

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Nícolas Pieniz Cerentini

**DOSAGEM DE UM PRÉ-MISTURADO A FRIO UTILIZANDO MATERIAL
ASFÁLTICO FRESADO**

Santa Cruz do Sul

2016

Nícolas Pieniz Cerentini

**DOSAGEM DE UM PRÉ-MISTURADO A FRIO UTILIZANDO MATERIAL
ASFÁLTICO FRESADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade de Santa Cruz do Sul, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Santa Cruz do Sul
2016

Nícolas Pieniz Cerentini

**DOSAGEM DE UM PRÉ-MISTURADO A FRIO UTILIZANDO MATERIAL
ASFÁLTICO FRESADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade de Santa Cruz do Sul, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Dr João Rodrigo Guerreiro Mattos
Professor Orientador

Me. Leandro Olivio Nervis
Professor Examinador

Me. Anelise Schmitz
Professora Examinadora

Santa Cruz do Sul
2016

Dedicado a todos que depositaram sua fé em mim.

AGRADECIMENTOS

Dirijo meus agradecimentos primeiramente ao maior engenheiro que possa existir: Deus, por tornar esta pesquisa possível, mediante todas as dificuldades encontradas.

Minha gratidão sincera, aos meus pais, Maria Goreti Cerentini e Jener Batista Cerentini, pelo suporte incondicional, além das palavras de força que me transmitem. Jamais conseguirei retribuir de maneira justa suas contribuições para a minha formação.

Aos laboratoristas Rafael Henn e Henrique Eichner, pelo auxílio quando precisei durante a realização dos ensaios, que foram diversas vezes, e pela amizade.

Por fim, gostaria de agradecer de maneira especial ao meu orientador Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos, pelo seu comprometimento e auxílio, tanto quanto a sua disponibilidade na hora das correções e revisões, e também pelo conhecimento transmitido.

RESUMO

Sabe-se que muitas rodovias brasileiras encontram-se em péssimo estado, necessitando de manutenção e restauração que nem sempre atingem o desempenho esperado e que, muitas vezes acabam explorando recursos de forma direta, sem necessidade, e também agredindo o meio. Frente a esses problemas, o alvo deste estudo é a análise da viabilidade para uma reciclagem do agregado oriundo das operações de fresagem do revestimento asfáltico, subproduto esse que muitas vezes é descartado em áreas impróprias. Esta pesquisa busca, através de ensaios laboratoriais, elaborar um projeto de mistura asfáltica a frio (PMF) com agregado fresado, para fins de revestimento e manutenção do pavimento em vias de tráfego leve e muito leve. Neste estudo, para a obtenção do teor de projeto da mistura asfáltica, foram moldados 3 corpos de prova para cada teor preliminar (5%, 6%, 7%, 8% e 9%) e então estudados seus parâmetros volumétricos, que são a densidade aparente, densidade máxima teórica e volume de vazios. Em seguida, foram ensaiados a estabilidade e fluência Marshall nestas misturas preliminares, a fim de caracterizá-las mecanicamente. Com esses resultados, foi então determinado o teor de projeto de 7%, pela média aritmética dos teores que obtiveram melhor desempenho nos parâmetros densidade aparente, volume de vazios e estabilidade Marshall. Por fim, foram moldados 3 CPs nesse teor de projeto de 7%, para a sua caracterização mecânica por ensaios de módulo e de resistência a tração.

Palavras-chave: Rodovias; PMF; reciclagem; agregado fresado.

ABSTRACT

It is known that many highways in Brazilian soil find themselves in poor conditions, needing maintenance and in some cases, even restoration, and yet, they don't reach the expected performance. Through this scenario, those operations exploit resources directly and in many ways, they end up harming the environment. Facing these problems, the goal of this research is to analyze the feasibility of recycling the reclaimed aggregate from the asphalt's milling process, byproduct that is, in most cases, discarded in non authorized areas. This study aims, through laboratory tests, to elaborate one cold bituminous mixture with reclaimed milled aggregate, for uses as superficial layer and maintenance of the pavement, in low and very low traffic lanes. In this research, for the achievement of the asphalt emulsion content percentage, were moulded 3 samples for each preliminary percentage (5%, 6%, 7%, 8%, and 9%), totalizing 15 samples. Therefore, was studied their volumetric parameters, which are the bulk density, the theoretical maximum density and the void volume. After that, was tested the Marshall stability and flow test, on those preliminary samples, in order to characterize them mechanically. With the results, was then determined the emulsion content percentage, which was 7%. This percentage was obtained through the arithmetic mean of the preliminary percentages which obtained the Best results. Lastly, were moulded 3 samples with this new percentage, for its mechanical characterization through resilience modulus test and tensile strength test.

Keywords: Highways; cold bituminous mixture; recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível sob carregamento	19
Figura 2 - Esquema de corte de máquina fresadora	23
Figura 3 - Freses metálicas no tambor de fresagem de uma fresadora a frio	24
Figura 4 - Granulometria do fresado asfáltico	24
Figura 5 - Sentido de corte do tambor fresador demonstrando a granulometria do material recuperado	25
Figura 6 - Diagrama de valor de serventia atual.....	27
Figura 7 - RAR estocado sob abrigo	28
Figura 8 - Superfície fresada do revestimento asfáltico com o RAR removido	28
Figura 9 - RAR no processo de mistura em usina Drum-Mix	32
Figura 10 - Usina Drum-Mix em processo de reciclagem de RAR	32
Figura 11 - Esquema de máquina recicladora a quente in situ.....	34
Figura 12 - Fluxograma de atividades na reciclagem a frio <i>in situ</i>	36
Figura 13 - Processo de reciclagem a frio em usina	37
Figura 14 – Local de extração de amostras do material fresado. BR 386 - Estrêla...39	
Figura 15 - Agregado fresado.....	40
Figura 16 - Pó de pedra	40
Figura 17 - Agregado fresado separado de acordo com sua graduação	42
Figura 18 - Gráfico da curva granulométrica da mistura com os limites superiores e inferiores.....	44
Figura 19 - Adição da emulsão asfáltica na mistura.....	47
Figura 20 - Pesagem do CP seco ao ar	48
Figura 21 - Pesagem Hidrostática do CP	49
Figura 22 - CP sendo seco para sua condição de superfície seca.....	49
Figura 23 - Agregado submerso por 24 horas.....	51
Figura 24 - Agregado sendo seco para sua condição de superfície seca	51
Figura 25 - Picnômetro com a amostra e água	52
Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	57
Figura 27 - Gráfico da relação Teor de emulsão x Densidade aparente	59
Figura 28 – Gráfico com a relação teor de emulsão e densidade máxima teórica	60
Figura 29 - Relação volume de vazios e teor de emulsão, método ASTM.....	61
Figura 30 - Relação teor de emulsão e volume de vazios, método DNIT	61

Figura 31 - Relação teor de emulsão e estabilidade Marshall.....	63
Figura 32 - Fluência em relação ao teor de emulsão	64
Figura 33 - Módulo de resiliência dos CPs teor de projeto.....	66
Figura 34 - Resistência a tração CPs teor de projeto.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das especificações da ES - 153/10.....	21
Tabela 2 – Pesquisas sobre misturas a frio	39
Tabela 2 - Principais propriedades da emulsão RM-1C	41
Tabela 3 - Ensaio Rotarex	42
Tabela 4 - Faixas granulométricas especificadas pelo DNIT	43
Tabela 5 - Granulometria escolhida	43
Tabela 6 - Massas dos agregados para uma mistura de 1000g.....	44
Tabela 7 - Classificação granulométrica quanto à porcentagem de vazios.....	53
Tabela 8 - Relação Teor de emulsão x Densidades aparentes pelos métodos ASTM e DNIT	58
Tabela 9 - Relação Teor de emulsão e Densidade Máxima Teórica.....	59
Tabela 10 - Relação teor de emulsão e volume de vazios, método ASTM	60
Tabela 11 - Relação Teor de emulsão X Volume de vazios, método DNIT	61
Tabela 12 - Estabilidade Marshall para os 5 teores de emulsão	62
Tabela 13 - Fluência das misturas recicladas, em mm	64
Tabela 14 - Parâmetros para a escolha do teor de projeto	65
Tabela 15 - Resultados volumétricos da mistura com teor de projeto.....	65
Tabela 16 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência	66
Tabela 17 - Resistência a tração dos dos CPs com teor de projeto.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABEDA	Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Petróleo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AR	Agente rejuvenescedor
ARRA	<i>Asphalt Recycling & Reclaiming Association</i>
ASTM	<i>Americans Society for Testing & Materials</i>
CA	Concreto asfáltico
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CP	Corpo de prova
CPA	Camada porosa de atrito
DMT	Densidade máxima teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodovias
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HIR	<i>Hot in-place Recycling</i>
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LAPAV	Laboratório de Pavimentação, UFRGS
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PMF	Pré misturado a frio
RAR	Revestimento asfáltico recuperado
SMA	<i>Stone matrix asphalt</i>
USACE	<i>The United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 Área e delimitações da Pesquisa	15
1.3 Justificativa.....	16
1.4 Estrutura do Trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Breve histórico sobre pavimentações.....	17
2.2 Pavimentos Flexíveis	18
2.3 Revestimentos Asfálticos	19
2.4 Misturas asfálticas a frio	20
2.5 Defeitos em Pavimentações Asfálticas	21
2.5.1 Trincamentos.....	22
2.5.2 Afundamentos	22
2.6 Fresagem	23
2.7 Importância da Reciclagem dos materiais.....	25
2.8 Reciclagem de Pavimentos	26
2.9 Revestimento Asfáltico Recuperado	27
2.9.1 RAR quanto a sua granulometria	29
2.9.2 RAR quanto ao seu teor de ligante	29
2.9.2.1 O Ligante Recuperado	29
2.10 Tipos de Reciclagens Asfálticas.....	30
2.10.1 Reciclagem a quente.....	30
2.10.1.1 Reciclagem a quente em usina estacionária	31
2.10.1.2 Reciclagem a quente “ <i>in situ</i> ”	32
2.10.2 Reciclagem a frio.....	34
2.10.2.1 Reciclagem a frio <i>In situ</i>	35
2.10.2.2 Reciclagem a frio em usina	36
2.11 Pesquisas sobre misturas a frio	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Materiais.....	39

3.1.1 Agregado Fresado.....	39
3.1.2 Pó de Pedra	40
3.1.3 Emulsão Asfáltica.....	41
3.2 Método	41
3.2.1 Teor de ligante do agregado fresado	41
3.2.2 Granulometria da mistura.....	42
3.2.3 Cálculo do Teor Preliminar de Emulsão Asfáltica.....	44
3.2.4 Moldagem dos corpos de prova Marshall.....	46
3.2.5 Densidade Aparente.....	48
3.2.6 Massa Específica Real dos Agregados Graúdos	50
3.2.7 Determinação da massa específica real do agregado miúdo.....	51
3.2.8 Densidade Máxima Teórica (DMT).....	52
3.2.9 Determinação do Volume de Vazios	53
3.2.10 Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.....	54
3.2.11 Escolha do teor de projeto.....	54
3.2.12 Módulo de Resiliência	55
3.2.13 Determinação de Resistência à tração por compressão diametral	55
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.1 Teor de Emulsão Preliminar	58
4.2 Resultados Volumétricos das misturas.....	58
4.3 Resultados dos ensaios mecânicos das misturas	62
4.4 Escolha do teor de emulsão de projeto	65
4.5 Resultados Volumétricos da mistura com teor de projeto	65
4.6 Resultados Mecânicos da mistura com teor de projeto.....	66
4.6.1 Módulo de Resiliência	66
4.6.2 Resistência à tração	67
5 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O Homem sempre teve a necessidade de ir e vir, e atualmente, devido ao crescente e intenso tráfego rodoviário no Brasil, muitas rodovias estão em estado de declínio e condições impróprias para o tráfego de veículos. Esse problema em geral é decorrente de decisões equivocadas de projeto da pavimentação e/ou também pela falta de sua manutenção nos períodos corretos, o que prolongaria a vida útil da estrutura. Essa situação é de grande dificuldade para os profissionais engenheiros, pois os mesmos devem apresentar soluções muitas vezes inovadoras para a preservação de grandes extensões da malha viária, com recursos cada vez mais limitados, gastos de energia, maior preocupação de emissão de poluentes no ar e também de resíduos na natureza. Desse modo, é cada vez mais apropriado, os estudos para reutilização de resíduos, para uma maior racionalização de custos e impactos no ambiente.

Uma possível solução para essas rodovias danificadas seria o aproveitamento de agregado fresado através da técnica de reciclagem asfáltica, a qual reutiliza os materiais contidos na pavimentação. Essa técnica vem sendo cada vez mais utilizada no mundo. Tal crescimento é devido às muitas vantagens que a prática possui, como o baixo consumo de energia comparado a outras técnicas, reutilização dos agregados e ligante envelhecido da mistura e menor impacto ambiental. A reciclagem de sub-produtos de origem viária, como o material fresado, está em evidência em vários países desenvolvidos como Estados Unidos, que chega a reciclar 80% de sua produção de fresado. A Suécia recicla cerca de 95% e a Alemanha, 55%. Países como Dinamarca e Holanda chegam a reaproveitar 100% de sua produção (HOLTZ E EIGHMY, 2000).

De modo a obter maior conhecimento na área da reciclagem asfáltica, esta pesquisa conta com ensaios laboratoriais e estudos sobre a reciclagem a frio do revestimento asfáltico, a fim de se verificar a possibilidade de fabricação de um Pré-Misturado a Frio (PMF) com fresado asfáltico, observando suas peculiaridades, comportamento e seu desempenho.

1.1 Objetivos da Pesquisa

Os objetivos propostos da pesquisa são divididos em objetivos gerais e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral elaborar uma dosagem de PMF reutilizando material asfáltico oriundo do processo dos fresagem do revestimento de um pavimento flexível.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar o material fresado utilizado;
- Estimar um teor de emulsão preliminar;
- Moldar corpos de provas com 1 e 2% de variação, para mais e para menos;
- Obter parâmetros volumétricos das misturas PMF;
- Realizar ensaios de caracterização mecânica do PMF, obtido a partir de material fresado;
- Determinar o teor ótimo para cada propriedade da mistura asfáltica;
- Determinar um Teor de projeto para a faixa granulométrica adotada;
- Caracterizar mecanicamente a mistura com teor de projeto quanto ao seu módulo de resiliência e resistência a tração;
- Comparar os resultados obtidos com outras pesquisas semelhantes

1.2 Área e delimitações da Pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido na área de infraestrutura viária, utilizando conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Estradas. O assunto da pesquisa se delimita em estudos laboratoriais experimentais sobre o comportamento mecânico de misturas a frio utilizando o material agregado oriundo do processo de fresagem da BR-386, trecho próximo à Estrela – RS.

