



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA MISTURA
ASFÁLTICA COMPOSTA POR MATERIAL FRESADO E CAL**

Natália Catto Dartora

Lajeado, novembro de 2015

Natália Catto Dartora

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA MISTURA
ASFÁLTICA COMPOSTA POR MATERIAL FRESADO E CAL**

Projeto de Pesquisa apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, novembro de 2015

Natália Catto Dartora

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA COMPOSTA POR MATERIAL FRESADO E CAL

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos -
orientador

Centro Universitário UNIVATES

Prof. M.Sc. Carolina Becker Pôrto Fransozi
Centro Universitário UNIVATES

Prof^a. M.Sc Betina Hansen
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, novembro de 2015

Aos meus pais,
Natal e Jussara Dartora e à minha irmã, Kênia Dartora, fruto desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho, dentre os quais destaco:

Aos meus pais, Natal Dartora e Jussara Catto Dartora, pelo amor, ensinamentos e incentivo, ao longo de minha vida. Meus heróis, amo muito vocês.

Meu namorado Roberto Ottoni, por todo apoio e compreensão em todos os momentos desta etapa.

Aos meus colegas que conheci e convivi, ao longo destes anos, pela amizade e companheirismo que por certo ficarão em nossa lembrança.

A todos os amigos, que de uma forma ou outra colaboram para o meu sucesso e formação acadêmica, sempre acrescentando experiências e conhecimentos.

E por fim, ao meu professor Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos, orientador deste trabalho, pelo conhecimento compartilhado e pela sua disponibilidade quando precisei.

RESUMO

Tem-se o conhecimento de que as rodovias pavimentadas possuem em grande parte um péssimo estado de conservação. Dito isso, sabe-se que as técnicas convencionais de manutenção são dispendiosas, causam impactos ao meio ambiente e nem sempre apresentam o desempenho esperado. Nesse sentido, torna-se uma necessidade a busca por alternativas que melhorem o aproveitamento dos materiais, que são capazes de intervir na precocidade da degradação da rodovia e que contribuam com o meio ambiente. Considerando esse problema, o presente estudo busca analisar a viabilidade da reutilização do material fresado para a camada de revestimento do pavimento, tentando elaborar um projeto de mistura asfáltica com adição de ligante convencional e cal, para suprir a falta de pó. A pesquisa apresenta o comportamento físico e mecânico em laboratório de misturas asfálticas recicladas com teores de ligante asfáltico CAP 50/70 distintos. Para a determinação do teor de ligante asfáltico do agregado reciclado foi utilizado o método de ensaio de extração de ligante – rotarék. O estudo contemplou a moldagem e a compactação de corpos de prova em temperatura de 160°C, aplicando energia de compactação de 75 golpes por face. Para a obtenção dos resultados, realizou-se a determinação das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas. As propriedades volumétricas deram-se através da obtenção da densidade aparente, da densidade máxima teórica e do volume de vazios. Já as propriedades mecânicas foram obtidas com a realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral. A partir da análise dos resultados laboratoriais com diferentes teores de ligante, foi possível determinar o teor de projeto para ser utilizado numa mistura asfáltica composta predominantemente por material fresado. A mistura asfáltica concebida teve como teor de projeto a adição de 2,8% de ligante asfáltico convencional (CAP 50/70). Esta mistura reciclada de projeto apresentou propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as exigências do DNIT, portanto, sendo possível o seu emprego para pavimentos com baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: Pavimento, Revestimento Asfáltico, Reciclagem de Pavimentos.

ABSTRACT

It is known the paved roads have mostly a bad condition. That said, it is known that conventional maintenance techniques are costly, causes environmental impact and do not always provide the expected performance. Therefore, it becomes necessary to search for alternatives that improve the utilization of materials, which are able to intervene in the precocity of highway degradation and contribute to the environment. Considering this issue, the present study investigates the viability of reusing milled material to the road surface layer, trying to prepare an asphalt mix project with the addition of conventional binder and lime, to supply the lack of dust. The research presents the physical and mechanical behavior in laboratory of recycled asphalt mixtures with distinct asphalt binder content CAP 50/70. For determining the asphalt binder content of the recycled aggregate, it was used the binder extraction test method - ROTAREX. The study looked at the molding and compression for test bodies at 160°C temperature, by applying compaction energy of 75 strokes for each face. To obtain the results, it was held the determination of volumetric and mechanical properties of asphalt mixtures. The volumetric properties were found by obtaining the apparent density, the theoretical maximum density and void volume. The mechanical properties were obtained with tests of stability, the Marshall flow method and traction endurance by diametrical compression. Based on the analysis of laboratory results with different binder contents, it was possible to determine the project content for use in an asphalt mix consisting primarily of milled material. The asphalt mixture conceived as project content was the addition of 2.8% of conventional asphalt binder (CAP 50/70). This recycled mix of the project, showed physical and mechanical properties compatible with the requirements of DNIT, so it is possible its use for pavements with low traffic volume.

Keywords: Pavement, Asphalt Coating, Pavement Recycling.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP -	Asfalto Diluído de Petróleo
AMB -	Asfalto Modificado por Borracha
AMP -	Asfalto Modificado por Polímero
ANTT -	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARRA -	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
ASTM -	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AR -	Agente Rejuvenescedor
AAUQ -	Areia Asfalto Usinado à Quente
CAP -	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ -	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CA -	Concreto Asfáltico
cm -	Centímetro
cm ³ -	Centímetro cúbico
CNT -	Confederação Nacional do Transporte
D -	Diâmetro
DAER -	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNER -	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT -	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP -	Emulsão Asfáltica de Petróleo
F -	Carga
g -	Gramas

Gmb -	Densidade aparente
Gmm -	Densidade máxima teórica
H -	Altura
ISC -	Índice de Suporte Califórnia
kgf -	Quilograma-força
LAPAV -	Laboratório de Pavimentação
mm -	Milímetro
mm ³ -	Milímetro cúbico
MPa -	Mega pascal
N -	Newton
P -	Peso do material constituinte
PMF -	Pré-misturado a Frio
PMQ -	Pré-misturado Denso
RT -	Resistência à tração
SMA -	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
UFRGS -	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Vv -	Volume de vazios
Wd -	Peso ao ar ou peso seco
Wssd -	Peso medido na condição saturada de superfície seca
Wsub -	Peso medido na condição saturada imerso em água
°C -	Graus Celsius
σ_R -	Resistência à tração

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de tensões em pavimentos flexíveis	20
Figura 2 – Camadas do pavimento flexível	21
Figura 3 – Classificação das camadas de base e sub-base	23
Figura 4 – Classificação de revestimentos	24
Figura 5 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina	30
Figura 6 – Recicladora in situ a quente - Remixer 4500 - Wirtgen	32
Figura 7 – Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio in situ.....	33
Figura 8 – Método da máquina única <i>single-pass</i>	35
Figura 9 – Método do Trem de Equipamentos <i>single-pass</i>	35
Figura 10 – Refinarias Petrobras que produzem asfalto	38
Figura 11 – Trecho de retida do material fresado	43
Figura 12 – Material Fresado	43
Figura 13 – Cal.....	45
Figura 14 – Separação dos agregados	47
Figura 15 – Torrões de material fresado.....	48
Figura 16 – Material pronto para a realização do ensaio	48
Figura 17 – Escoamento de Betume	49
Figura 18 – Separação dos Agregados	51
Figura 19 – Adição de ligante asfáltico na mistura	52
Figura 20 – Aspecto final da mistura	52
Figura 21 – Acomodação da mistura no molde	53
Figura 22 – Compactação da mistura.....	54
Figura 23 – Corpos de prova em repouso	55
Figura 24 – Pesagem do corpo de prova seco.....	56
Figura 25 – Pesagem do corpo de prova submerso.....	56
Figura 26 – Secagem do corpo de prova	57
Figura 27 – Preparação da mistura	59
Figura 28 – Aplicação do vácuo na mistura.....	60
Figura 29 – Corpos de prova submersos em banho-maria	62

Figura 30 – Posicionamento na prensa.....	63
Figura 31 – Corpos de prova deformados.....	64
Figura 32 – Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico	65
Figura 33 – Rompimento do corpo de prova na prensa cilíndrica	66
Figura 34 – Corpos de prova rompidos	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Enquadramento granulométrico dentro da faixa C do DNIT	70
Gráfico 2 – Teor de ligante asfáltico X Densidade aparente.....	71
Gráfico 3 – Teor de ligante asfáltico X Densidade máxima teórica.....	72
Gráfico 4 – Teor de ligante asfáltico X Volume de vazios	73
Gráfico 5 – Teor de Ligante X Estabilidade	75
Gráfico 6 – Teor de Ligante X Fluência	77
Gráfico 7 – Teor de projeto x Resistência a Tração.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos..	29
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens da Reciclagem de Pavimentos Asfálticos ...	37
Quadro 3 – Características dos diversos tipos de CAP.....	40
Quadro 4 – Particularizações técnicas do CAP 50/70.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição granulométrica de um corpo de prova.....	46
Tabela 2 – Ensaio Rotarék	69
Tabela 3 - Granulometria dos agregados do material fresado pós-extração do ligante	70
Tabela 4 – Teor de ligante asfáltico X Densidade aparente.....	71
Tabela 5 – Teor de ligante asfáltico X Densidade máxima teórica.....	72
Tabela 6 – Teor de ligante asfáltico X Volume de vazios	73
Tabela 7 – Parâmetros volumétricos para o teor ótimo de ligante	74
Tabela 8 – Teor de Ligante X Estabilidade	75
Tabela 9 – Teor de Ligante X Fluência	76
Tabela 10 – Estabilidade e Fluência Marshall para o teor de projeto	77
Tabela 11 – Teor de projeto x Resistência a Tração	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivos Gerais	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 Justificativa da pesquisa	17
1.3 Limitação da pesquisa	17
1.4 Descrição da pesquisa.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Pavimento	19
2.2 Classificação do pavimento	19
2.2.1 Pavimentos flexíveis	20
2.3 Camadas de base e sub-base de pavimento	22
2.4 Revestimento asfáltico de pavimento	23
2.5 Reciclagem de pavimentos	25
2.6 Tipos de reciclagem de pavimentos	27
2.6.1 Reciclagem a quente em usina.	29
2.6.2 Reciclagem a quente <i>in situ</i>	30
2.6.3 Reciclagem a frio em usina	32
2.6.4 Reciclagem a frio <i>in situ</i>	33
2.6.5 Reciclagem profunda.....	36
2.7 Vantagens e desvantagens das técnicas apresentadas	36
2.8 Ligantes.....	37
2.8.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	38
2.9 Uso de cal hidratada em misturas asfálticas	40
3 METODOLOGIA	42
3.1 Introdução.....	42
3.1.1 Material Fresado	43
3.1.2 Ligante.....	44
3.1.3 Cal.....	44
3.2 Método.....	45
3.2.1 Introdução.....	45
3.2.2 Preparação dos agregados	46

3.2.3 Determinação do teor de ligante.....	47
3.2.4 Dosagem Marshall.....	50
3.2.5 Determinação da densidade aparente.....	57
3.2.6 Determinação da densidade máxima teórica.....	58
3.2.7 Determinação do volume de vazios.....	61
3.2.8 Estabilidade e fluência Marshall.....	62
3.2.9 Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	64
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
4.1 Resultados da caracterização do material.....	69
4.1.1 Teor de ligante asfáltico do material fresado.....	69
4.1.2 Enquadramento granulométrico após extração de ligante.....	69
4.2 Resultados volumétricos.....	70
4.3 Resultados dos ensaios mecânicos.....	74
5 CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A Infraestrutura viária é elemento de grande relevância para o desenvolvimento econômico de um país. No Brasil, 65% da movimentação de cargas e 90% da movimentação dos passageiros é feito pelo modal rodoviário, segundo os dados da Pesquisa CNT de Rodovias de 2013 (CNT, 2013). A última Pesquisa também avalia que 49,9% das rodovias apresentam algum tipo de deficiência, das quais comprometem a segurança dos usuários (CNT, 2014).

De acordo com o Banco Mundial, existem mais de 15 milhões de quilômetros de estradas pavimentadas e rodovias no mundo inteiro. No setor nacional, apenas 10% da malha rodoviária é pavimentada (MEDINA; MOTTA, 2005). Entre as rodovias pavimentadas, 64.921 km são federais e destes 8% são de pista dupla, 2,1% são de vias em fase de duplicação e 89,9% são de pista simples (DNER, 2013).

Associado a isso, a crescente demanda de tráfego nas rodovias e o aumento das cargas nos veículos vem ocasionando a degradação precoce da estrutura do pavimento. Assim, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2012), cerca de 30% dos 96.714 km de rodovias pesquisadas apresentam um padrão de qualidade inferior à condição regular, evento esse que demonstra a necessidade de interferências com objetivo de melhorar a condição estrutural e de rolamento das rodovias.

Para a manutenção da qualidade das rodovias, elas passam, periodicamente, por procedimentos de restauração que normalmente consistem na aplicação de

novas camadas de revestimento asfáltico contemplando, ou não, a retirada da camada deteriorada (ARRA, 2001). Para Fredrigo (2014), a construção de novos pavimentos com revestimentos vigorosos e as práticas tradicionais de restauração, como recapeamentos, são igualmente dispendiosas, causam impactos ambientais e nem sempre alcançam o desempenho esperado.

À medida que a deterioração vai evoluindo é necessário definir as intervenções de manutenção do pavimento degradado. As formas de intervenção para a recuperação da capacidade estrutural de uma rodovia iniciam com o ciclo de exploração de jazidas, produção e transporte desse material, que geram não somente impactos ambientais, mas também financeiros. Destarte, a reciclagem se torna uma opção menos dispendiosa.

Assim, Salomom e Newcomb (2000) afirmam que os processos de restauração que não contemplam nenhum tipo de reciclagem aumentam o custo da restauração entre 50% e 60%.

Para Lima (2003) a reciclagem de pavimentos asfálticos tem se apresentado uma exigência do mundo contemporâneo, principalmente em termos de uma consciência ambiental, além de trazer repercussões econômicas e sociais.

