

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CRISTIANE BOLINA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO**

Alegrete

2014

CRISTIANE BOLINA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Jaelson Budny

**Alegrete
2014**

CRISTIANE BOLINA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 20 de Agosto de 2014.

Banca examinadora:

Prof. Mestre Jaelson Budny
Orientador Unipampa

Prof. Mestre Magnos Baroni
Unipampa

Prof. Rodrigo Klamt
Unipampa

DEDICATÓRIA

“Dedico este trabalho a minha irmã e aos meus pais, meus amores e principais incentivadores. Por vocês tenho forças para enfrentar qualquer coisa.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por te me dado força para superar todos os obstáculos. Aos amigos, familiares e colegas que incentivaram, torceram e ajudaram, de alguma forma, para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Jaelson Budny, meu orientador, pelo apoio, orientação e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Aos professores, membros da banca avaliadora, pelas orientações de forma a acrescentar e melhorar a qualidade do trabalho final.

À Universidade Federal do Pampa pela oportunidade de formação, e aos professores do curso de Engenharia Civil, pelo conhecimento adquirido e crescimento pessoal e profissional proporcionado pela convivência com todos vocês.

À Universidade Federal de Santa Maria, por permitir a utilização de seus laboratórios para desenvolvimento de ensaios.

Agradeço aos meus pais, Rodnei e Zair, pelo apoio incondicional e incentivo ao longo de toda a graduação, amo vocês.

Em especial, agradeço também a minha irmã Bruna, por ser mais do que irmã, ser minha melhor amiga, meu anjo que me dá forças sempre, você é a minha vida.

E, por fim, agradeço a uma pessoa que não está mais entre nós, mas em vida, ajudou na minha criação, me amou, torceu pelo meu sucesso. Minha querida avó Malvina, tenho certeza que de alguma forma irá comemorar esta vitória comigo. Amo muito você e sinto saudades.

RESUMO

A escassez dos recursos naturais e a demanda por alternativas de reutilização de materiais reciclados tornou a reciclagem uma palavra de ordem no atual cenário da construção rodoviária mundial. A fresagem de pavimentos produz um material de alto valor econômico e com ótimas propriedades físicas e mecânicas que podem ser introduzidas na composição de novas misturas asfálticas. O presente trabalho avaliou o comportamento mecânico de misturas usinadas a quente com adição de diferentes teores de ligante novo. O material do estudo é proveniente da BR-290 do trecho situado entre os municípios de Rosário do Sul e São Gabriel. Para caracterização do material fresado foi executado os ensaios de granulometria, extração de betume, estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral com corpos-de-prova cilíndricos moldados de acordo com as misturas propostas. De acordo com os resultados, obtiveram-se valores de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral, satisfatórios para a aplicação de material fresado em misturas asfálticas para camadas de rolamento.

Palavras-chave: fresado; reciclagem; dosagem.

ABSTRACT

The scarcity of natural resources and the demand for alternative reuse of recycled materials has made recycling a slogan in the current scenario of global road construction. A floor milling yields a material with high economic value and excellent physical and mechanical properties that may be introduced in the composition of new asphalt mixtures. This study evaluated the mechanical mixtures machined hot with addition of different amounts of new binder behavior. The study material is from the BR-290's passage located between the municipalities of Rosario do Sul and São Gabriel. For characterization of the milled material was performed assays grading, bitumen extraction, Marshall stability and creep and tensile strength by diametral-compression bodies of cylindrical specimens molded in accordance with the proposals mixtures. According to the results, we obtained values of stability, creep and tensile strength by diametral compression, suitable for the application of milled material in asphalt mixtures for layers bearing.

Keywords: milled; recycling; dosing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento	19
Figura 2 - Efeitos da escolha do momento de se restaurar um pavimento	23
Figura 3 - Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos.....	23
Figura 4 - Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis	26
Figura 5 - Fresadora a frio Wirtgen mod. W200	27
Figura 6 - Unidade simples de reciclagem	28
Figura 7 - Unidade múltipla de reciclagem	29
Figura 8 - Fases de reciclagem in situ a frio com emulsão.....	29
Figura 9 - Reciclagem a frio in situ do revestimento asfáltico.....	30
Figura 10 - Reciclagem a frio in situ do revestimento asfáltico e camada granular.....	31
Figura 11 - Fases de intervenção na reciclagem a frio, em central, com emulsão	31
Figura 12 - Usina de reciclagem a frio modelo Wirtgen	32
Figura 13 - Fases de intervenção na reciclagem in situ a quente com rejuvenescedor ..	34
Figura 14 - Fases de intervenção na reciclagem de mistura a quente.....	36
Figura 15 - Operação de usina drum mixer na reciclagem a quente	37
Figura 16 - Exemplo de equipamento Saybolt-Furol e esquema de funcionamento.....	46
Figura 17 - Viscosímetro Brookfield e esquema de funcionamento	47
Figura 18 - Exemplo de curva de viscosidade Brookfield em função da temperatura...	47
Figura 19 - Exemplo de equipamento manual para medir penetração	48
Figura 20 - Equipamento automático e manual para medir o amolecimento.....	49
Figura 21 - Exemplo de equipamento e esquema do ensaio de ponto de fulgor	50
Figura 22 - Esquema de volumes considerados para determinar o Gmm	53
Figura 23 - Amostra de mistura com peso conhecido	55
Figura 24 - Determinação do peso do kitasato com água.....	56
Figura 25 - Aplicação de vácuo com auxílio de bomba	56
Figura 26 - Kitasato com amostra com água e amostra após aplicação de vácuo.....	57
Figura 27 - Exemplo de curva resultante da Estabilidade Marshall	58
Figura 28 - Prensa Marshall	60
Figura 29 - Orientação do plano de ruptura por compressão diametral	61
Figura 30 - Amostras do material fresado	62
Figura 31 - Conjunto de peneiras com material fresado.....	63
Figura 32 - Curva granulométrica do material fresado.....	64
Figura 33 - Etapas do ensaio de extração do ligante	65

Figura 34 - Peneiramento de amostras após extração do ligante.....	66
Figura 35 - Curva granulométrica do fresado após extração do ligante	67
Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica da brita 1.....	69
Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica do pedrisco (brita 0)	70
Figura 38 - Curva de distribuição granulométrica do pó de pedra	71
Figura 39 - Curva viscosidade x temperatura.....	72
Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica da mistura 2.....	74
Figura 41 - Amostras de misturas com diferentes dosagens	75
Figura 42 - Compactador Marshall.....	76
Figura 43 - Macaco hidráulico tipo garrafa	76
Figura 44 - Corpos-de-prova	76
Figura 45 - Prensa EMIC modelo DL2000	77
Figura 46 - Corpos-de-prova em banho e molde do ensaio Marshall	78
Figura 47 - Ensaio de ruptura à tração por compressão diametral	78
Figura 48 - Curva de estabilidade x teor de ligante da mistura 1	81
Figura 49 - Curva de fluência x teor de ligante da mistura 1	82
Figura 50 - Curva de estabilidade x teor de ligante da mistura 2	84
Figura 51 - Curva de fluência x teor de ligante da mistura 2	84
Figura 52 - Curva volume de vazios x teor de ligante da mistura 1	85
Figura 53 - Curva volume de vazios x teor de ligante da mistura 2	86
Figura 54 - Média da resistência à tração das misturas 1 e 2	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade.....	18
Tabela 2 - Comparação entre consumo de energia.....	37
Tabela 3 - Subdivisão dos agregados	40
Tabela 4 - Faixas granulométricas e percentuais de ligante betuminoso	42
Tabela 5 - Valores limitantes de Vv e RBV	51
Tabela 6 - Quantidade de amostra requerida para o ensaio.....	55
Tabela 7 - Fatores de correção da estabilidade.....	59
Tabela 8 - Ensaio de análise granulométrica do material fresado com betume	63
Tabela 9 - Porcentagem de betume.....	65
Tabela 10 - Ensaio de análise granulométrica do material fresado sem betume.....	67
Tabela 11 - Granulometria brita 1	68
Tabela 12 - Granulometria pedrisco (brita 0)	69
Tabela 13 - Granulometria pó de pedra	70
Tabela 14 - Ensaio de viscosidade Brookfield do ligante	72
Tabela 15 - Proporções de agregados na composição da mistura 2	73
Tabela 16 - Porcentagens de acréscimo de ligante novo nas misturas	74
Tabela 17 - Média dos parâmetros da mistura 1 e os limites do DNIT.....	80
Tabela 18 - Resultados do ensaio de estabilidade e fluência da mistura 1	81
Tabela 19 - Média dos parâmetros da mistura 2 e os limites do DNIT.....	82
Tabela 20 - Resultados do ensaio de estabilidade e fluência da mistura 2.....	83
Tabela 21 - Resistência à tração por compressão diametral do teor ótimo da mistura 1	87
Tabela 22 - Resistência à tração por compressão diametral do teor ótimo da mistura 2	87

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARTC – Association des Routes et Transport Du Canadá
ASTM – American Society for Testing and Materials
CBUQ – Cimento asfáltico usinado a quente
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
cP – centipoise
CP – Corpo-de-prova
D – Diâmetro corpo-de-prova
DMT – Densidade Máxima Teórica
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP – Emulsão asfáltica de petróleo
F – Carga de ruptura
Ga – Massa específica do ligante
Gmb – Massa específica aparente
Gmm – Massa específica máxima medida
H – Altura corpo-de-prova
Ms – Massa seca
Mssub – Massa submersa em água
RAR – Revestimento asfáltico recuperado
RBV – Relação betume vazios
TDD – Tratamento superficial duplo
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
V – Volume
VAM – Volume de vazios do agregado mineral
VCB – Vazios com betume
Vv – Volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Estrutura do trabalho	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Estrutura de pavimentos.....	18
2.1.1 Rígido.....	18
2.1.2 Semi-Rígido	18
2.1.3 Flexível.....	19
2.1.4 Sub-leito.....	19
2.1.5 Reforço do Subleito	20
2.1.6 Sub-base.....	20
2.1.7 Base	20
2.1.8 Revestimento	20
2.2 Manutenção de pavimentos	21
2.3 Reciclagem de pavimentos rodoviários.....	24
2.4 Vantagens da reciclagem de revestimento asfáltico	25
2.5 Métodos de reciclagem	25
2.5.1 Reciclagem a frio	27
2.5.2 Reciclagem a quente	33
2.5.3 Escolha do método de reciclagem de pavimentos	39
2.6 Materiais empregados na construção de pavimentos reciclados.....	40
2.6.1 Agregados virgens	40
2.6.2 Revestimento asfáltico recuperado (RAR)	40
2.6.3 Cimento asfáltico de Petróleo (CAP)	42
2.6.4 Emulsão asfáltica de Petróleo (EAP)	43
2.6.5 Aditivos.....	43
2.6.6 Agente Rejuvenescedor	44
2.7 Controle tecnológico através de ensaios laboratoriais	44
2.7.1 Ensaio de granulometria	44
2.7.2 Extração do teor de asfalto	45
2.7.3 Caracterização do ligante asfáltico	45

2.7.3.1 Ensaio de viscosidade	46
2.7.3.2 Ensaio de penetração.....	48
2.7.3.3 Ensaio de ductilidade	48
2.7.3.4 Ensaio de solubilidade.....	48
2.7.3.5 Ensaio de amolecimento.....	49
2.7.3.6 Ensaio de ponto de fulgor	49
2.7.3.7 Ensaio de durabilidade.....	50
2.8 Determinação da dosagem da mistura reciclada.....	51
2.8.1 Dosagem Marshall	52
2.9 Caracterização mecânica e volumétrica da mistura reciclada.....	53
2.9.1 Determinação da densidade máxima	54
2.9.2 Resistência à compressão	57
2.9.3 Fluência	59
2.9.4 Resistência à tração	60
3 METODOLOGIA.....	62
3.1 Caracterização dos materiais	62
3.1.1 Material fresado.....	62
3.1.1.1 Ensaio de granulometria do material com betume.....	62
3.1.1.2 Extração do ligante.....	64
3.1.1.3 Ensaio de granulometria do material sem betume.....	66
3.1.2 Agregado virgem	68
3.1.2.1 Análise granulométrica dos agregados.....	68
3.1.3 Ligante asfáltico.....	71
3.1.3.1 Ensaio de viscosidade	71
3.2 Dosagem e definição do teor de projeto.....	72
3.2.1 Projeto de dosagem.....	72
3.2.2 Moldagem dos corpos-de-prova	74
3.2.3 Rompimento dos corpos-de-prova	77
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
4.1 Ensaio de caracterização mecânica e volumétrica	79
4.2 Definição do teor de projeto	85
4.3 Caracterização mecânica do teor de projeto.....	86
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1970, a construção rodoviária brasileira passou por mudanças no seu cenário de desenvolvimento. Tal fato ocorreu, principalmente, por conta do início das cobranças por parte dos órgãos ambientais, forçando os construtores a adequar o processo de construção rodoviária as normas vigentes. Visando também a economia, houve um estímulo na implantação de métodos tecnológicos envolvendo a reciclagem de pavimentos (ALVIM, 1999). Nos anos que se seguiram a técnica de reciclagem para reabilitação de pavimentos, considerando a reutilização do resíduo oriundo da fresagem na composição da nova camada asfáltica, obteve reconhecimento notório devido a uma série de fatores. Dentre eles, o avanço das pesquisas na área possibilitando o conhecimento das características mecânicas dos materiais envolvidos e a conscientização da importância da reciclagem como meio de preservação ambiental. Tal mudança deve-se principalmente ao reconhecimento do esgotamento das fontes de recursos naturais, explorados de maneira descontrolada e da necessidade de se reduzir os custos de revitalização das vias.