1.3 Justificativa

No Brasil, em alguns trechos de rodovias já foram empregados processos de reciclagem asfáltica, entretanto, ainda existe carência de informações e estudos sobre o assunto. Isto é constatado no controle tecnológico, na avaliação da performance do pavimento, e também no projeto de misturas recicladas. Este trabalho tem como finalidade contribuir com mais informações sobre reciclagem de pavimentos a frio com utilização como camada de revestimento ou desgaste para vias de tráfego leve e muito leve, como vias urbanas, acostamentos, acessos secundários de rodovias, etc. A escolha do tema justifica-se também pelo fato de que muitas rodovias contam com largas camadas de revestimento asfálticos, devido a processos de recapeamentos consecutivos, que então possibilitam o processo de fresagem e coleta do material em quantidades significativas. A evolução dos equipamentos de fresagem e reciclagem também ajudam no controle de qualidade durante o processo, tornando assim esta solução de reabilitação mais atrativa.

1.4 Estrutura do Trabalho

No presente capítulo é apresentado uma breve introdução do assunto que se refere a PMF com utilização de agregado fresado, tema pertencente à área de infraestrutura. Também foram expostos o objetivo geral e os objetivos específicos, assim como a justificativa para o estudo.

No capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica, trazendo informações de diversas fontes e autores, estrangeiros e brasileiros, de modo a dar um embasamento sobre a utilização do PMF e reciclagem do agregado fresado.

O capítulo 3 expõe os materiais, juntamente com suas características, e também a metodologia empregada para a realização dos ensaios, necessários para a consecução dos objetivos desta pesquisa.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, propostos no capítulo 3 durante a metodologia.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico sobre pavimentações

A História da pavimentação no mundo evoluiu concomitantemente com o desenvolvimento humano, desde as épocas de povoamentos dos continentes, das disputas por territórios, mercados de intercâmbio de especiarias e obras primas, como também fez parte do desenvolvimento cultural, religioso e também urbanístico dos povos. Assim como a História, os Pavimentos também são compostos por camadas constituindo uma estrutura, uma estrada que através dela pode-se visualizar um histórico de sua utilização pela humanidade.

De acordo com o relatado por Bernucci *et al.* (2008), uma das estradas pavimentadas mais antigas de que se tem ciência situa-se no Egito e não foi executada para uso de veículos de roda, e sim para uso de trenós utilizados para carga de materiais pesados para a construção das Pirâmides (2600 AC- 2400 AC). Estradas executadas com lajões de rocha com bom suporte e boa capacidade, revestidas com musgo, azeite e água, a fim de atenuar o atrito entre os veículos e a estrutura.

Avançando um pouco na História, na Roma antiga foram empregados sistemas rodoviários de grande nível técnico, sob ordens de Otaviano Augusto no ano 27 AC. Essa infraestrutura permitiu que suas tropas se deslocassem para pontos estratégicos.

Mais recentemente, no Brasil, deu-se destaque a algumas estradas simbólicas com o propósito de demonstrar a evolução da pavimentação no país, segundo Prego (2001), Ribas (2003), Concer (1997), e História das rodovias (2004) *apud* Bernucci *et al.* (2008).

Em 1560, no Brasil há registros de uma das primeiras estradas, durante o governo de Mem de Sá. A estrada tinha por finalidade interligar o Planalto Piratinga a São Vicente. A Capitania de São Vicente, em 1661, reabilitou esta via, que ficou conhecida como Estrada do mar, permitindo o tráfego de veículos. Diversas vezes foram realizadas manutenções e intervenções na estrada com o passar do tempo, porém, em 1913, a estrada foi deixada de lado em consequência da concorrência ferroviária (BERNUCCI *et al.*, 2008). No ano de 1922 uma sociedade fora criada com a finalidade de reconstruir a estrada e empregar um pedágio, foi chamada de

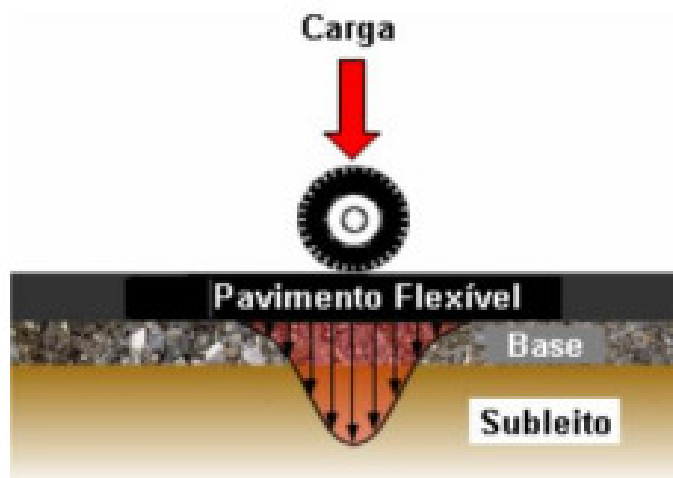
Sociedade Caminho do Mar, e foi pavimentada com concreto no seu trecho mais alcantilado.

No ano de 1937, foi criado então o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) que atuava sob a supervisão do Ministério de Viação e Obras, criada pelo então Presidente da República, Getúlio Vargas. Durante a década de 40, em virtude da Segunda Guerra Mundial, notou-se um desenvolvimento das pavimentações pelo país (BERNUCCI et al, 2008). O avanço na infraestrutura rodoviária se deu nas décadas de 40 e 50 devido ao Fundo Rodoviário Nacional, criado em 1946. Grifa-se, logo em 1953, a constituição da Petrobrás. Prego (2001) ressalta que ocorreu em 1950 o início de obras rodoviárias em grandeza industrial e também a geração de empresas construtoras de grande magnitude. Um Período muito importante também para o desenvolvimento rodoviário no país foi durante o governo JK, quando foi implantada a indústria automobilística, e também foi criado o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), atuando juntamente com o DNER e a Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) (BERNUCCI et al, 2008). Atualmente, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), criado em 2007, no segundo mandato do governo Lula, contribuiu para o planejamento e execução de grandes obras de infraestrutura pelo país. Em 2015, foi considerado um programa sólido, com cerca de 37 mil empreendimentos efetuados (Ministério do Planejamento, 2015).

2.2 Pavimentos Flexíveis

A Definição de Pavimento Flexível se dá por meio da característica de que todas as camadas da estrutura do pavimento (revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, se houver) se deformam de forma elástica devido ao carregamento sofrido. Essa carga é então transmitida por todas as camadas até o subleito ou terraplano da estrada (bacia de deformações). A figura 1 ilustra o comportamento da estrutura de um pavimento flexível quanto ao carregamento.

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível sob carregamento



Fonte: Lima, 2003.

2.3 Revestimentos Asfálticos

O revestimento asfáltico é a última camada do pavimento flexível, a mais externa, destinada a receber diretamente a carga dos veículos e também o intemperismo e eventos climáticos. Por isso, essa camada deve demonstrar grande resistência ao contato pneu-pavimento, e ser o mais impermeável possível a fim de evitar a percolação de água às camadas subjacentes da estrutura do pavimento (BERNUCCI et al, 2008). Ainda segundo os autores, o revestimento pode ser desenvolvido em usinas fixas ou móveis, ou fabricada in-loco em formato de tratamentos superficiais. São também classificados quanto ao seu tipo de ligante, cimento asfáltico de petróleo (CAP) no caso da mistura ser a quente, ou emulsão asfáltica de petróleo (EAP) no caso de misturas a frio. Quanto à sua granulometria, diferenciam-se em abertas, densas, contínuas e descontínuas. As misturas usinadas se distinguem em a quente e a frio.

Nas misturas a quente, podem ser destacadas por meio de sua graduação:

- Graduação Densa: Concreto Asfáltico (CA);
- Graduação Aberta: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- Graduação Descontínua: Matriz Pétreo Asfáltica (*Stone Matrix Asphalt – SMA*) e misturas sem agregados de certa graduação (*Gap-graded mix*).

2.4 Misturas asfálticas a frio

Os Pré-misturados a frio (PMFs) são misturas asfálticas de agregados graúdos, finos, *filler* ou de enchimento, com emulsões asfálticas (EAP), misturadas a temperatura ambiente (BERNUCCI et al, 2008).

O emprego do PMF em vias de tráfego leve pode ser de rolamento, podendo também ser como camada intermediária (*binder*).

Os pré-misturados se dividem em duas categorias:

- Densos – contém um baixo volume de vazios e uma granulometria bem graduada.
- Abertos – contém grande volume de vazios em sua estrutura, e conta com granulometria aberta.

O PMF conta com alguns aspectos que dependem dos vazios, e é função da granulometria escolhida, de acordo com Santana (1993), e pode ser concebido em três tipos:

- Aberto: quantidade pequena ou inexistente de miúdos, com pouco ou sem *filler*, com volume de vazios entre 22 e 34% (alto valor de vazios);
- Semidenso: volume médio de miúdos e pouca quantidade de *filler*, com volume de vazios entre 15 e 22 % (valor intermediário);
- Denso: PMF com miúdos, *filler* e agregado graúdo, apresentando um volume de vazios pequeno, na ordem de 9 a 15 %.

Os pré-misturados podem ser compactados em espessuras de 30 a 70 mm, dependendo de sua finalidade e traço. Espessuras que superem 70 mm devem ser compactadas em mais camadas. Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto - ABEDA (2001), o PMF destinado a uso de revestimento, deve conter emulsão de ruptura lenta e misturas densas, pelo fato de apresentarem resistências mecânicas superiores aos outros tipos de misturas. Para isso, tem-se a Norma ES-153/10 do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). A tabela 1 mostra os requisitos de dosagem e faixas granulométricas para os PMFs.

Tabela 1 - Resumo das especificações da ES - 153/10

Peneiras		% mínima passante				
Pol.	Mm	A	B	C	D	Tolerância da faixa de projeto
1"	25,4	100	-	100	-	± 7%
¾"	19,1	75-100	100	95-100	100	± 7%
½"	12,7	-	75-100	-	95-100	± 7%
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	± 7%
Nº 4	4,8	10-35	15-40	20-40	25-45	± 5%
Nº 10	2,0	5-20	10-25	10-25	15-30	± 5%
Nº 200	0,075	0-5	0-5	0-8	0-8	± 2%
Betume solúvel no CS ₂ %		4-6	4-6	4-6	4-6	± 2%

Fonte: DNIT, 2010.

As misturas a frio apresentam muitas vantagens, como a utilização de equipamentos simples para a realização das misturas, adesividade com materiais britados e boa trabalhabilidade em temperatura ambiente (ABEDA, 2001). Os PMFs devem contar com controle granulométrico rigoroso, por se tratarem de misturas a frio e apresentarem menor resistência quando comparados com misturas a quente. A norma 153/10 trás considerações quanto ao controle da usinagem do PMF, como controle da quantidade de ligante na mistura, pelo processo de extração de emulsão de amostras, não podendo extrapolar $\pm 0,3\%$ do teor de projeto. Quanto à granulometria, deve ser empregado o procedimento DNER-ME 083/98 após a extração da emulsão das amostras, devendo manter-se contínua, de acordo com as tolerâncias especificadas no projeto.

É previsto pelo DNIT também, a utilização de emulsão com polímero nos PMFs. O Procedimento é normatizado pela ES-390/99 do DNER, a qual especifica quase os mesmos parâmetros da emulsão asfáltica normal, porém estabilidade de 250 Kgf para 75 golpes por face no ensaio Marshall, volume de vazios na faixa de 5 a 25 % e, nas faixas C e D, teor de emulsão entre 4 e 7 por cento.

2.5 Defeitos em Pavimentações Asfálticas

Muitos são os problemas que assolam os pavimentos asfálticos. Para este estudo, os defeitos funcionais serão os abordados, visto que são superficiais permitindo assim serem removidos por meio de fresagem e este material ser submetido a uma reciclagem. Os danos considerados superficiais de importância

funcional são aqueles que são identificados a olho nu. Para isto, o DNIT ressalta e padroniza alguns dos defeitos superficiais que influenciam na avaliação funcional do pavimento (DNIT 005/2003-TER-DNIT, 2003a). Dentre esses defeitos podem-se destacar os trincamentos e afundamentos.

2.5.1 Trincamentos

De acordo com o DNIT, por sua norma 005/03 TER, Trincamentos são fendas (descontinuidades representando aberturas) presentes no revestimento, visível a olho nu, de tamanho maior que as fissuras (que ainda não causam danos funcionais à condição do revestimento) podendo ser classificadas em trincas isoladas ou trincas interligadas.

Segundo o departamento, as trincas isoladas se dividem em 3 categorias:

- Trinca Transversal: trinca que tem padrão de direção perpendicular ao sentido da via. Trincas transversais com comprimento menor que 1 metro são chamadas de curtas. Trincas maiores que um metro são consideradas longas.
- Trinca Longitudinal: são trincas que são paralelas ao sentido de fluxo da rodovia. Com extensão menor que 1 metro, são denominadas curtas. Com extensão maior que 1 metro são denominadas longas.
- Trinca de Retração: trincas que ocorrem por retração e dilatação térmica dos materiais, e não por fadiga do revestimento.

Trincas interligadas são definidas como “Couro de jacaré” ou tipo “bloco”:

- Couro de Jacaré (*Alligator Cracking*): trincas interligadas com formato assemelhado ao aspecto de “couro de jacaré”. Podem apresentar erosão ou não em suas extremidades.
- Trinca tipo bloco: trincas unificadas que tem formato em padrão de “blocos” bem definidos. Pode apresentar erosão em sua estrutura ou não.

2.5.2 Afundamentos

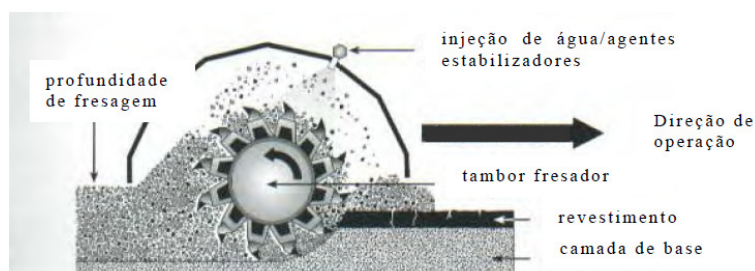
Ainda segundo a norma 005/03, o afundamento é um defeito permanente onde ocorre deformação por depressão da camada superior da pavimentação. Se define em 2 tipos: afundamento plástico e afundamento de consolidação.