Nesse sentido, a reciclagem de pavimentos é um processo de restauração onde toda, ou parte da camada do pavimento atual, são reaproveitados na construção de uma nova camada, adicionando ou não novos materiais, possibilitando assim obter um pavimento com propriedades parecidas ou superiores ao pavimento antigo (LIMA, 2003).

Sendo um método eficaz e inovador, a reciclagem de pavimentos pode ser executada a frio ou a quente através de adições ao material fresado de emulsões rejuvenescedoras, Cimento Asfáltico de Petróleo ou Emulsão Asfáltica de Petróleo novos, espuma de asfalto, e também com adição de aglomerantes hidráulicos com ou sem estes materiais complementares (BERNUCCI et al., 2008). No caso da técnica de reciclagem a quente, o material depois de fresado é misturado e tratado termicamente com adição de ligantes ou Agente Rejuvenescedor, com ou sem correção granulométrica (LIMA, 2003).

Por conseguinte, esta prática de reciclagem de pavimentos apresenta como vantagens a diminuição do consumo energético, redução do uso de materiais asfálticos e agregados, além de reduzir o tempo de execução e restauração das vias, reduzindo expressivamente o custo da obra. Além do mais, coopera para a preservação ambiental, pois reduz o uso de recursos não renováveis além de proporcionar uma solução para o problema de disposição final destes materiais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este estudo tem como objetivo geral determinar um projeto de mistura asfáltica dosada com predominância de material fresado com a adição de cal e ligante asfáltico convencional, assim como analisar a viabilidade da utilização desta mistura para a camada de revestimento do pavimento.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral será alcançado através do desenvolvimento dos objetivos específicos elencados através da apreciação das propriedades do material fresado e as propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas moldadas. Para tanto, foram conduzidos testes laboratoriais do material fresado e determinaram-se as seguintes propriedades da mistura asfáltica de projeto:

- ✓ Teor de ligante do material fresado;
- ✓ Densidade aparente;
- ✓ Densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;
- ✓ Volume de vazios;
- ✓ Estabilidade e fluência Marshall;
- ✓ Resistência à tração por compressão diametral.

1.2 Justificativa da pesquisa

Tendo em vista a importância de se reciclar o concreto asfáltico fresado disposto de forma imprópria na natureza, e que o petróleo, matéria-prima utilizada na produção de asfalto, tem futuro incerto, é primordial o desenvolvimento de um estudo incorporando as misturas asfálticas, o material fresado e a cal, para a restauração e manutenção da malha rodoviária.

A proposta de reciclagem de pavimentos será realizada através da dosagem de ligante asfáltico, a fim de obter o teor de ligante para o projeto, contribuindo, desta forma, para a redução de resíduos gerados e a diminuição da exploração dos recursos naturais.

1.3 Limitação da pesquisa

A presente pesquisa possui como limitação a caracterização das propriedades mecânicas, pois se realizaram apenas os ensaios de estabilidade e fluência Marshall e Resistência à tração por compressão diametral.

1.4 Descrição da pesquisa

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos, descritos abaixo:

O Capítulo 1 introduz o tema do trabalho de conclusão do curso, apresentando os objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 contempla o referencial teórico utilizado como fundamentação para o desenvolvimento do estudo, abrangendo a caracterização e estrutura dos pavimentos, características da reciclagem de pavimento, bem como os tipos de reciclagens empregados e as vantagens e desvantagens do processo, e ainda, as características do ligante e da cal.

O Capítulo 3 expõe os materiais adotados e os procedimentos experimentais

empregados para a elaboração do presente estudo.

O Capítulo 4 refere-se à apresentação e análise dos resultados obtidos, iniciado pela apresentação dos resultados das propriedades do material fresado, seguido dos resultados volumétricos das misturas recicladas, posteriormente a definição do teor de ligante de projeto e, por conseguinte, os resultados mecânicos.

No Capítulo 5 apresenta-se as conclusões obtidas e as proposições para pesquisas futuras que deem prosseguimento ao atual estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimento

Para Bernucci et al (2008)., Pavimento é:

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

Segundo Senço (1997), o pavimento também é uma estrutura formada por camadas de espessuras finitas, encaixadas sobre o terreno de fundação, considerando como semiespaço interminável e denominado como subleito.

Já para Baldo (2007), a estrutura do pavimento é composta por camadas sobrepostas de diversos materiais compactados, adaptada para atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de modo durável e com retenção de custos.

2.2 Classificação do pavimento

Os pavimentos são classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos:

- **Pavimentos Flexíveis:** As camadas do pavimento sofrem deformação elástica ao serem submetidas ao carregamento, com isso as cargas são distribuídas proporcionalmente ao longo da estrutura (PINTO, 2010). São constituídos de revestimento asfáltico (betuminoso) delgado sobre camadas granulares ou acima de

camada de solo estabilizado granulometricamente (BARROS, 2013).

- **Pavimentos Rígidos:** São constituídos de placas de concreto de cimento Portland amparadas sobre camadas granulares. Essas placas apresentam elevada rigidez em relação às camadas subjacentes, absorvendo praticamente todas as tensões originadas do carregamento aplicado (BARROS, 2013).

- **Pavimentos Semi-rígidos:** É definido como sendo aquele pavimento que se utiliza, especialmente, de misturas do tipo solo-cal, solo-betume, solo-cimento, no qual oferecem uma aceitável resistência às solicitações a tração, sendo avaliado como uma situação mediadora entre os pavimentos rígidos e flexíveis (DNIT, 2006).

2.2.1 Pavimentos flexíveis

Segundo a NBR 7207/82 da ABNT, os pavimentos flexíveis são compostos por camadas que não trabalham a tração, observação feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. Então, Baldo (2007) explica que as camadas constituintes do pavimento devem sofrer deformações compatíveis com a natureza de cada camada que a compõem para se obter um funcionamento adequado. Além do mais, as cargas devem ser distribuídas em parcelas equivalentes entre as camadas para que não ocorram rupturas e danificações precoces no pavimento, conforme a Figura 1 (BARROS, 2013).

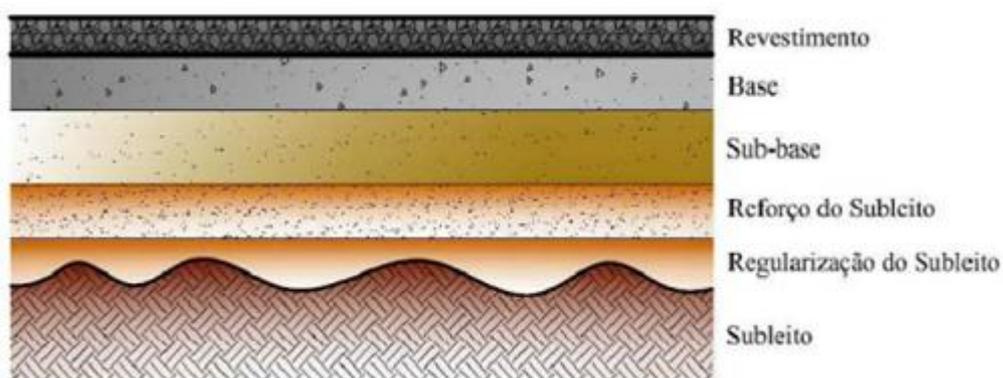
Figura 1 – Distribuição de tensões em pavimentos flexíveis



Fonte: DNIT (2006).

Já a Figura 2 apresenta as diferentes camadas que podem compor a estrutura de um pavimento flexível, cujas principais são: revestimento (asfáltico), base, sub-base, reforço do subleito e regularização do subleito. Todas essas camadas são apoiadas sobre o subleito.

Figura 2 – Camadas do pavimento flexível



Fonte: Marques (2007).

A seguir, será apresentada uma sucinta definição das camadas da estrutura do pavimento flexível, ilustrada na Figura 2, de acordo com Marques (2007) e Neckel (2008):

- **Revestimento:** é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, a qual deve resistir aos esforços atuantes, além de ser a camada destinada a impermeabilizar o pavimento, melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança aos usuários;

- **Base:** é a camada destinada a resistir aos esforços gerados pelo tráfego e transmiti-los ao subleito, devendo ter um Índice de Suporte Califórnia (ISC) maior que 60%;

- **Sub-base:** é a camada complementar à base, com as mesmas funções, e executada por motivos econômicos (reduz a espessura da base). Deve ter ISC maior que 20%;

- **Reforço de subleito:** é uma camada existente em pavimentos muito grossos, com espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, tendo como função melhorar a qualidade do subleito. Deve ter ISC menor que 2%;

- **Regularização do subleito:** também é conhecido como nivelamento, é a

camada de espessura variável, destinada a preparar o leito da estrada para receber o pavimento. A existência desta camada está relacionada com as condições do subleito;

- **Subleito:** é o terreno onde ocorrerá o assentamento do pavimento. Deve-se examinar/estudar até onde a profundidade acontecerá e as tensões que irão atuar.

2.3 Camadas de base e sub-base de pavimento

As camadas de base e sub-base concentram a maior parte dos esforços provenientes do tráfego de veículos e as distribuem de forma minimizada à camada de subleito. Em consequência disso, possuem um papel de grande relevância na qualidade e durabilidade das rodovias.

Segundo DNIT (2006), as camadas de base e sub-base estão sempre expostas a amplas cargas, dessa forma, essas camadas possuem em suas composições materiais que oferecem apropriada característica mecânica podendo resistir às cargas sem apresentar deformação considerável que danifique o pavimento.

Os materiais empregados nas camadas estruturais do pavimento são habitualmente compostos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal e emulsão asfáltica. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica e agrupa os diversos tipos existentes de bases e sub-base, conforme o esquema representativo exibido na Figura 3.

Figura 3 – Classificação das camadas de base e sub-base



Fonte: DNIT (2006).

Os materiais provenientes da reutilização e reciclagem de resíduos são cada vez mais empregados nas camadas dos pavimentos. Os principais resíduos utilizados são: mistura asfáltica fresada, escória de alto-forno, agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, demolições e etc. Segundo Barros (2013), a reutilização de materiais originados dos resíduos (gerado pela fresagem de pavimentos flexíveis, construção civil e etc.) misturados com materiais utilizados na construção de camadas de pavimentos (agregados, solo jazida e etc.) e a reciclagem de resíduos são métodos economicamente viáveis e ambientalmente adequados para a construção e reconstrução de camadas de pavimentos.

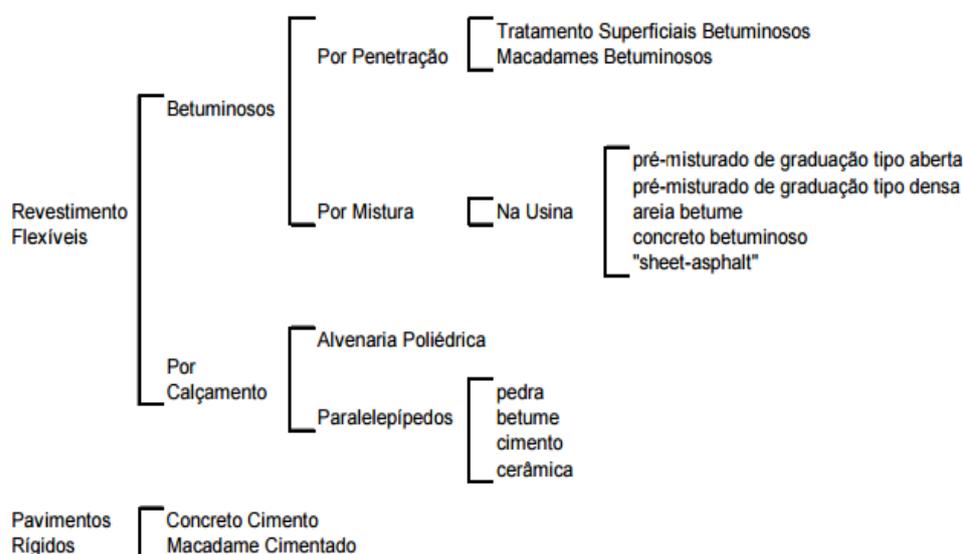
Associado a isso, Moreira (2006) ressalta que o material fresado é tecnicamente viável para reciclagem e reutilização, pois se trata de um material que obtém boas características, podendo aumentar a resistência da camada e, por conseguinte, diminuir a espessura do pavimento.

2.4 Revestimento asfáltico de pavimento

Diversas são as composições que podem ser utilizadas como a camada final da estrutura de um pavimento, as quais devem suportar a ação de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer amplas deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Destarte, essa camada precisa ser originada de materiais bem aglutinados ou dispostos de modo a evitar sua

movimentação horizontal (BARROS, 2013). Dessa forma, os revestimentos asfálticos apresentam um excelente desempenho por serem constituídos por associação de agregados e de ligante asfáltico (BALBO, 2007). Na Figura 4 pode ser visto um esquema representativo do modo como os diversos tipos de revestimento podem ser classificados e agrupados, conforme O Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

Figura 4 – Classificação de revestimentos



Fonte: DNIT (2006).

Nos pavimentos brasileiros são usadas geralmente como revestimento as misturas asfálticas. O revestimento asfáltico pode ser composto por um único tipo de mistura asfáltica em situações comuns até um determinado volume de tráfego. Os tipos se distinguem quanto ao local de fabricação (em usinas ou no local que são os tratamentos superficiais), temperatura de misturação (a quente ou a frio), e a composição granulométrica (densa, aberta e descontínua) (BERNUCCI, 2008).

Em seguida, em caso de recomposição da capacidade estrutural ou funcional, é aceitável o uso de outros tipos de misturas. Tais processos, feitos em usinas móveis especiais que promovem a mistura de agregados-ligante imediatamente antes da colocação no pavimento, podendo ser separados em: misturas novas relativamente fluidas (lama asfáltica e microrrevestimento) e misturas recicladas com uso de fresadoras – recicladas (BARROS, 2013).

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 157), a composição de revestimento

asfáltico, feita por meio da mistura de agregados e ligante asfáltico, precisa ser satisfatoriamente adequada a fim de que "garanta ao serviço executado as condições de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego esperado para o local".