Rotineiramente, prefeituras e entidades gestoras, precisam recuperar pavimentos envelhecidos, costumeiramente utilizando-se da técnica de recapeamento. O problema decorrente desta atividade consiste nas diferenças de elevação deixadas, provocando desconforto ao usuário (DANTAS et al., 2007).

Para diminuir os problemas ocasionados pelos capeamentos sucessivos de vias, é empregada a técnica de fresagem asfáltica do pavimento, para remoção da camada superficial desgastada e colocação de uma nova camada devidamente nivelada com o acostamento ou meio-fio existente. A partir desse momento, o problema que surge é o que fazer com o material triturado proveniente desse procedimento. Na composição dessa mistura triturada encontra-se brita, areia, filler e CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) (DAU, 2001). Por muito tempo este material fora considerado rejeito de construção e destinado a aterros de depósito ou bota-foras previamente determinados pela fiscalização. Atualmente a fiscalização sobre a destinação do material proveniente da fresagem dos pavimentos, assim como de outras atividades construtivas, é estabelecida pela Resolução N° 307 de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece leis e diretrizes de gestão de resíduos, exigindo que todo órgão gerador de resíduos deverá ter um programa de gestão deste material de forma a minimizar os impactos ambientais (DANTAS et al., 2007).

Tendo em vista o crescimento sustentável e em conformidade com a resolução nº 307, órgãos de gestão veem procurando soluções ecológicas, como a reciclagem do pavimento existente, como uma das alternativas economicamente viáveis e politicamente corretas.

Apesar das crescentes pesquisas contemplando atividades de restauração com o uso de materiais reciclados, há necessidade de medidas de incentivo por parte dos órgãos competentes para que a atividade de reciclagem seja executada nos serviços de pavimentação. Enquanto houver matéria-prima suficiente para execução das atividades construtivas, dificilmente as empresas terão a iniciativa de executar a reciclagem. Contudo em um futuro próximo, essas medidas tornar-se-ão exigências impostas através de leis e resoluções e as empreiteiras deverão regulamentar e adaptar seus sistemas construtivos, independentemente dos custos de implantação.

O grande benefício desta alternativa é a possibilidade de reutilização de quase todo o material constituinte da via restaurada, propiciando menor consumo de energia e de recursos naturais não renováveis.

Em razão da importância desta atividade, devido ao esgotamento dos recursos naturais e locais para depósito de resíduos, a reciclagem de revestimento asfáltico deverá tornar-se um procedimento rotineiro no futuro (DAU, 2001).

Visando fornecer dados para futuras pesquisas e abordar a importância do uso de tecnologias sustentáveis, o presente trabalho abordará uma análise do desempenho de misturas asfálticas com adição de material fresado para camadas de revestimento, visando avaliar as propriedades mecânicas da composição, para aplicação em processos de reciclagem na região da fronteira-oeste do Rio Grande do Sul, utilizando amostras coletadas na região.

1.1 Justificativa

A falta de conservação de rodovias afeta o conforto e segurança dos usuários. Além disso, também impulsionam a emissão de gás carbônico. Pesquisas apontam que isso se deve a má condição das rodovias, exigindo maior desempenho dos veículos de grande porte, como caminhões e semi-reboques. Quando isso acontece, o veículo tem um aumento no seu custo operacional, incluindo o consumo de combustível (TRICHÊS e SANTOS, 2011).

De acordo com Trichês e Santos (2011), a reciclagem de pavimentos é uma técnica recente, com muito a ser desenvolvido na área para conhecer melhor o

desempenho e as características mecânicas do material reciclado. Com base no exposto, torna-se complicado a escolha por projetos que contemplem esta alternativa, servindo assim como incentivo para o progresso de novas pesquisas.

Usualmente, materiais reciclados provenientes da fresagem de camadas asfálticas, são reutilizados em camadas de base de pavimentos. Trata-se de uma ótima solução para destinação destes resíduos e preservação ambiental, porém este tipo de solução subestima o valor do material presente na camada fresada, que tem por principal característica a presença de ligante asfáltico, um dos componentes de maior valor econômico na composição de um pavimento.

As técnicas de restauração de pavimentos com o uso do agregado asfáltico reciclado são compensatórias quando considerado o processo de manipulação de agregado virgem e o elevado preço do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), influenciando a adoção desta solução por meio dos gestores e possibilitando não só benefícios socioambientais, como econômicos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica, para aplicação em camadas de revestimento usinadas a quente, utilizando material fresado proveniente da Rodovia BR-290, no trecho Rosário do Sul/São Gabriel – RS. A partir da definição da dosagem proposta para o projeto de reciclagem, analisaram-se também os benefícios econômicos do emprego desta atividade.

Como objetivos específicos avaliou-se:

- As características do material fresado;
- Diferentes dosagens de projeto para avaliar o comportamento do material reciclado para uso em revestimentos de novos pavimentos;
- Apresentar o desempenho da proposta de dosagem empregada, de forma a incentivar a aplicação da técnica de reciclagem a quente.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

a) No capítulo I, apresenta-se a introdução e considerações acerca da reciclagem de revestimentos asfálticos, justificativas do trabalho e objetivos gerais e específicos;

- b) No capítulo II, aborda a revisão bibliográfica contendo: estrutura de pavimentos, manutenção, a reciclagem e seus métodos, materiais empregados na reciclagem, escolha dos métodos de reciclagem, controle tecnológico dos materiais envolvidos;
- c) No capítulo III, é descrita a metodologia adotada para desenvolvimento da presente pesquisa;
- d) No capítulo IV são descritos os resultados;
- e) No capítulo V são apresentadas as considerações finais do estudo.
- f) No capítulo VI encontram-se as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura de pavimentos

O pavimento é formado por uma composição de várias camadas de diferentes materiais que podem assumir variadas espessuras, desempenhando papéis diversificados e que tem por objetivo propiciar conforto e mobilidade aos usuários, assim como resistir aos esforços solicitantes oriundos das cargas dos veículos. Segundo Branco et al. (2008), um pavimento pode ser caracterizado de acordo com o critérios de desempenho esperado do mesmo, podendo ser qualificado como pavimento de desempenho funcional ou estrutural.

Usualmente os pavimentos são classificados como rígidos, semi-rígidos ou flexíveis, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade

Tipos de pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

Fonte: (Adaptado de BRANCO, 2008, p. 11)

2.1.1 Rígido

Os pavimentos rígidos são os construídos em placas de concreto de cimento Portland, podendo ser apoiado sobre o solo, sub-base ou até mesmo sobre um pavimento antigo de concreto ou asfalto. Esse tipo de pavimento tem por característica principal, resistir a grandes carregamentos, absorvendo a maior parte das tensões de tração e compressão, pois seu revestimento possui elevada rigidez comparada às camadas inferiores de sua estrutura (BRANCO et al., 2008).

2.1.2 Semi-Rígido

Os pavimentos semi-rígidos possuem uma base modificada através da adição de componentes químicos, formando misturas como solo-cal, solo-cimento, dentre outras. Este tipo de pavimento é constituído de revestimento flexível e camada de base semi-flexível. Sua base possui razoável resistência à tração. Dessa forma, os pavimentos semi-rígidos são mais deformáveis que os rígidos e menos deformáveis que os pavimentos flexíveis (BRANCO et al., 2008).

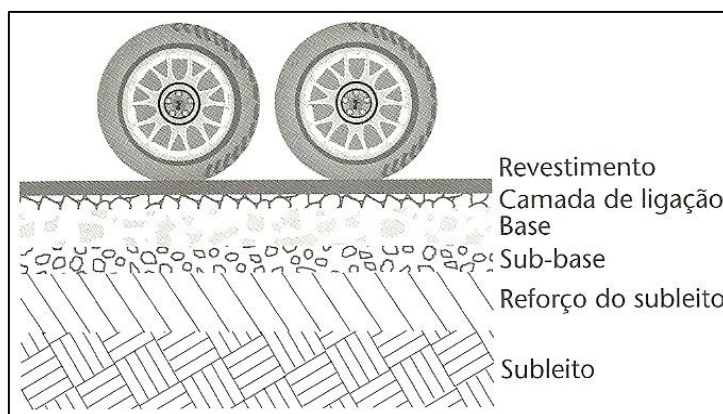
2.1.3 Flexível

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma combinação de ligante asfáltico e agregados. Este tipo de pavimento possui revestimento flexível que funciona apenas como faixa de rolamento, sendo as tensões provenientes dos carregamentos distribuídas nas suas camadas inferiores. O bom funcionamento de um pavimento flexível depende diretamente da constituição de suas camadas, pois as tensões são distribuídas ao longo do sistema de camadas superpostas, sendo a primeira abaixo do revestimento, a que deve ter melhor capacidade de suporte (BRANCO et al., 2008).

A estrutura do pavimento constituída dessas diferentes camadas tem por principal objetivo suprir as necessidades de utilização do usuário. Conforme Balbo (2007), cada camada do pavimento desempenha diferentes funções e devem suportar as cargas aplicadas sobre a superfície de rolamento de forma que as deformações oriundas das tensões aplicadas, ao longo da vida útil do pavimento, sejam as menores possíveis.

A constituição dos pavimentos é, em geral, composta por cinco principais camadas: sub-leito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. A Figura 1 demonstra a estrutura usual dos pavimentos.

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: BALBO, 2007, p. 36

2.1.4 Sub-leito

O sub-leito é a fundação do pavimento. O solo constituinte desta primeira camada deve obedecer a parâmetros de resistência e estabilidade que devem ser pré-analisados antes da construção do pavimento (DNIT, 2006). Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), se o solo existente no sub-leito não possuir as características necessárias para suportar as tensões provenientes da circulação de

veículos sobre a via, este deverá ser substituído por outro de melhor qualidade. Essa camada é constituída de material natural compactado e as tensões impostas sobre a mesma são aliviadas pelos estratos superiores (BALBO, 2007).

2.1.5 Reforço do Subleito

Quando necessária por características técnicas de projeto, o reforço do subleito consiste em uma camada de solo de espessura constante, que se destina a melhorar a qualidade do sub-leito e regularizar a superfície para o recebimento da sub-base. Esta camada é composta por um solo de melhor capacidade de suporte sendo capaz, em último caso, de resistir às tensões provenientes das camadas superiores do pavimento (DNIT, 2006).

2.1.6 Sub-base

É a camada que está situada entre o subleito e a camada de base. A sub-base é executada quando por questões técnicas-econômicas não é recomendável a utilização de base diretamente sobre o subleito e tem como função prevenir o bombeamento do solo do subleito para a camada de base (DNIT, 2006). Portanto, o material utilizado e a sua execução são elementos de suma importância para seu bom desempenho. As camadas de base e sub-base podem ser constituídas do mesmo material podendo ser: brita graduada, mistura de solo-brita, solo estabilizado com ligantes, dentre outros (BALBO, 2007).

2.1.7 Base

Camada granular, constituída por solos, britas, de rochas, escória de alto forno, misturas cimentadas, solo estabilizado com ligantes hidráulico, asfáltico ou ainda pela mistura desses materiais (BALBO, 2007). Tem como função principal fornecer suporte estrutural para o revestimento, aliviando as tensões oriundas do tráfego sobre o revestimento e as distribuindo nas camadas inferiores (DNIT, 2006). A base é de grande importância estrutural e precisa ser a camada de maior capacidade de suporte do pavimento.

2.1.8 Revestimento

O revestimento é a última camada da estrutura de um pavimento. É ela que inicialmente recebe todas as solicitações oriundas do tráfego. Essa camada é subjetivamente a de maior valor, pois necessita maiores investimentos de forma a obter

em sua constituição uma combinação de materiais que sejam resistentes ao desgaste e propiciem conforto e durabilidade a via (DNIT, 2006).

2.2 Manutenção de pavimentos

Segundo Sachet (2007), a ação repetida de cargas de serviço, ao longo do tempo, provoca o processo de deterioração dos pavimentos. A repetição de movimentos cíclicos, assim como a ação de intempéries, provoca alteração nas propriedades físicas e químicas dos materiais promovendo a degradação do pavimento e incitando a necessidade de intervenções.

Os pavimentos são estruturas que sofrem com a constante exposição aos agentes climáticos (RODRIGUES, 2003). Em decorrência disso, as manifestações patológicas ocorrem de forma mais rápida em estruturas viárias quando comparadas a estruturas de outros processos construtivos.

A construção do pavimento deve ser realizada em conjunto com um planejamento de futuras intervenções para manutenção da via, etapa esta que não deve ser ignorada. A previsão do desenvolvimento de atividades técnicas para manutenção das vias é uma etapa de suma importância nesse processo, de forma a prever o melhor momento para execução dos serviços de recuperação.

Conhecer o momento certo para praticar as intervenções evita perdas de caráter econômico decorrente dos danos ocasionados pelo retardo nos reparos, na medida em que muitas vezes o problema só é conhecido quando este já se encontra em um nível crítico onde a única solução é a reconstrução do pavimento (RODRIGUES, 2003).

Segundo Sachet (2007), dentre os serviços de manutenção, pode-se destacar a conserva rotineira, conserva leve, conserva pesada, restauração e reconstrução do pavimento. A decisão de se efetuar qualquer uma dessas atividades decorre da avaliação da necessidade de intervenções decorrente da mudança na configuração do pavimento construído, verificando irregularidades e degradação de superfície, ausência da condição funcional de conforto, trafegabilidade e segurança aos usuários.

Conforme Sachet e Gonçalves (2008), as deformações decorrentes do uso que provocam a necessidade de intervenções em pavimentos flexíveis podem ser: trincas, afundamentos por trilhas de rodas, desagregação da camada superficial, fendilhamento, desgaste por envelhecimento e ação da luz solar.

Para os defeitos citados acima, existe uma série de alternativas corretivas que podem ser escolhida para solucionar o problema.