- Afundamento Plástico: é causado por fluência plástica, que atua em uma ou várias camadas da pavimentação, juntamente com solevamento. Com comprimento menor que 6 metros são denominados Locais. Caso sua extensão seja maior que 6 metros, é então chamado como afundamento plástico de trilha de roda.
- Afundamento de Consolidação: é causado por consolidação de uma ou várias camadas da pavimentação, não ocorrendo solevamento. Ocorrendo com dimensão menor que 6 metros é chamado de local. Quando sua extensão é maior que 6 metros, é então chamado Afundamento de consolidação de trilha de roda.

2.6 Fresagem

Hoje em dia, a utilização do método conhecido como fresagem já é bastante difundido nas obras rodoviárias brasileiras, principalmente quando se trata de grandes recuperações em vias. É realizada com o intuito de remover parte ou a totalidade da espessura da capa danificada de revestimento a ser reciclada. Segundo Bonfim (2007), o termo fresagem se dá devido ao corte ou raspagem de materiais ou até desgaste, por meio de equipamento cortador rotativo dotado de várias fresas metálicas. A figura 2 exemplifica o processo de corte de uma fresadora. O método de fresagem mais utilizado no Brasil é o de fresagem a frio.

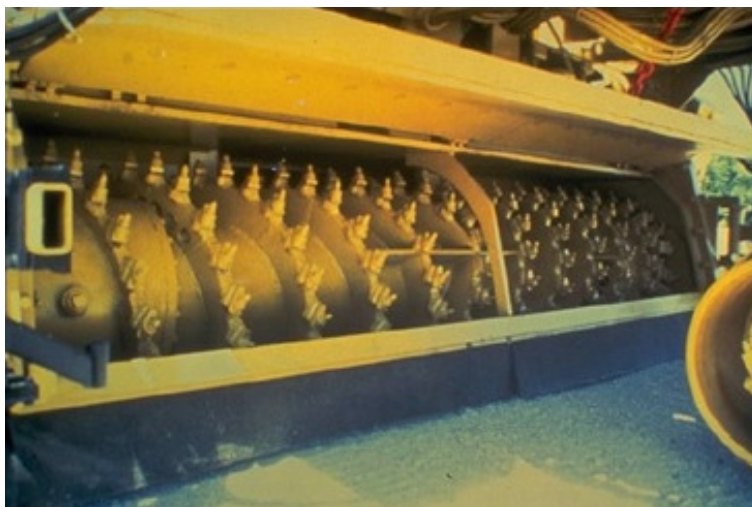
Figura 2 - Esquema de corte de máquina fresadora



Fonte: Dellabianca, 2004.

A figura 3 ilustra mais detalhadamente o cilindro fresador de uma fresadora a frio Wirtgen, muito utilizada no Brasil.

Figura 3 - Freses metálicos no tambor de fresagem de uma fresadora a frio

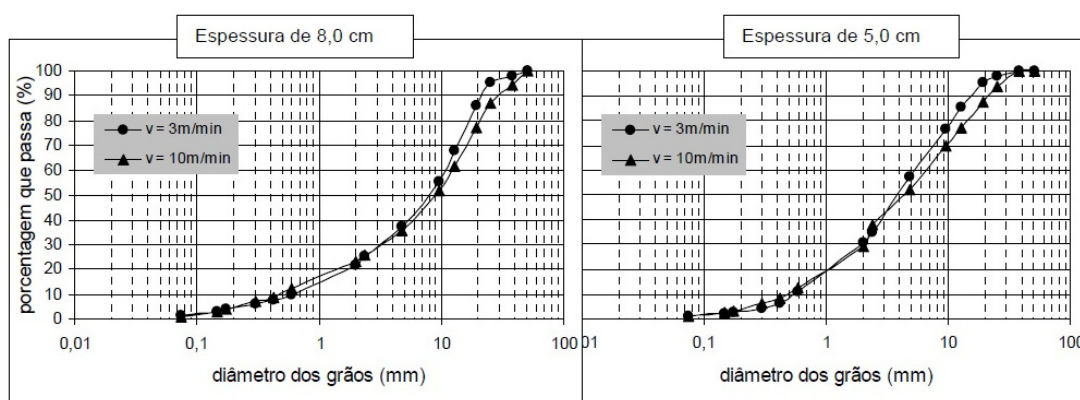


Fonte: Kandhal e Mallick, 1997.

Segundo DNIT (2006, p. 198) “a fresagem a frio destrói a integridade estrutural do revestimento, [...] em partículas de dimensões apropriadas. As dimensões finais das partículas são determinadas pela profundidade do corte, velocidade de avanço da máquina, sentido de rotação do cilindro fresador [...]”.

Bonfim (1999) conclui que a granulometria do material fresado depende da velocidade em que o corte é dado e também da espessura de abatimento do revestimento, sendo este critério, o que traz mais diferença. Além disso, observou que a velocidade de operação da fresadora deve ser de maneira controlada, de modo a evitar a eclosão de grumos com tamanhos indevidos. Ainda segundo o autor, a quantidade de finos do material recuperado obtido pela fresagem (passante na peneira 0,075 mm) independe da velocidade de corte. A figura 4 exemplifica a granulometria conforme a velocidade do processo e também a espessura da camada:

Figura 4 - Granulometria do fresado asfáltico

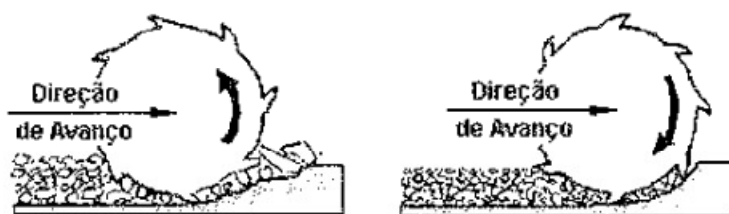


Fonte: Bonfim, 1999.

Quanto à velocidade de avanço do processo de fresagem, Caterpillar (1996) constata, assim como Bonfim que, quando as freses metálicas se mantêm em toque por mais tempo com o revestimento, uma granulometria de tamanho menor é gerada.

Fator de importância na fresagem que pode alterar a granulometria é o sentido de giro do tambor fresador, Ainda segundo o autor, o giro do tambor pode ser no sentido horário ou anti-horário, resultando numa granulometria menor caso o sentido seja horário, conforme figura 5

Figura 5 - Sentido de corte do tambor fresador demonstrando a granulometria do material recuperado



Fonte: Bonfim, 2007.

No Brasil, a fresagem a frio deve atender à norma do DNIT 159/2011-ES, a qual exibe as especificações de serviço, requisitos quanto à máquina fresadora, padrões de fresagem, e também sobre controle e execução.

Através de norma, DNIT (2006) ainda ressalta que o material fresado a frio apresenta uma granulometria conveniente para o processo de reciclagem, sem a imposição de um pós-processamento, salvo para descartar material de granulometria indesejável.

2.7 Importância da Reciclagem dos materiais

Com o passar do tempo, cresce a importância da reciclagem devido aos impactos ambientais, casos em que os materiais são depositados de forma negligente na natureza e também em questões como dar destinos úteis aos materiais remanescentes das operações da construção, otimizando os processos. Schroeder (1994) cita que existe uma dificuldade crescente das comunidades em encontrarem soluções para seus subprodutos, ressaltando que: "[...] Uma resposta a

todos estes problemas está na capacidade da sociedade para desenvolver usos benéficos para estes resíduos [...]”.

Dentro dessas preocupações, existe hoje no Brasil a situação de resíduos gerados pelas obras de infraestrutura, como o material fresado do revestimento asfáltico, que é alvo dos estudos deste trabalho de conclusão de curso. Kandhal e Mallick (1997) também enfatizam que, reaproveitar os resíduos gerados formando um novo material implica em uma redução na exploração de vários recursos. A reciclagem dos pavimentos também é uma técnica que, muitas vezes, proporciona menos interrupção do trânsito que outros tipos de reabilitação.

2.8 Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem de pavimentos asfálticos é, sem dúvidas, uma aplicação arrojada, porém não é uma prática muito nova. Seu princípio ocorreu em Singapura e na Índia com os primeiros trabalhos em reciclagem a quente, na década de 30. A Reciclagem a frio (*in situ*) começou a ser estudada no final da década de 30, pelo *Road Research Laboratory* (SULLIVAN, 1996; NICHOLLS, 1998). Contudo, mesmo obtendo resultados similares às misturas novas, sucedeu-se um estudo maior sobre a reciclagem dos pavimentos somente na década de 70. Tal fato ocorreu em consequência do embargo do petróleo, que inflacionou o custo do asfalto e consequentemente todas as obras rodoviárias (ROBERTS et al., 1996, apud MOREIRA et al.).

A Reciclagem de pavimentos mostra-se um recurso eficaz para muitas dificuldades relacionadas às pavimentações, apresentando diversas opções de execução e dispõe de abundantes benefícios.

Entre os benefícios da reciclagem de pavimentos pode ser destacado:

- Reaproveitamento de agregados e ligantes asfálticos;
- Contribuição para a preservação do ambiente;
- Restauração da situação geométrica existente.

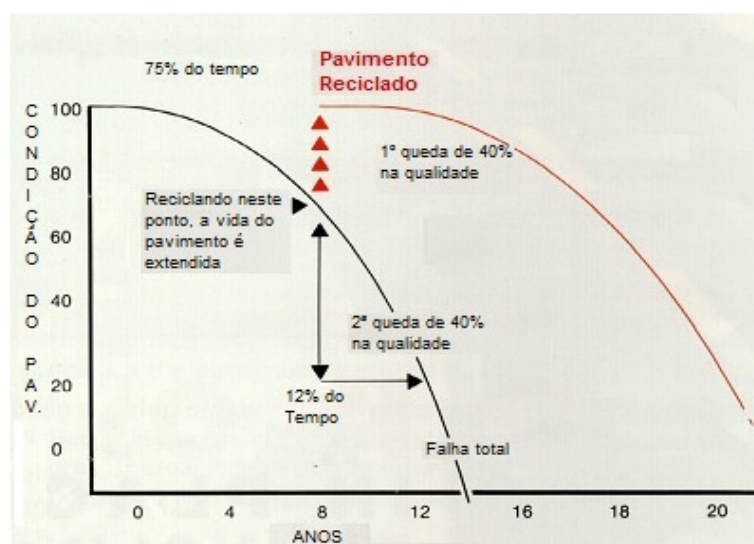
Segundo Kandhal e Mallick (1997), a restauração de pavimentos é necessária para manter o pavimento em boas condições. São citados alguns motivos pertinentes, para a restauração de um pavimento:

- Qualidade de rolagem inadequada;

- Excesso de patologias no pavimento;
- Atrito reduzido do revestimento;
- Necessidade de manutenção em excesso;
- Danos excessivos aos usuários;
- Capacidade estrutural insuficiente para o tráfego projetado.

A figura 6 demonstra um diagrama de Valor de Serventia Atual. É possível observar curvas que mostram o pavimento em declínio e um limite aceitável para o tráfego seguro através desse. A partir de certo ponto aceitável, deve-se realizar a devida operação de reciclagem do pavimento em razão de se estender sua vida útil e evitar uma maior e mais cara manutenção futura.

Figura 6 - Diagrama de valor de serventia atual



Fonte: Kandhal e Mallick, (traduzido) 1997.

2.9 Revestimento Asfáltico Recuperado

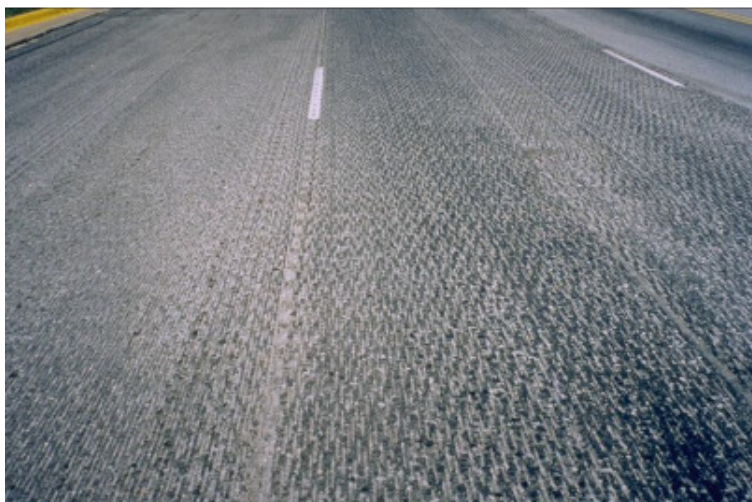
O Revestimento Asfáltico recuperado (RAR) também conhecido em bibliografias como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) – é o material Proveniente do processo de fresagem da camada de asfalto. A figura 7 mostra o RAR estocado em pilhas sob abrigo para proteção da umidade. Já a figura 8, demonstra o revestimento após a remoção do RAR.

Figura 7 - RAR estocado sob abrigo



Fonte: FHWA, 1997.

Figura 8 - Superfície fresada do revestimento asfáltico com o RAR removido



Fonte: Kandhal e Mallick, 1997.

Schroeder (1994) destaca a utilização do RAR:

- Nos revestimentos asfálticos (várias utilizações aceitas);
- No uso de base (desempenho aceito);
- Uso em aterros (desempenho aceito).

No cenário brasileiro, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER aborda a reciclagem a quente *in situ* e em usina, pelas normas ES 319 e ES 318, ambas de 1997 e fixa que o asfalto reciclado pode ser usado na restauração dos pavimentos como capa de rolamento, tanto quanto como base dos revestimentos, regularização e reforço.

As características do RAR provêm das peculiaridades dos materiais e do tipo de mistura asfáltica (camada de ligação ou *binder*, capa de rolagem) segundo Chesner et al. (1999).

2.9.1 RAR quanto a sua granulometria

Deve passar por processo de peneiramento normatizado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, pelo ensaio T 27 - *Sieve Analysis of Fine and Coarse Agregates* (peneiramento de agregados granulares), que no Brasil se equipara com a norma do DNER ME 083/98 - Análise granulométrica de agregados. Os grumos de RAR, muitas vezes, em reciclagens a frio, são nomeados como “rocha negra” e então definidos como agregados.

