme Momm e Domingues (1995, *apud* Cunha, 2010), a camada tratada com cimento é muito sensível à sobrecargas por ser um material com propriedade de flexão

relativamente ruim, se tornando bem quebradiça. Contudo, as rachaduras podem ocorrer mesmo na ausência de sobrecarga, apenas com a repetição de cargas oriundas do trânsito, ocasionando as denominadas rachaduras por fadiga.

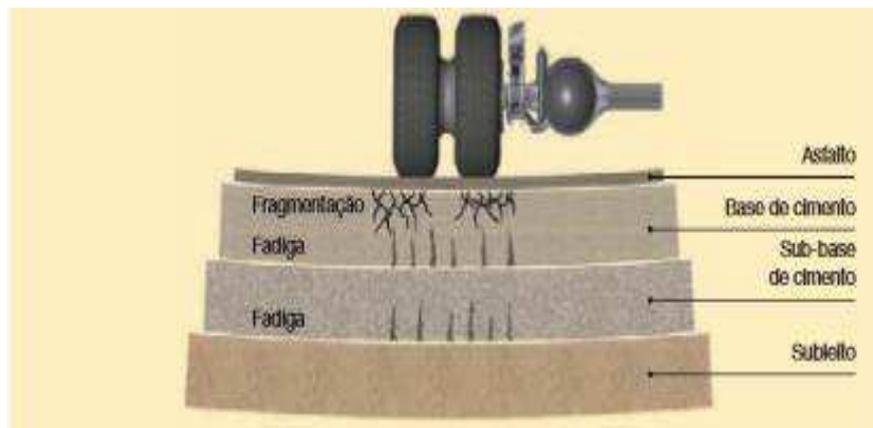
De acordo com Wirtgen Group (2012), após a rachadura, a camada ainda suporta as cargas provenientes dos veículos. Contudo, o processo de degradação piora cada vez mais até que o material atinja seu estado granular anterior à adição do cimento como agente estabilizador. O ápice da degradação ocorre quando a rachadura chega a superfície da camada, levando-se em consideração que, quando isso ocorre, a água entra na camada e acelera o processo de deterioração, podendo chegar até mesmo em outras camadas.

2.5.1.3 Fragmentação superficial

Conforme dito por Wirtgen Group (2012), este é um fenômeno que ocorre na parte superior da camada estabilizada com cimento quando as tensões oriundas do tráfego ultrapassam a resistência a compressão do material. O potencial de falha depende de basicamente três aspectos: resistência a compressão do material estabilizado com cimento, espessura e tipo da camada superficial e pressão dos pneus e carga por eixo aplicada.

O autor sugere que, para resolver tal problema, o mais adequado é que se faça um bom e eficaz controle de eixos para evitar uma sobrecarga. Além disso, deve haver um cuidado muito grande com relação ao tempo em que se irá abrir a pista ao tráfego tendo em vista que, como dito anteriormente, o cimento leva um tempo para atingir a resistência de projeto, levando cerca de 7 dias para atingir 50% de sua resistência e 28 dias para atingir cerca de 90% dela. A figura 11 ilustra os problemas de rachaduras e fragmentação superficial.

Figura 11 - Problemas relacionados à estabilização com cimento



Fonte: Wirtgen Group, 2012

2.5.1.4 Carbonatação

A carbonatação, juntamente com seus efeitos, é um fenômeno descrito da seguinte maneira pela Wirtgen Group (2012, p. 115):

A carbonatação é o nome dado à reação química complexa que ocorre entre o material cimentado e o dióxido de carbono presente na presença de água ou vapor (umidade). Em termos leigos, essa reação produz carbonato de cálcio a partir de íons livres de cálcio. [...] A alteração da estrutura molecular durante a carbonatação também está associada à mudança de volume [...]. Se as forças que emanam dessa mudança de volume ultrapassam a resistência do material tratado com cimento, a destruição ocorrerá.

Esta reação química quase nunca é motivo de preocupação na indústria de concreto, já que as tensões geradas por ela não chegam nem perto da resistência a tração do concreto e os agregados utilizados são geralmente pedras britadas com longa durabilidade. Contudo, os efeitos da carbonatação afetam muito a durabilidade em um RAP com adição de cimento, por exemplo, já que os agregados presentes nele costumam estar bem desgastados.

A durabilidade do RAP com cimento, inclusive, é medida principalmente ao serem realizados os ensaios de resistência a compressão não confinada e ensaios que indicam o potencial de efeitos da carbonatação como, por exemplo, o ensaio de resistência a tração indireta. De acordo com a Wirtgen Group (2012), os limites aceitos no primeiro ensaio mencionado vão de no mínimo 2 MPa e de no máximo 4 MPa, enquanto que no segundo ensaio o valor mínimo desejado é de 250 kPa.

2.5.2 Emulsão betuminosa como agente estabilizador

A emulsão betuminosa (ou emulsão asfáltica) tem sido o segundo agente estabilizador mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do cimento. Os diferentes tipos dela foram desenvolvidos basicamente para processos de aplicação de asfalto desenvolvidos inteiramente a frio. Este agente será mais detalhado, tendo em vista que é ele o escolhido para os ensaios realizados na presente pesquisa.

2.5.2.1 Emulsão betuminosa

Uma emulsão no geral é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis. No caso da emulsão betuminosa, os líquidos são o asfalto (em forma de pequenos glóbulos) e a água. Os diferentes tipos dela possuem coloração marrom e consistência

líquida. Após a ruptura elas passam a ter uma coloração mais voltada ao preto (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Segundo De David (2006), a emulsão betuminosa pode ser utilizada nos mais 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. Além disso, ela é muito usada também em praticamente todas as camadas existentes na estrutura de um pavimento flexível.

O uso de emulsão asfáltica em um pavimento gera ainda benefícios ecológicos e relacionados aos custos. Na grande maioria das vezes, elas podem ser aplicadas sem necessidade de aquecimento e sem necessidade ainda de secagem dos agregados, o que representa uma grande economia de energia e combustíveis. Além disso, há relativa facilidade de transporte e armazenamento dela, já que requerem instalações simples, o que evita a geração de vapores tóxicos e poluentes (ABEDA, 2010).

A simples mistura de água e dos glóbulos de asfalto não caracteriza uma emulsão asfáltica. Há a necessidade ainda da inclusão de um agente emulsificante. Este tem como objetivo favorecer a dispersão da fase asfáltica na fase aquosa e revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora (DNER, 1996).

De acordo com Senço (2007) os agentes emulsificantes podem ser do tipo não-ionizáveis, gerando emulsões eletricamente neutras, e do tipo ionizáveis, gerando 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. Normalmente, 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).

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 12 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.

Figura 12 - 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												
Mín.	% m/m	50	50	-	-	-	-	-	-	-	6569.2008	157/2011
Máx.		-	-	50	50	-	-	-	-	-		
Mistura com filler silício	%	-	-	-	-	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	6297.2012	
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

Dá-se preferência às emulsões catiônicas, dentre outros motivos, pelo fato de que elas possuem boa adesividade com a maioria dos agregados minerais, principalmente com os de cargas elétricas superficiais eletronegativas, como os arenitos e granitos, enquanto que as emulsões aniônicas possuem boa adesividade somente com os agregados de cargas elétricas superficiais eletropositivas (DNER, 1996).

Nas emulsões de ruptura rápida, a ruptura ocorre imediatamente ou pouco tempo depois do contato com os agregados, enquanto que emulsões de ruptura média o tempo de ruptura é maior, permitindo que sejam utilizadas em misturas de agregados, isentas, porém, de material fino. As emulsões de ruptura lenta, contudo, podem ser misturadas com material que possuam uma certa quantidade de finos por conta da lentidão de ocorrência deste fenômeno (ABEDA, 2010).

Com relação às técnicas de reciclagem, as emulsões de ruptura média e lenta têm sido as mais utilizadas, e isso depende principalmente da composição granulométrica do material a qual será adicionada. As emulsões de ruptura lenta possuem a desvantagem de um maior tempo de ruptura, mas elas não contêm solvente, presente na maioria das emulsões de ruptura média, que pode interferir nas propriedades de envolvimento das partículas do material fresado e no desempenho final da emulsão (SALOMON; NEWCOMB, 2000).

Existem ainda os agentes rejuvenescedores emulsionados (ARE), também conhecidos como agentes de reciclagem emulsionados, que são emulsões criadas especialmente para processos de reciclagem a frio. Estes agentes são catiônicos e possuem em sua composição um percentual de no mínimo 60% de agente rejuvenescedor. Os ARE's possuem também viscosidade SSF (25°C) de no máximo 70 segundos (ABEDA, 2010).

Existem diversos tipos de agentes rejuvenescedores emulsionados. Estes são classificados em: ARE-1, ARE-5, ARE-25, ARE-75, ARE-250 e ARE-500. A escolha do tipo de agente mais eficaz depende da consistência do asfalto envelhecido presente no material fresado, da utilização de agregados novos na mistura e de outras necessidades de projeto (ASTM D 5505, 2002 *apud*. DE DAVID, 2006).

A tabelada figura 13 mostra as especificações dos agentes rejuvenescedores emulsionados. Nota-se que, basicamente, os diferentes tipos de ARE's são classificados de acordo com a viscosidade cinemática a 60°C.

Figura 13 - Especificação brasileira para os agentes rejuvenescedores emulsionados

Características	Un.	Especificações						Métodos	
		ARE-1	ARE-5	ARE-25	ARE-75	ARE-250	ARE-500	ABNT/NBR	ASTM
Ensaio sobre a emulsão									
Viscosidade Saybolt-Furol SSF a 25°C	seg.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	14491	244
Sedimentação	% p	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.	6570	6930
Penetração, 0,84 mm	% p	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	14393	6933
Carga da partícula	-	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	6567	244
Destilado solvente	% v	nula	nula	nula	nula	nula	nula	6568	6997
Destilado resíduo	%p	60 min.	60 min.	60 min.	60 min.	60 min.	60 min.	6568	-
Ensaio sobre o resíduo									
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	50 - 175	176 - 900	901 - 4500	4501 - 12500	12501 - 37500	37501 - 60000	14756	D2171
Teor de Saturados	% p	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.	-	D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C									
Razão de Viscosidade	-	4	4	4	4	4	4	14736 ou 15235	D1754 ou D2872
Varição da Massa	% p	4 máx.	4 máx.	3 máx.	3 máx.	3 máx.	3 máx.		

Fonte: Regulamento Técnico DNC 04/97 Portaria DNC 44/97, 1997

Conforme Kandhal e Mallick (1997), é mais importante determinar as propriedades mecânicas da mistura reciclada com emulsão betuminosa antes e depois da cura do que simplesmente determinar a consistência do ligante, já que há alterações nessas propriedades com a perda de umidade. Fonseca (2002) *apud* Cunha (2010), por exemplo, afirma que há aumento de coesão da mistura quando se perde água durante a cura.

2.5.3 Efeitos dos agentes estabilizadores nas misturas recicladas a frio

Segundo Rogge *et al.* (1993) os agentes estabilizadores adicionados a uma mistura reciclada a frio estão interligados com a “teoria efetiva do asfalto”. Esta teoria é uma junção de duas subteorias.

A primeira delas afirma que o material fresado deve ser considerado como um “agregado negro” composto de agregados e asfalto envelhecido. Assim, a mistura deve ser projetada de maneira convencional.

A segunda subteoria afirma que todo asfalto envelhecido é capaz de ser recuperado. Desta maneira, as características físicas e químicas dele devem ser estudadas com o objetivo de se determinar qual o agente rejuvenescedor ou outro tipo de ligante deve ser adicionado à mistura a fim de recuperar, ao menos em parte, as condições originais do asfalto.

Desta forma, com base no que diz a teoria efetiva do asfalto, a emulsão betuminosa adicionada serve para se misturar com uma determinada porcentagem do asfalto envelhecido

amolecido formando uma porção na mistura chamada de asfalto efetivo. Conforme Rogge *et al.* (1993), a porcentagem de asfalto recuperada está diretamente ligada à rigidez do asfalto envelhecido e asfalto novo, à granulometria e à porcentagem de asfalto existente no material fresado.