Usualmente as intervenções são executadas para corrigir problemas de caráter funcional ou estrutural da via. Dessa forma, podem ser divididas em intervenções para reabilitação funcional ou estrutural do pavimento.

Para efetuar correções de problemas decorrentes da superfície do pavimento é usual utilizar as seguintes soluções: fresagem parcial ou total do revestimento asfáltico e substituição deste por material novo e de maior resistência; recapeamento simples com CBUQ; aplicação de tratamento superficial duplo ou reperfilagem (BRANCO et al., 2008).

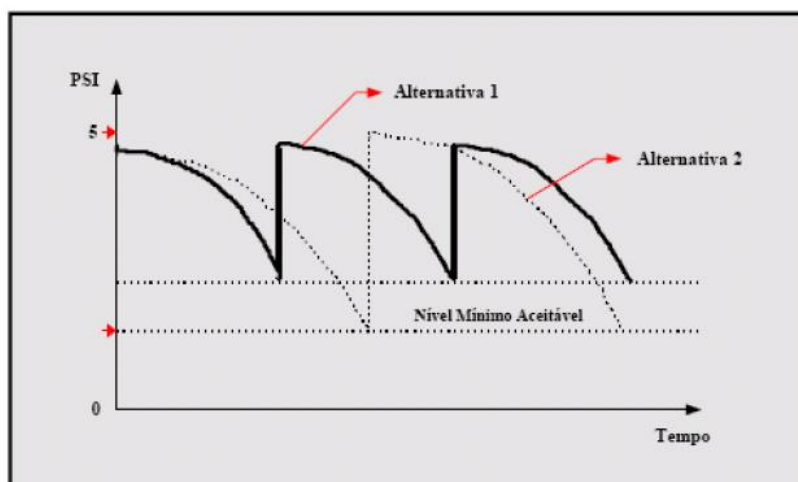
A reparação de defeitos superficiais localizados pode ser corrigida através de operações tapa-buracos, apenas com aplicação de material de enchimento; selagem de fendas, com lama asfáltica; ou ainda execução de cortes (arranque de placas) com substituição do material em zonas de grande deterioração (BRANCO et al., 2008).

No caso de pavimentos com problemas de caráter estrutural, faz-se a remoção da base e revestimento, podendo utilizar misturas betuminosas para reforço da camada de base. A reconstituição do revestimento pode ser feita através de tratamento superficial duplo (TSD) ou ainda aplicação de camada de CBUQ (GONÇALVES, 1999).

De acordo com Branco et al. (2008), as técnicas de reciclagem devem ser consideradas na escolha de técnicas para a reabilitação estrutural e funcional de pavimentos. Através da escolha adequada do tipo de reciclagem apropriado, sua aplicação proporciona melhoria nas características de superfície e capacidade estrutural do pavimento.

Branco et al. (2008) relata que, a implantação de um modelo para gestão de pavimentos, pelos órgãos responsáveis, implica em uma série de vantagens de cunho econômico, assim como técnico e administrativo. Para promover quaisquer intervenções é importante conhecer o momento certo para tomada de decisão (Figura 2), logo que é necessário ter total controle orçamentário para evitar possíveis problemas de caráter econômico prejudicando o desempenho da execução do processo de restauração escolhido (GONÇALVES, 1999).

Figura 2 - Efeitos da escolha do momento de se restaurar um pavimento

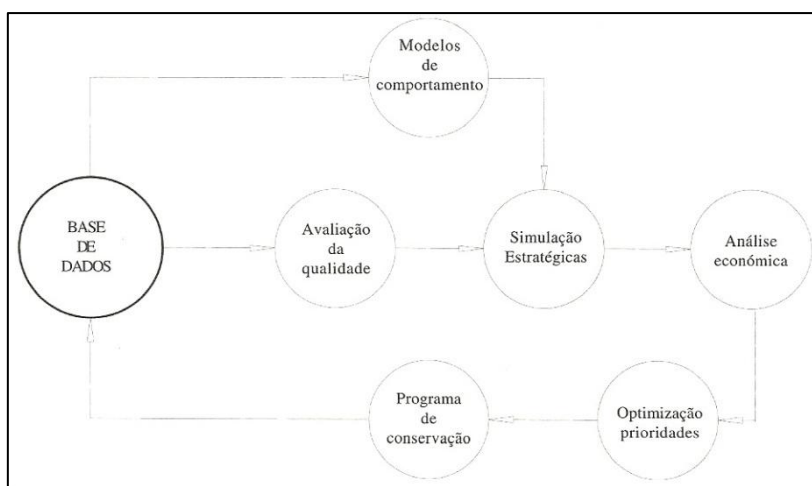


Fonte: Gonçalves (1999)

Segundo Pereira e Miranda (1999), um modelo de sistema de informação reúne um conjunto de dados importantíssimos para avaliação do estado das estruturas rodoviárias e armazena as informações relevantes para uma boa gestão da rodovia e acompanhamento do desempenho funcional e estrutural da mesma.

A Figura 3 apresenta um modelo de banco de dados da Association des Routes et Transport du Canadá - ARTC (1987), com componentes de um modelo de gestão, que são caracterizados como fundamentais para uma boa gestão e qualidade das atividades pertinentes à manutenção e conservação de rodovias pavimentadas.

Figura 3 - Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos



Fonte: ARTC (1987)

A conservação do pavimento é um processo eficaz e economicamente rentável para estender a vida útil da pista e evitar intervenções mais severas, como restauração e reconstrução do pavimento (BRANCO et al., 2008).

Diagnosticar e prever soluções possibilita elaborar medidas de conservação e restauração mais eficazes. Dessa forma permite atender as necessidades de manutenção e conservação durante todo o tempo de serviço da via, propiciando conforto e segurança a níveis compatíveis com a de um pavimento novo.

2.3 Reciclagem de pavimentos rodoviários

Com o passar dos anos aumenta a necessidade de implantação de alternativas que diminuam a agressão causada ao ambiente pelo setor da construção. Os órgãos governamentais do meio ambiente forçam as indústrias a desenvolverem técnicas sustentáveis que estejam de acordo com suas leis e resoluções em vigor. Dessa maneira todo prestador de serviço do ramo da construção deve adaptar seus sistemas construtivos, independentemente dos custos, de tal forma que suas atividades tornem-se sustentáveis e estejam devidamente regulamentadas e aprovadas pelos órgãos competentes.

De acordo com Sachet (2007) apud Bonola (2005), a reciclagem é uma exigência em todos os setores de produção e utilização de materiais, independente da categoria de sua aplicação, que surgiu, sobretudo visando à busca pela preservação ambiental e a necessidade de reduzir o consumo de matéria prima. Reciclar é a palavra de ordem no mundo contemporâneo e a cada década programas de gestão criados pelo mundo afora enfatizam sua necessidade e importância.

Em muitas regiões do país, há escassez de materiais granulares para uso em pavimentação, de tal forma que os custos aumentam com a necessidade de transportar esses materiais da fonte de material pétreo até o ponto de localização da obra.

A evolução das técnicas de reciclagem de pavimentos e melhoria na qualidade dos equipamentos, tornando-os mais econômicos, assim como as restrições impostas pela legislação ambiental em vigor, faz com que a reciclagem tenha cada vez mais importância na construção rodoviária (BRANCO et al., 2008).

Em virtude da redução considerável da extração de matéria-prima, as vantagens da reciclagem são inúmeras, principalmente do ponto de vista sustentável.

2.4 Vantagens da reciclagem de revestimento asfáltico

De acordo com Sachet (2007), os materiais derivados do petróleo para composição do revestimento asfáltico possuem custo elevado. A reciclagem e reutilização permite diminuir o consumo deste insumo. Logo implicam em uma vantajosa relação custo-benefício.

O processo de reciclagem gera um impacto ambiental menor que o processo obtido através do método convencional de fabricação de restauração de pavimentos. Além da preservação dos recursos naturais, material proveniente da reciclagem apresenta bom desempenho e substitui com eficácia o material primário (SACHET, 2007).

Conforme Castro (2003), o processo de reciclagem não impede o funcionamento de uma via. A remoção e reciclagem do material de uma faixa de rolamento podem ser feitas independente, sem prejudicar o fluxo de veículos em faixas adjacentes.

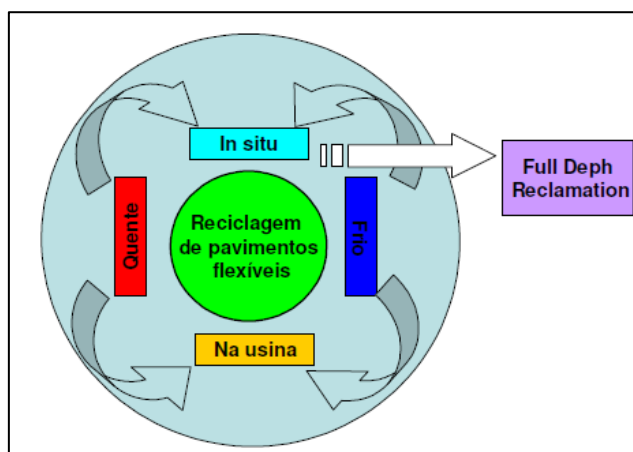
2.5 Métodos de reciclagem

As técnicas de reciclagem são usualmente classificadas em dois principais métodos de processamento, a frio e a quente (Figura 4). Essas, por sua vez são classificadas de acordo com o local onde a reciclagem é executada, analisando se o material é processado *in situ*, ou seja, no próprio local, ou beneficiado em usina apropriada (SACHET, 2007).

Logo, temos definidos os seguintes processos para reciclagem de revestimento asfáltico:

- Reciclagem a frio
 - Reciclagem a frio *in situ*;
 - Reciclagem parcial (Reciclagem do revestimento asfáltico);
 - Reciclagem total (Reciclagem Profunda).
 - Reciclagem a frio em usina;
- Reciclagem a quente
 - Reciclagem a quente *in situ*;
 - Reciclagem a quente em usina.

Figura 4 - Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis



Fonte: SACHET (2007, p. 25)

Segundo Bonfim (2001), os tipos de reciclagem de pavimento podem ser classificados não somente com a apreciação do local de processamento do material fresado, mas também se baseando na análise de outros itens como a modificação, ou não, do greide original da pista, quanto à fresagem a quente ou a frio do material, profundidade do corte, quanto à mistura reciclada, uso da mistura e materiais adicionados. Dessa forma a reciclagem do material pode ser feita de várias formas e empregando diferentes camadas. Pode-se fazer a reciclagem desde o revestimento até as camadas de base e sub-base reutilizando todo o material na composição da nova estrutura com ou sem recomposição granulométrica e/ou fazendo a adição de aditivos ligantes (BRANCO et al., 2008).

O emprego do processo de reciclagem não deve alterar a qualidade do pavimento. Independentemente de como for executado o pavimento reciclado, as propriedades principais para o bom comportamento mecânico e funcional do pavimento devem ser preservadas. Sendo este um dos principais pontos a avaliar no momento da escolha do método e desenvolvimento do projeto (DNIT, 2006).

A técnica de reciclagem *in situ* apresenta-se como um processo revolucionário na recuperação de pavimentos. A reutilização do material fresado no próprio local de onde foi retirado para processamento, exclui os custos de transporte e exploração de jazidas. Logo, proporciona economia ao processo como um todo.

Tal técnica demonstra viabilidade técnica e econômica. A possibilidade de reaproveitar o material proveniente da fresagem do revestimento asfáltico, exclui a necessidade de exploração de pedreiras e resolve o problema de destinação dos materiais que seriam depositados em áreas de aterro ou bota-fora. Portanto, através do

seu emprego é possível obter uma solução sustentavelmente correta e de acordo com as exigências dos órgãos de preservação ambiental. (DNER, 1996).

Contudo, Branco et al. (2008) ressalta que, não existe um melhor método a ser escolhido dentre todos, pois cada método possui potencialidades diferentes, sendo estas características de cada processo o carro chefe da análise para definir o tipo de reciclagem adequado para cada caso, considerando fatores técnicos, econômicos e ambientais.

2.5.1 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio consiste em um processo de beneficiamento do material sem gasto energético para aquecimento do mesmo (SACHET, 2007 apud MOMM e DOMINGUES, 1995). O revestimento asfáltico recuperado (RAR) proveniente deste método de reciclagem pode ser utilizado como reforço da camada de base.

O método de reciclagem a frio pode ser executado através de dois processos diferentes: na usina ou *in situ*. Segundo Sachet (2007), para remover a camada de pavimento que será reciclada são utilizadas, neste sistema, máquinas autopropelidas (Figura 5) que fresam o pavimento com o auxílio de cortador giratório de ângulos diversos, que tem por função cortar as camadas a uma profundidade pré-determinada.

A Figura 5 apresenta um modelo de fresadora de asfalto da Wirtgen.

Figura 5 - Fresadora a frio Wirtgen mod. W200



Fonte: Disponível em: www.wirten.de

O nível de deterioração pavimento é que vai definir a espessura da camada do revestimento a ser retirada.

A fresagem pode ser executada apenas sobre a camada de rolamento da pista, ou até as camadas mais profundas da estrutura do pavimento rodoviário. Todo o material

proveniente da reciclagem a frio pode ser utilizado como camada de base, sub-base, dependendo estritamente de avaliação técnica para definir sua melhor utilização (SACHET, 2007).

De acordo com o DNER (1996), a definição da dosagem de mistura nesta técnica é executada conforme o método de dosagem Marshall, regulamentado pela especificação de serviço DNER-ME 104/94.