Os principais tipos de revestimentos em relação às misturas usinadas são: densa (concreto asfáltico, areia – asfalto, pré misturado a frio) e descontínuas (*Stone Mastic Asphalt (SMA)*, porosa e gap-grad). Quanto à temperatura de misturação são a quente: pré- misturado denso ou aberto (PMQ), concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), argamassa betuminosa (areia asfalto, AAUQ) e reciclagem. A frio: em usina pré-misturado a frio denso, semidenso ou aberto (PMF), no local (tratamento superficial, lama asfáltica, microrrevestimento e reciclagem) (BERNUCCI, 2008).

A mistura asfáltica a quente mais comum e tradicional empregada no país é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se de uma mistura de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), de material fino (pó de pedra, cimento Portland e etc.) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP), a qual é homogeneizada a quente, na usina misturadora (BALBO, 2007). Também, o mesmo autor ressalta a realização da dosagem desses materiais a fim de se alcançar uma mistura trabalhável, pouco suscetível à fissuração por fadiga, com baixa deformação permanente e estável à ação de cargas estáticas ou móveis.

2.5 Reciclagem de pavimentos

Conforme Bernucci et al. (2008), a reciclagem de pavimentos é um processo de reabilitação rodoviária que compreende a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento. Os materiais são triturados e são adicionados agentes rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos novos, ou ainda são incorporados de agregado para correção granulométrica, espuma de asfalto, emulsões asfálticas e até de cimento Portland ou outro aditivo químico.

Para o DNIT (2006) a reciclagem dos pavimentos é uma solução para muitos

problemas e proporciona inúmeros benefícios em relação à utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes da pista de rolamento.

De acordo com a Federal Highway Administration (FHWA, 1997), o reaproveitamento do material existente no pavimento pode ser considerado uma eventual economia de materiais, dinheiro e energia. Além do mais, a geometria e espessura podem ser mantidas, dificuldades de descartes são minimizadas e a interrupção da rodovia é menor em comparação a outras intervenções.

Assim, Tuchumantel et al. (1999 apud CASTRO 2003) relata que a técnica de reciclagem estabelece uma inovação dentro do campo da recuperação de estruturas flexíveis.

Segundo Miranda et al. (2000 apud CASTRO, 2003), a reciclagem de pavimentos tem-se mostrado um bom caminho não apenas pela rapidez executiva, mas também pelo aspecto da preservação ambiental com o aproveitamento dos agregados pétreos e a economia que pode advir com o emprego desse método.

Por conseguinte, a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001) relata os primeiros comentários do uso de reciclagem na década de 1900 com o método de reciclagem a frio. Mas os primeiros registros significativos que se têm notícias acerca de serviços de reciclagem foram datados da década de 1930 com a reciclagem a quente *in situ*. No entanto, apenas na década de 1970 ocorreu um avanço nesta tecnologia, que se difundiu rapidamente pela Europa e América do Norte, em virtude da crise do petróleo e ao desenvolvimento de equipamentos de fresagem. Desde então, houve um crescimento tecnológico dos métodos e equipamentos envolvidos na reciclagem.

Inicialmente, muitos processos foram experimentados para a remoção do material do revestimento deteriorado, como escarificação do pavimento que era levado para processamento em usinas. Porém, esse procedimento era impróprio, pois procedia ao aparecimento de porções muito grandes de materiais, que devem ser quebrados ou rebitados, antes de serem empregados na reciclagem (BONFIM, 2001).

Atualmente, com o surgimento de fresadores e usinas de reciclagem, esses problemas foram sendo atenuados, visto que dispõem de apropriados comboios de reciclagem (*recycling train*), equipamentos elaborados e de grande desempenho, que fresam, ajustam a granulometria do fresado, incorporam os aditivos, emulsão, cimento, cal, etc., e executam a compactação da camada reciclada (DELLABIANCA, 2004).

No Brasil, a primeira experiência com o processo de reciclagem de uma rodovia ocorreu em 1985 num trecho de 100 km da Via Anhaguerra, entre São Paulo e Campinas. Campos (1987) cita que naquela ocasião foi adotado a fresagem do revestimento e posterior reciclagem em usina *drum mixer*. Após a chegada da máquina recicladora em solo brasileiro em meados da década de 90, iniciaram-se obras de reciclagem *in situ*. Dessa maneira, foi realizada a primeira obra registrada com o método de reciclagem *in situ* a frio em área urbana no país, no trecho comercial da Via Anchieta, São Paulo (BONFIM; DOMINGUES, 1995). Em seguida, outros trechos foram recuperados com a utilização do método de reciclagem. Assim, essa técnica vem ganhando espaço nas obras brasileiras e se transformando numa demanda real, principalmente na recuperação de pavimentos degradados.

2.6 Tipos de reciclagem de pavimentos

Há uma série de métodos de reciclagem empregados para efetuar a reciclagem do pavimento degradado, que podem ser caracterizados pelo local de produção da mistura (usina ou *in situ*), temperatura que a mistura é produzida (a quente ou a frio), pelas propriedades do material a reciclar e pelo tipo de asfalto usado.

Motta, Pinto e Guarçoni (2002) também relatam os fatores condicionantes na escolha das técnicas de reciclagem, os quais são:

- Tipo e idade do revestimento;
- A espessura da camada de revestimento;
- O estágio de conservação do revestimento e porcentagem de área

remendada;

- Condição estrutural do pavimento;
- Tipo de material de base e sua condição estrutural;
- Tráfego futuro estimado;
- Disponibilidade de materiais a serem adicionados, custos de aquisição, disponibilidade de equipamentos e distância de transporte.

Bonfim (2011) exhibe uma classificação definida dos tipos de reciclagem no Quadro 1. Tal classificação é designada de acordo com a geometria, temperatura com que se dá a mistura (“a quente” ou “a frio”) e o local em que ela é preparada (“em usina” ou “in situ”). Também é considerada a profundidade de corte do pavimento existente que sofrerá a intervenção e o material a ser adicionado durante o processo.

Quadro 1 – Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	Quando não se mantém as cotas do greide
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, quente ou frio
	<i>In situ</i>	<i>In situ</i> da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado
	Mista	
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à origem da mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial e CAP	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

Fonte: Bonfim (2011).

Já a associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming* – ARRA) define cinco processos executivos para os diferentes métodos de reciclagem de pavimentos: reciclagem a quente em usina, reciclagem a quente *in situ*, reciclagem a frio em usina, reciclagem a frio *in situ* e reciclagem profunda.

Tais métodos citados serão explanados nos itens a seguir (2.6.1 a 2.6.5).

2.6.1 Reciclagem a quente em usina.

Segundo o DNIT (2006), concreto asfáltico reciclado a quente em usina estacionária é a mistura realizada em central com características específicas, em que o material fresado do revestimento asfáltico, juntamente com novos agregados,

ligante asfáltico e/ou agentes rejuvenescedores, produzem uma mistura reciclada.

Primeiramente é feita a remoção do pavimento existente por fresagem, após este material é lançado em caminhões que o levam até uma central de mistura a quente, onde ocorrerá a adição de novos materiais, como agregados e cimento asfáltico. Em seguida, haverá a mistura do material fresado com os materiais novos e, por conseguinte o transporte da mistura final reciclada até o canteiro de obras para então ser executada a pavimentação de acordo com a ilustração (FIGURA 5), que demonstra o processo básico da reciclagem a quente em usina (PIRES, 2008).

Figura 5 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina



Fonte: Pires (2008).

O método de reciclagem a quente em usina, como pode ser observado anteriormente, é semelhante à produção de misturas a quente convencionais, pois os tipos de usinas utilizadas, procedimentos e equipamentos de distribuição e compactação são os mesmos, com poucas adaptações. Além do mais, as vantagens dessa técnica são semelhantes ou superiores ao desempenho da técnica convencional, com a capacidade de corrigir defeitos superficiais, deformações permanentes e trincas existentes na camada de revestimento, além de ser economicamente viável e ecológica (FEDRIGO, 2014).

2.6.2 Reciclagem a quente *in situ*

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (1998),

define a reciclagem a quente *in situ* como uma prática em que é retirado uma parte ou todo o revestimento asfáltico e reduzido a dimensões adequadas para depois ser misturado a quente no próprio local. Nesse sentido, a camada de revestimento do pavimento existente é aquecida, triturada até uma determinada espessura (2 a 5 cm) e, caso necessário, combinada com novos materiais (agregados virgens, ligantes asfálticos, agentes rejuvenescedores ou mesmo misturas de concreto asfáltico) para gerar uma nova camada de revestimento (FEDRIGO, 2014). Essa técnica pode ser empregada tanto numa operação de passagem única, que agrega a mistura reciclada como um material novo, como numa operação de duas passagens, onde a mistura reciclada é recompactada e a aplicação de uma nova camada de desgaste é efetuada após um período de espera (GUSMÃO, 2008).

De acordo com Nunn, Carswell e Merrill (2005), muitos especialistas estudam as diferentes variações nas técnicas de reciclagem *in situ* a quente da mistura asfáltica. A reciclagem a quente pode contribuir para uma redução no consumo de energia, além de apresentar vantagens semelhantes às proporcionadas pela reciclagem em usina, podendo-se acrescentar que a interrupção do tráfego é mínima e os custos de transporte de materiais são reduzidos.

A Wirtgen América (2007) expõe que o equipamento Remixer 4500, conforme a Figura 6 (modelo da Wirtgen), é extremamente empregada no processo de reciclagem a quente do revestimento asfáltico. Esta máquina é composta por um conjunto constituído de duas unidades: um equipamento para pré-aquecimento do revestimento e uma unidade de reciclagem *in situ*.

Figura 6 – Recicladora in situ a quente - Remixer 4500 - Wirtgen



Fonte: Wirtgen América (2007).

2.6.3 Reciclagem a frio em usina

A Wirtgen Gmbh (2001) relata que o processo de reciclagem de pavimento em usina a frio é uma técnica bastante empregada, sendo que o índice de reaproveitamento do material fresado proveniente das pistas em manutenção atinge até 90%. A reciclagem a frio tem como principal vantagem a diminuição da geração de poluentes e a conservação de energia, acarretadas justamente por não ser necessário aquecer os materiais no processo de reciclagem. O revestimento asfáltico fresado é transportado até a usina, como no método de reciclagem a quente, em usinas estacionárias, onde é realizada a mistura. Após, podem ser acrescentados agregados virgens, ligantes e aditivos químicos (cinza volante, cal, cimento) e/ou agentes rejuvenescedores emulsificados (FEDRIGO, 2014).

Segundo Arra (2001), são utilizados rolos pneumáticos pesados e rolos lisos vibratórios na compactação das camadas recicladas a frio. O material reciclado sofre influência das condições ambientais da drenagem e da umidade devido às variações significativas que comprometem o tempo de cura do material. Posteriormente à liberação, a mistura reciclada a frio é coberta por uma mistura de concreto asfáltico. No entanto, para tráfegos muito baixos é plausível empregar tratamento superficial simples ou duplo (FHWA, 1997).

2.6.4 Reciclagem a frio *in situ*

A reciclagem a frio *in situ*, diferente das técnicas de reciclagem a quente, possui atualmente uma importância expressiva, pois a aplicação acontece em maior escala no setor nacional (PIRES, 2014). Para Susuki, et.al (2005), a reciclagem a frio *in situ* é uma excelente opção para a reabilitação do pavimento, de modo que, o processo é aplicado principalmente em áreas urbanas, nas quais é aproveitado o uso exclusivo de materiais provenientes do pavimento degradado, tornando desnecessária a exploração de jazidas e depósitos para materiais excedentes. Também acontece a economia de energia proveniente dos combustíveis, pois não é necessário levar o material até uma usina estacionária, além de não haver o processo de aquecimento de materiais, o que resulta em economia de recursos e de capital aplicados.

Na Figura 7, Rogge et al. (1993 apud DAVID, 2006), trazem indicações do emprego do processo de reciclagem *in situ*.

Figura 7 – Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio *in situ*

Não se recomenda quando houver:
Problemas de subleito
Incompatibilidade ao volume de tráfego
Falta de adesividade
Excesso de ligante
Condições severas de frio e umidade
Espessuras de revestimento inferiores a 4 cm
Recomenda-se quando houver:
Trincamento
Desgaste
Irregularidade superficial
Necessidade de camada de binder ou base no caso de recapeamento
Necessidade de reabilitação seletiva por faixa de rolamento
Falta de agregados virgens na região

Fonte: ROGGE et al. (1993 apud DAVID, 2006).

De acordo com Arra (1997), as etapas para implantar o processo de reciclagem de revestimento a frio são:

- Preparação da área a ser reciclada;

- Fresagem do pavimento existente;
- Adição de agente de reciclagem e materiais virgens;
- Nivelamento;
- Compactação;
- Locação da camada de rolamento.

Conforme Fedrigo (2014), os aditivos empregados na reciclagem a frio *in situ* são os mesmos da reciclagem em usina. Caracteristicamente, quando um aditivo químico (cimento, cal, cinza volante) for usado para aumentar a resistência inicial e melhorar a resistência à umidade, a espessura de corte alcançada varia de 5 a 10 cm, podendo obter até 15 cm.

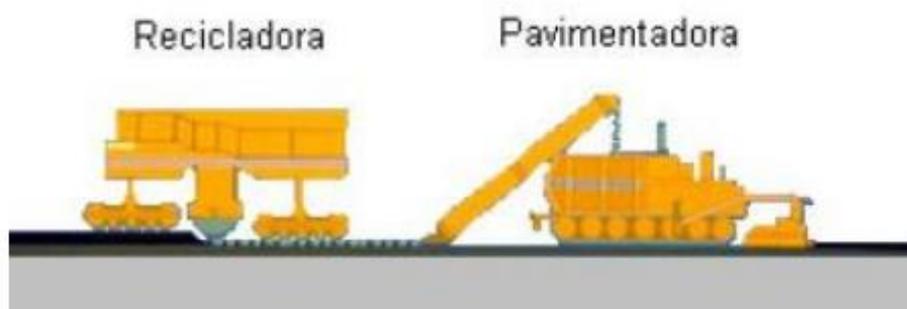
Quanto às vantagens, Bonfim (1999) expõe a diminuição do tempo de construção ao correlacionar com métodos a quente, visto que não ocorre a retirada de material para futuro lançamento de nova camada de pavimento. Também traz benefícios com a diminuição de tempo de tráfego interrompido, já que gera um aumento da segurança ao usuário. Além destas, destacam-se ainda uma expressiva melhora estrutural; a resistência à derrapagem é aperfeiçoada e o trincamento por deflexão pode ser eliminado se a profundidade de homogeneização e reprocessamento for adequada.