O teor de asfalto efetivo é fundamental para definir o desempenho final da mistura reciclada. Uma maneira de se determinar a quantidade necessária de ligante asfáltico é através da viscosidade ou penetração. Contudo, para definir o tipo e a quantidade de agente de reciclagem, seja ele emulsão, cimento ou qualquer outro agente, devem ser realizados ensaios que fornecem as propriedades mecânicas da mistura em si, já que as reações que ocorrem entre o ligante novo e o envelhecido não são simultâneas em toda a mistura e dependem de outros fatores, como os processos de mistura, compactação, tráfego e condições climáticas (DAVID, 2006).

Como o ligante novo demora um certo tempo para se misturar efetivamente com o envelhecido, Davidson, Blais e Croteau (2004) relatam que o desempenho mecânico das misturas recicladas vai melhorando com o decorrer do tempo nos primeiros meses de serviço. O mesmo autor sugere que as condições climáticas são fundamentais para determinar a eficiência do rejuvenescimento, mas não é o único fator. Um ligante rico em solvente, com boa capacidade de se misturar ao material rico em finos, em locais quentes origina um novo ligante efetivo mais rapidamente do que um ligante com pouco solvente, pouca capacidade de se misturar ao material rico em grãos e em locais frios, por exemplo.

2.6 PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO

Os diferentes métodos de projeto de misturas asfálticas recicladas a frio possuem o objetivo de determinar a quantidade necessária de agente estabilizador e de agregados novos, caso necessário, de uma maneira que haja viabilidade econômica e que a mistura obtenha características mecânicas aceitáveis.

Para que esse objetivo seja alcançado, as misturas são estudadas em laboratório através de diversos ensaios, cada uma contendo diferentes porcentagens de ligante asfáltico. A mistura que apresentar os melhores resultados provavelmente será a escolhida para ser utilizada na prática em uma rodovia.

Como afirma De David (2006), não existe um método padrão aceito no mundo todo para as misturas asfálticas recicladas a frio. No entanto, os procedimentos são bem semelhantes em praticamente todos os métodos e alguns destes procedimentos estão presentes em todos estes

métodos, como, por exemplo, coleta de amostra representativa, ensaio de peneiramento e posterior análise granulométrica do material, determinação do teor de asfalto necessário na mistura e do teor de asfalto existente no material fresado, determinação das propriedades mecânicas do asfalto envelhecido e analisar a necessidade ou não da adição de agregados novos à mistura.

A adição de agregados novos depende de alguns fatores, sendo que o principal deles é a análise granulométrica do material fresado. Neste caso, o agregado novo é adicionado para que o material se enquadre em uma das diversas faixas granulométricas presentes nas normas em geral. Contudo, a adição de agregados também pode servir para melhorar estruturalmente a mistura reciclada e melhorar algumas de suas propriedades, como estabilidade, durabilidade e trabalhabilidade (KANDHAL; MALLICK, 1997).

2.6.1 Métodos de projeto

Como este trabalho pretende analisar a influência de emulsão betuminosa em uma mistura reciclada, será dado um enfoque nos métodos de projetos de mistura asfáltica reciclada a frio utilizando este ligante.

Existem várias metodologias diferentes que são adotadas em todo o mundo no que se refere a misturas asfálticas recicladas a frio com utilização de emulsão betuminosa. Por isso, é importante frisar que não existe uma só metodologia adequada. As misturas provenientes de todas essas metodologias devem ser avaliadas em escala real, não apenas em estudos laboratoriais, e devem apresentar resultados satisfatórios ao longo dos anos.

Kandhal e Mallick (1997) afirmam que um método muito utilizado é o Marshall modificado, sendo este método inclusive indicado pela *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA) e pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

No método em questão, as amostras são compactadas com um compactador Marshall sendo dados 50 golpes por face e ensaiadas com diferença de 0,5% de teor de emulsão entre elas. Logo após isso, elas entram em cura por um período de 6 horas à temperatura de 60°C. Depois da cura, são determinados a massa específica aparente, a estabilidade a 60°C e a fluência a 60°C de cada amostra. A amostra que possuir os resultados mais satisfatórios, principalmente pela máxima massa específica aparente, é a que definirá o teor de projeto de emulsão betuminosa.

Pinto *et al.* (1994) *apud* David (2006) sugere uma metodologia baseada em métodos utilizados na França e Argentina. Ela consiste em realizar inicialmente ensaios no material fresado para analisar características como granulometria, teor de asfalto e penetração do ligante após sua extração do material fresado. Então são adicionadas diversas proporções de emulsão convencional, tipo lenta e especiais. A dosagem da mistura é feita pelo método Marshall modificado, no qual a compactação dos corpos de prova ocorre em moldes especiais que permitem a drenagem da água da emulsão no corpo. São determinados então os parâmetros Marshall e o módulo de resiliência.

Lee, Brayton e Huston (2002) sugerem uma metodologia que consiste em utilizar o compactador giratório Superpave para o projeto da mistura reciclada. No método em questão, o teor de emulsão a ser adicionado é aquele no qual há o valor máximo de massa específica aparente. Deve ser determinado também o teor de água que será incrementada à mistura. Após isso, são moldados os corpos de prova e determina-se o efeito deletério de água na mistura. Tal método só pode ser utilizado quando o agente estabilizador for a emulsão betuminosa.

Há ainda a metodologia proposta por Liberatori, Constantino e Tucumantel (2005), que se baseia na DNER-ME 107/94. Esta norma utiliza o método Marshall para misturas betuminosas a frio com utilização de emulsão asfáltica. Neste método são realizados ensaios para se determinar a estabilidade Marshall a 40°C, estabilidade Marshall retida, ensaio de desgaste, módulo de resiliência e resistência a tração (LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S.; TUCHUMANTEL JR., 2005 *apud* DAVID, 2006).

3 METODOLOGIA, MATERIAIS E ENSAIOS

3.1 COLETA DA AMOSTRA DE RAP

O RAP utilizado nesta pesquisa é proveniente do processo de fresagem realizado no dia 07/09/2018 no pavimento da Avenida José Sarney, localizada no bairro São Cristóvão. Tal processo foi executado com uma profundidade média de 3 cm, configurando-se como uma fresagem rasa, já que não atingiu, na maioria do trecho, as camadas inferiores ao revestimento.

Além disso, levando-se em consideração a distância entre os dentes do cilindro fresador utilizado, como mostra a figura 14, conclui-se que a fresagem também pode ser classificada como fresagem padrão.

Figura 14 - Cilindro utilizado na fresagem da Avenida José Sarney



Fonte: Autor, 2018

O caminhão basculante levou cerca de 300 kg de material fresado para a Universidade Estadual do Maranhão para que fossem realizados os ensaios e análises. Em seguida, foram separadas três amostras, cada uma utilizada por diferentes pesquisas. As figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a máquina utilizada para a execução do serviço, juntamente com o caminhão basculante e o revestimento asfáltico logo após a realização da fresagem.

Figura 15 - Processo de fresagem com utilização de caminhão basculante



Fonte: Matos, 2018

Figura 16 - Aspecto visual da pista logo após a fresagem



Fonte: Matos, 2018

3.2 COLETA DA AMOSTRA DE EMULSÃO BETUMINOSA

A emulsão betuminosa utilizada nesta monografia foi coletada com uma empresa privada da cidade de Maracanaú – CE. Esta empresa forneceu uma amostra de 5

kg de emulsão de ruptura lenta do tipo RL – 1C para fins de estudos universitários. O material foi transportado em um recipiente por um caminhão de outra empresa para a cidade de São Luís – MA.

3.3 COLETA DA AMOSTRA DE MATERIAL DE ENCHIMENTO

Devido à possibilidade do não enquadramento do RAP em uma faixa granulométrica pré-determinada por norma, foi adquirida uma amostra de 5 kg de cimento no comércio local como material de enchimento. O tipo de cimento escolhido e utilizado foi o CP IV-32 RS por conta da disponibilidade regional.

3.4 COLETA DA AMOSTRA DE AGREGADOS VIRGENS

Os agregados virgens (brita 1, brita 0, pó de brita e areia) utilizados nesta monografia foram adquiridos no laboratório de solos e pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão. Vale ressaltar que, por conta da pouca quantidade disponível no laboratório, foi comprado ainda mais agregados em comércio local.

3.5 ENSAIOS REALIZADOS

3.5.1 Material fresado

3.5.1.1 Análise granulométrica por peneiramento

Neste estudo, a análise granulométrica inicial por peneiramento do material fresado seguiu os procedimentos presentes na ABNT NBR 7217, utilizando-se a série normal de peneiras.

O material foi peneirado em seu estado natural, após o destorroamento manual e após a retirada do ligante asfáltico envelhecido. Isso foi feito apenas a título de comparação, mas como o estudo se trata de uma mistura a frio, o resultado que mais interessa é a análise granulométrica do material após o destorroamento manual.

No estudo em questão, um dos principais motivos para a realização da análise granulométrica do material fresado é para avaliar qual é o tipo de emulsão que deve ser adicionada à mistura. Conforme De David (2006), normalmente a emulsão mais utilizada em

material fresado é a de ruptura lenta. A emulsão de ruptura média pode ser utilizada apenas em misturas de graduação aberta.

3.5.1.2 Análise granulométrica conforme especificação de serviço ET-DE-P00/034

Foi feita também a análise granulométrica do RAP conforme o jogo de peneiras presente na tabela 3 do item 3.6 da especificação de serviço ET-DE-P00/034 para avaliar se há ou não necessidade de se acrescentar material virgem à mistura. O material seria acrescentado a fim de enquadrá-la em uma das faixas da especificação. O RAP foi peneirado conforme o jogo de peneiras da faixa I da especificação de serviço por possuir uma boa quantidade de finos.

3.5.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles fornece o desgaste sofrido pelo agregado gráúdo quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva composta por uma certa quantidade de esferas de aço. Ele simula o desgaste que o próprio agregado sofre na sua usinagem e sob ação do tráfego. Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 035/98 e a amostra ensaiada foi separada para se encaixar na categoria C da norma. As figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, a máquina de abrasão Los Angeles e o material fresado após a realização do ensaio.

Figura 17 - Máquina de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor, 2018

Figura 18 - Agregado fresado após o ensaio de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor, 2018

3.5.1.4 Equivalente de areia

Este ensaio tem como principal objetivo verificar a pureza dos agregados, ou seja, analisar a quantidade de material deletério presente no agregado miúdo. Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 054/97.

Para controlar a pureza do agregado miúdo que se utilizará no revestimento asfáltico, a Norma DNIT 153/2010 delimita um valor mínimo para o equivalente de areia de 55%. Esse limite mínimo permite que o agregado miúdo utilizado no revestimento seja de boa qualidade, não afetando a qualidade do revestimento.

3.5.1.5 Teor de asfalto envelhecido

O teor de asfalto envelhecido existente no material fresado foi obtido no aparelho extrator de betume denominado “rotarex” mostrado na figura 19. A porcentagem de betume é calculada simplesmente pela divisão do peso do betume extraído sobre o peso da amostra total. O ensaio seguiu os procedimentos presentes na norma DNER-ME 053/94.

A importância da obtenção deste teor se dá pelo fato de observar se o material fresado possui ou não um teor de asfalto dentro dos limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2006, já que o RAP é proveniente de um CAUQ. Esta norma estabelece que a mistura de concreto asfáltico deve possuir de 4% a 9% de teor de ligante.

Figura 19 – Rotarex: aparelho para extração de betume



Fonte: Autor, 2018

3.5.1.6 Massa específica real e absorção

Estes parâmetros servem para determinar posteriormente algumas características importantes da mistura betuminosa. Por isso, foram realizados ensaios para determinação das massas específicas dos agregados graúdos (juntamente com a absorção neste caso) e miúdos que compõem o RAP.

Para o agregado graúdo, o ensaio se baseou na norma DNER-ME 195/97. Esta norma estabelece que, para a determinação da massa específica, são necessárias três massas: massa do agregado seco em estufa (M_s), massa do agregado em condição saturada de superfície seca após passar um período de aproximadamente 24 horas imerso em água (M_h) e a massa do agregado imerso em água na pesagem hidrostática (M_i), mostrada mais adiante na figura 20. A massa específica real (γ_s) e a absorção (a) são encontradas, respectivamente, com base nas fórmulas abaixo:

$$\gamma_s = \frac{M_s}{M_h - M_i} \quad (1)$$

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

A figura 20 mostra a pesagem hidrostática para obtenção da massa submersa do agregado graúdo, em que este é colocado dentro de uma cesta e imerso em um recipiente com água sem tocar no fundo previamente tarado na balança.