Reciclagem a frio in situ

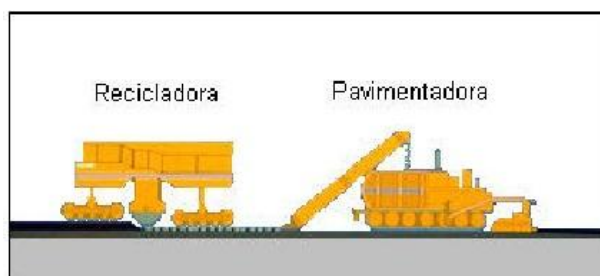
Este processo consiste em fresar, misturar, adicionar agentes e emulsão, espalhar e compactar o material reciclado, reutilizando-o no próprio local e excluindo a necessidade do aquecimento da mistura (SACHET, 2007).

Com o auxílio de uma máquina recicladora é possível executar o serviço em menor período de tempo e obter ótimos índices de produtividade e economia, dispensando o custo com transporte de material (SACHET, 2007 apud WIRTGEN, 2004). Além da máquina recicladora este processo utiliza dois rolos para compactação e acabamento, sendo respectivamente um de rasto listro e outro de pneus.

A norma DNER-ES 88/87 – Concreto asfáltico reciclado *in situ*, especifica os procedimentos para execução deste processo.

A técnica de reciclagem a frio *in situ* pode ser executada por uma máquina recicladora contendo uma unidade simples (Figura 6), que fresa e mistura o material, por várias unidades ligadas entre si (Figura 7), ou ainda pelo conjunto de equipamentos convencionais de pavimentação (Figura 8) que executam diferentes serviços simultaneamente, incluindo fresagem, peneiramento, britagem, mistura e adição de componentes para lançamento e compactação (KANDHALL e MALLICK, 1997).

Figura 6 - Unidade simples de reciclagem

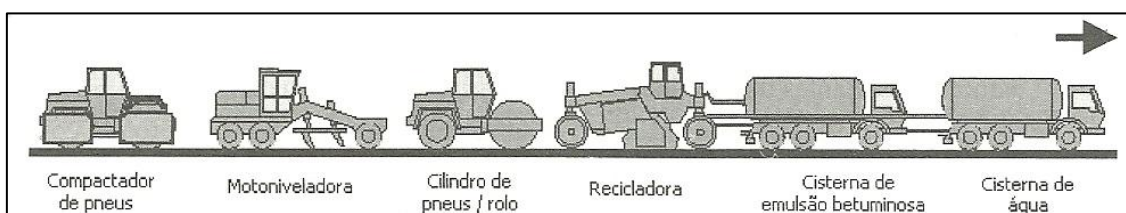


Fonte: KANDHALL e MALLICK (1997)

Figura 7 - Unidade múltipla de reciclagem



Fonte: KANDHALL e MALLICK (1997)

Figura 8 - Fases de reciclagem *in situ* a frio com emulsão

Fonte: BRANCO et al., 2008 apud MARTINHO, 2005 – traduzido e adaptado de WIRTGEN (2001)

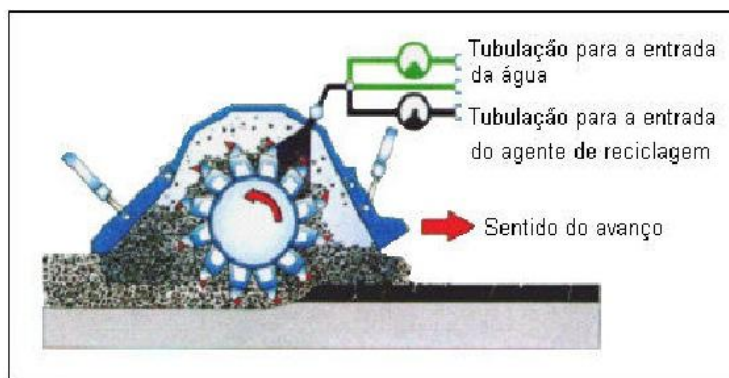
No processo de reciclagem é importante efetuar sondagens de forma a confirmar a homogeneidade do revestimento ao longo do trecho. Neste caso a realização de estudos detalhados sobre a composição dos agregados torna-se indispensável, uma vez que o agregado constituinte da mistura betuminosa será o próprio pavimento fresado (SACHET, 2007).

A reciclagem a frio *in situ* pode ser executada de forma parcial ou total. A reciclagem parcial consiste na remoção apenas da camada de rolamento enquanto na total, recicla-se a camada de rolamento juntamente com a camada granular. A escolha pelo método mais adequado consiste na avaliação do estado do pavimento (DAVID, 2006).

Reciclagem parcial (Reciclagem do revestimento asfáltico)

Este método de reciclagem deve ser aplicado quando existe a necessidade de recuperar o pavimento corrigindo apenas problemas superficiais como trincamento, irregularidade superficial, desgaste e baixa resistência à derrapagem. Neste caso não há defeitos envolvendo a base do pavimento (Figura 9).

Figura 9 - Reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico



Fonte: DAVID, 2006 apud WIRTGEN (2004, p. 25)

Utiliza-se o revestimento asfáltico recuperado (RAR), em conjunto com um agente de reciclagem que pode ser emulsão asfáltica, espuma de asfalto ou agente reciclado emulsionado, com a função de complementar a mistura e assegurar as características e propriedades definidas em projeto. Posteriormente é feito o lançamento e compactação da nova camada de base reciclada.

De acordo com David (2006), a reciclagem do RAR quando executado a frio *in situ* consiste na execução das seguintes operações:

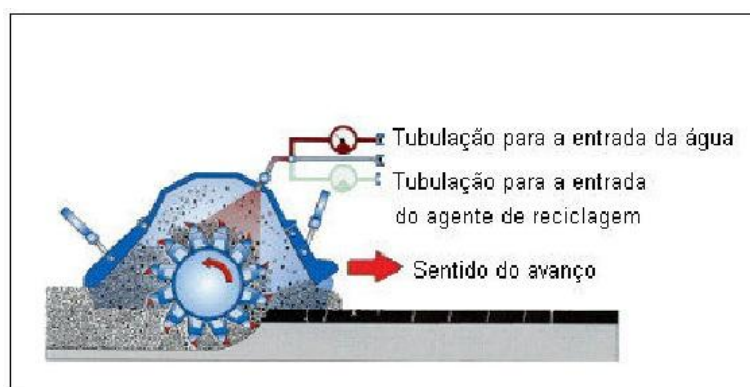
- a) Se necessário, antes de executar a fresagem, espalhar agregado sobre a pista de rolamento;
- b) Executar a fresagem do revestimento, sem afetar a base;
- c) Através do peneiramento e britagem transformarem o material em uma mistura homogênea;
- d) Adicionar emulsão asfáltica e agentes à mistura, de acordo com especificações de cada caso;
- e) Prosseguir com a mistura de todos os componentes adicionados;
- f) Lançar e compactar a base reciclada;
- g) Respeitar o tempo necessário para cura do material;
- h) Na última etapa executar aplicação da camada de rolamento, que pode ser executada através de tratamento superficial ou aplicação de CBUQ, com a função de proteger a camada reciclada.

Reciclagem total (Reciclagem Profunda)

Conforme Sachet (2007), este processo de reciclagem envolve a remoção do revestimento da pista assim como parte, ou totalidade, da camada de base da estrutura

do pavimento (Figura 10), com o objetivo principal de estabilizar o solo. Dessa forma, tanto o agregado da base quanto à composição betuminosa usada no revestimento passam pelo processo de reciclagem no local e podem ser utilizadas para constituir uma nova camada de base. A introdução de agregado virgem à mistura auxilia na composição da nova camada, de acordo com as exigências de cada situação. A base com utilização de mistura betuminosa reciclada pode ser utilizada para obter um pavimento com base de maior rigidez constituindo assim uma base estabilizada. O material reciclado pode compor ainda a nova mistura betuminosa para revestimento com adição de aglomerante e outros elementos. Este tratamento deve ser executado em locais onde mais de uma camada apresentam problemas (DAVID, 2006).

Figura 10 - Reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico e camada granular



Fonte: DAVID, 2006 apud WIRTGEN (2004, p. 28)

Reciclagem a frio em usina

Este método consiste em transportar o material fresado para central (Figura 11), onde o mesmo será processado, a frio, com adição de agregado natural, se necessário, e agente rejuvenescedor emulsionado (DNER, 1996).

Figura 11 - Fases de intervenção na reciclagem a frio, em central, com emulsão



Fonte: BRANCO et al., 2008 apud MARTINHO, 2005 – traduzido e adaptado de WIRTGEN@ (2004)

Diferentemente do processo de reciclagem *in situ*, onde uma máquina recicladora móvel é capaz de executar todo o serviço necessário para reciclagem e reconstrução da malha rodoviária, o sistema da reciclagem a frio em usina possui uma metodologia de trabalho completamente distinta. Nesse processo são utilizadas para execução do novo revestimento máquinas convencionais como vibro acabadora ou motoniveladora para espalhamento da mistura reciclada (SACHET, 2007). O acabamento é feito utilizando o rolo liso e/ou pneumático.

Faz-se uso da reciclagem a frio em usina quando é necessário efetuar algum tipo de adição ou tratamento especial na mistura do material reciclado ou, que por algum motivo específico, o material não possa ser mantido, ou processado, no próprio local (Figura 12).

A reciclagem a frio pode ser desenvolvida em usinas de solo, podendo também ser utilizadas usinas móveis ou gravimétricas (KANDHALL e MALLICK, 1997).

Figura 12 - Usina de reciclagem a frio modelo Wirtgen



Fonte: GEWEHR, 2012 – adaptado de WIRTGEN@ (2004)

Segundo Sachet (2007), o processo de reciclagem em usina torna-se mais caro pelos gastos com transporte, que são excluídos quando se faz uso do processamento *in situ*. Além disso, o tempo para execução do pavimento reabilitado será maior. Logo, ambos os métodos possuem espaço no mercado da construção viária e sua escolha dependerá exclusivamente das necessidades de cada situação.

Características dos processos de reciclagem a frio

A reciclagem a frio é um método bastante empregado em obras de recuperação de pavimentos, aplicado como base estabilizada, por oferecer rapidez de abertura ao tráfego, salvo em casos onde se aplica outra camada de revestimento sobre o pavimento reciclado (SILVA, 2011).

Segundo PAEZ (2012), pesquisas indicam bons resultados da aplicação desta técnica quando utilizado para restauração de pavimentos de rodovias vicinais, como camada de base estabilizada (tratamento superficial) e desempenhando a função de acostamento em rodovias de alto tráfego.

Conforme especificado pelo manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT (2006), a reciclagem a frio tem bom desempenho quanto à melhoria da capacidade estrutural da via; proporciona melhora significativa nas propriedades físicas e mecânicas do material, promovendo a restauração das camadas do pavimento e regularização da superfície; sua utilização em tratamentos superficiais com adição de agentes estabilizadores origina numa maior impermeabilização da superfície de rolamento.

Apesar dos inúmeros casos em que se pode empregar esta técnica, existem também os fatores que inviabilizam a escolha da mesma. De acordo com DNIT (2006), a interrupção do tráfego deste tipo de reciclagem é maior, devido ao fato de utilizar o mesmo apenas como base, logo dispendia de maior tempo para execução da camada de revestimento. Quando a finalidade da reciclagem for à execução de camadas de base estabilizadas com adição de estabilizadores químicos, a qualidade final do pavimento dependerá das condições climáticas do local, logo sua utilização pode se tornar inviável em algumas regiões. Não há métodos de ensaio e procedimentos bem definidos até o momento, havendo alguns problemas ao se fazer a aplicação de emulsão asfáltica.

2.5.2 Reciclagem a quente

No método de reciclagem a quente todos os materiais envolvidos na composição da camada de revestimento do pavimento recuperado são misturados a quente.

A reciclagem a quente pode ser feita em usina ou *in situ*, sendo definida de acordo com as condições técnicas e econômicas de cada caso.

São utilizados equipamentos convencionais de obras de pavimentação para fazer a remoção e transporte do material removido como caminhões caçamba, escavadeiras, carregadeiras, estações de britagem móveis ou fixas, fresadoras e tratores (SACHET, 2007). Ou ainda fresadoras que executam a remoção a quente ou a frio, no caso da reciclagem *in situ*.

Conforme o DNER (1997), as especificações de serviço brasileiras ES 318/97 e ES 319/97 estabelecem que o RAR proveniente da reciclagem a quente em usina ou *in*

situ pode ser aplicado em obras de restauração de pavimentos como camadas de base ou na composição do novo revestimento.

Essa técnica se assemelha muito ao processo natural de produção de misturas asfálticas a quente, com a principal diferença, e objetivo do presente trabalho, que é a adição do revestimento asfáltico recuperado a sua composição em substituição total ou parcial do agregado virgem.

A norma DNER-ME 043/1995 especifica os procedimentos para dosagem de misturas recicladas a quente pelo método de ensaio Marshall.

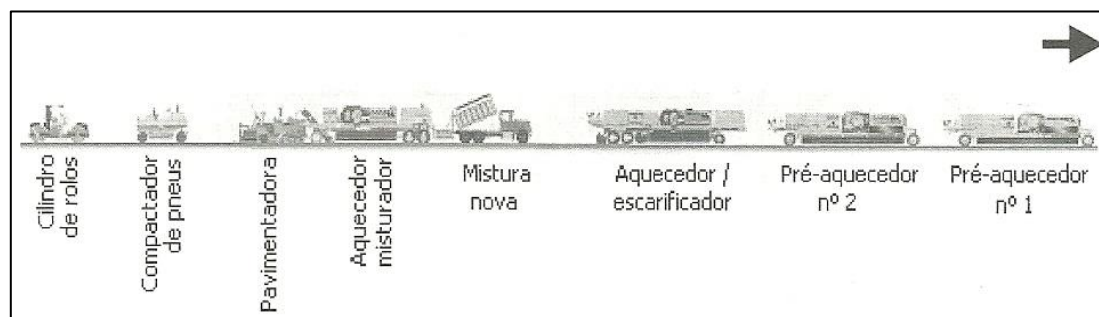
Reciclagem a quente *in situ*

Diferentemente dos métodos de reciclagem a frio, na reciclagem a quente, a fresagem do revestimento é executada por meio do aquecimento e amolecimento da camada de RAR, ou ainda utilizando fresagem a frio, porém posteriormente o material deve ser submetido a aquecimento. A fresagem executada a quente necessita de equipamentos específicos (Figura 13) para sua aplicação e dispêndia de maior energia de trabalho. A reciclagem *in situ* viabiliza o emprego desta técnica dada à exclusão de custos com transporte do material. Logo sua escolha mostra que há abundância de material para reaproveitamento no local, exigindo apenas a adição de agentes para recuperar as propriedades do revestimento asfáltico reciclado (SACHET, 2007 apud FHWA, 1997).