Dois métodos diferentes para a reciclagem a frio *in situ* são utilizados atualmente. São eles: máquina única *single-pass* e trem de equipamentos *single-pass*.

- Método da máquina única *single-pass*:

O equipamento é o único capaz de desintegrar, pulverizar o pavimento e adicionar agentes de reciclagem em uma única passagem. O sistema consiste basicamente de uma unidade recicladora e outra pavimentadora (ARRA, 1997). Na Figura 8 pode ser observado o esquema da máquina única *single-pass*.

Figura 8 – Método da máquina única *single-pass*



Fonte: Arra (1997).

• **Método do Trem de Equipamentos *single-pass*:**

Diversos equipamentos compõem o chamado trem de equipamentos *single-pass*, e cada um é denominado para uma função em particular. Os componentes mais comuns são: uma máquina fresadora, um britador/peneirador móvel, uma unidade de mistura e uma unidade pavimentadora. Segundo Arra (1997), ao implementar o processo, a unidade de britagem e peneiramento esmaga e peneira o material de tamanho variável, originário da fresagem. Deposita o material processado em um misturador do tipo *pugmill*, onde é acrescentado o agente de reciclagem. Após a mistura, o material é depositado sobre a pavimentadora para posterior aplicação e assentamento, ou disposto em leiras. Se for disposto em leiras, é pegado em seguida por uma pavimentadora para assentamento. Na Figura 9, pode ser visualizado o esquema básico do processo.

Figura 9 – Método do Trem de Equipamentos *single-pass*



Fonte: Arra (1997).

2.6.5 Reciclagem profunda

Para Fedrigo (2014), a reciclagem profunda é um método de reciclagem a frio *in situ* onde tanto a camada de revestimento asfáltico quanto a camada de base (por vezes sub-base) são tratadas respectivamente para produzir-se uma nova camada para a estrutura do pavimento. Bonfim (1999) acrescenta que para atingir o grau de compactação necessária no caso de reciclagem profunda, é necessário homogeneizar o material e perfilar parte do mesmo ao lado da pista, para que a compactação seja executada em camadas delgadas.

Os aditivos adicionados na mistura geralmente são os mesmos empregados na reciclagem a frio da camada de revestimento e igualmente, como nos outros processos de reciclagem, pode-se adicionar agregados virgens à mistura para se obter uma eventual correção granulométrica da mistura (FEDRIGO, 2014).

Segundo Arra (2001), as principais deformidades que podem ser corrigidas com a reciclagem com fresagem profunda são: trincas em blocos, transversais, trincas de bordo, trincas por fadiga, trincas por reflexão ou pelo envelhecimento do ligante; irregularidades no pavimento devido à empolamentos, afundamentos e depressões; deformações permanentes em trilha de roda, corrugações e escorregamento; perda de aderência entre as camadas do pavimento; perda da integridade do pavimento devido à exsudação; desnível excessivo do acostamento e capacidade estrutural insuficiente.

2.7 Vantagens e desvantagens das técnicas apresentadas

Finn (1980), na década de 80 e Bonfim (1999), concluíram que as vantagens do processo de reciclagem de pavimento asfáltico está no reaproveitamento do material deteriorado, os quais protegem o meio ambiente da degradação pela exploração de novos agregados, apresenta rapidez na execução, manutenção do *greide* original e economia, além de outras importantes vantagens em relação ao método convencional de reconstrução do pavimento.

Finn (1980) acrescenta que além da conservação do agregado, já que reutiliza o mesmo agregado, apresenta também conservação de asfalto e energia.

As desvantagens segundo Gusmão (2008) estão no processo da reciclagem de pavimento, pois apresenta uma execução mais lenta do que um simples reforço de pavimento e ainda exibe a possibilidade de formação de juntas longitudinais, mas por outro lado as vantagens são superiores às desvantagens, tornando a reciclagem uma excelente alternativa.

Na Quadro 2 estão dispostas as vantagens e desvantagens entre processos de reciclagem de pavimento de acordo com Lahue (1980).

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens da Reciclagem de Pavimentos Asfálticos

Reciclagem	Vantagens	Desvantagens
Reciclagem superficial	1- Reduz a reflexão de trincas na superfície 2- Promove a melhora do pavimento antigo com o pavimento reciclado 3- Reduz tendência de ocorrência de defeitos 4- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 5- É um processo alternativo para reabilitação	1- Limitações na melhoria estrutural 2- Potencial problemas de poluição do ar (poeira e fumaça)
Reciclagem "in situ"	1- Significante melhoria estrutural 2- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 3- É um processo alternativo para reabilitação	1- Problemas de controle de qualidade 2- Alguns parâmetros de projeto desconhecidos
Reciclagem com usina central	1- Aumento da melhora da capacidade estrutural de projeto 2- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 3- Melhoria do controle de qualidade quando comparada com a reciclagem superficial e a reciclagem "in situ" 4- É um processo alternativo para reabilitação	1- Melhora improvável do controle de qualidade requerido 2- Alguns parâmetros de projeto de reabilitação questionáveis 3- Potencial problemas de poluição do ar

Fonte: Lahue (1980).

2.8 Ligantes

Segundo Bernucci et al. (2008), no momento, o mercado brasileiro possui os seguintes tipos de ligantes asfálticos:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- Asfaltos diluídos de petróleo – ADP;

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

Estes ligantes, que são derivados do petróleo cru, são distribuídos em todo território brasileiro, produzidos em nove conjuntos da Petrobras: Amazonas, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo (dois), Paraná e Rio Grande do Sul. A Figura 10 mostra a localização destas refinarias que produzem asfalto.

Figura 10 – Refinarias Petrobras que produzem asfalto



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 40).

2.8.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP é um produto do refinamento do petróleo cru, que exibe uma

coloração negra ou marrom escuro, possui boa aderência aos agregados, sendo assim, empregado como ligante na pavimentação. É um material complexo que apresenta um comportamento viscoso.

De acordo com Glita (1988), o CAP é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos de massa molar e estrutura química diferentes, além de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre na sua composição, ainda pode encontrar-se quantidades variáveis de Fe, Ni, V, Ca, Ti, Mg, Na, Co, Cu, Sn, Zn. A composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, porém sua maior influência é quando da adição de agentes modificadores (BERNUCCI et al., 2008).

Também, o CAP é considerado uma dispersão coloidal de asfaltenos (saturados e aromáticos), e maltenos (BERNUCCI et al., 2007; SILVA, 2011b). Os asfaltenos constituem a parte sólida do CAP, responsável pela rigidez e coloração, enquanto os maltenos representam a sua parte oleosa, concedendo a plasticidade e viscosidade (BALDO, 2007).

Por possuir caráter termossuscetível, o CAP se enquadra em limites de consistência alterado quando submetido a determinadas temperaturas. O produto em temperaturas baixas é semissólido, visco elástico à temperatura ambiente, e líquida a altas temperaturas (BERNUCCI et al., 2008).

Porém, para Baldo (2007) o CAP, sujeitado a temperaturas abundantes, pode apresentar patologias. Sofre oxidação em elevadas temperaturas, mostrando-se menos viscoso e quebradiço, enquanto em temperaturas amenas sofre retração térmica, acarretando fissuramentos.

Para Baldo (2007) o CAP apresenta:

Favoravelmente a seu uso, propriedades como flexibilidade, relativa durabilidade e grande resistência à maior parte dos ácidos, sais e álcalis, além de ser insolúvel em água. É um material termoplástico, de comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que, com o intemperismo, se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil (BALBO, 2007, p. 111).

No Quadro 3 são explanadas as características dos diferentes tipos de CAP existentes, os quais são: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

Quadro 3 – Características dos diversos tipos de CAP

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.(*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 61).

2.9 Uso de cal hidratada em misturas asfálticas

A cal hidratada apresenta inúmeras decorrências benéficas sobre o concreto asfáltico comprovadas cientificamente. Para Bock (2012), a cal é vista como um aditivo para prevenção de danos causados pela umidade e também como um agente melhorador multifuncional, o qual reduz o envelhecimento químico do ligante asfáltico e melhora o comportamento dos pavimentos, em relação à trincamento por fadiga e deformação permanente.

Ishai e Craus (1977) complementam que a cal hidratada altera as propriedades superficiais do agregado, consentindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais adequadas à adesão do ligante. Também, as influências químicas entre a cal hidratada e as ligações de ácidos do ligante colaboram para o aumento da resistência ao envelhecimento e ainda, melhoram a adesividade das misturas modificadas (BOCK, 2012).

Diante disso, as interações entre a cal hidratada e os outros componentes da mistura asfáltica são evidentes, resultando em melhorias importantes na resistência à umidade, no envelhecimento, na adesividade e, por consequência, nas propriedades mecânicas das misturas.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Este trabalho tem como objetivos específicos analisar a viabilidade da reutilização do material fresado para a camada de revestimento do pavimento, para o qual foi elaborado um projeto de mistura asfáltica com a adição de cal e ligante asfáltico convencional. O estudo possibilitou a análise das propriedades do material fresado e as propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas. Dessa forma, realizaram-se, a partir de ensaios laboratoriais, os seguintes testes para a determinação das propriedades das misturas asfálticas:

- ✓ Teor de ligante;
- ✓ Densidade aparente;
- ✓ Densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta;
- ✓ Volume de vazios;
- ✓ Estabilidade e fluência Marshall;
- ✓ Resistência à tração por compressão diametral.

O presente Capítulo apresenta a descrição dos materiais e método de pesquisa empregado para o desenvolvimento deste estudo.

3.1.2 Ligante

O ligante asfáltico utilizado provém da refinaria da Petrobras Distribuidora S/A situada em Canoas/RS, sendo esse distribuído pela Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda.

Para o estudo optou-se pelo CAP 50/70 por ser de fácil obtenção, sendo o ligante de uso frequente no estado do Rio Grande do Sul. A particularização técnica do ligante é explanada no Quadro 4.

Quadro 4 – Particularizações técnicas do CAP 50/70

Característica	Unidade	Método		Especificação
		ABNT	ASTM	CAP 50-70
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	NBR-6576	D 5	50 a 70
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR-6560	D 36	46
Viscosidade Saybolt Furol				
a 135°C, mín.	SSF	NBR-14950	E 102	141
a 150°C, mín.				50
a 177°C				30 a 150
ou				
Viscosidade Brookfield:				
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	NBR-15184	D 4402	274
a 150°C, SP 21, mín.				112
a 177°C, SP 21				57 a 285
Índice de Susceptibilidade Térmica (1)				(-1,5) a (+0,7)
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR-11341	D 92	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	NBR-14855	D 2042	99,5
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	NBR-6293	D 113	60
Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos:		NBR-15235	D 2872	
Varição em Massa, máx. (2)	%	NBR-15235	D 2872	0,5
Ductilidade a 25°C, mín.		NBR-6293	D 113	20
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR-6560	D 36	8
Penetração retida, mín. (3)	%	NBR-6576	D 5	55

Fonte: Adaptado pela autora com base em Greca Asfaltos (2014).

3.1.3 Cal

A cal hidratada, incorporada na mistura asfáltica para suprir a falta de pó do

material fresado na composição granulométrica das misturas analisadas é da marca Dagoberto Barcellos (DB).

Figura 13 – Cal



Fonte: elaborado pela autora (2015)

3.2 Método

3.2.1 Introdução

Para a realização do atual estudo foram confeccionadas misturas asfálticas de material fresado com a adição ligante asfáltico (CAP 50/70) e cal.

Adotou-se a metodologia Marshall para a dosagem das misturas recicladas, das quais foram moldados três corpos-de-prova para cada teor de ligante, nos padrões de medida de 101,5 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, seguindo a especificação vigente da norma DNER ME 043 (DNER, 1995a). Foram produzidos 18 corpos de prova, conforme a relação abaixo:

- 3 corpos de prova com teor de 2% de CAP 50/70;
- 3 corpos de prova com teor de 2,5% de CAP 50/70;
- 3 corpos de prova com teor de 2,8% de CAP 50/70;
- 3 corpos de prova com teor de 3% de CAP 50/70;

- 3 corpos de prova com teor de 3,5% de CAP 50/70;
- 3 corpos de prova com teor de 4% de CAP 50/70.

Para os diversos tipos de misturas asfálticas, foram adotadas a mesma faixa granulométrica e a mesma temperatura de aquecimento e mistura dos ligantes e agregados.

3.2.2 Preparação dos agregados

Inicialmente, o material fresado foi peneirado e separado em 8 diferentes faixas granulométricas, conforme as faixas utilizadas pelo DNIT (Faixa C) com base no projeto da BR 386, elaborado pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), com base no método de ensaio da Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95), o peso final do corpo de prova deve permanecer próximo a 1.200,00g. Sendo assim, o presente estudo avaliou o peso, de acordo com a especificação vigente, para cada corpo de prova com 1.200,00 g. A Tabela 1 apresenta a composição granulométrica da mistura asfáltica, juntamente com a quantidade em gramas calculada para cada fração de agregado adicionada para a composição de 1 corpo de prova.

Tabela 1 – Composição granulométrica de um corpo de prova

Peneira	Mistura	Percentual (%)	Peso (g)
3/4"	100,00	0,00	0,00
1/2"	86,60	15,40	184,80
3/8"	79,10	5,50	66,00
Nº 4	52,20	26,90	322,80
Nº 10	35,20	17,00	204,00
Nº 40	20,00	15,20	182,40
Nº 80	13,20	6,80	81,60
Nº 200	6,90	6,30	75,60
Passante Nº 200	0,00	6,90	82,80
Total		100,00	1.200,00

Fonte: adaptada pela autora de UFRGS.