Figura 20 - Pesagem hidrostática do agregado graúdo



Fonte: Autor, 2018

Para a obtenção da massa específica do agregado miúdo presente no RAP, a norma DNER-ME 194/98 foi tida como base. Com isso, foi inserido em um frasco Chapman (figura 21) 200 cm³ de água e, após um período de repouso, 500 g de agregado miúdo seco previamente em estufa a 110 °C. O frasco foi agitado para evitar a formação de bolhas de ar e foi feita a leitura do nível da água atingido no gargalo (L), que indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

Figura 21 – Frasco Chapman utilizado no ensaio



Fonte: Autor, 2018

A massa específica do agregado miúdo inserido no frasco Chapman (γ) é obtida pela fórmula abaixo:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (3)$$

3.5.1.7 Índice de forma do agregado

O índice de forma é um parâmetro que permite avaliar a qualidade do agregado graúdo em relação à forma dos grãos. Em geral, os agregados cúbicos são melhores do que os lamelares para utilização na pavimentação.

O ensaio do índice de forma consiste basicamente em realizar medidas das seguintes dimensões de uma amostra de 200 grãos com a utilização de um paquímetro: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Ele está padronizado pela norma ABNT NBR 7809/2005 e pela ABNR NBR 6954/1989. O agregado é classificado conforme a tabela abaixo.

Tabela 1 - Classificação da 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: adaptado de ABNT NBR 6954/1989

3.5.2 Material adicional

Por conta da possibilidade do não enquadramento do material fresado em nenhuma das faixas granulométricas da especificação de serviço ET-DE-P00/034, faz-se necessário o uso de um material adicional para correção de sua granulometria. Neste estudo, foi utilizado cimento como material adicional. Para isso, foram necessários os ensaios de massa específica do cimento e a sua granulometria, conforme os itens a seguir.

3.5.2.1 Massa específica do cimento

Este ensaio foi realizado conforme a norma NM 23:2000, que indica a utilização do frasco volumétrico *Le Chatelier* para a determinação da massa específica do cimento e outros materiais em pó.

De início separa-se uma massa de 60 g de cimento. Em seguida, coloca-se querosene no frasco *Le Chatelier* até atingir a marca presente no seu pescoço que marca de 0,0 cm³ a 1,00 cm³. Em seguida, o cimento é inserido dentro do frasco com querosene com auxílio de um funil para não perder material no ensaio. Logo após é feita a leitura final que o material atinge.

Para calcular a massa específica do cimento (ρ), utiliza-se a fórmula 4, em que “m” é a massa de cimento inserida no frasco *Le Chatelier* e “v” é o volume deslocado por essa massa:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

3.5.2.2 Granulometria do cimento

A tabela 2 resume as exigências da especificação de serviço ET-DE-P00/034 quanto à granulometria do material de enchimento, que no caso deste estudo é o cimento Portland.

Tabela 2 - Granulometria do material de enchimento exigida pela ET-DE-P00/034

Peneira	Abertura (mm)	% mínima passante exigida
N 40	0,425	100,00%
N 80	0,15	95,00%
N 200	0,075	65,00%

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

3.5.3 Emulsão asfáltica

3.5.3.1 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio padronizado de viscosidade Saybolt-Furol para emulsão asfáltica está presente na norma DAER/RS-EL 202/01. Os métodos para este ensaio diferem um pouco do ensaio realizado em um ligante asfáltico comum, como o CAP.

A viscosidade é o principal parâmetro que define a trabalhabilidade e a consistência da emulsão. Sua determinação se dá pela quantidade de tempo, em segundos, que a emulsão leva para atingir a marca de 60 ml em um frasco padrão depois de passar pelo orifício do viscosímetro Saybolt-Furol. A figura 22 mostra o viscosímetro Saybolt-Furol, equipamento em que é realizado o ensaio.

Figura 22 - Viscosímetro Saybolt-Furol



Fonte: Autor, 2018

3.5.3.2 Sedimentação

Este ensaio está padronizado na norma ABNT NBR 6570/2016. Ele consiste em deixar uma amostra de 500 ml de emulsão em repouso numa proveta por um período de cinco dias (figura 23). Após esse período, coleta-se em béqueres uma amostra de 55 ml do topo da proveta e outra de mesma quantidade do fundo dela. Em seguida, as amostras são colocadas em estufa por duas horas a uma temperatura de $(163 \pm 3) ^\circ\text{C}$ para posterior agitação dos béqueres. Após a agitação, eles são colocados de volta na estufa por uma hora e depois são resfriados a temperatura ambiente. O resíduo é determinado pela diferença de peso entre os valores encontrados nas amostras do topo e da base.

Figura 23 - Provetas com emulsão em repouso por cinco dias



Fonte: Autor, 2018

3.5.3.3 Peneiração

Este ensaio seguiu os procedimentos descritos na norma DAER/RS-EL 207/01. Ele 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, averiguando se ela possui uma quantidade excessiva de asfalto em sua composição.

A norma em questão pede para 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. A figura 24 mostra o resíduo de asfalto presente na emulsão após o ensaio.

Figura 24 - Ensaio de resíduo por evaporação



Fonte: Autor, 2018

3.5.3.4 Resíduo por evaporação

O ensaio de resíduo por evaporação tem o objetivo de determinar a quantidade de resíduo seco contido em uma emulsão betuminosa após o aquecimento dela até a total evaporação da água, determinada por peso constante. Este ensaio é padronizado pela DAER/RS-EL 210/01.

3.5.4 Agregados virgens

Os agregados virgens são divididos da seguinte maneira: brita 1, brita 0, pó de brita e areia. Os ensaios realizados neles foram semelhantes aos realizados no material fresado.

Nas britas foram feitos ensaios de massa específica e absorção. No pó de brita e na areia foram feitos ensaios de massa específica e equivalente de areia. Em todos os agregados foram feitas análises granulométricas por peneiramento.

3.6 DOSAGEM DAS MISTURAS

3.6.1 Dosagem Marshall

A dosagem da mistura asfáltica foi feita em parte com base na dosagem Marshall. Segundo Bernucci *et al.* (2007), este método consiste na seguinte sequência:

- 1) Determinar as massas específicas reais de cada elemento que irá compor a mistura, como o ligante e os agregados;
- 2) Selecionar a faixa granulométrica a qual a mistura irá se encaixar. Normalmente, utiliza-se a tabela do item 5.2 da norma DNIT 031/2004, mas também podem ser utilizadas outras tabelas de órgãos municipais ou estaduais;
- 3) Escolher a composição da mistura, ou seja, o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura, de forma a enquadrá-la na faixa granulométrica escolhida;
- 4) Determinar as temperaturas de mistura e de compactação a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido;
- 5) Adotar diferentes teores de asfalto para a moldagem dos corpos de prova com a diferença de 0,5% entre eles. Por exemplo, se o teor escolhido foi T, adotam-se os teores de T – 1,0%, T – 0,5%, T, T + 0,5% e T + 1,0%;
- 6) Moldar os corpos de prova na temperatura adotada de mistura dos agregados e ligante e compactá-lo na temperatura de compactação adotada. A norma DNER-ME 43/95 sugere que sejam dados 50 golpes para pressão até 7 kgf/cm² e 75 golpes para pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm²;
- 7) Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova, determinar suas dimensões (média de quatro alturas medidas em direções diametralmente

opostas), massa seca (M_S) e massa submersa em água (M_{sub}). Estes são parâmetros necessários para a determinação da massa específica aparente dos corpos de prova (G_{mb}) conforme a fórmula abaixo:

$$G_{mb} = \frac{M_S}{M_S - M_{sub}} \quad (5)$$

- 8) Ajustar o percentual em massa de cada agregado a partir do teor de asfalto dos corpos de prova;
- 9) Determinar a massa específica máxima teórica (DMT) conforme fórmula abaixo, na qual %a, %Ag, %Am e %f representam, respectivamente, as porcentagens de ligante, agregado graúdo, agregado miúdo e filer da mistura asfáltica e G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f representam as massas específicas dos materiais mencionados:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (6)$$

- 10) Calcular os parâmetros volumétricos da mistura, como volume de vazios (V_v), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RVB) conforme as fórmulas abaixo:

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (7)$$

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%a}{G_a} \quad (8)$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (9)$$

$$RVB = \frac{VCB}{VAM} \quad (10)$$

- 11) Submergir completamente os corpos de prova em banho-maria a 60°C por um período de 30 a 40 minutos para submetê-los em seguida aos ensaios de estabilidade e fluência.

3.6.2 Metodologia adotada para a dosagem

No item anterior, é notório que o método de dosagem Marshall é mais adequado para misturas asfálticas a quente. Contudo, conforme Bernucci *et al* (2007), ele também pode ser utilizado para misturas a frio com algumas adaptações, como, por exemplo, o fato de não ser necessário determinar as temperaturas de mistura e compactação, já que estes processos devem ocorrer em temperatura ambiente no processo a frio.

Neste estudo, como se pretende comparar corpos de prova confeccionados com RAP e com material virgem, foram feitas dosagens diferentes. Os corpos de prova com RAP foram dosados de acordo com a granulometria exigida pela especificação de serviço ET-DE-P00/034 enquanto que os corpos com material virgem foram dosados de acordo com granulometria exigida pela norma DNIT 153/2010.

3.7 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova com RAP e com material virgem foram todos moldados e ensaiados conforme a norma DNER-ME 107/94, visto que ambos possuem emulsão asfáltica como ligante. Foram escolhidos cinco diferentes teores de emulsão para os ensaios, sendo que para cada teor foram confeccionados três corpos de prova.

Conforme já mencionado anteriormente, foi acrescentado cimento à mistura com RAP para o devido enquadramento granulométrico. Isso também foi feito com os corpos de prova com material virgem pelo mesmo motivo.

A ideia inicial era utilizar os mesmos teores de emulsão nos corpos de prova com RAP e com material virgem a fim de compará-los. As pesquisas em geral com RAP sugerem teores de ligante entre 0,5% e 4,5%, por conta de já haver o ligante envelhecido do material fresado. Porém, foi observado que estes teores baixos com material virgem não oferecem coesão aos corpos de prova, como mostra a figura 25. A própria norma DNIT 153/2010 exige que a mistura com emulsão betuminosa tenha entre 4,0% e 6,0% de teor de ligante.

Assim, os teores de emulsão utilizados foram determinados e se encontram na tabela 3, sendo que a comparação foi feita entre os teores relativos. Por exemplo, o teor mínimo de 2,0% no RAP foi comparado com o teor mínimo de 4,0% no agregado virgem.

Tabela 3 - características dos corpos de prova moldados

Agregados utilizados	Teor de emulsão	Teor de cimento	Número de corpos de prova
Agregados virgens	4,00%	2,00%	3
Agregados virgens	4,50%	2,00%	3
Agregados virgens	5,00%	2,00%	3
Agregados virgens	5,50%	2,00%	3
Agregados virgens	6,00%	2,00%	3
RAP	2,00%	2,00%	3
RAP	2,50%	2,00%	3
RAP	3,00%	2,00%	3
RAP	3,50%	2,00%	3
RAP	4,00%	2,00%	3

Fonte: Autor, 2018

Figura 25 - Corpos de prova de baixo teor de ligante com pouca coesão



Fonte: Autor, 2018

3.7.1 Moldagem dos corpos de prova com RAP

3.7.1.1 Secagem do material fresado

O material fresado utilizado para a moldagem dos corpos de prova foi seco em estufa a 110 °C até constância de peso. Isso deve ser feito para que a água presente no material não se adicione à água de molhagem posteriormente adicionada e o corpo de prova fique com um teor de umidade muito alto.

3.7.1.2 Pesagem dos materiais pétreos

O RAP é composto por agregados das mais variadas dimensões. Por isso, a fim de evitar que se utilize apenas uma parte deste material, foi feita a separação e posterior pesagem dos agregados de acordo com suas dimensões. O peso de cada um a ser utilizado na mistura foi previamente determinado na dosagem Marshall para enquadrar a mistura na faixa II da especificação de serviço ET-DE-P00/034. A figura 26 mostra os materiais pétreos previamente pesados e separados em uma bandeja para posterior mistura e compactação de um dos corpos de prova.