A especificação de serviço ES 87/87 desenvolvida pelo DNER, estabelece os critérios de execução da reciclagem a quente *in situ*.

Na Figura 13 podem-se observar as etapas do processo de reciclagem a quente *in situ*.

Figura 13 - Fases de intervenção na reciclagem *in situ* a quente com rejuvenescedor



Fonte: BRANCO et al., 2008 apud MARTINHO, 2005 – traduzido e adaptado de MARTEC@ (2004)

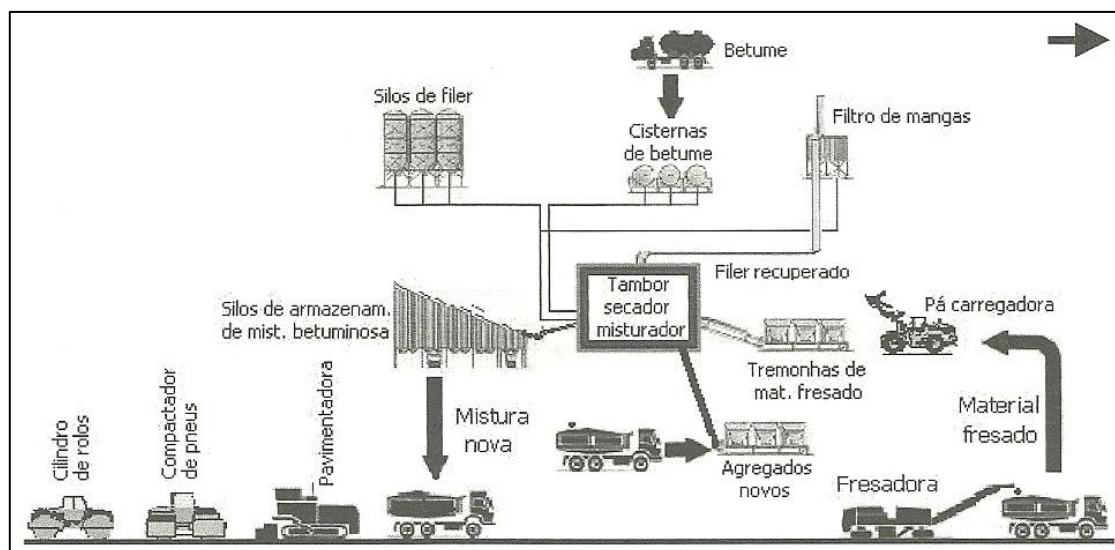
Segundo Silva (2011) apud FHWA (1997), a reciclagem a quente *in situ* pode ser realizada por meio de três diferentes processos: *escarificação com aquecimento*, *repavimentação* ou *remixing*. O que os difere é a forma como é tratada a execução da última camada da pista de rolamento. No processo de *escarificação*, o pavimento a ser reciclado passa pelo processo de fresagem a quente, logo o volume resultante é misturado com ligante betuminoso, agregado virgem (se necessário) e aditivos rejuvenescedores. A mistura é nivelada na pista onde se executa a reperfilagem e consequentemente a compactação. Na execução da *repavimentação*, a diferença para o processo anterior consiste na aplicação de uma camada de mistura asfáltica de pequena espessura sobre o pavimento reciclado e compactado. Já o *remixing* fundamenta-se em um processo mais trabalhoso, onde se faz uso de correção granulométrica e introdução de aditivos ao RAR. Nesse processo é possível aplicar uma camada mais espessa de revestimento. A aplicação deste método deve ser feita com cautela de forma a seguir rigoroso controle da adição de RAR às misturas betuminosas mornas e quentes (SILVA, 2011 apud TAO e MALLICK, 2009).

A negligência de fiscalização durante o processo de mistura pode desencadear em problemas funcionais no pavimento acabado. Tal fato deve-se a redução de trabalhabilidade de misturas mornas com os grânulos formados pelo agregado e ligante envelhecidos. Logo, constata-se a importância da incorporação de agentes rejuvenescedores para alteração da trabalhabilidade e viscosidade da mistura de forma que o agregado fresado não prejudique na qualidade da camada final de pavimentação (SILVA, 2011).

Reciclagem a quente em usina

Este método baseia-se na remoção do revestimento a ser reciclado e transporte para local destinado à estocagem do mesmo. Posteriormente o material é analisado e submetido a tratamento com agentes modificadores, emulsão asfáltica e agregados virgens, em usina (Figura 14).

Figura 14 - Fases de intervenção na reciclagem de mistura a quente



Fonte: BRANCO et al., 2008 apud MARTINHO, 2005 – adaptado de EAPA (1998)

A remoção do material pode ser feita, neste caso, com equipamentos convencionais como escavadeiras e carregadeiras, ou ainda, utilizando a mesma fresadora da reciclagem a frio que executa a remoção do material sem a necessidade do aquecimento (PAEZ, 2012).

Conforme Paez (2012) apud FHWA (1997), a reciclagem em usina pode ser executada em usinas gravimétricas ou contínuas, de forma semelhante ao de fabricação de misturas convencionais, apenas com adaptações para trabalhar com adição de material fresado às misturas mornas e agentes rejuvenescedores.

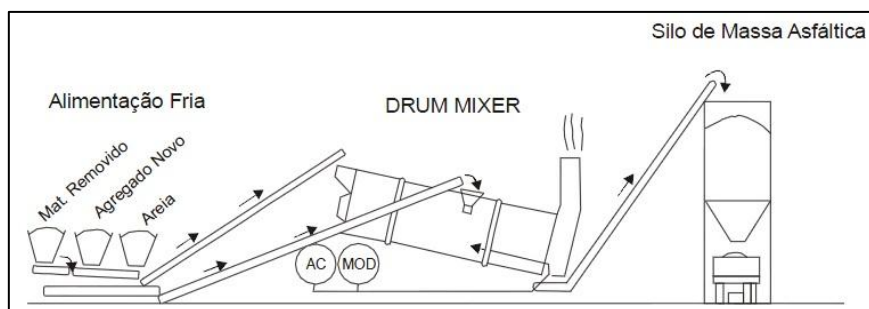
(PAEZ, 2012, pg. 30), diz que:

“A usinagem a quente de um material requer algumas modificações em relação à reciclagem convencional.

Neste caso, há um cuidado especial na secagem, para não expor o material diretamente à chama do secador. O contato direto com a chama, pode endurecer o asfalto remanescente do revestimento e promover poluição do ar”.

Segundo DNIT (2006), as usinas tipo tambor *drum mixer*, conforme ilustração da Figura 15 são as mais utilizadas para produção das misturas asfálticas recicladas a quente. Este tipo de usina já possui as adaptações necessárias para recebimento e aplicação do RAR.

Figura 15 - Operação de usina *drum mixer* na reciclagem a quente



Fonte: DNIT (2006)

É importante que haja controle e verificação do material removido, antes da aplicação à mistura. Conforme salienta (PAEZ, 2012, pg. 31):

“ Para atingir as expectativas de uma boa mistura, é necessário avaliar a qualidade do material removido. No controle de qualidade deve se dar ênfase especial à granulometria do agregado e também , às características do asfalto retirado da pista (DNIT, 2006).”

Características dos processos de reciclagem a quente

Segundo DNIT (2006), a utilização da reciclagem a quente proporciona economia de energia, apresentando resultados superiores quando comparada, por exemplo, à técnica usualmente empregada de recapeamento com mistura nova, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre consumo de energia

Processo	Necessidade de energia (BTU/ton)
Recape com mistura nova (e = 4 cm)	581.980
Fresagem a frio e reciclagem a quente em usina	
- 20% reciclado / 80% mistura nova (e = 4 cm)	542.049
- 40% reciclado / 60% mistura nova (e = 4 cm)	488.401
Reciclagem a quente na pista (e = 4 cm)	202.300

Fonte: Adaptado de DNIT (2006, p. 191)

No manual de restauração de pavimentos asfálticos (DNIT, 2006, pg. 182), diz que:

“ Como as técnicas de reciclagem a quente *in situ* envolvem a reelaboração de uma camada do revestimento relativamente delgada, elas devem ser utilizadas para correção de defeitos de superfície, exclusivamente de classe funcional. Podem ser corrigidos defeitos com severidade baixa ou média tais como desagregações, corrugações, afundamentos nas trilhas de roda, locais de baixa aderência, exsudações e locais com problemas de declividade transversal”.

Na reciclagem em usina é possível efetuar maior controle da granulometria do material e dosagens da mistura. Logo, resultando numa composição de maior qualidade de forma a assegurar que atendam as propriedades de uma mistura convencional. Este método de reciclagem a quente demonstra ótimo desempenho quando aplicada em rodovias de alta trafegabilidade, propicia aumento da resistência do pavimento e por consequência proporciona melhorias estruturais a pista (DNIT, 2006).

(DNIT, 2006, pg. 191), salienta que:

“ Outras vantagens das operações em usina devem-se a sua capacidade de reparar quase todos os tipos de defeitos dos pavimentos e de produzir melhoria estrutural significativa. Os problemas de resistência à derrapagem podem, também, se corrigidos mediante adequado projeto de mistura, incluindo a adição de uma camada de agregado resistente ao polimento.”

Sabe-se que os métodos de reciclagem *in situ* proporcionam redução de custos com transporte, uma vez que somente os aditivos serão transportados para o local; porém este custo existe na reciclagem em usina. Logo concluímos que, custos com transporte, equipamentos, materiais e características técnicas, como as citadas anteriormente, podem viabilizar ou não, a escolha de alguma das técnicas citadas acima.

Com base no exposto, conclui-se que somente após estudo detalhado de todos os fatores pertinentes ao projeto e avaliação criteriosa das condições da região em que se pretende restaurar um pavimento, é que se pode optar pelo melhor método a ser utilizado na restauração.

2.5.3 Escolha do método de reciclagem de pavimentos

A escolha do método de reciclagem mais adequado para cada pavimento depende da avaliação de uma série de critérios condicionada principalmente pela capacidade estrutural do pavimento existente, tempo de vida útil do pavimento, tipos de materiais empregados na sua composição, tipos de defeitos, extensão e severidade dos mesmos. A funcionalidade e região do pavimento a ser recuperado também são critérios importantes para sua escolha, devido a variações climáticas, logística entre o local da obra e pontos de fornecimento de material e estações de tratamento, disponibilidade dos equipamentos e solicitação de tráfego na área.

Conforme (SACHET, 2007, pg. 52):

“ Antes de se decidir definitivamente qual a alternativa a se utilizar, o projetista deve avaliar as condições ambientais, de drenagem e as limitações práticas impostas por estruturas adjacentes. Visto que diferentes técnicas de restauração podem produzir diferentes ciclos de vida, o projetista deve considerar uma expectativa de vida para o pavimento, bem como, avaliar as restrições orçamentárias, se houverem, e se esta é conveniente para o usuário da via”.

No Brasil, as técnicas utilizadas para reciclagem de pavimentos, como citadas anteriormente são, reciclagem a frio *in situ*, reciclagem a frio em usina, reciclagem a quente *in situ*, reciclagem a quente em usina. Tais técnicas permitem que o material proveniente da fresagem do revestimento seja empregado na composição das camadas de base ou revestimento da pista de rolamento (DNIT, 2006).

Segundo Sachet (2007) apud Wirtgen (2004), deve-se ter em mente no momento de concepção do projeto do novo pavimento, além dos fatores anteriormente citados, qual o propósito da restauração, de forma a compreender previamente o seu comportamento quando liberado para uso. Logo definir se o objetivo da recuperação é de caráter funcional ou estrutural, de tal forma a facilitar a caracterização e identificação do método a ser empregado.

2.6 Materiais empregados na construção de pavimentos reciclados

2.6.1 Agregados virgens

Também conhecido por agregado natural, resulta do processo de intemperismo, fragmentação e outros processos geológicos aos quais as rochas estão propensas (BALBO, 2007). Ainda segundo Balbo (2007), esses agregados destinam-se no meio rodoviário, a composição das camadas constituídas por bases granulares e na composição de misturas asfálticas.

Segundo o DNIT (2006), o agregado virgem é classificado de acordo com as diferentes faixas de granulometria, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Subdivisão dos agregados

Denominação	Faixa de diâmetro (mm)
Pó de pedra	< 2,4
Pedra 0 ou pedrisco	Entre 2,4 e 9,5
Pedra 1	Entre 9,5 e 19,0
Pedra 2	Entre 19,0 e 38,0
Pedra 3	Entre 38,0 e 76,0

Fonte: PAEZ (2012, pg. 15) apud BALBO (2007, pg. 100)

Segundo Balbo (2007), outro fator de importante observação na escolha do agregado virgem para pavimentação, é quanto ao formato do mesmo. Agregados com formas cúbica ou esférica possuem boas propriedades que agregam qualidade e melhor desempenho e trabalhabilidade a misturas asfálticas.

Os agregados virgens são usualmente, submetidos a ensaios de Abrasão Los Angeles, Índice de Forma, Granulometria dentre outros, com o objetivo de determinar a resistência do agregado à solicitação de tensões, formato e qualidade, faixa granulométrica entre outras propriedades significativas para a escolha do agregado e dosagem mais adequada à mistura asfáltica (PAEZ, 2012).