A execução para a separação do material fresado foi realizada com o aparelho agitador de peneiras que realizou movimentos constantes até a separação dos agregados, e então, o material fresado foi retido em cada peneira conforme a faixa granulométrica utilizada. São exibidos na Figura 14 os agregados utilizados para a moldagem dos corpos de prova, de acordo com a faixa granulométrica. Nota-se que o passante da peneira Nº200 foi substituído por cal, para suprir a falta de pó do material fresado.

Figura 14 – Separação dos agregados



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

3.2.3 Determinação do teor de ligante

O teor de ligante asfáltico do material fresado do revestimento foi definido através do emprego do rotaréx. A execução da mistura Betuminosa foi executada conforme as especificações da norma Misturas betuminosas – percentagem de ligante (DNER-ME 053/94). Desta maneira, seguiram-se os critérios apresentados a seguir.

Para a preparação da mistura, utilizou-se torrões de material fresado, pesando 2,178g, conforme apresentado na Figura 15. O material depositado em uma vasilha foi posto na estufa para a secagem dos agregados. Empregou-se um intervalo de temperatura entre 100°C a 120°C, no período de uma hora. Após, retirou-se a amostra e desmancharam-se os grumos com a colher, atendendo às especificações vigentes. A Figura 16 exhibe a amostra posteriormente às aplicações e

pronto para empregar o material no aparelho rotaréz.

Figura 15 – Torrões de material fresado



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Figura 16 – Material pronto para a realização do ensaio



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Efetivou-se em seguida, a pesagem da mistura, e após colocou-se a amostra no interior do prato de extrator de betume com papel de filtro no prato centrifugador e atarraxou-se firmemente a tampa. Adicionou-se pelo tubo de escoamento 150 ml de solvente, deixou-se agir por cerca de 15 min e acionou-se o aparelho.

Assim que a solução do betume e solvente parou de escoar, parou-se o aparelho e adicionou-se novamente 150 ml de solvente. Essa operação ocorreu sucessivamente até o solvente sair claro. Na Figura 17, pode ser visualizado o início do escoamento de Betume após a primeira aplicação de Solvente.

Figura 17 – Escoamento de Betume



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Esgotada a última carga de solvente, retirou-se o material do aparelho e colocou-se na estufa no intervalo de temperatura entre 80°C a 100°C até constância de peso.

Após, pesou-se a mistura e a partir das massas inicial e final das amostras, determinou-se o teor de ligante do material fresado, de acordo com a equação (1) abaixo:

$$P = \frac{\text{peso do betume extraído}}{\text{peso da amostra total}} \times 100 \quad (1)$$

Em seguida, originou-se a curva granulométrica do material após a extração do ligante asfáltico.

3.2.4 Dosagem Marshall

De acordo com Reis (2013), a dosagem de misturas asfálticas com material reciclado ainda não apresenta acordo entre agências e departamentos de transporte pelo mundo. No Brasil, procede-se da mesma forma, ou seja, não há procedimentos específicos de dosagem para misturas recicladas. No entanto, tem-se empregado no país a metodologia de dosagem Marshall de misturas asfálticas a quente.

Então, para a execução dos corpos de provas das misturas asfálticas respeitou-se as especificações do método de ensaio da Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95).

Primeiramente, realizou-se a secagem dos agregados na estufa para a preparação da mistura, em intervalo de temperatura entre 105°C e 110°C. Posteriormente, efetivou-se a pesagem e a separação granulométrica de cada uma das frações de agregados a serem empregados para a execução de um corpo de prova, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Separação dos Agregados



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Na sequência, realizou-se o aquecimento dos agregados na estufa a uma temperatura de 170°C, observando para que esta temperatura estivesse entre 10°C e 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, não podendo ultrapassar os 177°C, de acordo com o estabelecido na especificação vigente.

Em relação ao aquecimento do ligante, foi estabelecida a temperatura de 160°C, atendendo às especificações descritas anteriormente, não ultrapassando o tempo de 1 hora para o aquecimento do mesmo. Com a dosagem posta e a temperatura de acordo, abriu-se uma cratera e adicionou-se o ligante na mistura, pesando-o instantaneamente, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Adição de ligante asfáltico na mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Executou-se a mistura rapidamente sobre o fogo, num intervalo de 1 a 2 minutos, até que todos os agregados estivessem devidamente cobertos pelo ligante, conforme indicado nas particularizações da norma. A aparência final da mistura asfáltica é exibida na Figura 20.

Figura 20 – Aspecto final da mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Com a mistura envolta pelo ligante e devidamente finalizada, iniciou-se o processo de moldagem e compactação do corpo de prova. A mistura asfáltica foi colocada por duas horas dentro de uma estufa, empregando a mesma temperatura

em que a mistura seria compactada. Também se adicionou, juntamente na estufa, o molde de compactação para ser aquecido, a fim de que a mistura asfáltica não perdesse temperatura no momento da compactação.

Após, o molde foi assentado na posição correta no suporte de compactação e colocou-se papel filtro no fundo do molde. Em seguida, introduziu-se a mistura no protótipo, acomodando-a por meio de 15 golpes vigorosos no seu interior e extremidade, acrescentados de 10 golpes em seu centro, conforme exhibe a Figura 21.

Figura 21 – Acomodação da mistura no molde



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Com a mistura aclimatada no molde, aplicou-se 75 golpes com o soquete situado a uma altura de queda livre de 45,72 cm do corpo de prova. Finalizados os golpes, inverteu-se o corpo de prova, e aplicou-se mais 75 golpes, como pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Compactação da mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Com a remoção do molde dos corpos de prova após a sua compactação, colocou-se os mesmos sobre um superfície plana e lisa e deixou-se em repouso por 12 horas, à temperatura ambiente, seguindo as especificações do DNER-ME 043 (DNER, 1995a). A ilustração da Figura 23 mostra os corpos de prova prontos em repouso.

Figura 23 – Corpos de prova em repouso



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Realizou-se em cada corpo de prova a aferição das dimensões, pois, respeitando as especificações vigentes, o corpo de prova deve exibir uma altura de 63,50 mm, sendo aceitável uma variação de 1,3 mm tanto para mais quanto para menos, e um diâmetro de 100 mm, sendo cabível uma variação de até 2 mm a mais.

Atendendo às especificações, mediu-se com um paquímetro o corpo de prova em 4 posições diametralmente opostas, tanto para altura quanto para o diâmetro. Para a obtenção dos valores finais, realizou-se o cálculo de média entre os valores encontrados. Sucedeu-se também a pesagem dos corpos de prova, inicialmente secos e após submersos na água (FIGURA 24 e 25), em temperatura de 25°C. Na sequência, os mesmos foram retirados da água, e tiveram suas superfícies imediatamente secadas (FIGURA 26), e outra vez foram pesados.

Figura 24 – Pesagem do corpo de prova seco



Fonte: Elaborado pela autora (2015).

Figura 25 – Pesagem do corpo de prova submerso



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Figura 26 – Secagem do corpo de prova



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

A pesagem dos corpos de prova nas três circunstâncias descritas anteriormente é fundamental para a obtenção das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas estudadas.

3.2.5 Determinação da densidade aparente

Com a pesagem dos corpos de prova, efetuou-se a determinação da densidade aparente das misturas asfálticas. O método da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é o mais usado internacionalmente, com exceção do Brasil, que determina a densidade através do cálculo empregado pela NBR e pelo DNER (ANTT, 2014).

De acordo com Marques (2004), o método da ASTM D 2726 determina a massa específica aparente de uma mistura asfáltica compactada (G_{mb}) considerando os vazios superficiais por meio da utilização do peso úmido, adquirido com a secagem da superfície logo após a imersão na água. Já através do método brasileiro, tanto pela NBR 12891 (1993) ou pela DNER 117 (1994), obtém-se o volume do corpo de prova da mistura asfáltica sem considerar os vazios superficiais.

Deste modo, adotou-se para este estudo, o método ASTM D2726 para a determinação do G_{mb} através da equação (2) apresentada abaixo.

$$Gmb = \frac{Ms}{Msss - Msss_{sub}} \times 0,9971 \quad (2)$$

Onde:

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado;

Ms: peso ao ar ou peso seco;

Msss: peso medido na condição saturada de superfície seca;

Msss_{sub}: peso medido na condição saturada imerso em água;

0,9971: massa específica da água a 25°C, g/cm³.

3.2.6 Determinação da densidade máxima teórica

Determinou-se a Densidade Máxima Teórica (Gmm) por meio de ensaio a vácuo, indicado na norma americana ASTM D 2041 (ASTM, 2000). No Brasil, não há ainda técnica normatizada para essa determinação. Por isso a Gmm é habitualmente calculada através da ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2007).

Então, seguindo os parâmetros da norma americana para a determinação da Gmm em laboratório, utilizou-se o Rice Test.

Inicialmente, para a realização do ensaio, pesou-se 1200g de material fresado (mesma granulometria e temperatura utilizada para a dosagem Marshall) em um recipiente de massa conhecida, e adicionou-se porcentagem de ligante para a preparação da mistura, conforme indicado na Figura 27.

Figura 27 – Preparação da mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Calibrou-se o recipiente, e acrescentou-se água até o preenchimento do mesmo, pesando-o e em seguida removendo a água. Colocou-se a mistura feita no recipiente, pesando-os, e após adicionou-se água novamente, a uma temperatura de 25°C, até o cobrimento do material.

Após, o material foi levado para aplicação de uma pressão de vácuo residual no recipiente de 30mmHg, por um período de 15 minutos, com o propósito de expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante, como pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Aplicação do vácuo na mistura



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Depois da aplicação do vácuo, completou-se com água o volume do recipiente para posterior pesagem dos componentes (recipiente, mistura asfáltica e água). Assim, a G_{mm} foi calculada pela expressão (3) mostrada abaixo.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \times 0,9971 \quad (3)$$

Onde:

G_{mm} : densidade máxima teórica

A: massa da amostra seca em ar, g;

B: massa do recipiente em volume completo com água;

C: massa do recipiente + amostra submersa em água, g;

0,9971: massa específica da água a 25°C, g/cm³.

A vantagem do processo utilizando o Rice Test em relação à norma brasileira é a obtenção da massa específica da mistura asfáltica sem precisar obter as massas específicas dos seus agregados separadamente, além de já considerar a absorção

de ligante pelos agregados (BERNUCCI et al., 2007).

3.2.7 Determinação do volume de vazios

Asphalt Institute apud Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (2014) determina Volume de vazios (Vv) como "a porcentagem de vazios de ar na amostra compactada".

A preconização da norma DNIT 031 (DNIT, 2006b) determina que os vazios presentes em uma mistura asfáltica para a camada de rolamento devem atender aos percentuais limites de 3 a 5%.

Determinou-se o Vv das misturas estudadas, com os valores médios da densidade aparente (*Gmb*) calculados a partir dos três corpos de prova executados com a mesma porcentagem de ligante asfáltico.

Então, para a obtenção de Vv seguiu-se a seguinte Equação (4), de acordo com o método *Asphalt Institute* apud ANTT (2014),

$$Vv = 100 \times \frac{(Gmm - Gmb)}{Gmm} \quad (4)$$

Onde:

Vv: volume de vazios;

Gmm: densidade máxima medida da mistura asfáltica solta;

Gmb: densidade relativa aparente do corpo de prova compactado.

A partir das características volumétricas dos teores iniciais, descobriu-se o teor de ligante do projeto para o volume de vazios de 4% e, então, determinou-se o projeto de mistura asfáltica utilizando material reciclado.

3.2.8 Estabilidade e fluência Marshall

A estabilidade e fluência Marshall foram determinadas com base nas especificações do método de ensaio da Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95).

Primeiramente, colocaram-se os corpos de prova com teores de 2%, 2,5%, 3%, 3,5% e 4% submersos em banho-maria em temperatura de 60°C por um período de 30 a 40 minutos, conforme a Figura 29. Após, retirou-se cada corpo de prova e colocou-se imediatamente dentro do molde de compressão.

Figura 29 – Corpos de prova submersos em banho-maria



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Em seguida, o corpo de prova foi posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência. Foi assentado e ajustado na posição de ensaio, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Posicionamento na prensa



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

A prensa foi operada com uma taxa de carregamento de 5cm/minuto. O ensaio consistiu com a parte superior da prensa fixa e o prato inferior deslocando-se para cima, de acordo com a taxa referida. Também foi imposta uma força crescente para segurar o prato inferior se movendo.

Segundo Bernucci (2007), a força aumenta até certo ponto em que acontece uma perda da estabilidade do material, originada pelo deslocamento ou rompimento de agregados. Destarte, a estabilidade Marshall (kgf ou N) se refere à carga máxima correspondente a este ponto e o deslocamento vertical total do prato, correspondente ao ponto de carga máxima, nomeado fluência (mm).

Os resultados obtidos com o ensaio foram adquiridos simultaneamente com o registro automático da carga e do deslocamento feito pelo computador acoplado com o aparelho. A Figura 31 mostra os 15 corpos de prova deformados após a aplicação da carga.

Figura 31 – Corpos de prova deformados



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

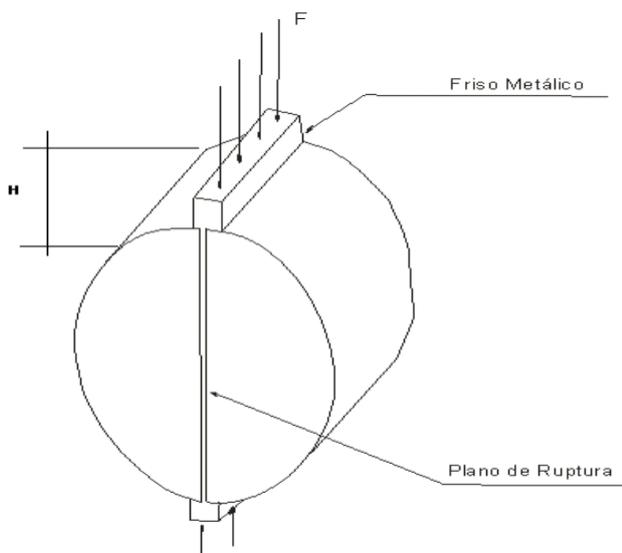
3.2.9 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Determinou-se a resistência à tração por compressão diametral para os 3 corpos de provas com teor de projeto, com base na especificação da norma DNIT 136 (DNIT, 2010). Inicialmente, devem-se medir os corpos de provas com o paquímetro. Como já havia sido aferido anteriormente, utilizaram-se as mesmas medidas.