2.9.2 RAR quanto ao seu teor de ligante

A fim de definir o teor de ligante atuante no RAR, devem-se executar os ensaios T-164/93 da ASSHTO. No país, o ensaio remete-se ao procedimento do DNER ME 053/94, com a utilização do Refluxo e Rotarex.

Para um estudo e extração do ligante asfáltico das amostras de RAR, recomenda-se o procedimento normatizado americano ABSON ASTM D - 1856/15. Este procedimento se dá por meio de uma destilação, através de pressão com gás inerte, assim removendo o solvente em sua totalidade, deixando o ligante com suas características em evidência.

2.9.2.1 O Ligante Recuperado

O ligante extraído das amostras de RAR também pode ser chamado de ligante envelhecido, pois está oxidado.

Segundo DNER (2006), alguns ensaios adicionais podem ser realizados com este ligante recuperado:

- Penetração (100g, 5s, 25°C), DNER-ME 003/94;
- Ponto de amolecimento (°C), ABNT MB 167/71 - NBR 6293/94;
- Ductilidade (25°C, cm, min.) ABNT MB 167/71 – NBR 6293/94;
- Viscosidade Saybolt Furol (175°C).

O reaproveitamento dos ligantes asfálticos é, sem dúvida, muito útil e obviamente uma grande vantagem da reciclagem de pavimentos existentes. O asfalto ao longo do tempo perde propriedades devido à oxidação e volatilização, porém, estas propriedades podem ser reobtidas com adição de um agente rejuvenescedor ou asfalto novo.

O reemprego do asfalto envelhecido pode significar a redução de asfalto novo na mistura para a reciclagem e, conseqüentemente um menor custo de execução. Um asfalto com reutilização de ligante implica a adição de ligante novo ou agente rejuvenescedor em uma ordem de 1% a 3%, comparado com uma mistura nova que consiste em um teor de ligante por volta de 6% (DNIT, 2006).

2.10 Tipos de Reciclagens Asfálticas

Existem vários tipos de reciclagens asfálticas conhecidas e difundidas no Brasil. Os principais métodos de reciclagem asfáltica são:

- Reciclagem a quente;
- Reciclagem a frio.

2.10.1 Reciclagem a quente

Reciclagem a quente, ou ainda *Hot Mix Recycling*, (em bibliografias americanas), consiste no processo de combinar os materiais provenientes do RAR com uma nova mistura asfáltica a quente, com adição de novo ligante ou agente rejuvenescedor, em usina ou *in situ*. Segundo a FHWA (1997), o RAR pode ser obtido através da fresagem ou até da remoção por quebra (*Ripping*). Geralmente, uma mistura reciclada a quente contém uma porcentagem de 10% a 30% de RAR em sua constituição. A mistura reciclada a quente apresenta fortes vantagens. Sua performance é igual ou até melhor que a camada original, além de corrigir danos superficiais e deformações como também trincas e fissuras.

Conforme a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* - ARRA (2001), a reciclagem a quente é o método de reciclagem mais utilizado mundialmente. O RAR gerado em obras rodoviárias nos Estados Unidos chega a mais de 50 milhões de toneladas por ano, sendo que destes, cerca de 33% são usados na reciclagem a quente. Do restante, 20% são descartados e 47% são usados em outros tipos de

reciclagem. ARRA (2001) ainda cita uma observação semelhante à FHWA, o RAR a ser utilizado pode ser proveniente do processo de *Ripping, Cold Planing/Milling* (Fresagem). Entretanto, é preferível um RAR proveniente de Fresagem.

A Reciclagem a quente abrange duas categorias e pode ser dividida em:

- Reciclagem a quente em usina estacionária;
- Reciclagem a quente *in situ*.

Em território brasileiro, o controle e normatização da reciclagem a quente é feita pelo DNIT através das normas:

- 033/2005-ES – Reciclagem a quente de pavimentos em usina, especificações de serviço;
- 034/2005-ES – Reciclagem a quente de pavimentos *in situ*, especificações de serviço.

O produto final destes procedimentos devem atender as especificações de misturas asfálticas definidas para camada de rolamento, *binder* ou base.

2.10.1.1 Reciclagem a quente em usina estacionária

A reciclagem a quente em usina, se detém na obtenção do RAR através da remoção por fresagem do revestimento asfáltico em questão, e então transportado à usina, onde o fresado é reciclado a quente, podendo haver adição de agregados virgens, como também ligante virgem e/ou agentes rejuvenescedores. Segundo DNIT (2006), o tipo de usina mais comum no Brasil é o tipo “Drum-Mixer”. ARRA (2001) destaca que, usualmente em reciclagens a quente em usina tipo Drum-Mixer, a proporção de RAR para agregados virgens é geralmente de 30 para 50 por cento. A mistura reciclada a quente então é transportada para o trecho de origem, onde é assentado com o mesmo maquinário de misturas a quente.

As figuras 9 e 10 ilustram o RAR sendo reaproveitado em mistura reciclada em usina Drum-Mixer.

Figura 9 - RAR no processo de mistura em usina Drum-Mix



Fonte: FHWA, 1997.

Figura 10 - Usina Drum-Mix em processo de reciclagem de RAR



Fonte: ARRA, 2001.

2.10.1.2 Reciclagem a quente “*in situ*”

A Reciclagem a quente *in situ*, chamada de *Hot In-place Recycling* (HIR) em bibliografias americanas se depreende por uma reciclagem do material fresado, (RAR) podendo ser adicionado agregado virgem, ligante asfáltico novo ou agente rejuvenescedor. O processo ocorre diretamente no local de origem, sem o transporte para a usina. De acordo com ARRA (2001), o processo se dá por aumento da temperatura do pavimento a fim de amaciá-lo, e então é submetido ao processo de remoção por fresagem em uma determinada espessura. O RAR é então misturado

dentre o comboio de reciclagem e depositado no lugar especificado e compactado com maquinário convencional de misturas a quente. Segundo o DNIT (2006) e Kandhal e Mallick (1997), a operação de reciclagem a quente *in situ* pode ser de passagem única ou passagem dupla. No tipo de passagem única, o RAR é misturado com materiais novos ou virgens e então depositado e compactado em uma única camada. No processo duplo, o RAR reciclado é recompactado formando uma camada de ligação ou *Binder*, subjacente a uma camada de desgaste posteriormente colocada. Este tipo de reciclagem deve ser destinado à correção de patologias superficiais do pavimento, como as da classe funcional, tais como afundamentos por trilha de roda, exsudação, corrugações, etc. Isto se dá devido ao emprego de uma camada fina de material reciclado, conforme o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006).

Na reciclagem a quente *in situ*, existem dois tipos já testados pelo DNER:

- Método Marini;
- Método Wirtgen.

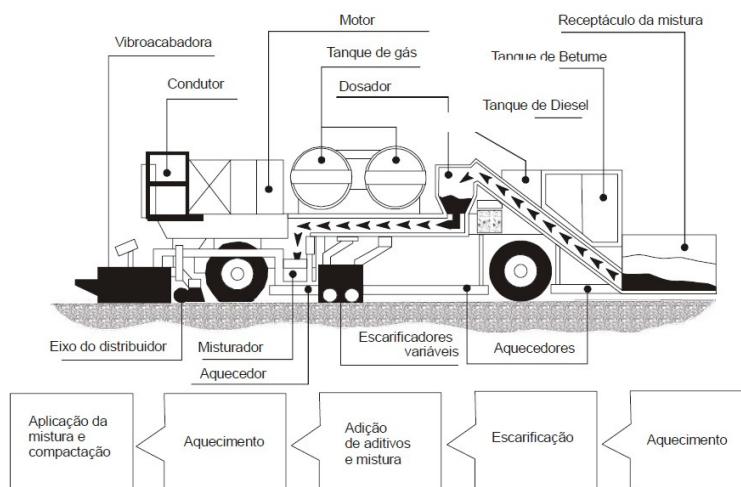
No Método Marini, o revestimento é fresado a frio, o qual é misturado em usina Drum-mixer móvel, com adição de materiais novos, como agente rejuvenescedor, ligante e agregado. Posteriormente é espalhado por vibro-acabadora e então compactado.

O DNER contemplava este procedimento nas especificações da Norma ES-188/87, substituída pela DNIT ES 034/2005;

Já no método Wirtgen, a reciclagem é realizada utilizando a Wirtgen Remixer. A fresagem neste procedimento acontece a quente. O DNER normatizava este procedimento por meio da norma ES-187/87, também substituída, pela Norma ES 034/2005.

A figura 11 é um esquema de como funciona uma recicladora a quente.

Figura 11 - Esquema de máquina recicladora a quente in situ



Fonte: DNIT, 2006.

Este método de reciclagem requer os mesmos ensaios necessários para o procedimento em usina estacionária. Os resultados da aplicação deste método comprovam grande economia de energia.

2.10.2 Reciclagem a frio

A Reciclagem a frio ou *Cold Recycling* trata-se do processo de reciclagem do pavimento realizada com a ausência de calor na fabricação da mistura, no local ou em usina estacionária. Normalmente na reciclagem a frio, é adicionado ao RAR emulsão asfáltica ou ligante novo e agregados virgens, formando assim a mistura. A reciclagem a frio é normalmente utilizada para a restauração estrutural da base da pavimentação.

Segundo DNIT (2006), a reciclagem a frio pode ser aproveitada com desempenho satisfatório nos casos a seguir:

- Vias com volume de tráfego baixo;
- Acostamentos deteriorados de vias principais;
- Uso do material como base estabilizada.

A Reciclagem a frio se divide em Duas Categorias:

- Reciclagem a frio *in situ* (*Cold Recycling In-Place*);
- Reciclagem a frio em usina (*Cold Recycling Central Plant*);

Ainda de acordo com DNIT, algumas razões que justificam o uso da reciclagem a frio dos pavimentos:

- Ganho de desempenho estrutural, principal vantagem deste processo;
- Reconfecção das camadas da pavimentação, correção de problemas devidos à má dosagem;
- Correção nas patologias da superfície do revestimento;
- Uso de estabilizantes a fim de aumentar a resistência do material em relação à umidade.

Alguns fatores devem ser observados no emprego da reciclagem a frio de pavimentos, tais como:

- Interrupção do trânsito, devido à lenta cura da mistura asfáltica;
- Se empregado estabilizante químico, a resistência depende do clima umidade e temperatura.

2.10.2.1 Reciclagem a frio *In situ*

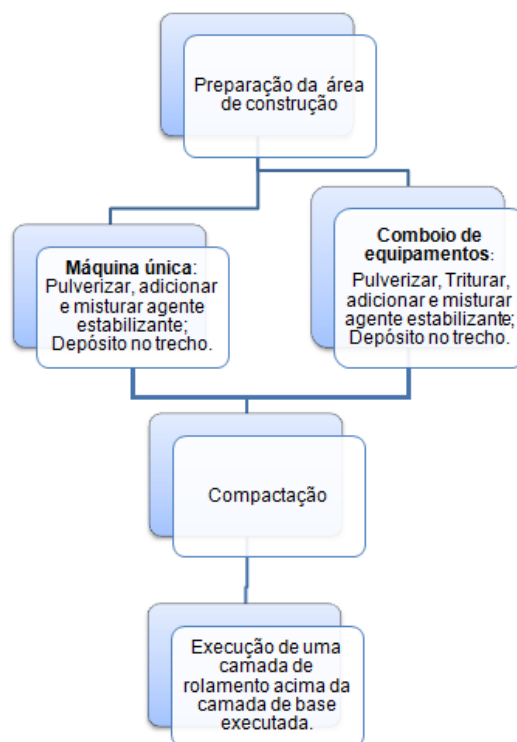
Segundo Kandhal e Mallick (1997), a reciclagem a frio *in situ* pode ser executada de duas maneiras:

- Em grande profundidade;
- Profundidade parcial.

Na reciclagem de grande profundidade, as camadas de revestimento asfáltico, base e até sub-base são trituradas, e posteriormente misturadas com ligante e depositadas como base estabilizada do pavimento.

A reciclagem a frio de profundidade parcial remove de 50 mm a 100 mm do revestimento asfáltico e é misturado com ligante novo, para reutilização como base do pavimento para um tráfego de pequeno a médio porte. A figura 12 mostra o processo de reciclagem a frio *in situ*.

Figura 12 - Fluxograma de atividades na reciclagem a frio *in situ*



Fonte: Kandhal e Mallick (Adaptado e Traduzido), 1997.

2.10.2.2 Reciclagem a frio em usina

A Reciclagem a frio em usina consiste no transporte do material recuperado para usina estacionária, quando por algum motivo este não possa ficar *in loco* ou a reciclagem a frio *in situ* não se aplique. O processo ocorre em usina estacionária e a frio, ou seja, sem calor. Então são dosadas misturas, podendo fazer parte dela agentes rejuvenescedores (AR), emulsão asfáltica (EAP) nova e também agregados virgens.

De acordo com Kandhal e Mallic (1997), os tipos mais utilizados de usinas são as do tipo Gravimétricas, e as do tipo Drum-Mixer. A figura 13 demonstra uma usina de reciclagem a frio.

Figura 13 - Processo de reciclagem a frio em usina



Fonte: Kandhal e Mallick, 1997.

Esse breve referencial teórico demonstrou de forma sucinta uma abordagem sobre os tipos de revestimentos asfálticos, com enfoque no PMF, alvo desta pesquisa. Também foi abordado o processo de fresagem, a fim de reunir maiores informações sobre a obtenção do agregado fresado (RAR) e como é sua caracterização e sua utilização no processo de reciclagem de acordo com variados autores, brasileiros e estrangeiros.

2.11 Pesquisas sobre misturas a frio

Aqui serão apresentados alguns trabalhos de autores diversos, sobre a área de misturas a frio, alvo desta pesquisa, no intuito de enriquecer o conteúdo. Na tabela 2, são demonstrados estas pesquisas e seus resultados. Na primeira coluna, constam os autores das pesquisas. A segunda coluna consta com uma breve descrição sobre a pesquisa do autor. Nas demais colunas, constam alguns resultados, como resistência a tração e módulo de resiliência.