Na reciclagem de revestimento asfáltico, os agregados naturais são utilizados na composição de uma nova dosagem de mistura reciclada, seja para corrigir a granulometria do material ou por outros condicionantes que exijam a sua utilização.

2.6.2 Revestimento asfáltico recuperado (RAR)

Material obtido através da fresagem do revestimento asfáltico, podendo ser removido pela fresagem a frio ou a quente.

De acordo com Silva (2011) apud Piarc (2008), o agregado reciclado não possui características constantes, havendo modificação em sua granulometria devido ao processo escolhido para remoção da camada a ser reciclada. No processo de fresagem a frio o material é removido com nova faixa de granulometria enquanto na fresagem a quente, por haver aquecimento prévio da camada a ser removida, é possível executar a fresagem na mesma faixa granulométrica existente no antigo pavimento (SILVA, 2011 apud PIARC, 2008).

Conforme Silva (2011), a dimensão máxima dos grãos do RAR deve ser controlada, de forma que não haja perda de material acima do diâmetro máximo passante permitido para a nova camada de revestimento. Além da característica granulométrica do material é importante conhecer a qualidade do ligante betuminoso envelhecido presente na composição do resíduo de reciclagem (SILVA, 2011 apud MnDOT, 2009).

Kandhal e Mallick (1997) sugerem que, para conhecimento prévio das características do RAR é importante fazer a coleta de amostras ao longo do trecho que será restaurado.

Sugere-se que não se misture, em um mesmo local de depósito, agregados reciclados provenientes de dois pontos de remoção diferentes, ou ainda que os misture com agregados virgens, devido às diferenças existentes na composição e granulometria do material (DAU, 2001).

De acordo com as especificações do DNER (1997), o revestimento asfáltico a ser reciclado deve ser submetido a ensaios de caracterização. A recuperação e extração do teor de ligante existente nas misturas betuminosas recicladas, devem ser determinadas pelo método “Abson”, com amostras retiradas a cada 1750m² do trecho de restauração.

O método Abson é regulamentado pela norma 1856/79 da ASTM-D, e consiste em efetuar a separação do ligante e agregado através da introdução de solvente. O ligante é dissolvido pelo solvente e removido através da aplicação de gás inerte. Este ensaio possibilita a extração do ligante para análise da viscosidade e demais propriedades do ligante envelhecido (DAU, 2001).

DNIT (2006) especifica que, a adição de agregado virgem a mistura reciclada só é feita quando o material reciclado resultante não obter faixa granulométrica aceitável e seja necessária a inclusão de novos agregados para correção.

A Tabela 4 apresenta a faixa granulométrica aceitável determinada pelo DNER.

Tabela 4 - Faixas granulométricas e percentuais de ligante betuminoso

Peneira de malha quadrada		% passando, em peso das faixas			
Discriminação	Abertura mm	A	B	C	Tolerâncias fixas de projeto
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
¾"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
½"	12,7	-	-	85-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	75-100	±7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	50-85	±7%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	30-75	±5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	15-40	±5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	8-30	±5%
Nº 200	0,074	1-8	3-8	5-10	±2%
Betume Solúvel no CS ₂ (+) %		4, 0-7, 0 Camada de Ligação (Binder)	4, 5-7, 5 Camada de Ligação e Rolamento	4, 5-9, 0 Camadas de Rolamento	±0,3%

Fonte: Adaptado de DNER-ES 313/97, p. 4

De acordo com Silva (2011), há desconfiança no desempenho de misturas com revestimento asfáltico recuperado, de forma que acredita-se que o uso de agregados virgens possuem melhor resistência, porém existem fontes de pesquisa que comprovam, até mesmo, melhor comportamento obtido por misturas recicladas do que por misturas convencionais utilizando agregado natural.

O material resultante da reciclagem do revestimento asfáltico possui formato cúbico obtido, geralmente, pela fresagem a frio (SILVA, 2011).

2.6.3 Cimento asfáltico de Petróleo (CAP)

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) deriva, principalmente, de processos de refinamento do petróleo e adição de grande quantidade de betume (hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos), além da presença de enxofre, nitrogênio e oxigênio, com a finalidade de aplicação em obras de pavimentação (BALBO, 2007).

A fabricação do CAP envolve um processo de destilação do petróleo cru. As características do material final variam de acordo com a destinação final do produto. A partir do CAP originam-se outros materiais de aplicação corriqueira na pavimentação como asfaltos diluídos e emulsões (BALBO, 2007).

Na composição de asfalto com misturas recicladas e asfalto convencional, tem por função principal envolver o material granular como um filme asfáltico estável e homogêneo e é comumente utilizado na composição de misturas recicladas a quente (SILVA, 2011).

2.6.4 Emulsão asfáltica de Petróleo (EAP)

A emulsão asfáltica é obtida através da mistura de cimento asfáltico de petróleo (CAP), água e agente emulsificante.

De acordo com Balbo (2007), a emulsão asfáltica possui boa aderência com materiais granulares, é impermeável e possui propriedades importantes como durabilidade, adesividade, endurecimento, flexibilidade, resistência ao ataque de agentes ácidos e é indissolúvel na presença de água.

É um material que apesar de possuir excelentes propriedades, sofre bastante com o ataque de agentes climáticos, como o sol, sendo termoplástico, desgasta-se e envelhece sob a ação constante da radiação solar. Os ácidos, graxas e combustíveis dos veículos também são agentes que provocam alteração nas configurações químicas da emulsão, provocando a oxidação desse material (BALBO, 2007).

Considerando a ação de altas temperaturas sobre o pavimento, a emulsão asfáltica sofre maior oxidação e sob a ação de temperaturas mais baixas está propenso a sofrer retração térmica. Logo emulsões submetidas a calor em excesso torna o material mais quebradiço, enquanto a temperaturas mais baixas provocam a fissuração da camada com aglutinante (BALBO, 2007).

A viscosidade e a velocidade de ruptura são características fundamentais para a classificação da emulsão asfáltica. A ruptura pode ser rápida ou lenta e sua definição depende das propriedades dos materiais envolvidos, como viscosidade do CAP, quantidade de emulsificante, umidade da superfície de aplicação, entre outros. O tipo de emulsão aplicado a obras de pavimentação são determinados a partir da classificação do material e sua aplicabilidade conforme as exigências de cada projeto (BALBO, 2007).

Em obras de reciclagem a emulsão asfáltica é incorporada a composição de novas misturas de material reciclado a frio.

2.6.5 Aditivos

Os aditivos são utilizados em misturas recicladas para recuperar as propriedades da mistura envelhecida. Espuma de asfalto, cal, cimento, cinza volante, agente

rejuvenecedor, são algumas adições que são usualmente aplicadas para melhorar as características da mistura final.

2.6.6 Agente Rejuvenecedor

Segundo Silva (2011) apud James (2006), em misturas recicladas a frio, adicionam-se aditivos rejuvenecedores emulsionados enquanto em misturas recicladas a quente, é usual a aplicação de agente rejuvenecedor para renovar as propriedades do ligante. Apesar da necessidade do uso de agente rejuvenecedor na reciclagem a quente, o teor de aditivo é consideravelmente menor que o utilizado na composição de reciclagem a frio, pois o teor existente na mistura reciclada é considerado na dosagem final do novo teor de emulsão asfáltica (SILVA, 2011).

Silva (2011) apud Mallick et al. (2010) afirma que, a presença de agente rejuvenecedor em misturas recicladas a quente apresentam desempenho similar aos valores obtidos para misturas asfálticas convencionais.

2.7 Controle tecnológico através de ensaios laboratoriais

O Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006) estabelece normas para avaliação visual e levantamento das condições de superfície e estruturais de um pavimento, de forma a fazer uma avaliação subjetiva de suas patologias, como ponto de partida.

De acordo com Paez (2012) apud DNIT (2006), para verificar as propriedades dos materiais provenientes da fresagem do revestimento, devem ser executados, além da investigação visual, os ensaios de granulometria dos agregados removidos, teor de asfalto e viscosidade, teor de umidade das camadas e dosagem Marshall para verificação da nova composição da mistura.

2.7.1 Ensaio de granulometria

Normatizado pela NBR NM 248, é necessária sua realização para determinação da faixa granulométrica dos agregados presentes na fresagem e posterior determinação do percentual do RAR presente na nova dosagem. Através dele determina-se, também, qual o melhor estabilizante a ser adicionada a mistura, considerando a quantidade de finos presentes no material fresado (PAEZ, 2012 apud DNIT, 2006).

Se, a partir da análise granulométrica verificar que o material não atende os critérios mencionados na norma, far-se-á adição de agregado virgem a composição da mistura (PAEZ, 2012).

2.7.2 Extração do teor de asfalto

De acordo com o PAEZ (2012) apud DNIT (2006), é necessário realizar ensaios de extração do ligante, caso a porcentagem de RAR utilizada na nova mistura seja maior que 50%. Nestes casos há necessidade de conhecer as propriedades do ligante envelhecido e efetuar sua recuperação, pois haverá influência do seu comportamento na qualidade da nova mistura. Caso a porcentagem seja menor, não há necessidade de efetuar esta verificação. A extração do ligante pode ser realizada pelo método Abson da ASTM D – 1856/79, ou ainda pela extração mecânica com solvente descrito pela norma DNER ME 053/94.

A norma DNER ME 053/94 tem por objetivo extrair e quantificar o teor de ligante presente numa determinada amostra de material fresado. A extração é feita por meio de uma centrífuga e recomenda-se a utilização de tetracloreto de carbono quando se deseja extrair um ligante asfáltico.

Neste método, é utilizado um aparelho extrator de betume, conhecido por rotarex, no qual é acoplado um prato metálico e é acionada eletricamente por meio de um motor.

O ensaio consiste em introduzir no prato uma amostra de 1000 g material, colocar 150 ml de solvente, ou o necessário para cobrir a amostra e introduzir um filtro de papel de diâmetro igual ao externo no prato metálico. Após dar início ao processo de centrifugação o solvente começa a escoar juntamente com o betume e assim que cessar o escoamento, é introduzida uma nova carga de solvente no aparelho. O processo é repetido até que todo o ligante seja eliminado e reste no prato apenas o agregado. A amostra então é colocada em estufa a uma temperatura de 80°C a 100°C e depois de seco o agregado recuperado será pesado. A diferença entre o peso inicial da amostra com betume e do agregado recuperado, fornece o teor de ligante existente na amostra.

2.7.3 Caracterização do ligante asfáltico

Para manipulação de ligantes asfálticos, se faz necessário conhecer o comportamento de suas partículas através de ensaios correntes e cálculos de suscetibilidade térmica. A necessidade de se determinar parâmetros para este material, decorre do fato que de todas suas propriedades físicas estão associadas à sua temperatura.

Segundo Bernucci et al. (2008), as moléculas do ligante se comportam de diferentes formas quando exposto a temperaturas distintas, podendo comportar-se como

um sólido a temperaturas mais baixas e como um líquido quando submetido a altas temperaturas.

Com base no exposto, fica clara a necessidade de conhecer as características deste material, objetivando facilitar a sua manipulação e execução de obras.

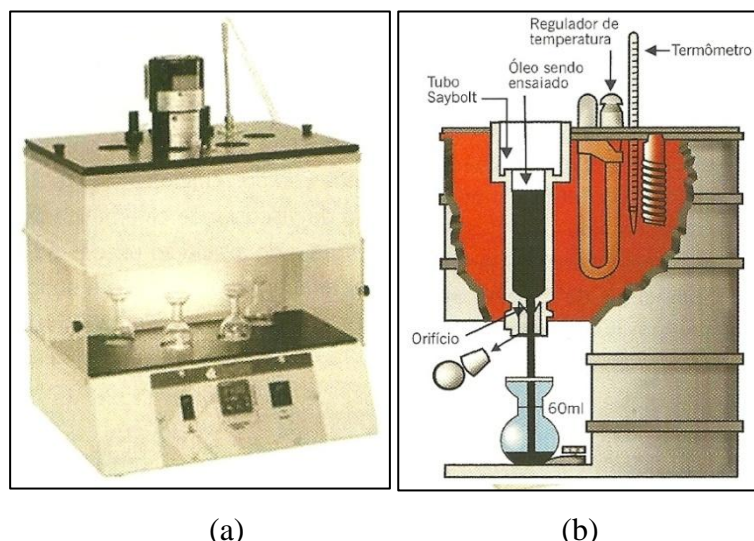
2.7.3.1 Ensaio de viscosidade

O ensaio de viscosidade é um dos mais importantes para determinação da resistência ao fluxo do ligante. No Brasil, este ensaio é regulamentado pela ABNT NBR 14756/2001.

O método descrito por esta norma utiliza um viscosímetro Saybolt-Furol (Figura 16), e reporta seus resultados em segundos Saybolt-Furol. O ensaio consiste em medir o tempo que leva para uma determinada amostra de material passar por tubos capilares e alcançar um volume de 60 ml no frasco inferior. Este método trabalha com temperatura de 135°C para cimentos asfálticos e o cronômetro só é acionado quando a temperatura estabilizar nessa faixa. Dessa forma a medida de viscosidade do ligante será baseada no tempo em que leva para escoar o volume mencionado anteriormente.

Bernucci et al. (2008) ressalta que, a determinação da viscosidade é importante para conhecer a consistência ideal do CAP, para se obter uma boa cobertura dos agregados, quando aplicada a misturas betuminosas.