Em seguida, as amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura de 25°C durante um período de 2 horas, sendo permitida uma variação de 0,10°C, conforme mencionado nas exigências da norma.

Após, cada corpo de prova foi situado sobre uma superfície cilíndrica, constituída por dois frisos metálicos, com uma das faces curva e comprimento igual ao corpo de prova, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 – Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: DNIT 136 (2010).

Na sequência, com o posicionamento correto do corpo de prova, aplicou-se uma carga progressiva sobre o mesmo, com velocidade de deformação de 0,80 mm/s, permitindo uma variação de 0,01 mm/s. A carga foi aplicada até que se sucedeu a ruptura, separando em duas metades o corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. A Figura 33 demonstra o exato momento da ruptura do corpo de prova.

Figura 33 – Rompimento do corpo de prova na prensa cilíndrica



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

A Figura 34 exibe os três corpos de prova rompidos posteriormente ao ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico.

Figura 34 – Corpos de prova rompidos



Fonte: Elaborado pela autora (2015)

Com o valor da carga de ruptura obtido no ensaio, calculou-se a resistência à tração do corpo de prova rompido, através da seguinte Equação (5):

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (5)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios das misturas asfálticas com material fresado foram realizados adicionando-se teores distintos de ligante asfáltico convencional, CAP 50/70. Foram adotadas 5 diferentes percentagens de ligante asfáltico: 2%, 2,5%, 3%, 3,5% e 4%, a fim de se obter o teor de ligante para o projeto. Todos foram compactados a uma temperatura de 160°C e para cada mistura com teor de ligante associou-se 3 amostras, totalizando 18 corpos de prova. Em todos os casos, a energia de compactação aplicada foi de 75 golpes por face.

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios são exibidos a seguir, através de tabelas e gráficos, os quais apreciam a análise das propriedades do material fresado, das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas executadas.

As características do material fresado são apresentadas através da determinação do teor de ligante asfáltico e o enquadramento granulométrico do material após extração de ligante. Já as características volumétricas das misturas asfálticas são exibidas através da densidade aparente, densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta e volume de vazios. As características mecânicas são demonstradas pela estabilidade e fluência Marshall, e pela resistência à tração por compressão diametral.

4.1 Resultados da caracterização do material

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização do material fresado proveniente da BR-386, entre as cidades de Estrela/RS e Tabai/RS. Inicialmente, será apresentada a percentagem de teor de ligante asfáltico extraído do material fresado e, em seguida, o enquadramento granulométrico da mistura.

4.1.1 Teor de ligante asfáltico do material fresado

Com base nos dados da Tabela 2, foi determinada a percentagem de teor de ligante asfáltico extraído do material fresado, o qual obteve como resultado o valor de 5,8%. Observou-se durante a apreciação do ensaio que o material fresado depois da extração do betume apresentou granulometria mais fina, evidenciada pela remoção de torrões de agregados que estavam unidos pelo ligante.

Tabela 2 – Ensaio Rotarék

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

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

4.1.2 Enquadramento granulométrico após extração de ligante

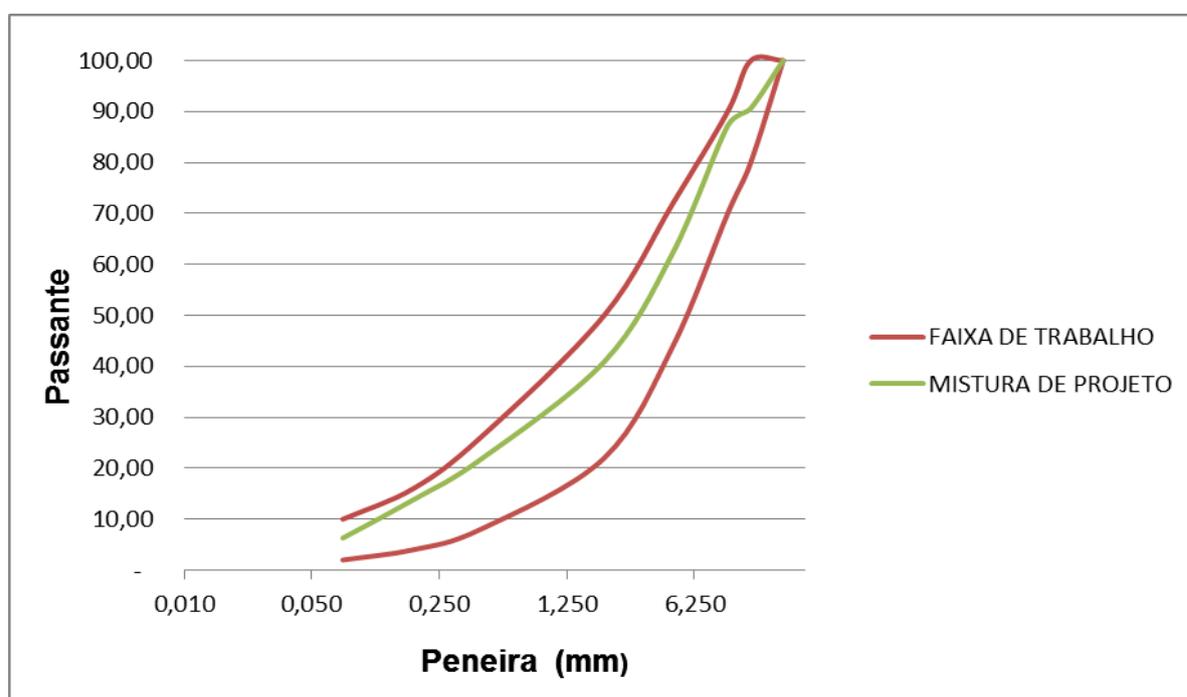
Após a extração do ligante asfáltico do material fresado, fez-se necessário o peneiramento do agregado, a fim de se obter o enquadramento granulométrico do mesmo. A Tabela 3 mostra o enquadramento granulométrico da mistura, juntamente com o Gráfico 1, que ilustra o enquadramento da mistura dentro dos limites da faixa “C” do DNIT.

Tabela 3 - Granulometria dos agregados do material fresado pós-extração do ligante

Peneira	mm	Material retido (g)	Faixa de trabalho (g)		Mistura (%)
$\frac{3}{4}$	19,100	-	100,00	100,00	100
$\frac{1}{2}$	12,700	88,50	80,00	100,00	90,60
$\frac{3}{8}$	9,500	32,50	70,00	90,00	87,20
4	4,760	234,80	44,00	72,00	62,30
10	2,000	201,90	22,00	50,00	40,90
40	0,420	180,70	8,00	26,00	21,70
80	0,180	74,40	4,00	16,00	13,80
200	0,074	71,10	2,00	10,00	6,30

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 1 – Enquadramento granulométrico dentro da faixa C do DNIT



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

4.2 Resultados volumétricos

A averiguação dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas compactadas em laboratório é importante para obter-se um indicativo do desempenho provável que estas misturas apresentarão depois em campo (ASPHALT INSTITUTE apud ANTT, 2014). Assim sendo, os resultados obtidos para os principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas (densidade aparente,

densidade máxima teórica da mistura asfáltica solta e volume de vazios) são apresentados a seguir.

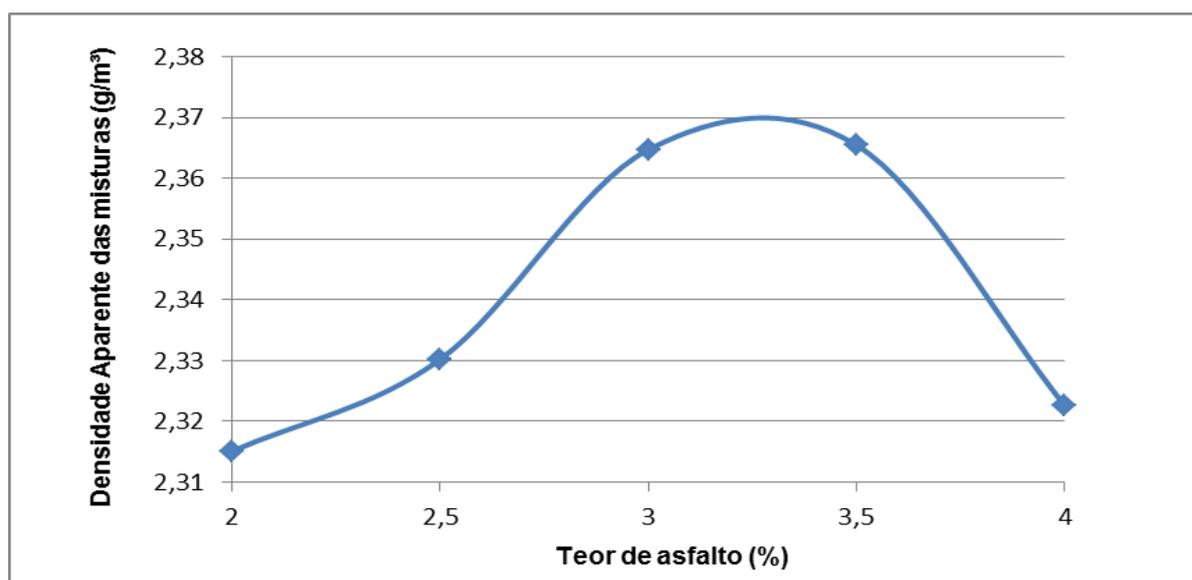
A primeira análise realizada refere-se à densidade aparente das misturas asfálticas. A Tabela 4 e o Gráfico 2 apresentam os resultados obtidos com a utilização do método empregado internacionalmente, pela ASTM D 2726. Percebe-se que há um aumento na densidade aparente até o teor de 3% de ligante asfáltico, mantendo-se a mesma até o teor de 3,5 % e após, a mistura sofre um decréscimo. Nota-se também que os corpos de prova sofrem pequenas variações na densidade, as quais ocorrem apenas na segunda casa decimal.

Tabela 4 – Teor de ligante asfáltico X Densidade aparente

Teor de CAP 50/70	Densidade Aparente média (g/cm ³)
2,0	2,315
2,5	2,330
3,0	2,365
3,5	2,365
4,0	2,323

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 2 – Teor de ligante asfáltico X Densidade aparente



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

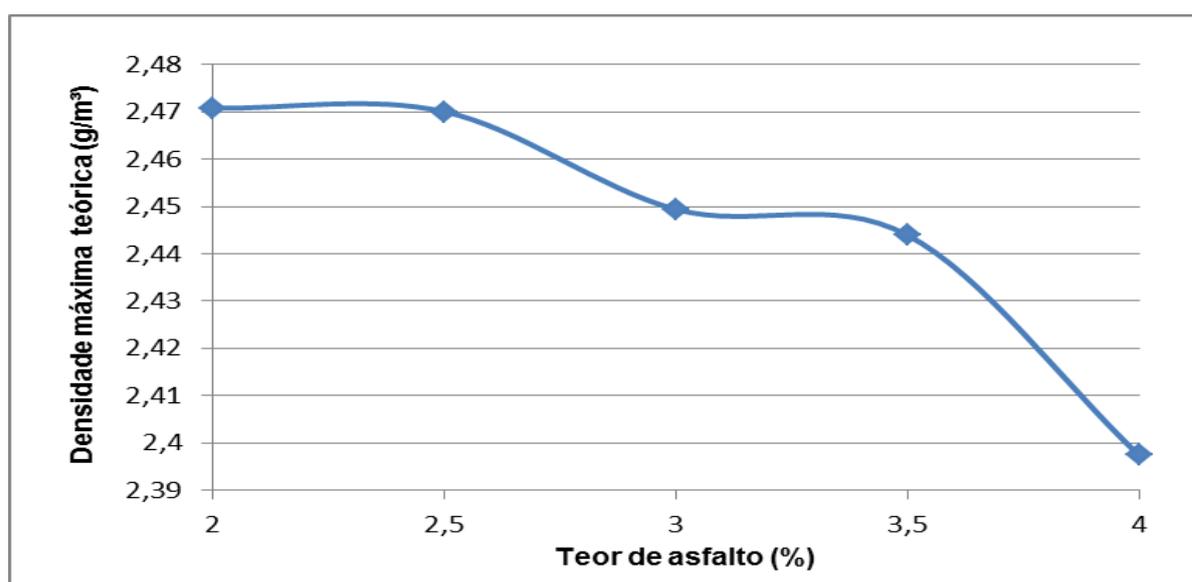
Na sequência, a Tabela 5 e o Gráfico 3 indicam os resultados obtidos em relação à densidade máxima teórica (Gmm). Determinou-se a Gmm por meio do ensaio Rice, indicado na norma americana ASTM D 2041 (ASTM, 2000). Observa-se que há um decréscimo na densidade máxima teórica em relação à percentagem de ligante asfáltico (CAP 50/70) das misturas asfálticas. Quanto maior o teor de ligante asfáltico, menor é a Gmm. Este fato é evidenciado pelo conjunto agregado e ligante que se apresenta menos denso ao passo que o teor de ligante aumenta, diminuindo conseqüentemente a Gmm das misturas asfálticas. Porém, percebe-se que as densidades pouco variam entre as misturas de 2% a 4% de ligante. Também nota-se que, para as misturas com 2% e 2,5% de ligante, a Gmm é praticamente igual, o mesmo acontece com os teores de 3% e 3,5%.