Tabela 2 – Pesquisas sobre misturas a frio

Autor	Descrição	Resistência à tração	Módulo de Resiliência
Aguiar e Rocha	PMF com quartzo (Faixa D DNER)	0,21 MPa	/
Moreira <i>et al</i>	Misturas asfálticas recicladas (75% fresado, faixa F DNER)	0,23 MPa	522 MPa
Rodrigues <i>et al</i>	PMF com Ardósia (Faixa C DNIT)	0,39 MPa	1.343 MPa
Silva <i>et al</i>	PMF (Agregado virgem, faixa C DNIT)	0,44 MPa	1.616 MPa

Fontes: Aguiar e Rocha (2010); Moreira *et al* (2005); Rodrigues *et al* (2010); Silva *et al* (2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Agregado Fresado

Neste trabalho, o qual visa um estudo sobre o desempenho de misturas asfálticas recicladas a frio, foi coletada uma quantia de aproximadamente de 200 kg de material fresado no trecho compreendido entre km 370 e o km 375 da rodovia federal BR-386, próximo à cidade de Fazenda Vilanova que situa-se entre os municípios de Estrela-RS e Tabaí-RS, conforme a Figura 14:

Figura 14 – Local de extração de amostras do material fresado. BR 386 - Estrela



Fonte: Google Maps, 2015.

O pode-se afirmar que o agregado fresado está isento de impurezas, pois o mesmo foi peneirado e limpo.

É representado na figura 15 o agregado fresado (RAR) logo após a coleta.

Figura 15 - Agregado fresado

Fonte: Autor, 2016.

3.1.2 Pó de Pedra

Foi utilizado o agregado pó de pedra, mostrado na imagem 16, doado pela empresa Construbrás, com sede situada na cidade de Sarandí-RS. A Jazida que originou este agregado localiza-se entre os municípios de Barra Funda-RS e Constantina-RS. A esse agregado foi adicionado à composição da mistura pois o agregado fresado adquirido não continha uma porção de miúdos e finos suficiente para a moldagem dos corpos de prova para a faixa escolhida (17% retido na peneira Nº200 e 3% passante na mesma).

Figura 16 - Pó de pedra

Fonte: Autor, 2016.

3.1.3 Emulsão Asfáltica

O ligante asfáltico utilizado na moldagem dos corpos de prova é o RM-1C. Segundo ABEDA (2001), este é um ligante asfáltico do tipo emulsão asfáltica de ruptura média, de baixa consistência. Contém 62% de cimento asfáltico e viscosidade de 20 a 200 S. Sua utilidade resume-se em pré-misturados a frio e pinturas de ligação. A tabela 3 expõe as principais propriedades da emulsão RM-1C.

Tabela 3 - Principais propriedades da emulsão RM-1C

Propriedades Técnicas Emulsão RM-1C	
Aspecto:	Líquido marrom a temperatura ambiente
Odor:	Característico
Ph:	2,5 a 4,5
Ponto de Fusão/ponto de congelamento:	-1,0° C
Ponto de ebulição inicial e faixa de temperatura de ebulição:	100° C @ 760 mmHg
Ponto de fulgor	235° C
Densidade	0,97 @ 15.6/15,8° C
Solubilidade:	Se dispersa rapidamente em água
Viscosidade	20-200 SSF @ 50° C
Teor de Asfalto (%):	62

Fonte: Petrobrás, 2016

3.2 Método

3.2.1 Teor de ligante do agregado fresado

Nesta pesquisa, foi desprezado o teor de ligante contido no agregado fresado, para a realização das misturas. O agregado foi tratado como virgem por motivos das misturas serem realizadas a frio, sem a possibilidade de união do ligante envelhecido com o ligante por processos a quente. Para uma caracterização complementar do agregado fresado, utilizou-se dados de Dartora (2015), que fez uso em sua pesquisa sobre CBUQ reciclado, do mesmo agregado fresado desta pesquisa. A autora respeitou os critérios estabelecidos segundo a norma DNER ME 053/94 – Misturas Betuminosas – percentagem de ligante. Segundo Dartora (2015), Através do Ensaio Rotarex, foi obtido um valor de 5,8 % de teor de ligante

betuminoso no agregado fresado. A autora frisa que após a remoção do ligante, a amostra demonstrou granulometria mais fina. A tabela 4 demonstra o teor de ligante contido no agregado pelo ensaio Rotarex.

Tabela 4 - Ensaio Rotarex

Fresado	Massa (g)
Amostra total	1200,1
Amostra após a extração de betume	943,5
Betume extraído	58,6

Fonte: Dartora, 2015.

3.2.2 Granulometria da mistura

Neste trabalho, para a confecção das misturas asfálticas, o agregado fresado foi peneirado e separado em diferentes graduações segundo as peneiras, para a composição da mistura. A figura 17 demonstra os agregados separados por suas dimensões:

Figura 17 - Agregado fresado separado de acordo com sua graduação



Fonte: Autor, 2016.

A fim de se ter uma maior chance de sucesso nos resultados, foi usada a faixa granulométrica C (DNIT – ES 153/2010), pois possui uma granulometria mais densa. Diante disto, foi então adicionado uma porcentagem de pó de pedra na composição da mistura, na intenção de produzir uma mistura com porcentagem de vazios menor,

e também obter um arranjo com comportamento mais solidário diante dos esforços destinados, propriamente para destinação como camada de rolamento.

A tabela 5 demonstra as faixas especificadas de acordo com o DNIT.

Tabela 5 - Faixas granulométricas especificadas pelo DNIT

Peneiras		% mínima passante				
Pol.	Mm	A	B	C	D	Tolerância da faixa de projeto
1"	25,4	100	-	100	-	± 7%
¾"	19,1	75-100	100	95-100	100	± 7%
½"	12,7	-	75-100	-	95-100	± 7%
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	± 7%
Nº 4	4,8	10-35	15-40	20-40	25-45	± 5%
Nº 10	2,0	5-20	10-25	10-25	15-30	± 5%
Nº 200	0,075	0-5	0-5	0-8	0-8	± 2%
Betume solúvel no CS ₂ %		4-6	4-6	4-6	4-6	± 2%

Fonte: DNIT, 2010. (Adaptado)

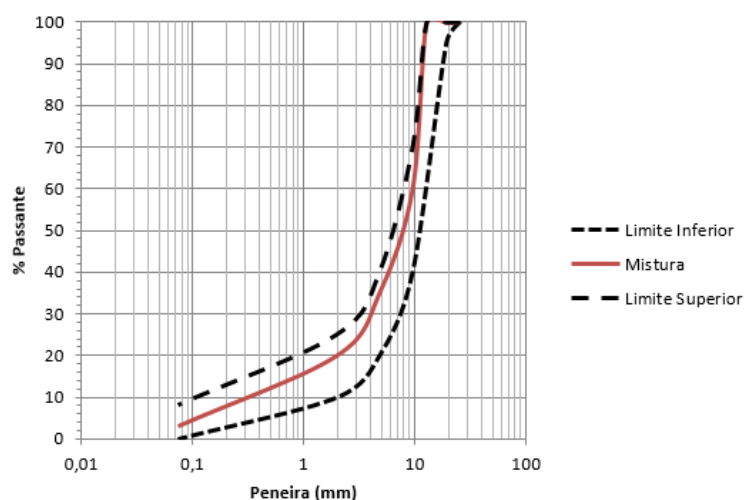
É representada a seguir, através da tabela 6 e gráfico da figura 18, a granulometria escolhida para a mistura, dentre os limites mínimos e máximos:

Tabela 6 - Granulometria escolhida

Faixa C DNIT			
Peneira (mm)	Passante mín %	Passante Máx %	Granulometria Mistura
25,4	100	100	100
19,1	95	100	100
12,7	40	100	100
9,5	20	70	60
4,8	10	40	35
2	0	25	20
0,075	0	8	3

Fonte: Autor, 2016.

Figura 18 - Gráfico da curva granulométrica da mistura com os limites superiores e inferiores



Fonte: Autor, 2016.

A tabela 7 demonstra, com mais detalhes os agregados e suas porcentagens, utilizados para a confecção da mistura:

Tabela 7 - Massas dos agregados para uma mistura de 1000g

Mistura para CP de 1000 g			
Peneira (retido)	Massa (g)	Agregado (tipo)	Porcentagem (total)
25,4	0	/	/
19,1	0		
12,7	0		
9,5	400	Fresado	80%
4,8	250	Fresado	
2	150	Fresado	
0,075	170	Pó Brita	20%
Fundo	30	Pó Brita	

Fonte: Autor, 2016.

3.2.3 Cálculo do Teor Preliminar de Emulsão Asfáltica

Foi utilizado o método de dosagem por superfície específica dos agregados. Desprezou o ligante contido no agregado fresado. Este método de dosagem se

resume na fórmula de Vogt, porém adaptada por Duriez para as peneiras brasileiras (BERNUCCI et al, 2008), conforme a equação 1:

$$100\Sigma = 0,33 P2 + 0,81 P1 + 21,9 S1 + 135 F \quad (1)$$

Onde:

Σ =Superfície específica dos agregados;

P2 = massa do material retido entre as peneiras 1/2" – N°4;

P1 = massa do material retido entre as peneiras N°4 – N°10;

S1 = massa do material retido entre as peneiras N°80 – N°200;

F = massa do material passante na peneira N°200.

Calculou-se então, o teor de asfalto residual (p), em relação a massa dos agregados da mistura, através da equação 2:

$$p = K \times \Sigma \times 0,2 \quad (2)$$

Onde:

K = Módulo de riqueza; para PMFs densos, Santana indica o uso de 3,2~4,5.

Por meio das equações 3 e 4, foi obtido o teor de asfalto (p') e de emulsão asfáltica (p'_{ea}) sobre o total da mistura asfáltica:

$$p' = \frac{100 \times p}{100 + p} \quad (3)$$

$$p'_{ea} = \frac{100 \times p'}{t} \quad (4)$$

Onde:

t = teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica.

A partir deste teor preliminar de emulsão, foi então moldado uma série de CPs para as análises volumétricas e mecânicas.

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova Marshall

A moldagem dos corpos de prova foi executada de acordo com o procedimento Estabilidade Marshall, desenvolvido por Bruce Marshall, engenheiro do *Bureau of Public Roads* (EUA) que propôs na década de 40, uma técnica de dosagem a quente para o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*United States Army Corps of Engineers* – USACE) (Balbo, 2007). No Brasil, este procedimento é normatizado pela ME 107/94, norma do DNER.

Seguindo os critérios estabelecidos na norma, foram preparados 3 corpos de prova, para 1% e 2% \pm do teor preliminar de emulsão asfáltica, totalizando 15 corpos de prova. Foi calculada a quantidade de materiais para a confecção de cada corpo de prova, pesando um total de 1000 g.

Foram então, pesados os agregados para um CP a cada vez. Depositado em recipiente apropriado de aço estampado. Então preparou-se o agregado realizando uma cratera a fim de receber o ligante para a mistura conforme a figura 19.

Figura 19 - Adição da emulsão asfáltica na mistura

Fonte: Autor, 2016.

Ressalta-se que para a moldagem de misturas a frio, deve-se sempre ter controle rigoroso da granulometria da mistura, respeitando as tolerâncias da faixa escolhida, pois se tratando de PMF, a mistura apresenta resistências menores quando comparadas com misturas a quente, justificando maiores cuidados. Realizou-se a mistura de forma rápida, manualmente e foi deixado curar à temperatura ambiente por 4 horas. Acomodou-se a mistura dentro do molde Marshall com 15 golpes de espátula ao redor do molde e 10 no centro. Teve início a compactação com 75 golpes em cada face (250 Kgf). Após a compactação, foram colocados os CP com molde em estufa, com temperatura de 60^o por 24 horas. Retirou-se da estufa os CPs com molde para esfriar por no mínimo duas horas em temperatura ambiente. Então foram extraídos os CPs dos moldes cilíndrico Marshall com auxílio do extrator, com manuseio cauteloso, evitando deformações ou fraturas no corpo de prova. Foram anotadas as medidas dos CPs, medido quatro vezes com o paquímetro em diferentes posições. Fez-se então a média aritmética das quatro medidas e procedeu-se à obtenção das densidades aparentes dos CPs.

3.2.5 Densidade Aparente

Foram estudados dois métodos para a obtenção da densidade aparente das misturas asfálticas. Primeiramente, o método normatizado pela ASTM D 2726, apresentado na equação 5, utilizada nos Estados Unidos.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{SSS_{sub}}} \times 0,9971 \quad (5)$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente de mistura compactada, em g;

M_s = massa do corpo de prova seco ao ar, em g;

M_{SSS} = massa do corpo de prova saturado com superfície seca, em g;

$M_{SSS_{sub}}$ = massa de corpo de prova imerso em água destilada, em g;

0,9971 = Peso específico da água em 25° C, em g/cm³.

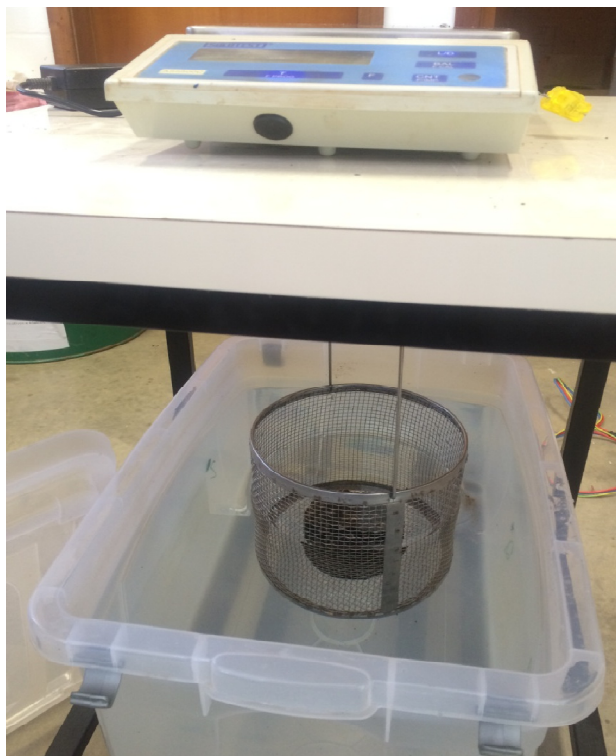
As figuras 20, 21 e 22 ilustram o procedimento, sendo pesado seco ao ar, submerso para a pesagem hidrostática e então com sua superfície seca, respectivamente.

Figura 20 - Pesagem do CP seco ao ar



Fonte: Autor, 2016.

Figura 21 - Pesagem Hidrostática do CP



Fonte: Autor, 2016.

Figura 22 - CP sendo seco para sua condição de superfície seca



Fonte: Autor, 2016.

No Brasil, é muito utilizado o método normatizado pela norma DNER ME117/94, conforme a equação 6.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{SSSub}} \times 0,9971 \quad (6)$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente de mistura compactada, em g;

M_s = massa do corpo de prova seco ao ar, em g;

M_{SSSub} = Massa do corpo de prova imerso em água destilada, em g;

0,9971 = Peso específico da água em 25 °C, em g/cm.