Figura 16 - Exemplo de equipamento Saybolt-Furol e esquema de funcionamento



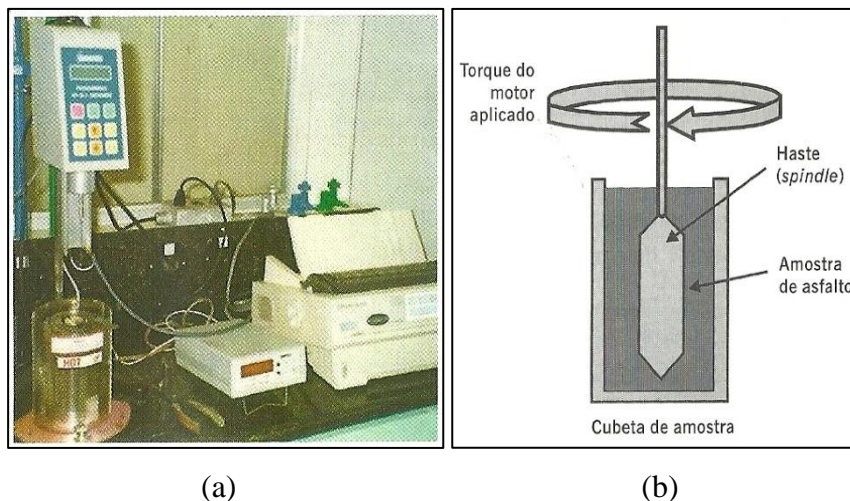
Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 46)

Outra forma de determinar a viscosidade do ligante asfáltico é utilizando o equipamento Brookfield (Figura 17). Ultimamente este método tem sido comumente

mais empregado nos Estados Unidos e na Europa. Através deste equipamento, obtém-se a medida de viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP).

A viscosidade é obtida através da rotação de cilindros que ficam imersos na amostra em teste. A ABNT NBR 15184 normatiza este método no Brasil.

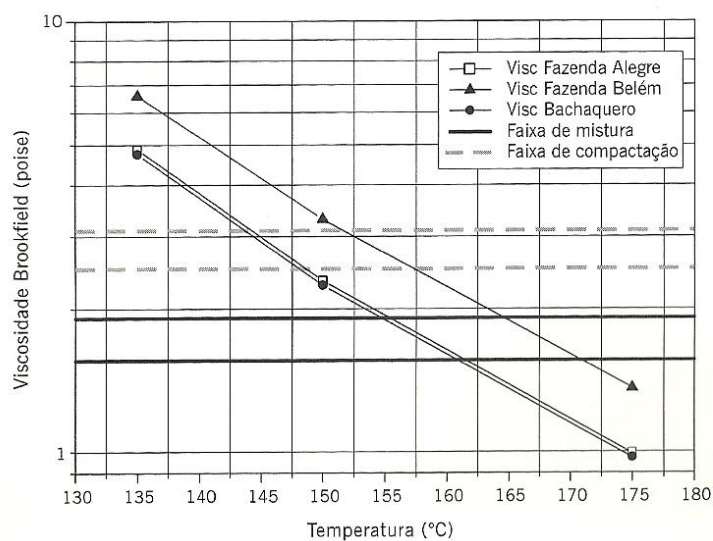
Figura 17 - Viscosímetro Brookfield e esquema de funcionamento



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 47)

Com o viscosímetro Brookfield é possível obter gráficos de temperatura x viscosidade (Figura 18) para projetos de mistura asfáltica, compactação e manuseio do ligante. Para fins do projeto em estudo, este será o método desenvolvido para encontrar a viscosidade do ligante asfáltico.

Figura 18 - Exemplo de curva de viscosidade Brookfield em função da temperatura

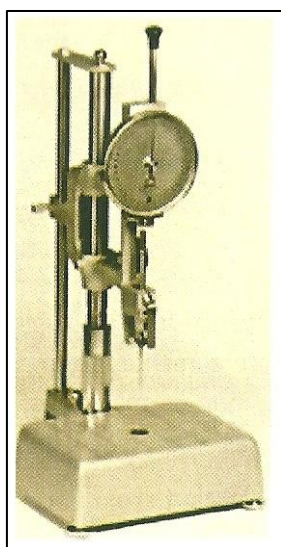


2.7.3.2 Ensaio de penetração

Este ensaio tem por objetivo determinar a dureza do cimento asfáltico de petróleo. O método de ensaio é normatizado pela ABNT NBR 6576/98 e determina a profundidade de penetração de uma agulha de 100 g em uma amostra padrão, por 5 segundos. Este procedimento deve ser executado a uma temperatura de 25°C e, normalmente, faz-se a média de três valores para obter a medida de penetração.

A Figura 19 apresenta um modelo de equipamento utilizado para execução deste ensaio.

Figura 19 - Exemplo de equipamento manual para medir penetração



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 219)

2.7.3.3 Ensaio de ductilidade

A norma ABNT NBR 6293/2001 regulamenta este ensaio que consiste na determinação da capacidade de alongamento, em centímetros, de um corpo-de-prova de ligante imerso em banho a uma temperatura de 25°C. A deformação tem uma velocidade de 5 cm/minuto e a ductilidade é dada pela capacidade de alongamento do filamento de CAP antes de sua ruptura.

2.7.3.4 Ensaio de solubilidade

O ensaio de solubilidade define o grau de pureza do asfalto. Em geral, em obras rodoviárias, as especificações para camadas de pavimentação exigem um teor pureza do asfalto de 99,0%. Este porcentual indica a presença de apenas 1,0% de impurezas.

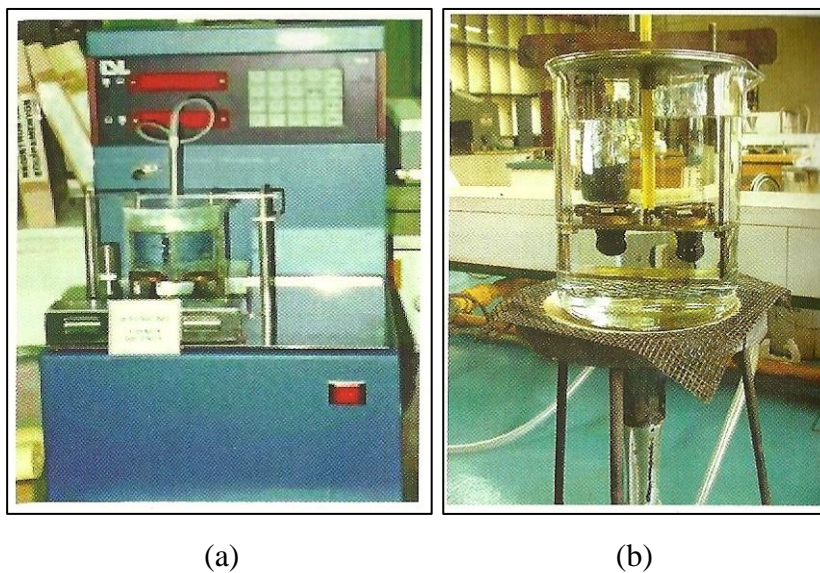
O ensaio é regulamentado segundo a norma ABNT NBR 14855/2002 e baseia-se na dissolução de uma amostra de ligante aplicando, o solvente tricloroetileno, através de um cadinho perfurado. O material retido no filtro indica as impurezas presentes na amostra de asfalto.

2.7.3.5 Ensaio de amolecimento

Este ensaio determina a suscetibilidade térmica do cimento asfáltico de petróleo. No Brasil é normatizado segundo a ABNT NBR 6560/2000 e é conhecido como ensaio do anel e bola.

A determinação desta propriedade consiste na colocação de uma bola de aço e peso conhecido, sobre uma amostra de CAP confinada em um anel metálico. O conjunto é colocado em banho, dentro de um béquer, e é aquecido a uma temperatura de 5°C/minuto (Figura 20). O ponto de amolecimento é medido quando, a uma determinada temperatura, a viscosidade do CAP diminui e então o ligante mistura-se com a bola de aço. A temperatura deve ser anotada no momento em que a mistura tocar o fundo do recipiente contendo o conjunto.

Figura 20 - Equipamento automático e manual para medir o amolecimento



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 48)

2.7.3.6 Ensaio de ponto de fulgor

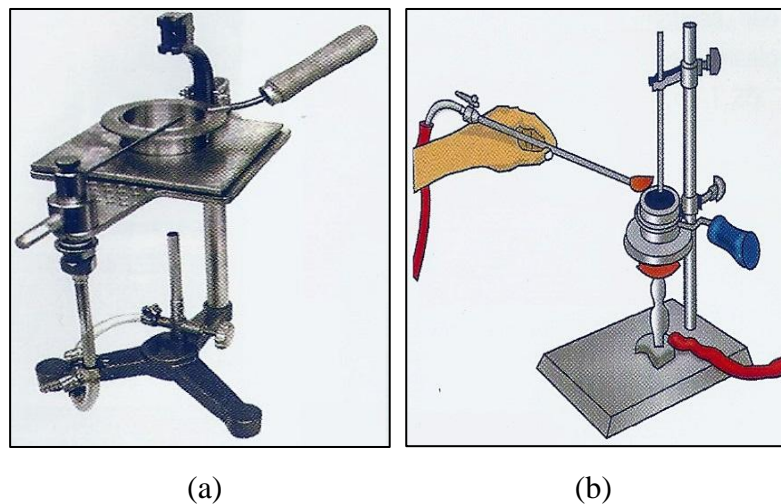
Preconizado pela norma ABNT NBR 11341/2004, este ensaio visa determinar a menor temperatura com a qual o ligante asfáltico inflama em contato com uma chama.

Conforme Bernucci et al. (2008), as temperaturas para que isto ocorra são superiores a 230°C.

O ponto de fulgor tem importância significativa uma vez que garante a segurança no manuseio, transporte e estocagem do material.

A Figura 21 demonstra o equipamento utilizado e o esquema de ensaio.

Figura 21 - Exemplo de equipamento e esquema do ensaio de ponto de fulgor



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 53)

2.7.3.7 Ensaio de durabilidade

A execução deste ensaio tem por objetivo simular a taxa de envelhecimento do ligante durante a usinagem.

Este método de avaliação é conhecido no Brasil como “efeito do calor e do ar” e é especificado segundo a norma ABNT NBR 14736/2001.

O ensaio consiste em simular o envelhecimento acelerado do CAP quando submetido a misturas com agregados em usina. As amostras de ligante são colocadas em um recipiente padronizado, na forma de uma película com pequena espessura. Utiliza-se uma estufa para aquecer a amostra, por um período de 5 horas a taxa de tempera de 163°C, aplicando jatos de ar. Devido a este processo, o ligante sofre envelhecimento por oxidação e evaporação. A partir disso, é possível medir os efeitos do envelhecimento nas características do ligante como a capacidade de penetração, viscosidade e dutilidade.

2.8 Determinação da dosagem da mistura reciclada

Para determinar a melhor dosagem a ser aplicada em campo deve-se, em primeiro lugar, conhecer as características do meio regional em que o trecho a ser restaurado está inserido.

Nos Estados Unidos foram desenvolvidos métodos que são usualmente empregados para determinação dos teores de misturas satisfatórios, porém as diferenças climáticas existentes quando comparado ao Brasil inviabiliza a adoção dos mesmos índices e critérios estabelecidos pelos ensaios americanos (SILVA, 2011).

Usualmente, a determinação do teor de ligante em projeto é definida com base no volume de vazios (V_v) de 4%. Este é o principal critério para avaliação, mas métodos propõem a análise de outras características como Relação Betume/Vazios (RBV), o volume de vazios do agregado mineral (VAM), a Estabilidade e a fluência. As duas últimas definidas, para este trabalho, pelo ensaio de compressão utilizando um prensa Marshall.

Segundo Taminini (2012), a avaliação destes parâmetros em conjunto tem grande relevância na definição de projeto, uma vez que se devem projetar misturas que atendam técnico- economicamente a todos os critérios significativos para produção de uma dosagem que garanta a durabilidade do pavimento e suas condições de operação.

A limitação do V_v , evita a exsudação do ligante para a superfície do pavimento, através da determinação de um valor mínimo de volumes de vazios. Esse valor corresponde a um limite em que permite a expansão térmica dos agregados e do CAP e garanta uma densidade suficiente para a camada de rolamento.

Ceratti e Reis (2011), ressaltam que a relação entre os parâmetros V_v e RBV devem ser limitadas para não produzir camadas com excesso ou falta de ligante, o que tornaria afetaria a estabilidade do revestimento.

A tabela 5 apresenta os critérios limites para o V_v e RBV especificados pelo DNIT.

Tabela 5 - Valores limitantes de V_v e RBV

Propriedades	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação
V_v , %	DNER - ME 043	3 - 5	4 - 6
RBV, %	DNER - ME 043	75 - 82	65 - 72

Fonte: Adaptado de DNIT (2006a, p. 05)

Analisando a durabilidade do pavimento, é importante verificar o VAM da mistura, uma vez que uma baixa taxa de volume de vazios do agregado mineral produzirão misturas com baixo volume de vazios. Logo, produzirá uma camada com baixa flexibilidade, deixando o pavimento suscetível a trincas em um período de tempo menor (CERATTI; REIS, 2011).

Os ensaios executados com o produto da reciclagem é que irão determinar os teores de adição de aditivos, emulsão asfáltica e agregados virgens, na composição da mistura reciclada.

2.8.1 Dosagem Marshall

No Brasil o DNIT (DNER ME 117/94), indica a confecção de corpos-de-prova Marshall, com aplicação de 50 a 75 golpes e tempo de cura de 24 horas, em estufa, à 60° de temperatura. Após o desmolde do corpo-de-prova, é recomendado aguardar duas horas para execução dos ensaios (SILVA, 2011).

O ensaio de dosagem Marshall é regulamento pela norma DNER-ME 043/95, e define os teores de cada material constituinte da camada de revestimento reciclado. Como o objetivo do presente trabalho é obter um pavimento restaurado, através da reciclagem, com a mesma qualidade de um pavimento novo, devem-se efetuar tentativas de dosagem diferentes, de forma a escolher a de melhor desempenho.