Tabela 5 – Teor de ligante asfáltico X Densidade máxima teórica

Teor de CAP 50/70	Densidade máxima teórica (g/cm ³)
2,0	2,471
2,5	2,470
3,0	2,449
3,5	2,444
4,0	2,397

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 3 – Teor de ligante asfáltico X Densidade máxima teórica



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Finalizando as análises em relação às propriedades volumétricas das misturas asfálticas com material fresado, tem-se a apresentação dos resultados do volume de vazios. Na presente análise, adotou-se o método Asphalt Institute *apud* ANTT (2014).

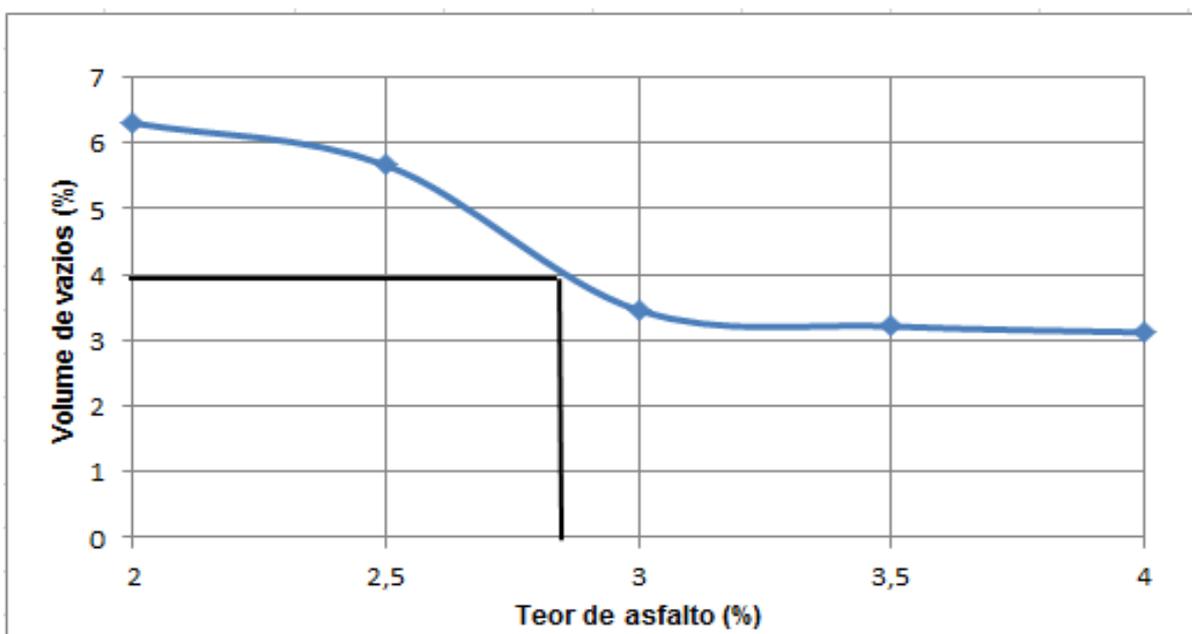
Com a análise do método adotado, pode-se concluir, a partir da apresentação da Tabela 6 e Gráfico 4, que o volume de vazios (Vv) de ambas misturas asfálticas apresentou um decréscimo no seu percentual, ao passo que o teor de ligante asfáltico das misturas é aumentada. Essa ocorrência pode ser explicada, pelo fato de que o ligante adicionado entra nos vazios dos agregados, reduzindo o Vv da mistura estudada.

Tabela 6 – Teor de ligante asfáltico X Volume de vazios

Teor de CAP 50/70	Volume de vazios (%)
2,0	6,301
2,5	5,660
3,0	3,456
3,5	3,212
4,0	3,122

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 4 – Teor de ligante asfáltico X Volume de vazios



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Determinou-se, a partir da obtenção do volume de vazios dos teores iniciais de ligante, o teor de projeto de ligante asfáltico para a mistura reciclada. A escolha do teor de projeto para a camada de rolamento baseou-se somente no volume de vazios (Vv), correspondente a 4%.

Para obter o teor de projeto da mistura asfáltica, traçou-se no Gráfico 4, uma linha na horizontal correspondendo ao Vv com o percentual de 4% até o encontro da curva, volume de vazios x teor de ligante. Em seguida, traçou-se uma segunda linha vertical até o eixo do teor de ligante, resultando no valor para o teor de projeto de ligante asfáltico convencional de 2,8%.

A aplicação do método de dosagem Marshall, utilizando o teor de projeto de ligante, confirma os valores médios para os parâmetros volumétricos a partir dos três corpos de prova adicionais executados, conforme a Tabela 7. Também apresenta resultado satisfatório para o percentual de Vv para a camada de rolamento, atendendo os requisitos técnicos para concretos asfálticos, segundo a norma DNIT ES 031(DNIT, 2006b), ficando em torno de um valor médio de 4,11%, o qual é aconselhado, para que posteriormente, a mistura apresente um apropriado comportamento às deformações permanentes e trincamentos por fadiga quando submetida aos esforços do tráfego.

Tabela 7 – Parâmetros volumétricos para o teor ótimo de ligante

Parâmetros Volumétricos	CP1	CP2	CP3	Média
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,356	2,351	2,349	2,352
Densidade máxima Teórica (g/cm ³)	2,453	2,453	2,453	2,453
Volume de vazios (%)	3,947	4,142	4,243	4,111

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

4.3 Resultados dos ensaios mecânicos

Os corpos de prova moldados foram submetidos a ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, e resistência à tração por compressão diametral.

Os resultados obtidos no ensaio de estabilidade Marshall para os diferentes teores de ligante asfáltico convencional são explanados na Tabela 8 e Gráfico 5. Observa-se também, que ocorre um acréscimo na estabilidade até o traço de 2,5%,

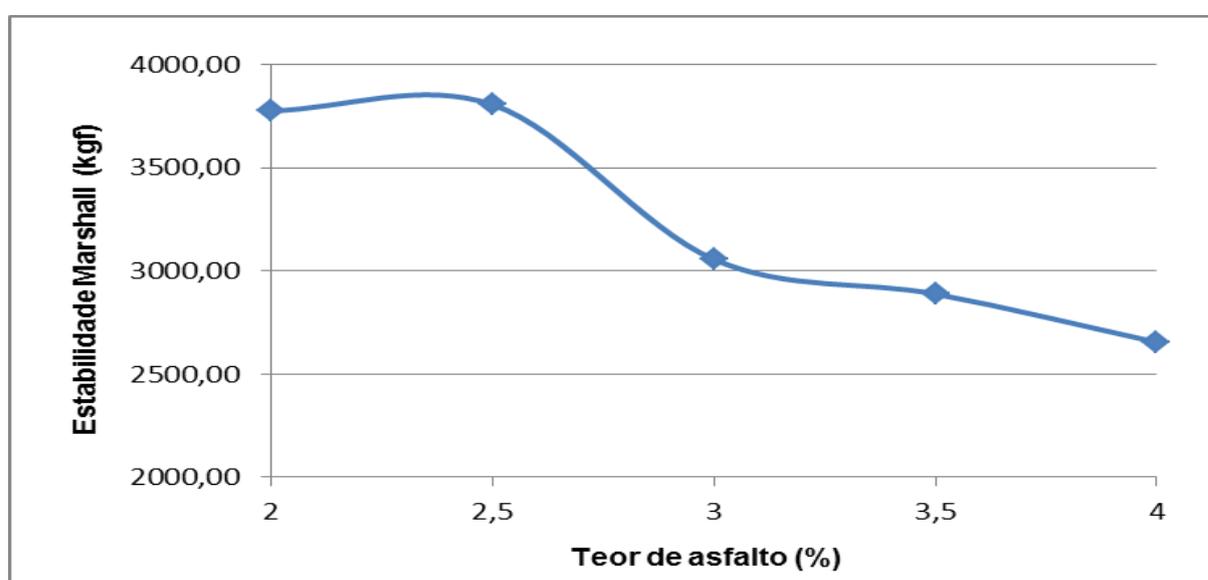
e ao passo que a percentagem de ligante aumenta, acontece um decréscimo na estabilidade. Esta ocorrência pode ser esclarecida pelo fato de que as misturas com maior percentual de ligante asfáltico são mais suscetíveis à temperatura, e ao serem colocadas em banho-maria a uma temperatura de 60°C num período de 40 min, a mistura compactada fica mais branda, pois o ligante fica mais fluído, e conseqüentemente menos resistente à carga de compressão.

Tabela 8 – Teor de Ligante X Estabilidade

CP's	Teor de Ligante (%)	Estabilidade (kgf)	Estabilidade Média (kgf)
0.1	2,0	4193	3776,67
0.2	2,0	3908	
0.3	2,0	3229	
0.4	2,5	4402	3805,67
0.5	2,5	3442	
0.6	2,5	3573	
0.7	3,0	4258	3055,67
0.8	3,0	2470	
0.9	3,0	2439	
10	3,5	2645	2888,33
11	3,5	3430	
12	3,5	2590	
13	4,0	2963	2654,67
14	4,0	2695	
15	4,0	2306	

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 5 – Teor de Ligante X Estabilidade



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

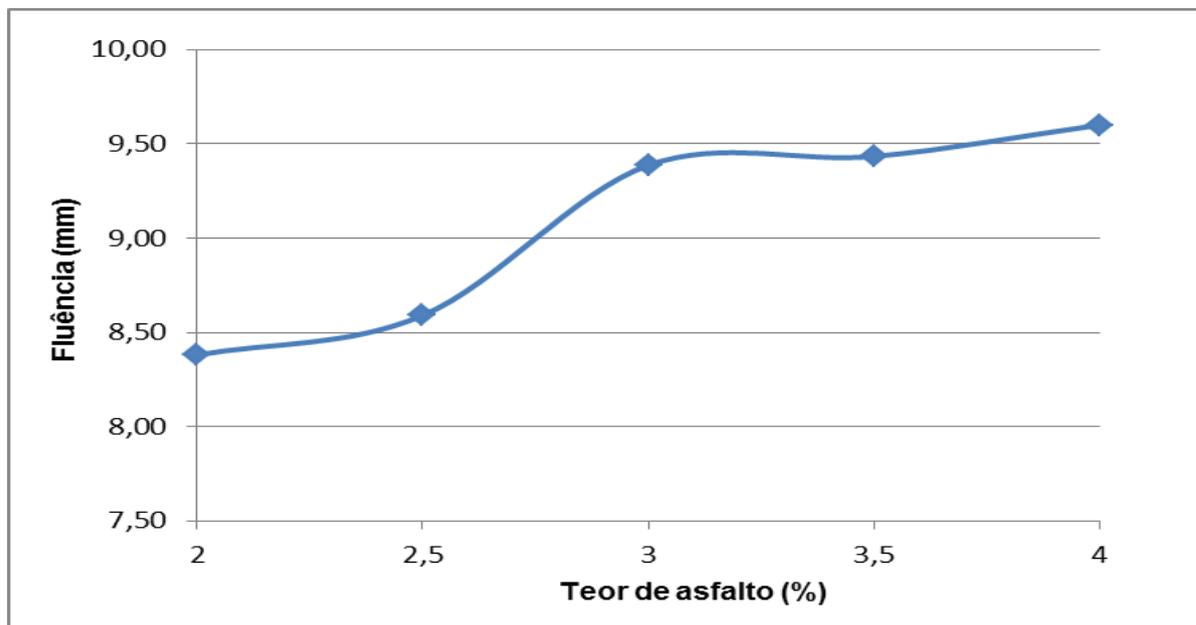
No mesmo instante em que se determinou a estabilidade por meio da prensa Marshall, determinou-se também a fluência, resultado do deslocamento vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima. A Tabela 9 e Gráfico 6 evidenciam os valores reais e médios encontrados no deslocamento vertical para os diferentes teores de ligante asfáltico. É notável o acréscimo na fluência, ao passo que a percentagem de ligante asfáltico aumenta. Este acontecimento pode acarretar o deslocamento dos agregados quando submetidos aos esforços de tráfego de veículos, prejudicando, desta forma, o desempenho mecânico do pavimento.

Tabela 9 – Teor de Ligante X Fluência

CPS	Teor de Ligante (%)	Fluência (mm)	Fluência média (mm)
0.1	2,0	8,33	8,38
0.2	2,0	10,38	
0.3	2,0	6,43	
0.4	2,5	7,15	8,59
0.5	2,5	11,83	
0.6	2,5	6,79	
0.7	3,0	8,51	9,39
0.8	3,0	9,35	
0.9	3,0	10,3	
10	3,5	9,8	9,43
11	3,5	7,9	
12	3,5	10,6	
13	4,0	9,7	9,60
14	4,0	8,5	
15	4,0	10,6	

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 6 – Teor de Ligante X Fluência



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

De posse destes resultados e a partir do teor de ligante de projeto de 2,8%, encontraram-se os demais valores médios de projeto, os quais estão apresentados na Tabela 10. Nota-se que o valor encontrado para a estabilidade apresenta-se bem acima do limite mínimo de 500 kgf estabelecido pela norma DNIT ES 031 (DNIT, 2006b), o que confirma a satisfatória utilização de material fresado em misturas asfálticas. Já a fluência apresentou valor acima das médias constatadas nas literaturas para o pavimento de concreto asfáltico e também apresentou valor superior ao limite preconizado na norma DNER ES 313 (DNER 1997), que aceita uma variação de 2,0 a 4,5 mm, deste modo, a fluência de projeto não apresentou valor favorável. O não atendimento do parâmetro pode influenciar no deslocamento do material quando submetido aos esforços de tráfego.