Figura 26 - Composição de um dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2018

3.7.1.3 Adição de água

Conforme a norma DNER-ME 107/94 sugere, na maioria das vezes é necessário acrescentar uma certa quantidade de água à mistura para umedecer os agregados, facilitar o recobrimento da emulsão nos mesmos e para a ruptura da emulsão não ocorrer em um tempo indevido, já que adicionar a água no agregado seco pode acelerar o processo de ruptura de maneira exarcebada. Por conta disto, foram moldados corpos de prova com diferentes teores de umidade para poder achar o teor ideal de água a ser adicionada à mistura.

Os teores de água para misturas asfálticas recicladas a frio devem variar entre 2,0% e 4,5% e o teor ótimo deve ser obtido através da análise dos gráficos de volume de vazios e da

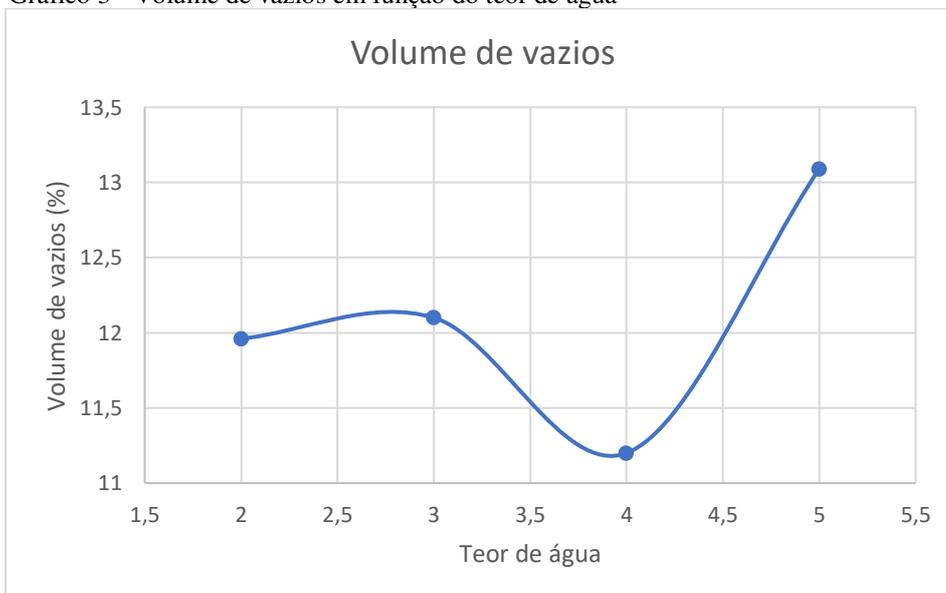
massa específica aparente (LEE; BRAYTON; HUSTON, 2002). Por isso, os teores de água adicionados foram os seguintes: 2,0%, 3,0%, 4,0% e 5,0%. Foram determinados então o volume de vazios e a massa específica aparente dos corpos de prova correspondentes a cada um dos teores ensaiados.

Gráfico 2 - Massa específica aparente em função do teor de água



Fonte: Autor, 2018

Gráfico 3 - Volume de vazios em função do teor de água



Fonte: Autor, 2018

Analisando os gráficos acima e com base ainda em observações visuais do comportamento das misturas submetidas a diferentes teores de água, é possível concluir que os corpos de prova obtêm melhores resultados se utilizados com um teor de água de aproximadamente 3,8%, teor este que será utilizado na moldagem dos demais corpos de prova.

3.7.1.4 Adição de emulsão asfáltica

A emulsão é o último componente adicionado à mistura betuminosa. Conforme exigido pela norma DNER 107/94, foi feito uma cratera na mistura para adição da emulsão, que foi misturada rapidamente até a completa cobertura dos agregados.

A mistura, antes de ser compactada, foi curada à temperatura ambiente por uma hora, visto que a emulsão adicionada é de ruptura lenta.

3.7.1.5 Compactação dos corpos de prova

A mistura foi adicionada ao molde de uma só vez. Foram dados 15 golpes de espátula ao redor do molde e dez golpes no centro de massa. Os corpos de prova foram compactados com ajuda de um compactador automático (figura 27). Foi escolhida a opção de golpear ambas as faces do corpo de prova por 75 vezes.

Figura 27 - Compactador automático dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2018

3.7.1.6 Massa específica aparente e volume de vazios

Os corpos de prova foram retirados do compactador automático e direcionados a uma estufa a 60 °C por 24 horas. Depois disso, foram retirados, resfriados a temperatura ambiente por duas horas, desmoldados e medidos com auxílio de um paquímetro.

Estes procedimentos precedem a realização da determinação da massa específica aparente do corpo de prova. O ensaio para determiná-la foi executado conforme a norma DNER-ME 117/94.

A massa específica aparente é um dos parâmetros para o cálculo do volume de vazios do corpo de prova. Foram feitos os cálculos baseados nas fórmulas (5) e (7) presentes no item 3.3.1 deste trabalho.

3.7.1.7 Estabilidade e fluência

Os corpos de prova foram colocados por 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 os 30 segundos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), estabilidade é a carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura e fluência é o deslocamento na vertical apresentado pelo corpo correspondente à aplicação da carga máxima.

Os corpos de prova foram então levados ao molde de compressão da prensa e foi realizado o ensaio Marshall. A norma pede que o êmbolo da prensa se eleve a uma velocidade de 50 mm por minuto até que o corpo se rompa. A própria máquina fornece os valores da estabilidade, em kgf, e da fluência, em mm⁻².

Para encontrar o valor real da estabilidade, a leitura efetuada 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 seguinte expressão:

$$f = 927,23 h^{-1,64} \quad (11)$$

Como a norma DNER 107/94 e a especificação de serviço não possuem limites inferiores e superiores para os valores de estabilidade e fluência do corpo de prova com RAP, os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os obtidos em trabalhos semelhantes.

3.7.2 Moldagem dos corpos de prova com agregados virgens

A moldagem dos corpos de prova com agregados virgens seguiu os mesmos procedimentos da moldagem realizada com o material fresado. Uma das principais diferenças se dá no enquadramento da mistura que, como já explicitado, segue a especificação de serviço ET-DE-P00/034 no caso do material fresado e a norma DNIT 153/2010 no caso dos agregados virgens.

Outra diferença tem a ver com o teor de emulsão adicionado ao corpo de prova. Caso os mesmos teores utilizados com o RAP fossem utilizados também com os agregados virgens, como já dito, os corpos de prova praticamente não teriam coesão.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão explanados os resultados dos ensaios no material fresado, no material adicional, nos agregados virgens e nos corpos de prova com diferentes teores de emulsão. Serão feitas análises a respeito de cada um e comparações quanto a trabalhos semelhantes e quanto às normas seguidas. Os resultados da maioria dos ensaios serão mostrados principalmente por meio de gráficos e tabelas.

A figura 28 ilustra os corpos de prova confeccionados com agregados virgens e diferentes teores de emulsão betuminosa. Nota-se que eles possuem um aspecto visual diferente dos corpos de prova convencionais feitos com CAP como ligante, como uma coloração marrom e alturas um pouco maiores.

Figura 28 - Corpos de prova com agregado virgem



Fonte: Autor, 2018

4.1 MATERIAL FRESADO

4.1.1 Análise granulométrica

Tabela 4 - Análise granulométrica do RAP natural

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante			
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	96,45%	95,98%	92,82%	95,08%
3/4"	19	91,38%	86,42%	82,18%	86,66%
1/2"	12,5	83,13%	76,18%	70,13%	76,48%
3/8"	9,5	76,69%	71,41%	62,82%	70,31%
1/4"	6,3	59,44%	59,82%	50,17%	56,48%
N4	4,75	52,88%	51,85%	43,12%	49,28%
N8	2,36	35,18%	35,11%	27,00%	32,43%
N10	2	30,61%	32,84%	24,00%	29,15%
N16	1,18	23,34%	20,76%	18,47%	20,85%
N30	0,6	9,27%	12,96%	11,54%	11,26%
N40	0,425	2,39%	2,75%	6,98%	4,04%
N50	0,3	1,89%	2,16%	3,84%	2,63%
N100	0,15	0,82%	0,87%	0,13%	0,61%
N200	0,075	0,57%	0,67%	0,03%	0,42%

Fonte: Autor, 2018

Tabela 5 - Análise granulométrica do RAP destorroado manualmente

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante			
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	98,10%	98,91%	99,14%	98,72%
1/2"	12,5	91,03%	93,57%	93,54%	92,71%
3/8"	9,5	87,08%	88,06%	87,92%	87,69%
1/4"	6,3	74,55%	75,18%	75,93%	75,22%
N4	4,75	64,83%	66,10%	66,87%	65,93%
N8	2,36	41,55%	45,03%	43,82%	43,46%
N10	2	37,61%	39,93%	38,71%	38,75%
N16	1,18	26,85%	26,53%	26,12%	26,50%
N30	0,6	15,19%	15,38%	13,49%	14,69%
N40	0,425	8,65%	8,88%	7,23%	8,25%
N50	0,3	4,76%	5,00%	3,73%	4,50%
N100	0,15	1,34%	1,40%	0,81%	1,18%
N200	0,075	0,22%	0,25%	0,04%	0,17%

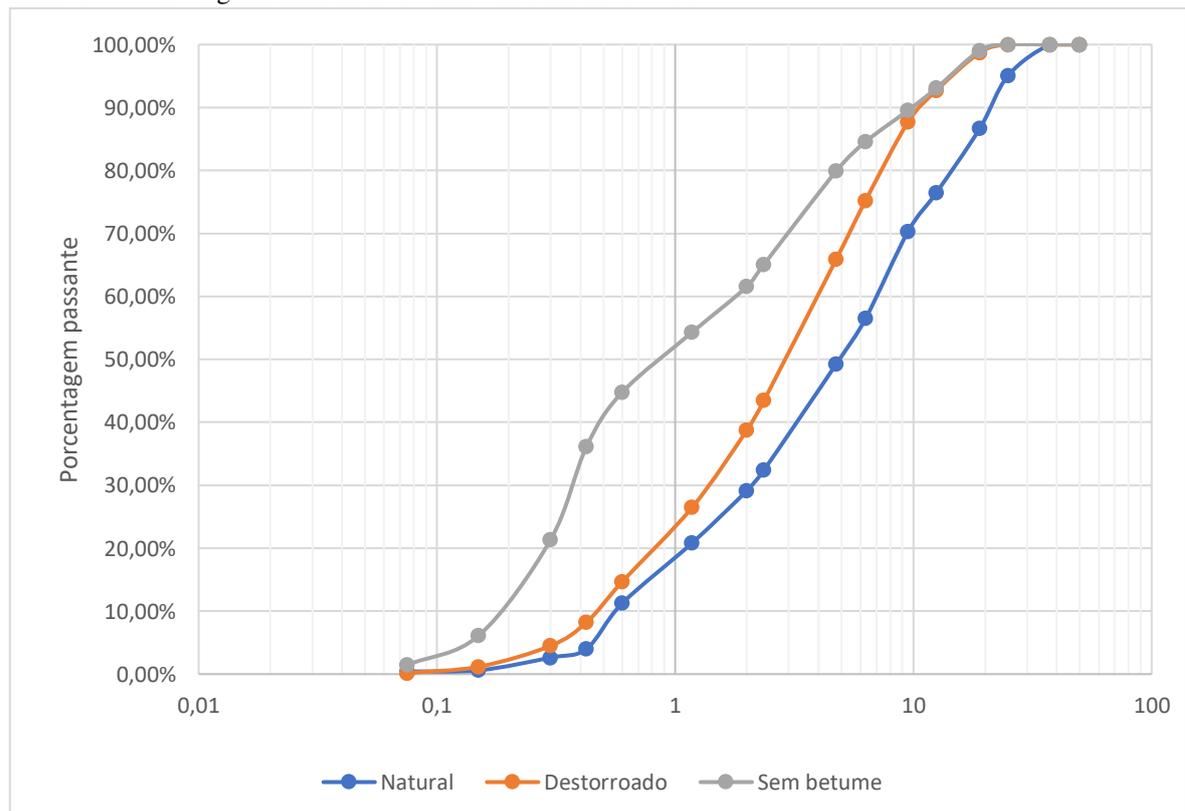
Fonte: Autor, 2018

Tabela 6 - Análise granulométrica do RAP sem betume

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante			
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	99,21%	97,71%	99,04%	99,04%
1/2"	12,5	92,07%	93,08%	93,44%	93,08%
3/8"	9,5	89,48%	89,91%	89,54%	89,54%
1/4"	6,3	85,99%	84,24%	84,56%	84,56%
N4	4,75	80,01%	78,42%	79,92%	79,92%
N8	2,36	64,48%	65,09%	66,01%	65,09%
N10	2	61,54%	61,62%	61,55%	61,55%
N16	1,18	53,89%	54,31%	54,38%	54,31%
N30	0,6	44,77%	44,83%	44,48%	44,77%
N40	0,425	36,04%	36,17%	36,54%	36,17%
N50	0,3	21,33%	21,65%	20,97%	21,33%
N100	0,15	5,84%	6,14%	6,31%	6,14%
N200	0,075	1,81%	1,45%	1,46%	1,46%