3.2.6 Massa Específica Real dos Agregados Graúdos

O procedimento para a determinação da massa real dos agregados graúdos é padronizado pela norma DNER ME 081/98. O agregado graúdo foi deixado 24 horas submerso, como demonstra a figura 23, e então, em sua condição saturada, foi pesado com sua superfície seca, como aparece na figura 24, e recolocado na cesta para pesagem hidrostática. Após a pesagem hidrostática, foi seco ao sol até constância de massa e pesado seco, ao ar.

Para a obtenção da massa específica real do agregado graúdo, segue-se de acordo com a equação 7 descrita na norma:

$$D = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (7)$$

Onde:

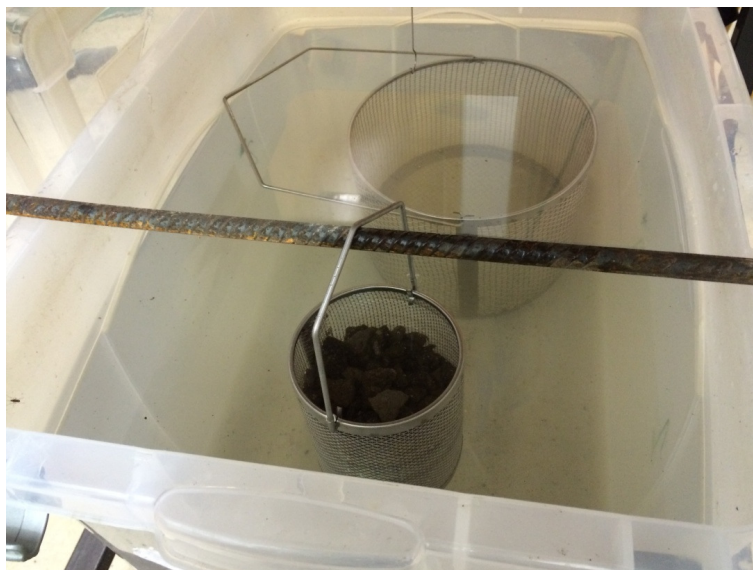
D = Densidade do agregado graúdo;

M_s = Massa do agregado seco ao ar;

M_h = Massa do agregado na condição saturada com superfície seca;

L = Massa do agregado submerso

Figura 23 - Agregado submerso por 24 horas



Fonte: Autor, 2016.

Figura 24 - Agregado sendo seco para sua condição de superfície seca



Fonte: Autor, 2016.

3.2.7 Determinação da massa específica real do agregado miúdo

Para a obtenção da massa específica real da porção de miúdos, foi seguida a norma do DNER ME 84/95, obtendo assim os dados para a equação 8:

$$D = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (8)$$

Onde:

D = Densidade real do agregado miúdo;

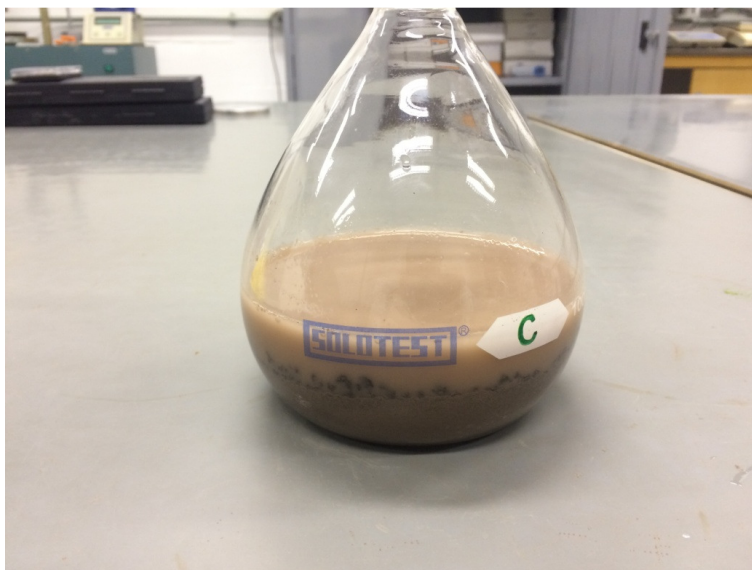
a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

d = massa do picnômetro cheio d'água, em g.

Figura 25 - Picnômetro com a amostra e água



Fonte: Autor

3.2.8 Densidade Máxima Teórica (DMT)

A Densidade Máxima Teórica, ou somente DMT, é utilizada para calcular o volume de vazios da mistura. Segundo Bernucci (2008, p. 209), a DMT é “a razão entre massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto.”

Foi utilizado nesta pesquisa o método de Ponderação das Massas Específicas Reais para a obtenção da DMT a qual se dá pela equação 9:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%A_g}{G_{ag}} + \frac{\%A_m}{G_{am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (9)$$

Onde:

DMT = Densidade Máxima Teórica;

%a = Porcentagem de Emulsão Asfáltica (EAP);

%A_g, %A_m, e %f = Porcentagem de Agregado Graúdo, Agregado Miúdo e *Filler* da mistura, respectivamente;

G_a, G_{ag}, G_{am} e G_f = Massas específicas Reais da emulsão e dos respectivos agregados.

3.2.9 Determinação do Volume de Vazios

De acordo com DNIT, através da Norma ES 153/10, o Volume de vazios de misturas a frio deve estar numa faixa compreendida entre 5~30%, conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Classificação granulométrica quanto à porcentagem de vazios

Denominação	% vazios
Aberto	22 a 30
Semi-densos	15 a 22
Densos	5 a 15

Fonte: ABEDA, 2001.

Existem dois métodos para a obtenção do volume de vazios das misturas asfálticas. Os métodos mais usuais no país são o método *Asphalt Institute*, procedimento americano, e o normatizado pela ABNT NBR 16273:2014.

Para o método do *Asphalt Institute* apud. ANTT 2014, a obtenção se dá pela equação 10.

$$V_v = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} \quad (10)$$

Onde:

V_v = volume de Vazios;

G_{mm} = densidade máxima medida da mistura asfáltica solta;

G_{mb} = densidade relativa aparente do corpo de prova compactado.

Já no procedimento normatizado pela ABNT NBR 16273:2014 é obtido através da equação 11.

$$V_v = \frac{(DMT-d)}{DMT} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

V_v = volume de vazios;

DMT = densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;

d = densidade aparente do corpo de prova compactado.

3.2.10 Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall

Os CP's foram colocados em estufa sob temperatura constante de 40° C por 2 horas. Após o período determinado, os CPs então foram levados ao molde de fluência junto ao equipamento de compressão dotado de velocidade do êmbolo de 50 mm/min e medidor de fluência ou extensômetro com precisão de 0,01 mm. Os corpos de prova que diferiam de 63,5 mm, tiveram suas estabilidades retificadas através do fator de correção f, presente na norma DNER 107/94, conforme equação 12:

$$f = 927,23 h^{-1,64} \quad (12)$$

Onde:

f = fator de correção;

h = média aritmética da espessura do corpo de prova.

3.2.11 Escolha do teor de projeto

Segundo Balbo (2007), ainda não se tem um critério consagrado para a escolha do teor de projeto para misturas asfálticas a frio, sendo sua escolha por métodos empíricos, muitas vezes não disponíveis na literatura, de modo organizado. A escolha do teor de projeto foi decidida segundo a metodologia citada por Bernucci, para misturas a quente, critério que leva em consideração o teor ótimo para a

Estabilidade Marshall, mistura com menor volume de vazios e mistura com maior densidade aparente. Fazendo então uma média aritmética destes teores ótimos, tem-se o teor de projeto. Então foram moldados 3 CPs neste teor para analisar seu Módulo de Resiliência e Resistência à tração diametral.

3.2.12 Módulo de Resiliência

Segundo Hveem, apud Bernucci et al. (2008), o módulo de resiliência é a relação entre deformações recuperáveis de uma mistura asfáltica com as suas fissuras. No país, o ensaio de módulo de resiliência é padronizado pela norma do DNER ME 133/94 a qual define que o módulo de resiliência é uma relação entre uma tensão de tração (σ_t) a qual é aplicada repetidamente e diametralmente e a deformação específica recuperável (ϵ_t). É expresso pela equação 13:

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (13)$$

Onde:

MR = Módulo de Resiliência;

σ_t = Tensão de tração;

ϵ_t = Deformação específica recuperável.

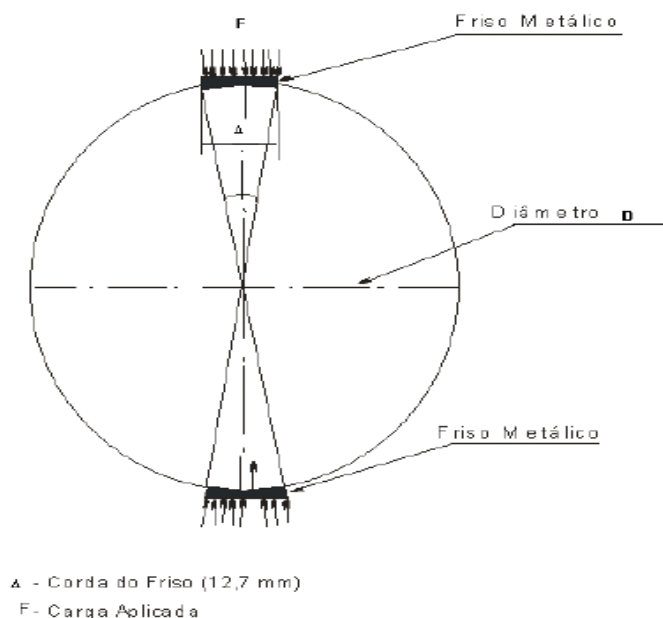
3.2.13 Determinação de Resistência à tração por compressão diametral

A Resistência à tração foi ensaiada na mistura asfáltica a fim de se ter um melhor controle de qualidade. O DNIT normatiza o procedimento através da ME 136/2010. Os corpos de prova devem contar com altura entre 3,5 cm e 6,5 cm e 10 cm de diâmetro, com variação de 0,2 cm para mais ou para menos.

- Mediu-se a altura do corpo de prova em 4 posições diferentes, e então anotou-se a média aritmética entre os 4 valores;
- Mediu-se o diâmetro do CP com paquímetro em 3 posições diferentes. Anota-se a média aritmética entre os 3 valores;
- Colocou-se o corpo de prova em sistema de refrigeração a 25° C + - 0,1°C, por um tempo de 2 horas;

- Foi ajustado então o CP no pórtico de compressão normatizado para ensaio de resistência a tração por compressão diametral conforme figura 26:

Figura 26 - Corpo de prova ajustado em pórtico de compressão diametral



Fonte: DNIT ME 136, 2010.

Aplicou-se a carga de 0,8 mm/s até a ruína do corpo de prova. Então anotou-se valor da carga de ruptura (F).

A Resistência à tração é dada pela equação 14 (DNIT, 2010).

$$\sigma_R = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (14)$$

Onde:

σ_R = resistência à tração, em Mpa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = altura do corpo de prova, em cm.

A figura 26 exemplifica o ensaio de resistência à tração por compressão diametral no Laboratório de Solos e Pavimentação da UNISC.

Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor, 2016.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Teor de Emulsão Preliminar

Conforme descrito na metodologia, para a obtenção do teor preliminar de emulsão asfáltica, foi seguida a fórmula de Vogt, adaptada por Duriez (BERNUCCI et al, 2008), apresentando os seguintes resultados:

- Teor de emulsão asfáltica $p'_{ea} = 68,15g$ para uma mistura de 1000g. Este resultado foi arredondado para 70 g, ou seja, teor de emulsão asfáltica de 7%.

4.2 Resultados Volumétricos das misturas

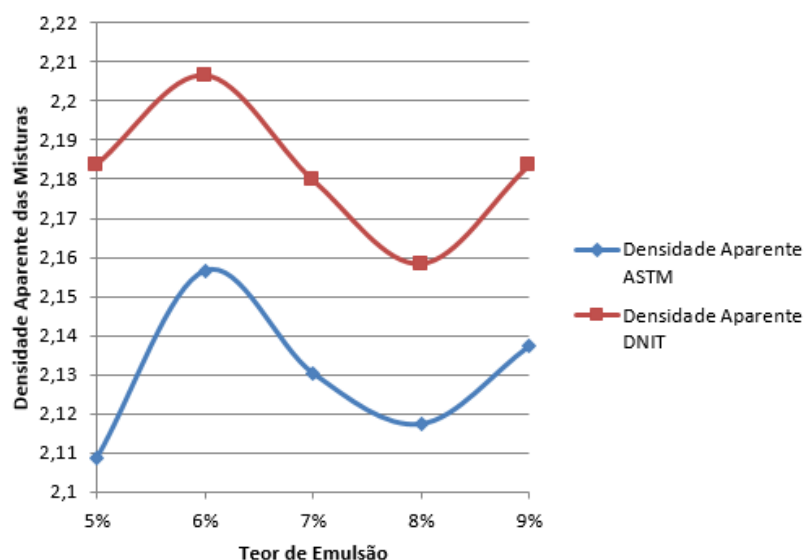
Os parâmetros volumétricos de misturas asfálticas são importantes pois através deles, pode-se presumir seu desempenho quando empregadas em campo (Asphalt Institute, 2001 *apud*. ANTT, 2014). Através destes parâmetros, são conhecidos os teores ótimos em cada aspecto da mistura, possibilitando assim adotar um teor de projeto (BERNUCCI et al, 2008). A densidade aparente das misturas foi o primeiro critério a ser analisado, pelos dois métodos, ASTM e pela norma brasileira DNIT. São demonstrados então os resultados por ambos os métodos conforme a tabela 9 e o gráfico mostrado na figura 27:

Tabela 9 - Relação Teor de emulsão x Densidades aparentes pelos métodos ASTM e DNIT

Teor de Emulsão Asfáltica	Densidade Aparente ASTM (g/cm ³)	Densidade Aparente DNIT (g/cm ³)
5	2,108	2,184
6	2,157	2,206
7	2,130	2,180
8	2,117	2,158
9	2,137	2,183

Fonte: Autor, 2016.

Figura 27 - Gráfico da relação Teor de emulsão x Densidade aparente



Fonte: Autor, 2016.

Percebe-se que há uma divergência de valores entre os dois métodos. As curvas são semelhantes, porém as densidades pelo método DNIT obtiveram valores menores. Pôde-se perceber também que em ambos os métodos, o teor ótimo para a densidade foi de 6% de ligante.