Tabela 10 – Estabilidade e Fluência Marshall para o teor de projeto

Teor de Projeto (%)	Estabilidade Marshall (Kgf)	Fluência (mm)
2,8	3378,67	9,14

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Examinando os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), através da Tabela 11 e Gráfico 7, consta que os corpos de prova moldados com teor de projeto apresentam valores satisfatórios para esse

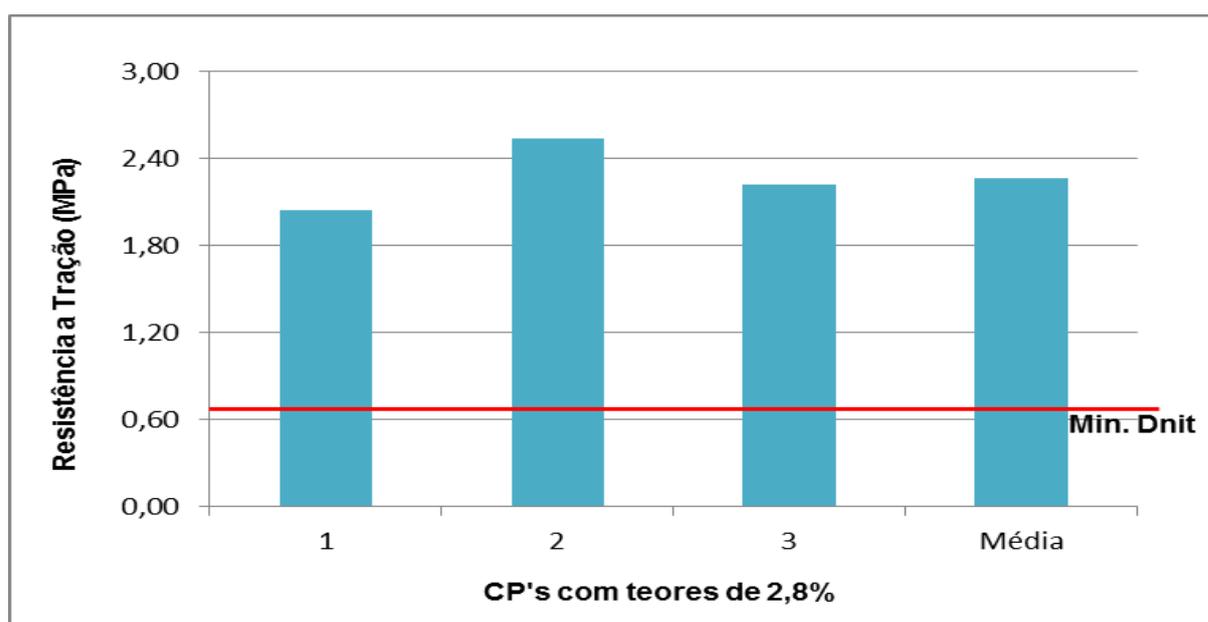
tipo de mistura, ressaltando-se o valor mínimo de RT descrito na norma DNIT ES 031 (DNIT, 2006) de 0,65 Mpa. Destaca-se que os valores encontrados atendem à especificação. O Gráfico 7 mostra os resultados dessas resistências, comparando-os com o valor mínimo exigido na norma para a camada de rolamento, faixa C do DNIT.

Tabela 11 – Teor de projeto x Resistência a Tração

CP's	Teor de projeto de Ligante (%)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga de Ruptura (N)	Resistência a Tração (MPa)	Resistência a Tração Média (MPa)
1	2,8	10,15	6,50	21199,41	2,046	2,268
2	2,8	10,15	6,50	26280,99	2,536	
3	2,8	10,15	6,50	23033,88	2,223	

Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Gráfico 7 – Teor de projeto x Resistência a Tração



Fonte: Elaborada pela Autora (2015)

Conforme os dados apresentados e as análises realizadas, constatou-se que a mistura asfáltica elaborada com material fresado e incorporação de Cal para suprir a falta de pó empregando ligante convencional (CAP 50/70), apresentou características mecânicas que atendem às especificações do DNIT. Portanto, o reaproveitamento deste material fresado para execução de um novo revestimento asfáltico é viável. Entretanto, é de conhecimento geral que a usinagem desta mistura asfáltica não seria uma tarefa simples e teriam que ser realizadas adaptações nos

equipamentos para tal tarefa.

Por fim, destaca-se que o emprego da mistura asfáltica apresentada nesta pesquisa não seria recomendado para revestimentos asfálticos de rodovias com muito tráfego, pois seriam necessários ensaios adicionais para verificar tal viabilidade.

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo determinar um projeto de mistura asfáltica, dosada com material fresado, incorporação de cal e emprego de ligante asfáltico convencional (CAP 50/70), assim como analisar a viabilidade da reutilização deste material para a camada de revestimento do pavimento. O estudo possibilitou análise das propriedades do material fresado, bem como as propriedades mecânicas e volumétricas da mistura asfáltica. Ressalta-se, como dito anteriormente, que o reaproveitamento deste material fresado para execução de um novo revestimento asfáltico é viável. Entretanto, é de conhecimento geral que a usinagem desta mistura asfáltica não seria uma tarefa simples e teriam que ser realizadas adaptações nos equipamentos para tal tarefa.

Dessa forma, dos resultados obtidos e das análises feitas, chegou-se a algumas conclusões que serão apresentadas a seguir. Por último, será feito um comentário sobre sugestões para futuras pesquisas que deem sequência ao presente estudo.

Após atingir os objetivos sugeridos inicialmente, pode-se concluir:

I. A percentagem de teor de ligante asfáltico extraído do material fresado foi igual a 5,8%. Salienta-se que esta percentagem de ligante encontrada no material fresado pode sofrer variação na composição granulométrica das misturas estudadas, devido à existência de fresado com maior e menor incorporação de ligante antigo e também, pela eventual perda de material durante a moldagem dos corpos de prova.

II. A composição granulométrica do agregado após extração de ligante asfáltico

se enquadraram nas faixas das especificações adotadas neste estudo para pavimento de concreto asfáltico, Faixa C do DNIT.

III. Para o volume de vazios correspondente a 4%, determinou-se o teor de ligante asfáltico de 2,8% para a execução do projeto de mistura asfáltica dosada com predominância de material fresado.

IV. A densidade aparente, determinada a partir do teor de ligante de projeto, apresentou valor médio dos 3 corpos de prova de 2,352 g/cm³.

V. A utilização do método ASTM para a determinação da densidade máxima teórica através do ensaio Rice apresentou o resultado de 2,453 g/cm³ para o teor de ligante de projeto.

VI. O volume de vazios para o teor de projeto de 2,8% de ligante asfáltico, para os corpos de provas moldados especialmente para medição da resistência à tração, apresentaram valor médio de 4,11%. Essa variação é aceita conforme especificado na norma do DNIT ES 031 (DNIT, 2006b) para a camada de rolamento, que aceita variações no teor de vazios de $\pm 1\%$.

VII. A mistura com teor de projeto de ligante asfáltico apresentou Estabilidade Marshall de 3378,67 Kgf, valor acima do limite mínimo de 500 Kgf especificado na norma adotada. Em contrapartida, a Fluência Marshall não apresentou valor favorável. O não atendimento do parâmetro pode influenciar no deslocamento do material quando submetido aos esforços de tráfego, devido ao valor encontrado de 9,14 mm ser acima das médias constatadas nas literaturas para o pavimento de concreto asfáltico e também, superior aos valores aceitos conforme a especificação do DNER ES 313 (DNER 1997), que é de 2,0 a 4,5 mm.

VIII. A determinação da resistência à tração para a mistura asfáltica elaborada a partir de material asfáltico fresado, apresentou valor médio de 2,268 MPa. A mistura apresentou valor de RT superior ao limite preconizado na norma DNIT ES 031 (DNIT, 2006b), que é de 0,65 MPa.

IX. O emprego da mistura asfáltica apresentada nesta pesquisa não é conclusivo para revestimentos asfálticos de rodovias com alto volume de tráfego, pois seriam necessários ensaios adicionais para verificar tal viabilidade.

Diante dessas análises conclusivas, não se tem a pretensão de esgotar todas as outras formas de pesquisa, assim sendo, sugere-se os seguintes estudos acerca do assunto:

I. Estudar a mistura reciclada de projeto realizando o ensaio mecânico de módulo de resiliência;

II. Determinar o ensaio de fadiga para a determinação dos parâmetros mecânicos da mistura reciclada estudada;

III. Estudar misturas com 100% de material fresado utilizando o método de dosagem SUPERPAVE;

IV. Estudar misturas com adição de agente rejuvenescedor para beneficiar e melhorar o CAP encanecido no material fresado, considerando também na dosagem, o CAP proveniente no material fresado;

V. Estudar trechos experimentais com a implantação de misturas asfálticas recicladas que, a partir de pesquisas laboratoriais, apresentaram desempenhos satisfatórios para os parâmetros analisados.

REFERÊNCIAS

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/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa___RDT.html>. Acesso em: 6 set. 2015.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 2041. **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures**. USA: American Society for Testing and Materials, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7207:1982**. Terminologia e Classificação de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12891:1993**. Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION (ARRA). **Basic Asphalt Recycling Manual** – publicação da ARRA, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration –Estados Unidos da América, 2001.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION (ARRA).. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1997.

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

BARROS, Rafael F. **Utilização do revestimento fresado da BR-104 como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. Caruaru: O Autor, 2013.

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

BERNUCCI, Liedi B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2007.

BOCK, André Luiz. **Efeito da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3. ed. São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

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

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. Editora Fazendo Arte, São Paulo, 2. ed. 2001.

BONFIM, V.; DOMINGUES, F. A. A. **Utilização de Fresagem e Reciclagem “In Situ” a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos**. 29. Reunião Anual de Pavimentação, v. 3, Cuiabá, MT, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 313**: Pavimentação: concreto betuminoso. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043**: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 053**: Misturas betuminosas: percentagem de betume. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031 - ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136 - ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE

TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. IPR. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: DNIT, 1998.

CAMPOS, O. de S. **Serviços de Reciclagem de Pavimentos Realizados nas Rodovias da DERSA** - Desenvolvimento Rodoviário S. A. 22. Reunião Anual de Pavimentação, v. 2, Maceió, AL, 1987.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/index.aspx>>. Acesso em: 28 mar. 2015.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2013: relatório gerencial**. Brasília, 2003. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Pagina/2012/relGeral.aspx>>. Acesso em: 28 mar. 2015.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese (Doutorado) – UnB, Brasília, DF. 2004.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Pavement recycling guidelines for state and local governments**: Technical Report No. FHWA-AS-98-042. Washington. 1997.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Recycled Materials In European Highway Environments**, Uses, Technologies, and Policies- FHWA-PL-00-25, 2000.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland – Proposição de um método de dosagem**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FINN, Fred N. **Seminar on Asphalt Pavement Recycling Overview of Project Selection**. Transportation Research Record 780- Commission on Sociotechnical Systems – National Academy of Sciences. Washington D.C., 1980.

GLITA, S. **Contribution à l'étude physico-chimie des bitumes**. Havre: Tese de Doutorado apresentada à Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre, 1988.

GRECA ASFALTOS. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/menu-esquerda-produtos-asfaltos-cap>>. Acesso em: 1 out. 2015.

GULYAS, Andras; BOROMISZA, Tibor; TOROCSIK, Frigyes. Experience of Cold Inplace Recycling in Hungary. **Transportation Research Board**- Washington D.C., 2006.

GUSMÃO, C. B. **Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado – UNICAMP, Campinas. 2008.

ISHAI, I.; CRAUS, J. **Effect of the on aggregate bitumam adhesion properties in bituminous mixtures**. Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228-258, 1977.

LAHUE, Sanford P. **Procedings of the Nacional Semiar on Asphalt Pavement Recycling- Economics of Recycling**. Transportation Research Record 780-Commission on Sociotechnical Sístems – National Academy of Sciences. Washigton D.C., 1980.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MARQUES, Geraldo L. de O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Rio de Janeiro, 2004.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Camadas de pavimentos flexíveis**. 2007.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G. da. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

MIRANDA J. et al. **Reciclagem de Camadas Betuminosas com Sub-base Estabilizada com Cimento na BR-381: Uma Experiência**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32a , ABPv, Brasília, 2000.

MOREIRA, J. P. V., **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**, 2006. CGASC, V.N.Famalicão, Portugal.

MOTTA, Laura M. G. da; PINTO, Salomao; GUARCONI, Dilma S. Trecho de Reciclagem a Frio na BR 393 - **Avaliação após 8 anos da Implantação**. IBP03102, 2002.

NECKEL Glauciano. **Estudo do asfalto-borracha como revestimento asfáltico em pistas aeroportuárias**. Trabalho de conclusão do curso (Bacharel em engenharia Civil) – UDESC, Joinville, SC. 2008.

NUNN, M.; CARSWELL, I.; MERRILL, D. Sustainable Maintenance of Roads using Cold Recycling Techniques (Smart Project) - **International Symposium on Pavement Recycling**. São Paulo, 2005.

PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA (2008). **Formação básica para engenheiros**, Rio de Janeiro 2008.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos. 3. ed. 2007.

PIRES, G. M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material**

fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos. Tese (Mestrado) – UFSM, Santa Maria/RS, 2014.

REIS, A. C. C. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Recicladas em Usina Protótipo de Escala Reduzida.** Dissertação (Mestrado). – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2013.

SALOMON, A.; NEWCOMB, D. E. **Cold In-Place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure.** Minnesota Department of Transportation, Relatório No. MN/RC-2000-21. 2000.

SENÇO, Wlastemiler de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. v. 1.

SUZUKI, Carlos Y.; PEREIRA, Antonio C. O.; TSU, Bruna S. A.; AZEVEDO, Angela M.; DIAZ, Patricio H.; TUCHUMANTEL, Osvaldo. Structural Analysis of a Test Section Using Cold in Place Recycling - **International Symposium on Pavement Recycling.** São Paulo, 2005.

TUCHUMANTEL JR, Osvaldo. **Reciclagem de Pavimentos** - Conceitos, Interpretações e Controle, Betunel Indústria e Comércio LTDA, 1999.

WIRTGEN AMERICA. **Recycling e Stabilization.** Disponível em: <<https://www.wirtgenamerica.com/flash.html>>. Acesso em: 28 mar. 2015.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio:** Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. Windhagen, Alemanha, 2012.

WIRTGEN. **Tecnologia inovadora que conquistou o mundo:** O mundo das estabilizadoras de solos e recicladoras a frio da Wirtgen. Windhagen, Alemanha, 2007.