Fonte: Autor, 2018

Gráfico 4 - Curvas granulométricas do RAP em diferentes estados



Fonte: Autor, 2018

4.1.2 Análise granulométrica conforme especificação de serviço ET-DE-P00/034

Tabela 7 - análise granulométrica conforme jogo de peneiras da DNIT 031/2004: RAP destorroado

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante				Porcentagem exigida da faixa I
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	
1 1/4"	31	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100
1"	25	96,64%	98,47%	96,98%	97,36%	90-100
3/4"	19	87,97%	92,98%	90,19%	90,38%	80-100
1/2"	12,5	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	60,61%	65,29%	61,68%	62,53%	45-80
N4	6,3	51,95%	53,84%	53,90%	53,23%	28-60
N10	4,75	33,03%	34,26%	33,45%	33,58%	20-45
N40	2	11,15%	12,55%	12,60%	12,10%	10-32
N80	0,425	3,08%	2,96%	3,01%	3,02%	8-20
N200	0,075	1,18%	0,34%	0,98%	0,83%	3-8

Fonte: Autor, 2018

Com base na tabela 7, constatou-se que o material fresado possui uma certa deficiência de material fino, principalmente no material passante nas peneiras de número 80 e 200. Assim, como já mencionado, para suprir esta ausência a fim de enquadrar a mistura de maneira adequada na faixa I da especificação de serviço, optou-se por acrescentar a ela um teor de 2% de cimento Portland.

4.1.3 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles no material fresado foi realizado três vezes e o resultado médio da abrasão foi de 33%. A especificação de serviço ET-DE-P00/034 prevê que, para fins de utilização do material fresado em uma mistura betuminosa, sua abrasão máxima deve ser de 50% e a norma DNIT 153/2010 exige um valor máximo de 40% para o uso do agregado em misturas a frio, o que mostra que o material fresado utilizado neste estudo está dentro das especificações.

4.1.4 Equivalente de areia

O resultado médio do equivalente de areia realizado no material fresado foi de 92%, encontrando-se assim dentro do limite da especificação de serviço ET-DE-P00/034 e da norma DNIT 153/2010. Ambas exigem um valor mínimo de 55% para o ensaio de equivalente de areia. O agregado miúdo presente no RAP encontra-se, portanto, dentro das especificações.

4.1.5 Teor de asfalto envelhecido

O ensaio foi realizado três vezes e forneceu os resultados de 5,0%, 5,3%, e 4,9%. Com isso, estes resultados fornecem a média de aproximadamente **5,1%** de teor de ligante, valor que se configura 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.

4.1.6 Massa específica real e absorção

Os ensaios foram realizados em três amostras para obtenção de resultados mais confiáveis e forneceram os seguintes valores abaixo de cada parâmetro:

Tabela 8 - Resultados dos parâmetros em três amostras

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
M_s (g)	754,7	729,3	871,8
M_h (g)	765,6	742,0	862,0
M_i (g)	481,5	453,3	524,4

Fonte: Autor, 2018

Com isso, as massas específicas obtidas foram as seguintes: 2,656 g/cm³, 2,570 g/cm³ e 2,582 g/cm³. Assim, a média destes valores nos fornecem a massa específica do agregado graúdo do RAP de **2,603 g/cm³**.

Por sua vez, tabela 8 permite obter os seguintes valores de absorção: 1,44%, 1,74% e 1,50%. Assim, a média destes valores fornecem a absorção do agregado graúdo do RAP de **1,56%**.

Com relação à massa específica do agregado miúdo do material fresado, mais uma vez três ensaios foram realizados e foram obtidos os seguintes resultados da tabela abaixo:

Tabela 9 - Resultados para massa específica do agregado miúdo do RAP

	Leitura realizada no frasco Chapman (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Amostra 01	425	2,222
Amostra 02	427	2,203
Amostra 03	424	2,232

Fonte: Autor, 2018

Assim, os resultados acima fornecem uma massa específica média do agregado miúdo do RAP de **2,219 g/cm³**.

4.1.7 Índice de forma

A média das relações b/a e c/a foram, respectivamente, 0,77 e 0,46. Assim, o agregado fresado pode ser classificado como **alongado** conforme a classificação da ABNT NBR 6954/1989.

4.2 MATERIAL ADICIONAL

4.2.1 Massa específica do cimento

A massa de cimento ensaiada foi de 60,03 g. A leitura inicial do frasco *Le Chatelier* foi de 0,3 cm³ e a leitura final do frasco atingiu a marca de 21,5 cm³. Assim, com a massa de 60,03 g e o volume de 21,2 cm³ (diferença entre as leituras final e inicial no frasco), com base na fórmula (4), temos que a massa específica do cimento é igual a **2,831 g/cm³**.

4.2.2 Granulometria do cimento

Tabela 10 - Granulometria do cimento Portland

Peneira	Abertura (mm)	%passante
N 40	0,425	100,00%
N 80	0,15	100,00%
N 200	0,075	92,45%

Fonte: Adaptado de ET-DE-P00/034, 2006

Analisando a porcentagem passante nas peneiras de acordo com a tabela acima e comparando com porcentagem exigida pela ET-DE-P00/034, o cimento adicionado é adequado para uso nas misturas.

4.3 EMULSÃO BETUMINOSA

4.3.1 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio foi realizado com a emulsão em uma temperatura de 25 °C e apresentou uma média de **64,9 sSF**. A norma DNIT 165/2013 apresenta limite máximo de viscosidade para emulsões de ruptura lenta apenas no ensaio com esta temperatura e mostra que o valor não deve ultrapassar 90 sSF.

4.3.2 Sedimentação

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos no ensaio de sedimentação da emulsão betuminosa utilizada.

Tabela 11 - Ensaio de sedimentação da emulsão

	Amostra 01	Amostra 02
Peso do topo da proveta (g)	39,6	38,8
Peso da base da proveta (g)	37,5	36,8
Sedimentação	3,82%	3,64%

Fonte: Autor, 2018

Com os resultados obtidos acima, o valor médio da sedimentação é de **3,73%**. A norma ABNT NBR 6570/2016 exige que o resultado não ultrapasse o valor de 5%, o que pôde ser visto no ensaio realizado com a emulsão em questão.

4.3.3 Peneiração

Os procedimentos exigidos pela norma DAER/RS-EL 207/01 foram realizados obtendo-se os seguintes resultados:

- Peso da amostra: 1000,1 g;
- Peso do conjunto peneira e fundo: 699,1 g;
- Peso do conjunto peneira, fundo e resíduo: 699,5 g.

A porcentagem de resíduo é encontrada pelo do peso do conjunto “peneira, fundo e resíduo” menos o peso do conjunto “peneira e fundo” dividido pelo peso da amostra. Assim, encontrou-se uma porcentagem de resíduo de **0,05%**, valor abaixo do limite máximo de 0,1% da norma.

4.3.4 Resíduo por evaporação

Os procedimentos exigidos pela norma DAER/RS-EL 210/01 foram realizados obtendo-se os seguintes resultados:

- Peso do recipiente e bastão: 44,7 g;
- Peso do recipiente, bastão e amostra: 94,7 g;
- Peso do recipiente, bastão e resíduo: 77,1 g.

A porcentagem de resíduo é encontrada pela fórmula abaixo, retirada da DAER/RS-EL 210/01.

$$\% \text{ Resíduo} = \frac{P_{\text{recipiente+bastão+resíduo}} - P_{\text{recipiente+bastão}}}{P_{\text{recipiente+bastão+amostra}} - P_{\text{recipiente+bastão}}} \quad (12)$$

Assim, com base nos dados do ensaio, a porcentagem de resíduo seco obtida foi de **64,8%**, valor acima do limite mínimo da norma de 60%.

4.4 AGREGADOS VIRGENS

As tabelas 12 e 13 apresentam os resultados dos ensaios realizados nos agregados virgens.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios nos agregados virgens

	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)	Equivalente de areia (%)
Brita 1	2,786	0,91	-
Brita 0	2,774	1,29	-
Pó de brita	2,793	-	69,5
Areia	2,674	-	62,8

Fonte: Autor, 2018

Tabela 13 - Análise granulométrica por peneiramento dos agregados virgens

Peneira	Abertura peneira (mm)	Porcentagem passante			
		Brita 1	Brita 0	Pó de Brita	Areia
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,1	89,16%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7	-	-	-	-
3/8"	9,5	9,39%	69,80%	97,93%	100,00%
4	4,8	1,02%	0,72%	93,83%	99,71%
10	2	0,52%	0,39%	60,94%	98,35%
200	0,075	0,26%	0,34%	5,55%	2,47%

Fonte: Autor, 2018

4.5 MISTURAS ASFÁLTICAS

4.5.1 Misturas com agregado fresado

4.5.1.1 Traço das misturas

A tabela 14 apresenta o traço das misturas com material fresado.

Tabela 14 - Traços das misturas com RAP

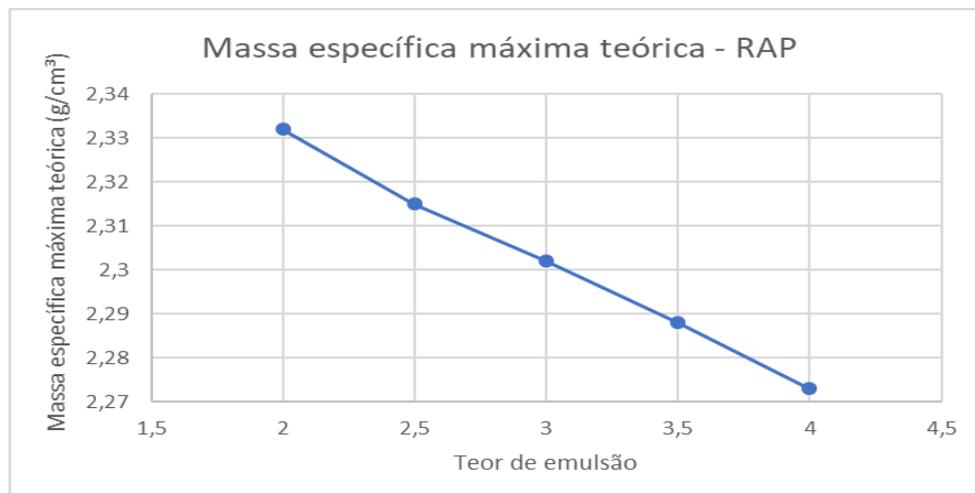
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Brita 2	9,3%	9,1%	9,1%	9,1%	9,0%
Brita 1	26,8%	26,5%	26,6%	26,5%	26,4%
Brita 0	9,8%	9,6%	9,6%	9,5%	9,5%
Pó de brita	18,4%	18,6%	18,2%	18,1%	17,9%
Areia	31,8%	31,7%	31,5%	31,3%	31,1%
Cimento	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Emulsão	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,5%

Fonte: Autor, 2018

4.5.1.2 Massa específica máxima teórica

A massa específica máxima teórica (DMT) depende das porcentagens de agregados graúdos, miúdos, fíler e ligante na mistura, bem como das massas específicas dos componentes citados, e é calculada conforme a fórmula (6) encontrada no item 3.3.1. Como foram feitas misturas com diferentes teores de ligantes, cada teor possui uma massa específica máxima teórica diferente. Ela tende a diminuir com o acréscimo do teor de ligante, visto que isso diminui as porcentagens dos componentes de maior massa específica, como os agregados graúdo e miúdo. O gráfico abaixo mostra os resultados.