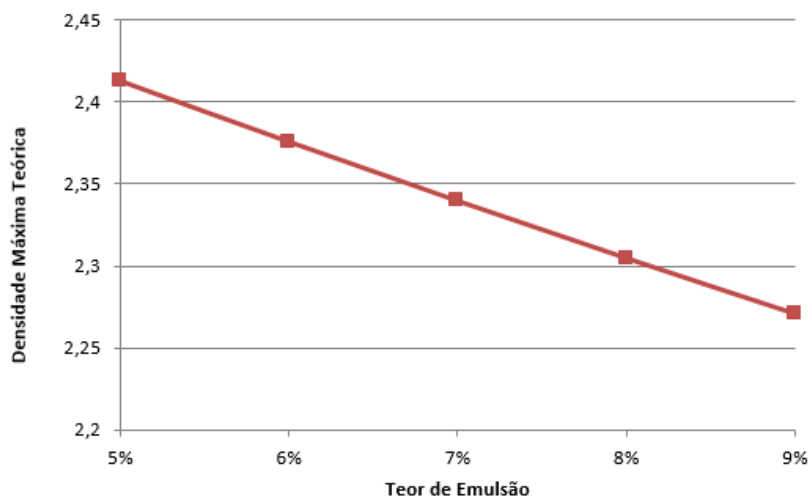
O próximo critério analisado foram as densidades máximas teóricas, das misturas. A Densidade Máxima Teórica (DMT) foi determinada, conforme visto no capítulo 3, pelo método citado por Bernucci et al. (2008).

A seguir, a tabela 10 e a figura 28, que demonstra o gráfico expondo os resultados da relação Teor de emulsão e Densidade máxima Teórica:

Tabela 10 - Relação Teor de emulsão e Densidade Máxima Teórica

Teor de Emulsão	Densidade Máxima Teórica (g/cm ³)
5	2,412
6	2,375
7	2,339
8	2,304
9	2,271

Fonte: Autor, 2016.

Figura 28 – Gráfico com a relação teor de emulsão e densidade máxima teórica

Fonte: Autor, 2016.

Pode-se perceber que há um declínio em relação à densidade máxima teórica e o teor de emulsão. A medida que se aumenta o teor de emulsão asfáltica, a densidade máxima teórica da mistura asfáltica com agregado fresado sofre queda. Este fato é explicado pelo fato de o componente agregado-ligante torna-se menos denso.

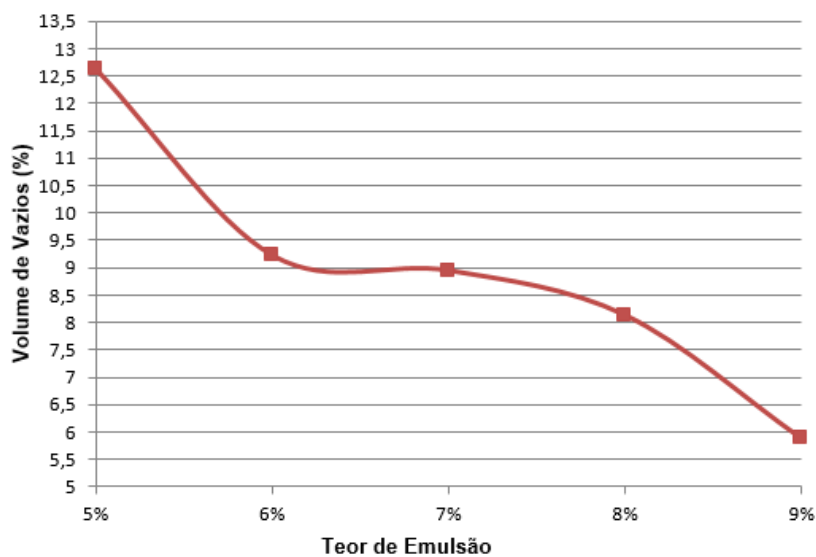
Por fim, foi analisado o Volume de Vazios das misturas asfálticas com fresado, utilizando as densidades aparentes obtidas pelo método ASTM e pelo método DNIT. A seguir, são mostradas as tabelas 11 e 12 e as figuras 29 e 30 com gráficos expondo os resultados do Volume de vazios, pelos dois métodos.

Tabela 11 - Relação teor de emulsão e volume de vazios, método ASTM

Teor de Emulsão	Volume de Vazios
5	12,62%
6	9,22%
7	8,95%
8	8,13%
9	5,88%

Fonte: Autor, 2016.

Figura 29 - Relação volume de vazios e teor de emulsão, método ASTM



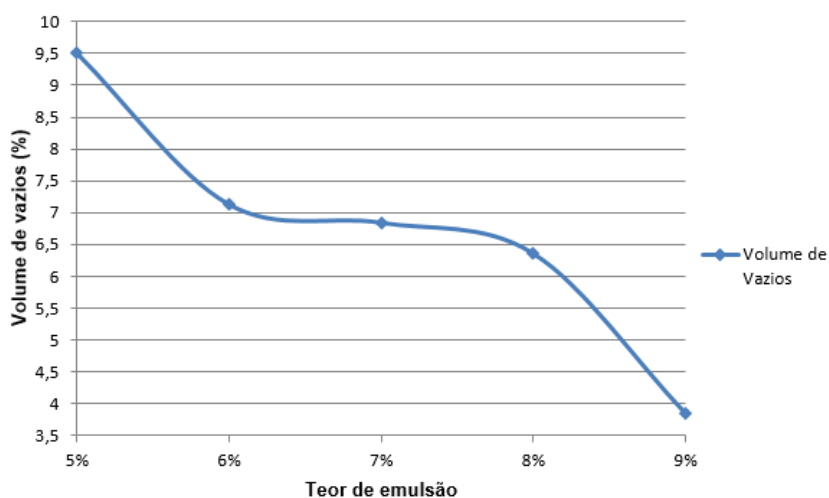
Fonte: Autor, 2016.

Tabela 12 - Relação Teor de emulsão X Volume de vazios, método DNIT

Teor de Emulsão	Volume de Vazios
5	9,50%
6	7,12%
7	6,84%
8	6,35%
9	3,85%

Fonte: Autor, 2016.

Figura 30 - Relação teor de emulsão e volume de vazios, método DNIT



Fonte: Autor, 2016.

Percebe-se através destes resultados que, ao passo que se aumenta o teor de emulsão asfáltica, o volume de vazios da mistura asfáltica reciclada decai, isto se dá pelo preenchimento dos vazios pela emulsão asfáltica. Os valores de vazios encontram-se todos dentro os especificados pela norma para pré-misturados a frio ES -153/10 do DNIT que é de 5 a 30%. Os resultados também se encaixaram no intervalo de misturas densas segundo ABEDA (2001), que é de 5% a 15% de vazios,

Nota-se que para este critério, em ambos os métodos, o teor ótimo foi de 9%, o qual obtém o volume de vazios mais baixo das misturas analisadas.

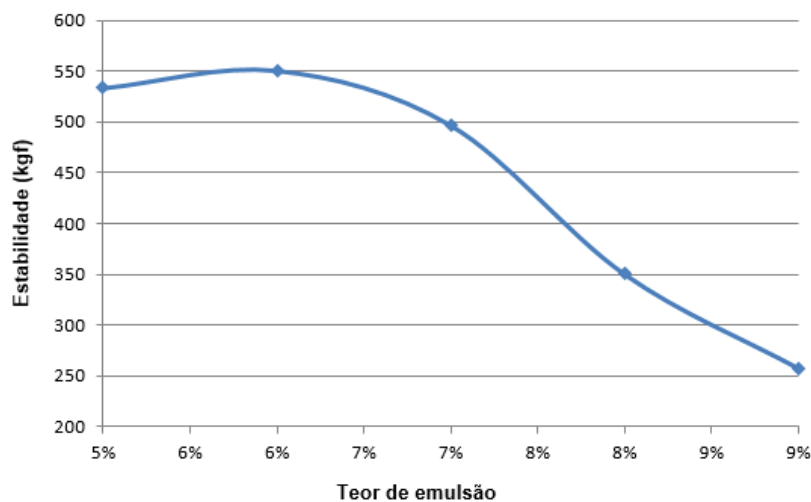
4.3 Resultados dos ensaios mecânicos das misturas

A fim de se obter um teor ótimo no que diz respeito a ensaios mecânicos, os 5 teores (5%,6%,7%,8% e 9%) foram submetidos ao ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall. Os Resultados com o devido fator de correção já aplicado são descritos na tabela 13 e gráfico da figura 31:

Tabela 13 – Estabilidade Marshall para os 5 teores de emulsão

CPs/ Teores	Est Corrig.	Est. Média (kgf)	Desvio	CV
CP5-1	534,9366	533,52	1,98	0,37
CP5-2	534,3698			
CP5-3	531,264			
CP6-1	532,7213	550,85	15,746	2,86
CP6-2	561,0954			
CP6-3	558,7403			
CP7-1	497,2618	497,08	0,81	0,16
CP7-2	497,7796			
CP7-3	496,1867			
CP8-1	323,8509	350,42	29,33	8,37
CP8-2	345,5072			
CP8-3	381,8929			
CP9-1	231,7404	257,62	24,39	9,47
CP9-2	280,1752			
CP9-3	260,9318			

Fonte: Autor, 2016.

Figura 31 - Relação teor de emulsão e estabilidade Marshall

Fonte: Autor, 2016.

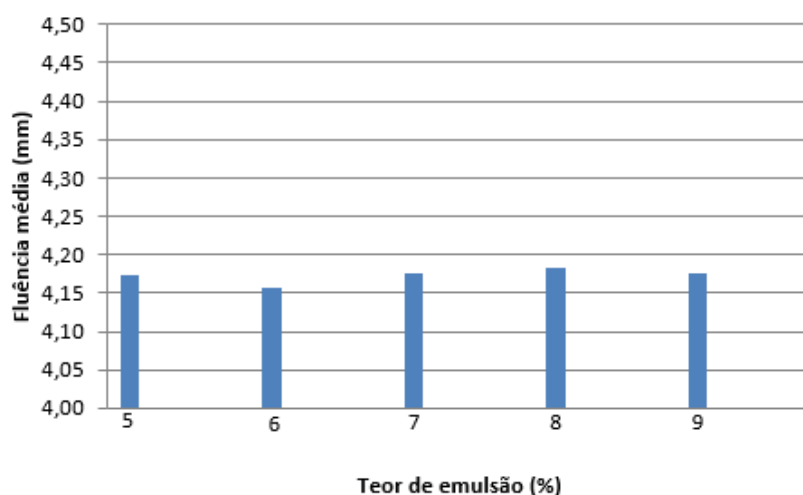
Analisando os resultados, pode-se perceber que as médias de estabilidade ficaram acima do valor exigido pela norma DNIT ES 153/10, que é de 250 kgf para 75 golpes por face. Para este parâmetro, foi percebido que o teor ótimo foi de 6%, pois obteve uma média de estabilidade superior aos demais teores de misturas.

Concomitantemente com o ensaio de Estabilidade, foi também ensaiada a Fluência Marshall, que é o deslocamento vertical total no momento em que se atinge a carga máxima obtida (BERNUCCI et al, 2008). A tabela 14 e o gráfico da figura 32 a seguir explanam os resultados obtidos para a fluência das misturas asfálticas recicladas com fresado.

Tabela 14 - Fluência das misturas recicladas, em mm

CPs/ Teores	Fluência (mm)	Fluência Média (mm)
CP5-1	4,19	4,173
CP5-2	4,16	
CP5-3	4,17	
CP6-1	4,15	4,157
CP6-2	4,2	
CP6-3	4,12	
CP7-1	4,19	4,177
CP7-2	4,18	
CP7-3	4,16	
CP8-1	4,18	4,183
CP8-2	4,17	
CP8-3	4,2	
CP9-1	4,19	4,177
CP9-2	4,19	
CP9-3	4,15	

Fonte: Autor, 2016.

Figura 32 - Fluência em relação ao teor de emulsão

Fonte: Autor, 2016.

Observou-se que nesta faixa de teores escolhida (5%, 6%, 7%, 8% e 9%) não houve grande variação de fluência obtida no ensaio com corpos de prova moldados a frio com fresado. Diante destes resultados de fluência foi constatado que ficaram dentro do intervalo padrão, referido na norma 153/10 ES do DNIT que é de 2,0 a 4,5 mm.

4.4 Escolha do teor de emulsão de projeto

Conforme descrito no capítulo 3, o teor de emulsão de projeto foi escolhido conforme cita Bernucci (2008), levando em consideração os critérios de Estabilidade Marshall, Volume de vazios e Densidade Aparente. A tabela 15 abaixo ilustra de maneira mais clara essa tomada de decisão.

Tabela 15 - Parâmetros para a escolha do teor de projeto

Parâmetros Volumétricos	Teor ótimo
Volume de vazios	9%
Densidade Aparente	6%
Parâmetros Mecânicos	-
Estabilidade Marshall	6%
Teor de Projeto (Média)	7%

Fonte: Autor, 2016.

Através destes teores de emulsão, para estes critérios, foi feita a média aritmética destes valores, obtendo o teor de projeto equivalente a 7%. De posse desse valor de teor de projeto, foram moldados 3 CPs para determinar então propriedades volumétricas e mecânicas adicionais como ensaio de Módulo de Resiliência e Resistência a tração.

4.5 Resultados Volumétricos da mistura com teor de projeto

Foram então moldados 3 CPs no teor de projeto escolhido, que é de 7%. Então foram estudados seus parâmetros volumétricos. Os resultados da mistura com teor de projeto são descritos a seguir na tabela 16.

Tabela 16 - Resultados volumétricos da mistura com teor de projeto

Teor de projeto	Densidade Aparente	Volume de Vazios %
7%	2,166	7,39

Fonte: Autor, 2016.

Percebe-se que há uma pequena divergência nos valores obtidos com teor de projeto de 7% e o teor preliminar de 7%, Essa diferença se dá pois a compactação

Marshall foi feita de modo manual, podendo assim sempre apresentar uma pequena diferença.

4.6 Resultados Mecânicos da mistura com teor de projeto

Após as análises volumétricas, procedeu-se com o ensaio de módulo de resiliência nas dependências do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Em seguida, foi dado início ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral, ensaiado nas mesmas dependências.