Gráfico 5 - Massa específica máxima teórica das misturas com RAP



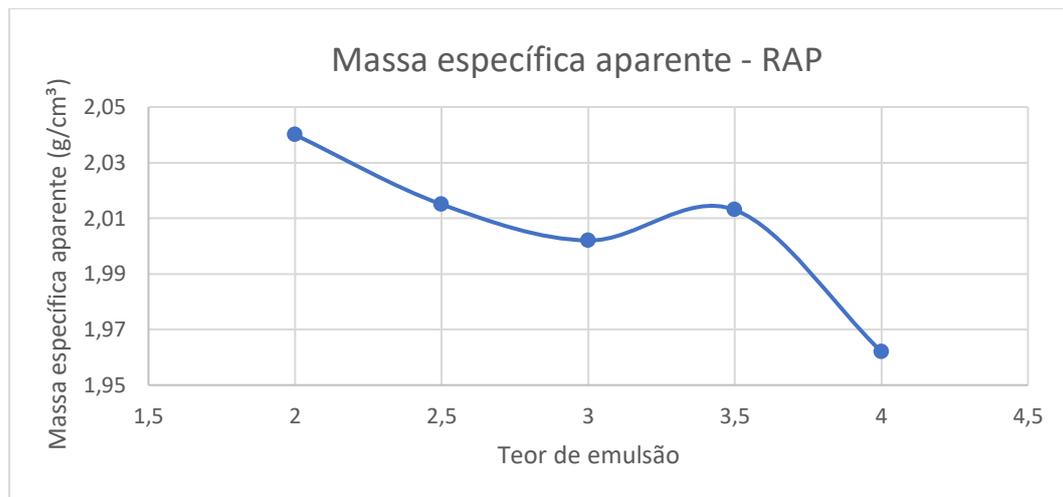
Fonte: Autor, 2018

4.5.1.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente de cada corpo de prova foi determinada de acordo com a norma DNER-ME 117/94. Como o volume de vazios dos corpos de prova são maiores do que 10%, o procedimento foi realizado com a utilização de parafina e fita adesiva, assim como manda a norma em questão.

Em geral, foi observado um decréscimo na massa específica aparente com o aumento do teor de emulsão adicionado à mistura, exceto na faixa entre 3,0 e 3,5%, como pode ser observado no gráfico 6.

Gráfico 6 - Massa específica aparente das misturas com RAP

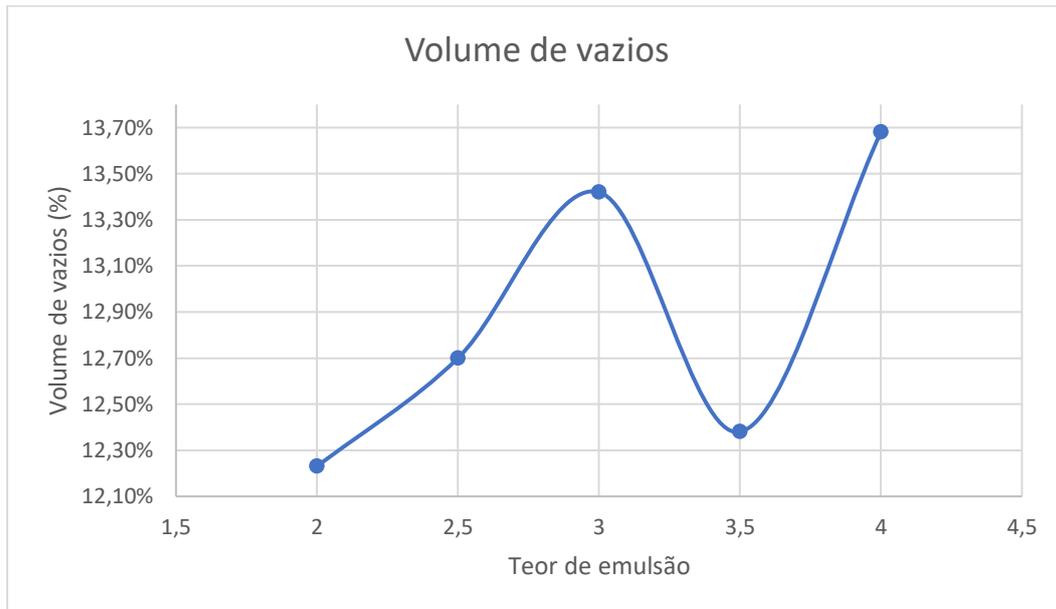


Fonte: Autor, 2018

4.5.1.4 Volume de vazios

O volume de vazios é determinado em função da massa específica aparente e da massa específica máxima teórica e é calculado utilizando a fórmula (7). O gráfico a seguir apresenta os resultados obtidos.

Gráfico 7 - Volume de vazios das misturas com RAP



Fonte: Autor, 2018

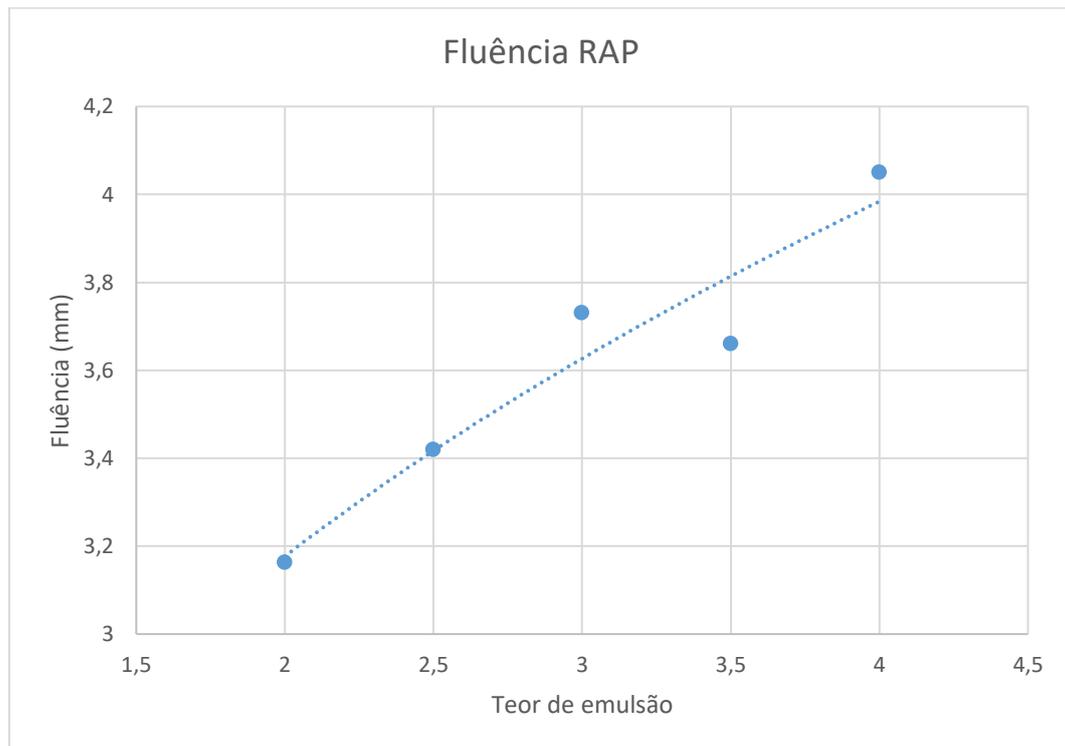
Conforme visto no gráfico do volume de vazios, a mistura com agregado fresado e emulsão betuminosa apresenta um comportamento diferente das misturas convencionais, visto que ela tende a possuir mais vazios na medida em que se aumenta o teor de ligante. Silva (2011) e David (2006) obtiveram resultados semelhantes quanto ao comportamento das misturas ensaiadas com RAP e emulsão de ruptura lenta.

A especificação de serviço ET-DE-P00/034 estabelece um valor máximo de 18% de volume de vazios. Portanto, os valores encontrados estão dentro das especificações.

4.5.1.5 Fluência

Seguindo as orientações da norma DNER 107/94, conforme dito, os corpos de prova foram colocados em uma estufa por duas horas a 40 °C antes de realizar o ensaio na prensa automática. Os resultados se encontram no gráfico abaixo.

Gráfico 8 - Fluência das misturas com RAP



Fonte: Autor, 2018

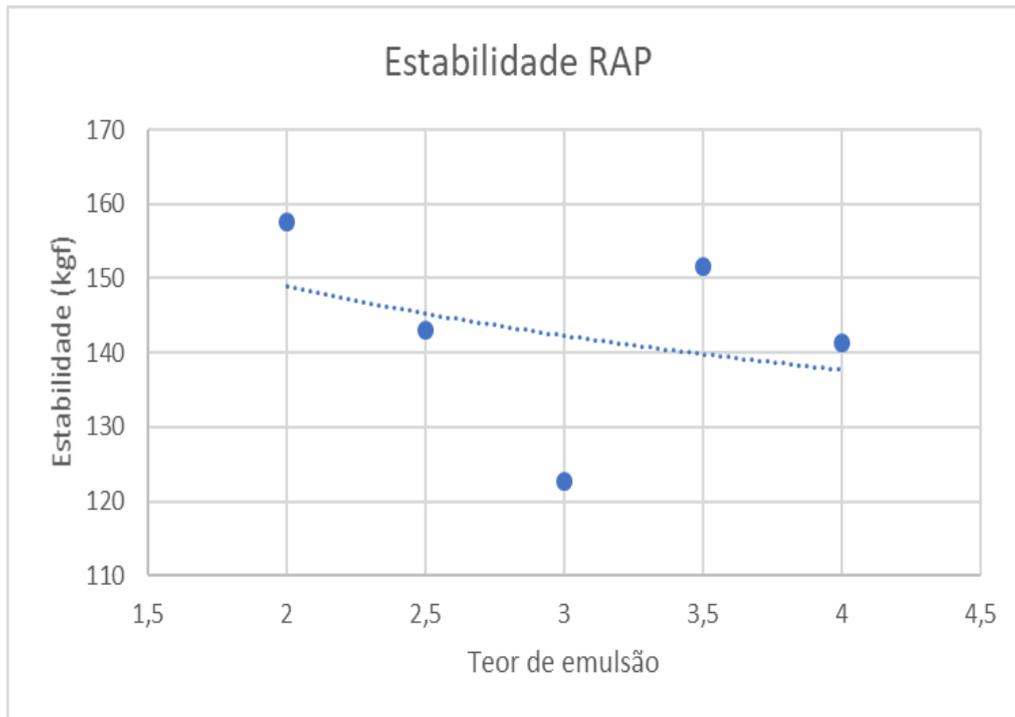
Os valores de fluência se encontram um pouco acima em comparação com os obtidos em outros trabalhos. David (2006), por exemplo, obteve valores entre 2,5 mm e 3,0 mm.

A especificação de serviço ET-DE-P00/034 não possui limites quanto à fluência. Assim, os valores obtidos foram comparados com a norma DNIT 153/2010, que exige que os valores estejam entre 2,0 mm e 4,5 mm. Com isso, os resultados de fluência nas misturas com RAP se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma.

4.5.1.6 Estabilidade

O gráfico abaixo mostra os valores médios de estabilidade Marshall obtidos após o rompimento dos corpos de prova de diferentes teores de ligante.

Gráfico 9 - Estabilidade x teor de emulsão nas misturas com RAP



Fonte: Autor, 2018

Mais uma vez é notório o comportamento diferente da mistura com RAP e emulsão em relação às misturas convencionais. Normalmente, a estabilidade tende a crescer com o aumento do teor de ligante, mas, neste caso, ocorre o inverso. Silva (2011) e David (2006) também apresentaram comportamento semelhante.

Neste estudo, os valores encontrados para estabilidade foram baixos em comparação com a especificação de serviço ET-DE-P00/034. Esta especificação exige um valor mínimo de 500 kgf para corpos de prova compactados com 75 golpes.

Em relação a outros trabalhos semelhantes, David (2006) obteve resultados entre 600 kgf e 900 kgf para teores de ligante entre 0,5% e 4,0%, enquanto Silva (2011) obteve valores entre 275 kgf e 315 kgf para teores de ligante entre 2,5% e 4,0%.

4.5.2 Misturas com agregado virgem

Os ensaios realizados nas misturas com agregado virgem são iguais aos realizados nas misturas com agregado fresado. Todos os parâmetros a seguir foram obtidos de forma semelhante.

4.5.2.1 Traço das misturas

A tabela 15 apresenta o traço das misturas com agregados virgens.

Tabela 15 - Traço das misturas com agregados virgens

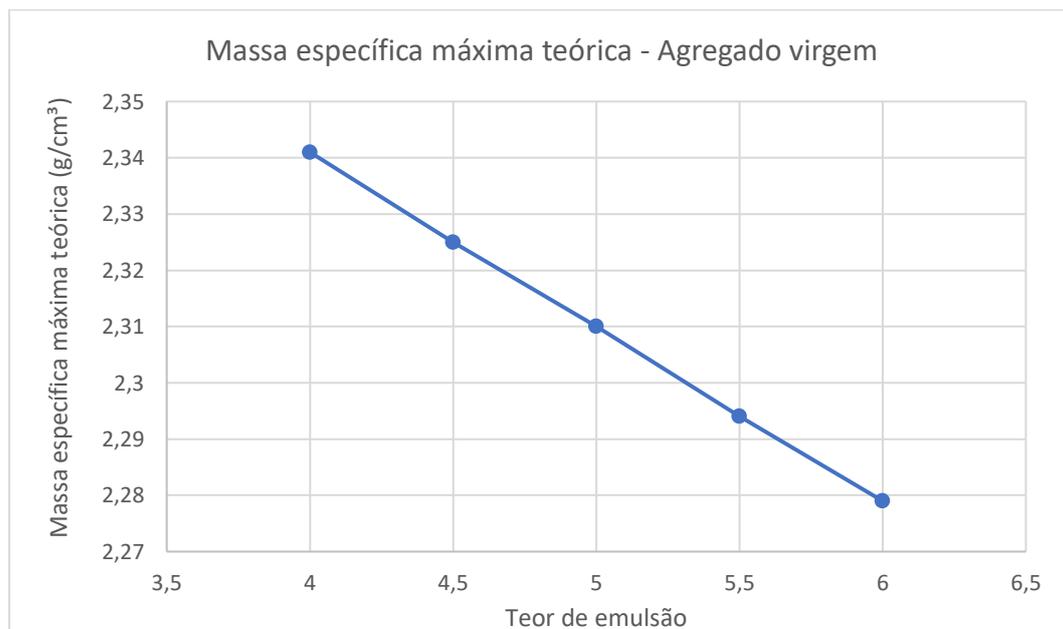
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Brita 1	31,7%	31,5%	31,4%	31,2%	31,0%
Brita 0	32,6%	32,5%	32,3%	32,1%	32,0%
Pó de brita	20,2%	20,1%	20,0%	19,8%	19,7%
Areia	9,6%	9,6%	9,5%	9,5%	9,4%
Cimento	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Emulsão	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%

Fonte: Autor, 2018

4.5.2.2 Massa específica máxima teórica

Por sua vez, os resultados das massas específicas máximas teóricas dos corpos de prova com agregados virgens podem ser vistos no gráfico 10.

Gráfico 10 - Massa específica máxima teórica das misturas com agregado virgem

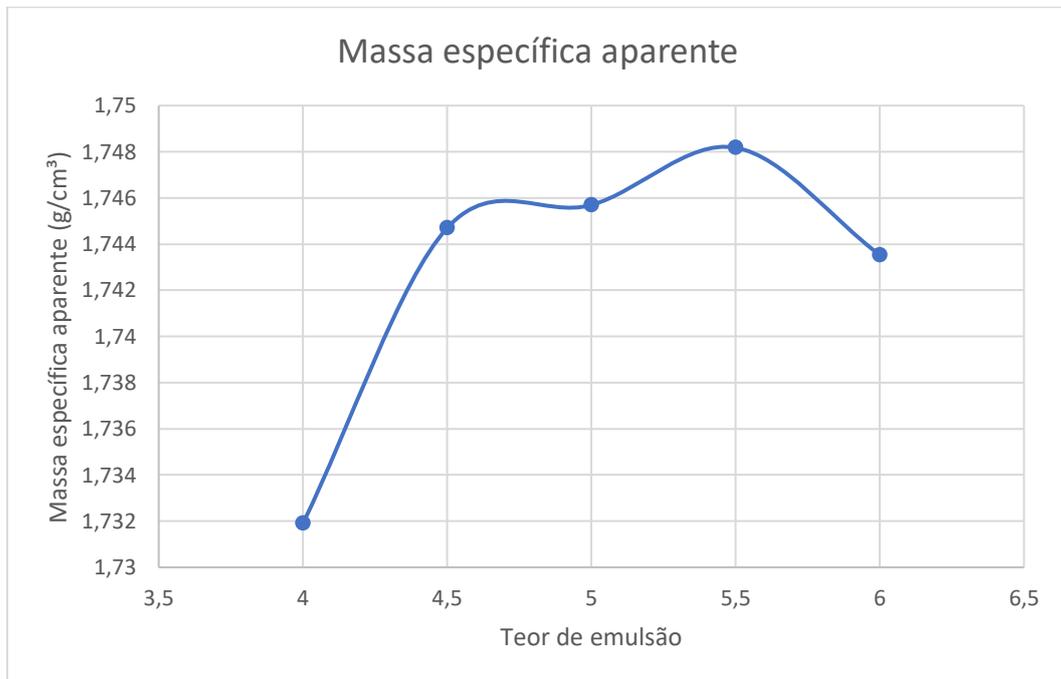


Fonte: Autor, 2018

4.5.2.3 Massa específica aparente

O gráfico 11 apresenta as massas específicas aparentes dos corpos de prova com agregados virgens.

Gráfico 11 - Massa específica aparente das misturas com agregado virgem



Fonte: Autor, 2018

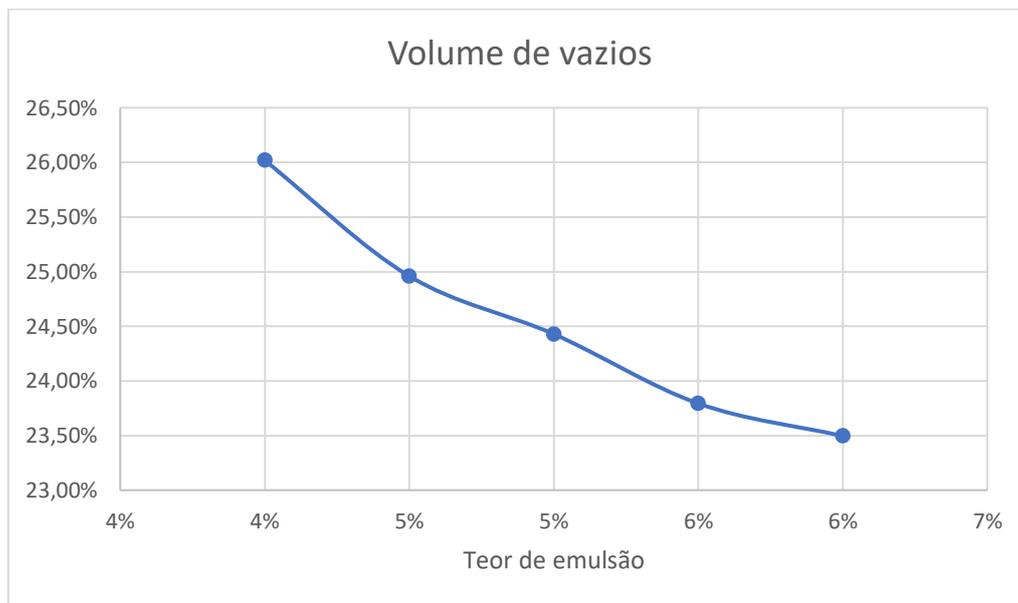
Com relação à massa específica aparente, as misturas com agregado virgem obtiveram valores bem menores em comparação com as misturas com agregado fresado. Isto era esperado, já que as misturas com agregado virgem possuem bem menos material fino em comparação com as misturas com material fresado para atender as exigências de granulometria da norma DNIT 153/2010.

Outro fato observado foi que a massa específica aumentou na medida em que o teor de ligante foi acrescido, o que normalmente acontece em misturas convencionais, mas não acontece nas misturas com RAP, como exposto.

4.5.2.4 Volume de vazios

O gráfico 12 mostra os resultados de volume de vazios nas misturas com agregados virgens.

Gráfico 12 - Volume de vazios das misturas com agregado virgem



Fonte: Autor, 2018

As misturas com agregado virgem apresentaram novamente um comportamento inverso em relação às com agregado fresado. Podemos observar que o volume de vazios diminui com o acréscimo do teor de emulsão, fato que costuma ocorrer em misturas convencionais a quente e a frio.

Observa-se também que o volume de vazios é bem maior em comparação com as misturas com RAP, com valores variando entre 23,5% e 26,0%. Isso ocorre também pelo fato de estas misturas possuírem bem menos material fino.

A norma DNIT 153/2010 estabelece um intervalo aceitável de volume de vazios entre 5,0% e 30,0% para misturas a frio. Desta maneira, as misturas com agregado virgem se encontram dentro das especificações da norma.

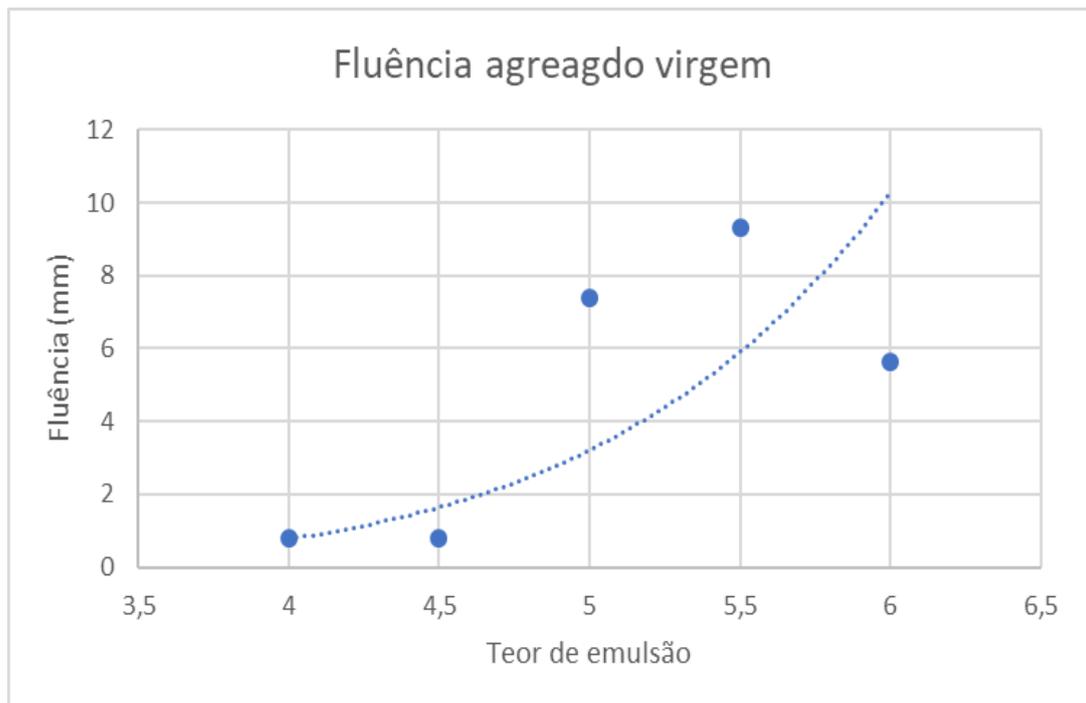
É importante ainda considerar que, como David (2006) sugere, para um pavimento com elevado volume de vazios, como é o caso, é necessária a execução de uma camada de

revestimento impermeável sobre a camada do pavimento em si a fim de evitar a penetração exagerada de água e manter sua durabilidade.

4.5.2.5 Fluência

O gráfico 13 mostra os resultados de fluência nas misturas com agregados virgens.