4.6.1 Módulo de Resiliência

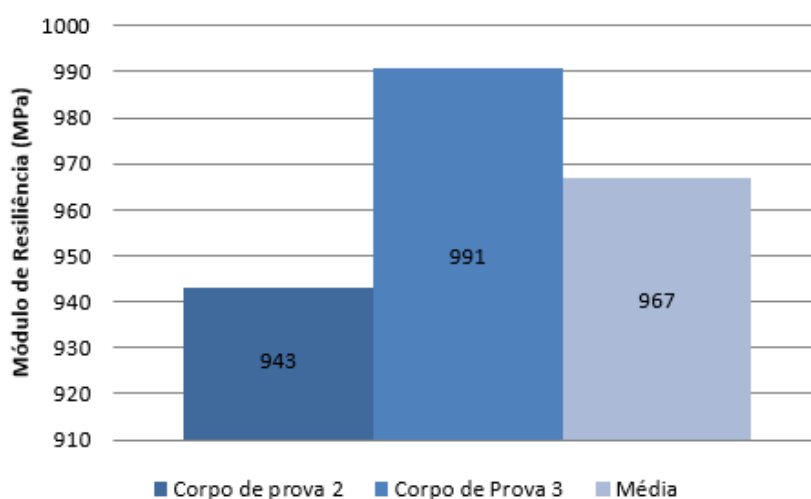
O ensaio de módulo de resiliência foi realizado de acordo com a norma brasileira 135/10 ME, do DNIT, o qual obteve os seguintes resultados, apresentados na tabela 17 e na figura 33.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência

C.P	Diâm.	Altura	MR ₁	MR ₂	MR ₃	MR	MR MEDIA (MPa)
1	10,10	6,33	/	/	/	/	967
2	10,10	6,52	962	943	924	943	
3	10,10	6,48	1013	990	969	991	

Fonte: Autor, 2016.

Figura 33 - Módulo de resiliência dos CPs teor de projeto



Fonte: Autor, 2016.

Ainda não existe no meio literário, um critério seguro para a análise dos resultados de módulo de resiliência em misturas a frio. A seguir, os resultados serão comparados com os trabalhos autores citados no referencial teórico para um maior entendimento.

Segundo os trabalhos de Moreira et al (2005), para misturas a frio com 75% de agregado fresado e faixa granulométrica F do DNER, obtiveram um módulo de 522 MPa. Já para Rodrigues et al. (2010), o módulo para seu PMF com faixa C DNIT e com agregado de ardósia foi de 1.343 MPa. Para Silva et al. (2015) e seu estudo sobre mistura PMF, também de granulometria C DNIT, obteve 1.616 MPa. Através destes resultados, percebe-se que os valores de módulo deste estudo são congruentes.

4.6.2 Resistência à tração

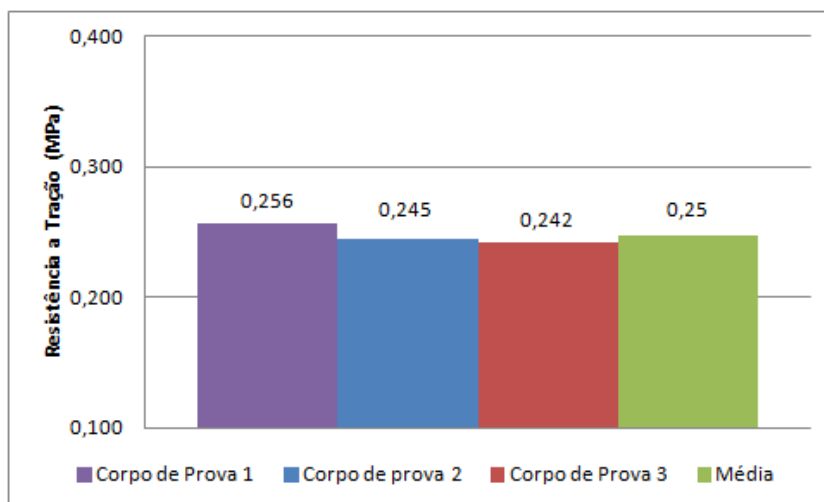
Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi respeitada a norma vigente 136/10 ME, do DNIT, conforme descrito no capítulo 3, apresentando os seguintes resultados, mostrados na tabela 18.

Tabela 18 - Resistência a tração dos CPs com teor de projeto

C.P	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Leitura	RT (MPa)
1	10,10	6,33	128	0,26
2	10,10	6,52	126	0,24
3	10,10	6,48	124	0,24

Fonte: Autor, 2016.

No quesito resistência à tração para misturas asfálticas a frio, não se têm também critérios confiáveis para avaliação dos resultados, então os mesmos serão comparados com os mínimos previstos pela norma de Concreto Asfáltico (CBUQ), 031/04 ES do DNIT, A figura 34, demonstra os valores de maneira mais clara.

Figura 34 - Resistência a tração CPs teor de projeto

Fonte: Autor, 2016.

Os resultados de resistência a tração por compressão diametral dos CPs de projeto ficaram abaixo do mínimo exigido para misturas a quente que é de 0,65 MPa segundo a norma 031/04 ES do DNIT. Os resultados deste trabalho também foram comparados com resultados de pesquisas semelhantes.

Segundo Aguiar e Rocha (2010) em sua pesquisa sobre misturas a frio com agregado de quartzo e faixa granulométrica D DNER 317/94, os resultados de resistência a tração dos ensaios foram de 0,21 MPa. Conforme o estudo de Silva et al. (2015), para seu estudo sobre PMF, o resultado para resistência a tração foi de 0,44 MPa.

Percebe-se através da comparação, que os resultados de resistência à tração obtidos nesta pesquisa obtidos são válidos, a partir dos resultados de outros estudos.

5 CONCLUSÃO

Ao final deste estudo, concluiu-se que foi alcançado o objetivo geral da pesquisa, que se delimitava em elaborar uma dosagem de PMF reutilizando material asfáltico fresado. Para a consecução desse objetivo geral, foram definidos certos objetivos específicos, que foram também alcançados nas diversas etapas da pesquisa, sendo discutidos a seguir:

- I. O material utilizado nesta pesquisa foi devidamente caracterizado. O agregado fresado, segundo Dartora, apresentou teor de ligante betuminoso de 5,8%;
- II. Foi estimado um teor de emulsão preliminar, através da equação de Duriez, citada por Bernucci et al, que foi de 6,8%, mas arredondado para 7%;
- III. Foram moldados corpos de prova com 1 e 2% de variação para mais e para menos de 7%, sendo 3 corpos de prova por teor, totalizando 15 corpos de prova betuminosos (5%,6%,7%,8% e 9%);
- IV. Com posse dos resultados dos parâmetros volumétricos destes corpos de prova preliminares, constatou-se que todos os volumes de vazios estavam dentro o intervalo para PMFs densos, segundo ABEDA (2001) e entre o especificado pela 153/10 ES do DNIT;
- V. Após o ensaio mecânico de Estabilidade e Fluência Marshall para os corpos de prova preliminares, foram obtidos valores acima do mínimo especificado pela norma 153/10 ES, norma vigente para PMFs no Brasil, que é de 250 kgf para estabilidade e de 2,0 a 4,5 mm para fluência.
- VI. Foi determinado um teor de projeto de 7%, obtido através da média aritmética dos teores com performances melhores nos critérios volumétricos e mecânicos, os quais foram de 6% para Estabilidade Marshall, 6% para densidade aparente e 9% para menor volume de vazios;
- VII. Com o teor de projeto, foram moldados 3 corpos de prova para serem avaliados em ensaios de módulo de resiliência e também de resistência a tração. Para o ensaio de módulo de resiliência, a média dos resultados foi de 967 MPa. Já para a resistência a tração, a média dos resultados foi de 0,25 MPa. Os resultados para estes ensaios mecânicos foram válidos, quando comparados com os de outros autores, lembrando que ainda não existem parâmetros seguros na literatura.

Concluiu-se que, através dos resultados e comparações com parâmetros normatizados e também com resultados de variados autores, o emprego de material fresado como agregado neste tipo de mistura para obras e também em operações “Tapa Buraco” para vias de tráfego leve é viável. Ressaltando, como observado neste estudo, deve-se ter um controle rigoroso no processo de produção deste PMF, de sua granulometria, compactação e também ao utilizar um agregado complementar com porção de miúdos e finos.

A seguir, serão feitos alguns comentários sobre sugestões de novos temas para pesquisa, que possam utilizar como base este trabalho de graduação.

- I. Empregar em trechos experimentais, o projeto de mistura asfáltica reciclada que apresentou desempenho satisfatório nos critérios avaliados;
- II. Estudar misturas a frio considerando o teor de ligante betuminoso já contido no agregado fresado;
- III. Estudar o ensaio de fadiga, sobre a mistura desenvolvida nesta pesquisa;
- IV. Utilizar agente rejuvenescedor para um melhor aproveitamento do ligante contido no agregado fresado;
- V. Estudar financeiramente o emprego de misturas recicladas a frio, em relação ao consumo de emulsão;
- VI. Estudar uma incorporação de cal e cimento, na mistura asfáltica a frio, na tentativa de se aumentar o desempenho;
- VII. Estudar o módulo de resiliência da mistura reciclada em diferentes temperaturas.
- VIII. Estudar misturas asfálticas a frio com agregado fresado, utilizando outras faixas granulométricas.

REFERÊNCIAS

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. *Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade*. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

AGUIAR, M. F. M; ROCHA, A. C. F. *Aproveitamento de rejeito de quartzo como agregado na dosagem de pré-misturado a frio*. 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ – 26 a 28 de outubro de 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. *ND T 27: Sieve analysis of fine and coarse aggregates*. 2015.

_____. AASHTO. T-164. *Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA)*. United States. 2014 .

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *D 2726: Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*. USA: American Society for Testing and Materials, 2000.

_____. ASTM. D-1856. *Standard Test Method for Recovery of Asphalt From Solution by Abson Method*. United States. 2015 .

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. *Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas*. 2014. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=13274>. Acesso em: 15 nov. 2015.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. *ARRA - Basic Asphalt Recycling Manual*. 2001.

BALBO, José T. *Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al*. *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS. ABEDA, 2008.

BONFIM, Valmir. *Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio*. Dissertação de Mestrado (Escola Politécnica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

BONFIM, Valmir. *Fresagem de pavimentos asfálticos – 3ª ed. rev. e atual.* – São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

CATERPILLAR. *Manual de Recuperação de Rodovias*. EUA, Minnesota. 1996.

CHESNER, W. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Washington: Federal Highway Administration - FHWA, 1999.

DARTORA, Natália Catto. *Caracterização mecânica de uma mistura asfáltica composta por material fresado e cal*. Trabalho de conclusão de curso (Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior – UNIVATES) Lajeado, Rio Grande do Sul, 2015.

DELLABIANCA, Luciana Michèlle Araújo. *Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos*. Tese de Doutorado (Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília – Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. ES 318. *Pavimentação – Concreto Betuminoso reciclado a quente na Usina*. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER. ES 319. *Pavimentação – Concreto Betuminoso reciclado a quente no local*. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER. ES 390. *Pavimentação – Pré-misturado a frio com emulsão modificado por polímero*. Rio de Janeiro, 1999

_____. DNER. ME 053. *Misturas Betuminosas – Percentagem de betume*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER. ME 107. *Misturas Betuminosas – Método Marshall a frio*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER. ME 081. *Agregados – Determinação da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER. ME 084. *Agregados – Determinação da densidade real de agregado miúdo*. Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER. ME 117. *Misturas Betuminosas – Determinação da densidade aparente*. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - ES 034: *Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local. Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

_____. DNIT - ES 033: *Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente em usina. Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.

_____. DNIT - TER 005: *Pavimentos Flexíveis – Pré - misturado a frio. Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.

_____. DNIT - ES 153: *Pavimentos Flexíveis – Pré - misturado a frio. Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

_____. DNIT- ES 159: *Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio. Especificação de Serviço*. Rio de janeiro: DNIT, 2011.

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

_____. DNIT- ME 135: *Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametra – Método de ensaio*. Rio de janeiro: DNIT, 2010

_____. DNIT: *Manual de pavimentação*. 3 ed. Rio de janeiro: DNIT, 2006.

_____. DNIT: *Manual de restauração de pavimentos asfálticos*. 2 ed. Rio de janeiro: DNIT, 2005.

_____. DNIT- TER 005: *Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi - rígidos. Terminologia*. Rio de janeiro: DNIT, 2003.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. U.S. Department of Transportation. Publicação Nº. FHWA-SA-98-042. Dezembro 1997

HOLTZ, K.; EIGHMY, T. T. *Scanning European Advances in the Use of Recycled Materials in Highway Construction*. FHWA Public Roads. vol. 64, n. 1. 2000. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/00julaug/recycscan.cfm>>. Acesso em 16 nov. 2015.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. FHWA – SA – 98 - 042. Washington, 1997.

LIMA, André Theophilo. *Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente*. Dissertação de Mestrado (Programa de Mestrado em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Ceará – Fortaleza, 2003.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. *Sobre o PAC*. Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac>>. Acesso em 16 mai. 2016.

MOREIRA, H. S. *Comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16273: *Misturas asfálticas – Propriedades volumétricas de concreto asfáltico*. São Paulo (SP). 2014.

NICHOLLS, C. *A Guide to Asphalt Surfacing and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements*. Londres: Transport Research Laboratory, 1996.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A. Ficha de informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ. Emulsão Asfáltica RM-1C. Cidade Nova, Rio de Janeiro (RJ).

PREGO, A.S.S. *A memória da pavimentação no Brasil*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

RODRIGUES, Wallace da Costa. et al. *Um estudo sobre a utilização de resíduos de ardósia em misturas asfálticas do tipo PMF*. 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ - 26 a 28 de outubro de 2010.

SANTANA, H. *Manual de pré-misturados a frio*. 1. ed. Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SCHROEDER, Robin L. *The use of Recycled Materials in Highway Construction*. ROADS On-line, Volume 57, Nº 2. Turner - Fairbank Highway Research Center. Estados Unidos, 1994. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/94fall/p94au32.cfm>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

SILVA, Amanda Marcandali. et al. *Estudo comparativo entre misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão modificada por polímero SBS e com emulsão convencional*. 40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ - 26 a 28 de outubro de 2010.

SILVA, Tamyres Karla da. et al. *Dosagem de mistura betuminosa a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas*. Universidade Federal de Viçosa, Graduando em Engenharia Civil, Viçosa, MG – Brasil. 2015.

SULLIVAN, J. *Pavement Recycling Executive Summary and Report*. FHWA – AS – 95 – 060. USA, Washington. 1996.