Gráfico 13: Fluência das misturas com agregado virgem



Fonte: Autor, 2018

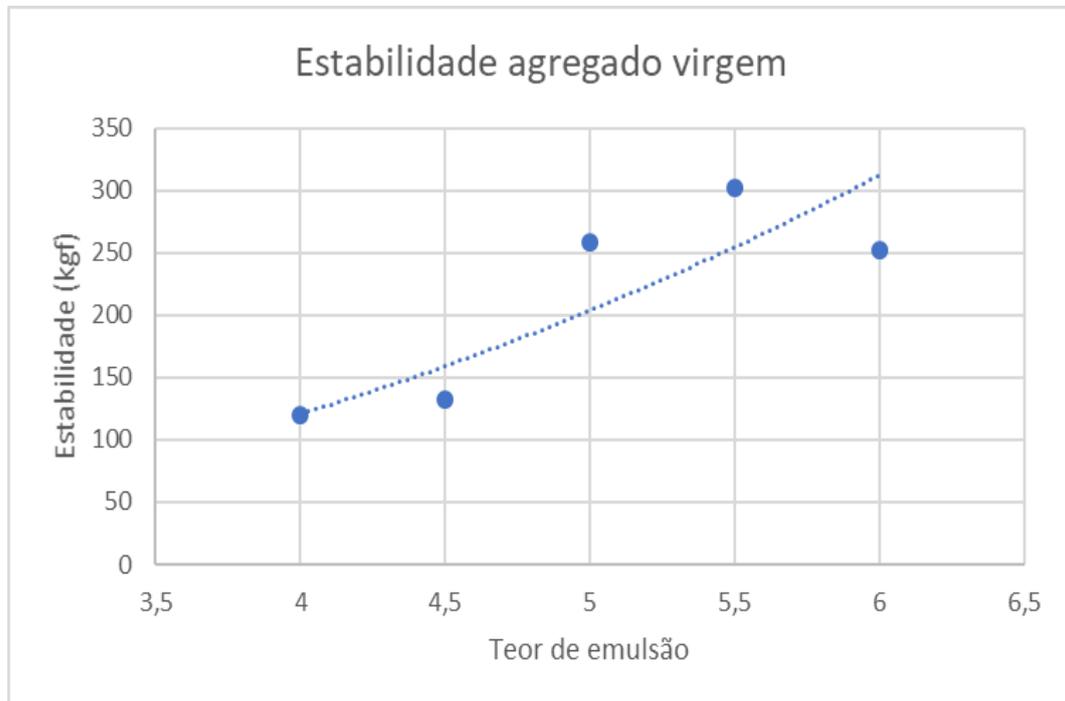
Nota-se pelos resultados de fluência que os corpos de prova com agregado virgem possuem o mesmo comportamento dos corpos de prova com RAP, tendendo a aumentar com o incremento de emulsão.

No entanto, a norma DNIT 153/2010 estabelece que a fluência da mistura deve possuir valores entre 2,0 mm e 4,5 mm. Os valores do gráfico acima mostram que todas as misturas ficaram fora dos limites da norma, sendo que as misturas com os teores de 4,0% e 4,5% ficaram abaixo do valor mínimo e as misturas com os demais teores ficaram acima do valor máximo.

4.5.2.6 Estabilidade

O gráfico 14 mostra os resultados de estabilidade nas misturas com agregados virgens.

Gráfico 14 - Estabilidade das misturas com agregado virgem



Fonte: Autor, 2018

O gráfico 14, juntamente com a curva de tendência, mostra que os corpos de prova com agregado virgem tendem a melhorar seus valores de estabilidade com o aumento do teor de ligante, ocorrendo o inverso do que tende a acontecer com as misturas em que se utiliza material fresado. Nota-se também que há um pico de estabilidade atingido por volta de um teor de 5,5% de emulsão. Teores acima deste tendem a reduzir a estabilidade do corpo de prova. Um teor de 6,0% de emulsão, por exemplo, atingiu um valor 16,5% menor em comparação com o teor de 5,5%.

A norma DNIT 153/2010 exige uma estabilidade mínima de 150 kgf para corpos de prova compactados com 50 golpes em ambas as faces e 250 kgf para corpos de prova compactados com 75 golpes em ambas as faces. Neste trabalho, os corpos foram compactados com 75 golpes a fim de buscar melhores resultados para as misturas.

Em relação à norma citada, foi observado que a mistura com agregado virgem atingiu o limite inferior de 250 kgf nos teores a partir de 5,0%, enquanto que os teores de 4,0% e 4,5% apresentaram valores abaixo do exigido pela norma.

4.5.3 Misturas com teor ótimo

A especificação de serviço ET-DE-P00/034 estabelece o teor ótimo de uma mistura reciclada como sendo aquela que obedece aos seguintes requisitos da tabela 16

Tabela 16 - Requisitos para o projeto de mistura asfáltica reciclada com emulsão

Características	Método de Ensaio	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

Como as misturas recicladas deste trabalho não atingiram a exigência mínima de 5 kN de estabilidade, o teor ótimo de emulsão foi estabelecido com base nos métodos de projeto do item 2.6.1.

A maioria destes métodos sugere que o teor ótimo de uma mistura reciclada a frio seja definido 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 não apenas nas misturas recicladas, mas nas misturas a frio em geral.

Desta maneira, tanto nas misturas com material fresado como nas misturas com agregado virgem, 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 com RAP é de **3,4%** e nas misturas com agregado virgem é de **5,4%**.

4.5.3.1 Ensaio Cantabro

O ensaio Cantabro serve para medir o desgaste dos corpos de prova quando são submetidos a 300 rotações na máquina Los Angeles sem a carga abrasiva (esferas de aço). O desgaste foi medido nos corpos de prova com os teores ótimos de emulsão previamente

estabelecidos para misturas com RAP e para misturas com agregado virgem. Foi feito o ensaio em três corpos de prova de cada mistura. Os corpos de prova com agregado fresado apresentaram os valores da tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do ensaio Cantabro na mistura com RAP

	Corpo de prova 01	Corpo de prova 02	Corpo de prova 3
Peso inicial (g)	1155,9	1166,7	1152,7
Peso final (g)	769,4	975,9	897,4

Fonte: Autor, 2018

O desgaste é medido a partir da massa que o corpo de prova perde em relação à massa inicial. Desta maneira, a mistura com material fresado apresentou um desgaste Cantabro médio de **23,9%**, valor semelhante aos encontrados na literatura. Silva (2011), por exemplo, obteve um desgaste Cantabro de 20,2% nos corpos de prova misturados com emulsão convencional de ruptura lenta.

Figura 29 - Corpos de prova com RAP após o ensaio Cantabro



Fonte: Autor, 2018

Por outro lado, os corpos de prova com agregado virgem perderam completamente a massa inicial após a realização do ensaio. Talvez isso tenha ocorrido por conta de uma possível

compactação inadequada ou ainda por conta da diminuição da qualidade da emulsão betuminosa no período em que ela esteve sendo estocada e usada, já que Brasquímica (2018) não recomenda a utilização da emulsão após um período de estocagem superior a 30 dias.

4.5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi feito em três corpos de prova diferentes para os teores ótimos de emulsão das misturas com agregado fresado e das misturas com agregado virgem. Os procedimentos foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 138/94 e os resultados se encontram na tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Tipo de mistura	Parâmetros	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
RAP	Altura (H)	6,23 cm	6,36 cm	6,31 cm
	Diâmetro (D)	9,92 cm	10,12 cm	10,15 cm
	Carga lida (F)	716,13 N	500,31 N	941,76 N
Agregado virgem	Altura (H)	7,58 cm	6,82 cm	7,21 cm
	Diâmetro (D)	10,14 cm	10,11 cm	10,21 cm
	Carga lida (F)	3462,93 N	2423,07 N	2884,14 N

Fonte: Autor, 2018

O valor da resistência (S_R) foi calculado com base na fórmula abaixo, retirada da norma DNER-ME 138/94.

$$S_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (12)$$

Assim, tem-se que as misturas com material fresado obtiveram uma resistência à tração média de **0,072 MPa** e as misturas com agregado virgem obtiveram uma média de **0,253 MPa**.

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

A norma citada estabelece um valor mínimo de resistência à tração de 0,25 MPa, o que torna as misturas com RAP insatisfatórias e as misturas com agregado virgem adequadas para uso. David (2006) obteve resultados entre 0,24 MPa e 0,38 MPa para misturas com RAP e emulsão do tipo RL-1C.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta pesquisa foram estudadas misturas betuminosas a frio com adição de emulsão de ruptura lenta do tipo RL-1C. Parte dos corpos de prova foram confeccionados com material fresado e a outra parte com agregados virgens para a posterior comparação entre eles. Foram moldados corpos de prova com diferentes teores de emulsão para analisar o comportamento deles com o acréscimo de ligante. Este tópico apresenta as conclusões mais pertinentes e sugestões para futuros trabalhos.

5.1 CONCLUSÕES

Durante a pesquisa, notou-se que as misturas feitas com material fresado utilizam bem menos ligante do que as feitas com agregado virgem. A ideia inicial era utilizar os mesmos teores de emulsão nas duas misturas, mas foi observado que as de agregado virgem necessitam de praticamente o dobro de emulsão para que os corpos de prova pudessem ter coesão entre o ligante e os agregados em si.

Em se tratando de uma obra de pavimentação, este fato possibilita bastante a redução dos custos, visto que o ligante é o componente mais caro de um pavimento em comparação com os outros agregados, como areia, brita e material de enchimento.

Além dos custos, a utilização de material fresado em um pavimento evita que ele seja descartado de maneira inadequada e reduz a necessidade de utilização integral de agregados virgens, reduzindo também, desta forma, a exploração das jazidas, o que é bom para o meio ambiente.

Contudo, foi observado que a utilização de 100% do material fresado, no caso deste trabalho, como agregado em uma mistura betuminosa não satisfaz alguns requisitos importantes, como a estabilidade Marshall e a resistência à tração por compressão diametral.

Foi observado que o RAP utilizado nesta pesquisa, apesar de ter apresentado resultados satisfatórios quanto à algumas características físicas e mecânicas, como abrasão Los Angeles, possuía uma quantidade significativa de materiais que podem ter reduzido a qualidade dele, como galhos, pedaços de sacola, restos de tijolo, pedaços de vidro e outras coisas. Isso decorre do fato de que o pavimento fresado da Avenida José Sarney já era bastante remendado com o decorrer dos anos.

Outros trabalhos e pesquisas semelhantes, porém, apresentaram resultados satisfatórios quanto a praticamente todos os ensaios nos corpos de prova, incluindo a

estabilidade Marshall e a resistência à tração por compressão diametral. Isso leva à conclusão que um RAP pode ser utilizado em um novo pavimento, mas essa decisão depende muito de alguns fatores, como a procedência e a qualidade deste material fresado.

5.2 SUGESTÕES

As sugestões para trabalhos futuros serão dadas através dos tópicos a seguir com o objetivo de evoluir os estudos e conhecimentos a respeito das misturas asfálticas recicladas a frio e da área de pavimentação e solos em geral.

- Utilização de outro agente estabilizador, como, por exemplo, espuma de asfalto ou agente rejuvenescedor;
- Confeção de corpos de prova juntando agregado fresado e agregado virgem na mesma mistura, desde que haja um devido enquadramento granulométrico em alguma norma ou especificação de serviço;
- Utilização de melhoradores de adesividade, como cal, dope e outros;
- Realização de outros ensaios para determinar parâmetros mais utilizados recentemente, como o módulo de resiliência;
- Avaliação detalhada sobre os custos gerados em uma obra de pavimentação que utiliza material fresado, comparando com os custos obtidos na utilização de métodos convencionais;
- Estudo do RAP em diferentes situações, como a possibilidade de utilizá-lo em estabilização de solos;
- Avaliação dos parâmetros estruturais e funcionais de um pavimento reciclado ao longo do tempo.

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.
- ALKINS, A.; LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T. **Sustainable Pavements – Environmental, Economic and Social Benefits of In-Situ Pavement Recycling**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Canada, 2008.
- 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.
- ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. NM 23:2000. Argentina, 2000.
- 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: 19.09.2018.
- 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 DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com emulsão**. ET-DE-P00/034. São Paulo, 2006.

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. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro**. DNER-ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa – determinação da resistência à tração por compressão diametral.** DNER-ME 138/94. 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.

DVS. **Microfresagem de pavimentos.** Barueri, 2018. Disponível em: <<http://fresagem.com.br/servicos/microfresagem-de-pavimentos-2/>> Acesso em: 15.09.2018.

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: 26.09.2018.

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.

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.

MATOS, Ana Caroline Rosa. **Estabilização de solos com utilização de revestimento asfáltico fresado em camadas de pavimentos**. São Luís, 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão.

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.

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.

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: 27.09.2018.