Segundo Paez, os projetos e misturas reciclados são, em geral, feitos a partir da análise das pesquisas realizadas por outros autores da área. De acordo com o DNIT (2006), não existe nenhuma dosagem de mistura pré-definida para essas aplicações.

A partir da Metodologia do Instituto do Asfalto, Paez (2012) descreve as seguintes etapas para determinação da dosagem de misturas recicladas:

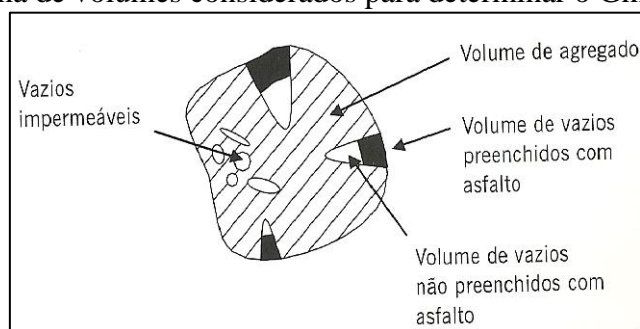
- Verificação da quantidade de agregado reciclado que poderá ser utilizada na mistura;
- Definição da qualidade pretendida para o novo revestimento asfáltico;
- Determinação do teor de ligante presente na quantidade de material fresado selecionado para composição da mistura;
- Análise da quantidade de emulsão asfáltica e agente rejuvenescedor que deverá ser adicionada a mistura;
- Por fim definir os teores de emulsão, agregados virgens (se necessário) e aditivos, a partir da moldagem de corpos-de-prova e ensaios pelo Método Marshall.

2.9 Caracterização mecânica e volumétrica da mistura reciclada

Misturas asfálticas compactadas possuem uma estrutura com diferentes componentes. Para determinação dos teores de ligante, é necessário conhecer os componentes que fazem parte dessas misturas e determinar suas massas específicas, aparentes e efetivas. Também se faz necessário verificar o volume de vazios e o teor de ligante que foi absorvido pelos agregados.

A Figura 22 apresenta um esquema da composição de uma mistura asfáltica com a interação entre agregado e ligante. A mistura desses componentes dá origem a um material compactado com presença de: volume de vazios preenchidos por ligantes, e volume de poros permeáveis à água sem presença de CAP.

Figura 22 - Esquema de volumes considerados para determinar o Gmm



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 210)

A compreensão e uso desses parâmetros são requeridos para efetuar o cálculo das propriedades da mistura e conseqüentemente das suas propriedades mecânicas.

Os parâmetros volumétricos são obtidos através das seguintes equações:

Volume dos corpos-de-prova :

$$V = M_s - M_{sub} , \text{ em \%} \quad \dots (1)$$

Massa específica aparente da mistura:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V}, \text{ em g/cm}^3 \quad \dots (2)$$

Volume de vazios:

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}, \text{ em \%} \quad \dots (3)$$

Vazios com betume:

$$VCB = \frac{Gmb \times \%a}{Ga}, \text{ em \%} \quad \dots (4)$$

Vazios do agregado mineral:

$$VAM = Vv + VCB, \text{ em \%} \quad \dots (5)$$

Relação betume / vazios:

$$RBV = \frac{VCB}{VAM}, \text{ em \%} \quad \dots (6)$$

Onde:

V = volume dos corpos-de-prova (cm³);

Ms = massa seca (g);

MSub = massa submersa em água (g);

%a = teor de asfalto (%);

Ga = massa específica do ligante (g/cm³).

2.9.1 Determinação da densidade máxima

O cálculo densidade máxima teórica (DMT) ou a massa específica máxima medida (Gmm), é necessário para determinar o Vv, a taxa de absorção de ligante pelos agregados da mistura, o teor de asfalto efetivo e a massa específica efetiva do agregado.

Para fins do presente estudo, será obtido o Gmm através do procedimento com utilização de vácuo, descrito pelos métodos norte-americanos ASTM D 2041 (2000), ASSHTO T 209 (1999) e o europeu EM 12697-5.

O procedimento de ensaio consiste em determinar a massa da amostra em ar, massa do recipiente com volume completo com água e a massa do recipiente com amostra submersa em água.

Inicialmente pesa-se uma amostra da mistura em uma recipiente, cuja massa seja conhecida (Figura 23). A quantidade de amostra que deve ser utilizada para este ensaio depende do tamanho máximo do grão presente na mistura.

Figura 23 - Amostra de mistura com peso conhecido



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 6 apresenta a quantidade de amostra especificada pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para diferentes tamanhos de agregados.

Tabela 6 - Quantidade de amostra requerida para o ensaio

Tamanho máximo do agregado	Tamanho mínimo da amostra
37,5 mm	4000 g
25,0 mm	2500 g
19,0 mm	2000 g
12,5 mm	1500 g
9,5 mm	1000 g
4,75 mm	500 g

Fonte: AASHTO T 209 (1999)

Em seguida, calibra-se o Kitasato para determinar a massa do conjunto Kitasato mais água a temperatura média de 25°C, conforme apresenta a figura 24.

Figura 24 - Determinação do peso do kitasato com água



Fonte: Elaboração própria

Então a quantidade de amostra é pesada e posteriormente introduzida no kitasato, recebendo água até que toda a mistura fique recoberta. O próximo passo é a aplicação de uma pressão de vácuo residual no recipiente, em torno de, 730mmHg. O vácuo é aplicado com a finalidade de expulsar as bolhas de ar presentes nos grumos de agregado e ligante da mistura (Figura 25).

Figura 25 - Aplicação de vácuo com auxílio de bomba



Fonte: Elaboração própria

Define-se um tempo médio de execução deste processo de 15 minutos. Após o encerramento do período de aplicação, é reestabelecida a pressão ambiente. Dessa forma, completa-se o recipiente, contendo a mistura, com água e verifica o peso do conjunto (Figura 26).

Figura 26 - Kitasato com amostra com água e amostra após aplicação de vácuo



Fonte: Elaboração própria

O Gmm é obtido através da expressão abaixo:

$$Gmm = \frac{A}{A+B+C} \times 0,9971, \text{ em g/cm}^3 \quad \dots (7)$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar, g;

B = massa do recipiente com volume completo com água, g;

C = massa do recipiente + amostra submersa em água, g.

Bernucci et al. (2008) aponta que, a vantagem de se obter o Gmm através do método de aplicação de vácuo, consiste em não ser necessário conhecer as massas específicas dos constituintes da mistura, separadamente.

2.9.2 Resistência à compressão

Para verificar a resistência à compressão dos CP's, é utilizado o método Marshall normatizado pela DNER – ME 043/95.

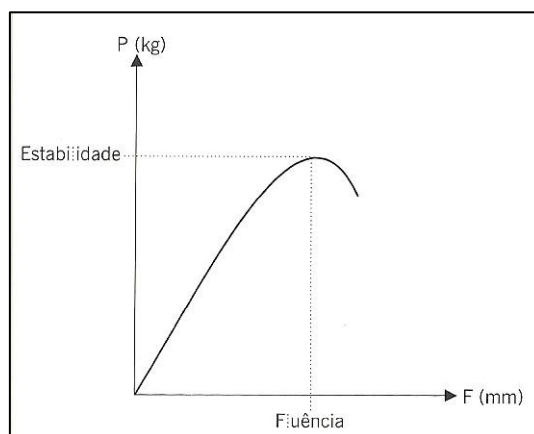
A prensa Marshall é equipada com um molde de compressão, anel dinamométrico para leitura da carga e um medidor mecânico de fluência. Para determinar os parâmetros mecânicos, o corpo-de-prova é imerso em banho maria por cerca de 30 a 40 minutos, sob uma temperatura média de 60°C. Alternativamente, podem-se deixar os CP's em uma estufa, por cerca de duas horas com esta temperatura.

A prensa Marshall é capaz de aplicar cargas de até 39,2 kN (4000 Kgf). Possui um erro inferior a 24,5 N (2,5 Kgf) e utiliza um êmbolo que se movimenta a uma taxa de velocidade de 5 cm por minuto.

Segundo a norma, a resistência máxima a compressão radial é dada pela estabilidade Marshall. Onde a estabilidade é a carga, em N (Kgf), que um corpo-de-prova é capaz de suportar antes de sua ruptura.

São necessários, no mínimo, a execução do ensaio de ruptura para três CP's de cada dosagem. Dessa forma, obtém-se a curva resultante da estabilidade x fluência (Figura 27).

Figura 27 - Exemplo de curva resultante da Estabilidade Marshall



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 289)

Com o rompimento dos corpos-de-prova, a carga fornecida pela prensa é determinada como estabilidade lida. A estabilidade real é definida pela multiplicação da estabilidade lida por um fator de correção que depende da espessura do CP. Ou ainda pela equação abaixo:

$$f = 927,23 \times h^{-1,64} \quad \dots (8)$$

A Tabela 7 especifica os fatores de correção da estabilidade em função da espessura do corpo-de-prova.

Tabela 7 - Fatores de correção da estabilidade

ESP.(mm)	FATOR	ESP.(mm)	FATOR	ESP.(mm)	FATOR
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51,0	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,20	65,1	0,96
51,6	1,43	57,12	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52,0	1,41	57,7	1,17	66,7	0,93
52,2	1,40	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,90
52,9	1,37	59,0	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60,0	1,10	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,03	0,85
54,0	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,30	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73,0	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,80
55,1	1,27	62,3	1,03	74,0	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1,00	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99	-	-

Fonte: DNER-ME 043/95 (1995)

2.9.3 Fluência

A fluência é obtida simultaneamente a determinação da estabilidade. Este parâmetro é definido como o deslocamento máximo na vertical correspondente ao maior carregamento aplicado sobre o corpo-de-prova antes de sua ruptura.

Esse valor varia de zero até a taxa total de deformação sofrida pelo corpo, medida em milímetros (mm).

A fluência é dada através do defletômetro, com graduação de 0,0025 mm, que mede o encurtamento da peça.

Durante o ensaio, a luva-guia deve ser firmada no topo do segmento do molde de compressão. No momento em que se der o rompimento do CP, é necessário abrandar a pressão sobre a luva do medidor de fluência e posteriormente será lido o resultado.

A Figura 28 apresenta um exemplo de prensa Marshall para execução deste ensaio.

Figura 28 - Prensa Marshall



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 223)

2.9.4 Resistência à tração

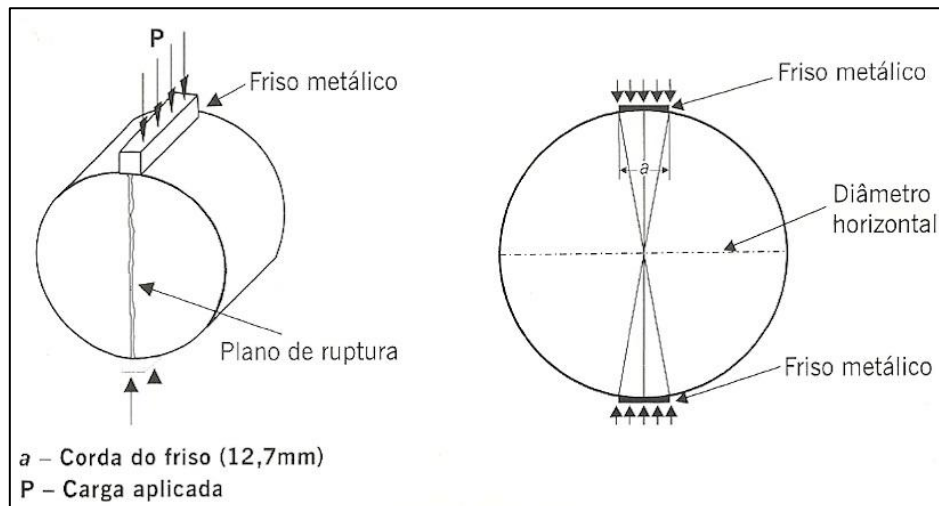
O ensaio de ruptura para determinação da resistência à tração por compressão diametral é um dos principais parâmetros de caracterização de misturas asfálticas. O procedimento de execução deste método é preconizado pela norma DNER – ME 138/94.

O método de ensaio estabelecido pela norma consiste em medir a altura e o diâmetro dos corpos-de-prova com um paquímetro, em quatro posições opostas, de forma a se obter a altura média dos CP's que serão rompidos. Em seguida, o corpo-de-prova é posicionado sobre o prato inferior da prensa, entre dois frisos metálicos. Os CP's são levemente comprimidos, de forma a se manterem fixos na posição para iniciar o ensaio. Progressivamente, é aplicada uma carga com 0,8 mm/s de velocidade, parando imediatamente após se dar a ruptura do corpo-de-prova.

Este ensaio pode ser desenvolvido com o corpo-de-prova com temperatura variando entre 25°C à 60°C. Para fins desta pesquisa, os CP's foram estabilizados a uma temperatura de 25°C para determinação de sua resistência.

A ruptura dos CP's ocorre na perpendicularmente ao ponto de aplicação de carga sobre o friso metálico, conforme indicado na Figura 29.

Figura 29 - Orientação do plano de ruptura por compressão diametral



Fonte: Bernucci et. al (2008, pg. 309)

Deste ensaio são obtidos os valores de deformação em mm e a carga de ruptura F. Esta carga deve ser anotada e o cálculo da resistência à tração do corpo-de-prova rompido é obtido através da seguinte equação:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH}, \text{ em MPa} \quad \dots (9)$$

Onde:

σ_R = resistência à tração;

F = carga de ruptura, N;

D = diâmetro de corpo-de-prova, cm;

H = altura do corpo-de-prova, cm.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos materiais

Neste capítulo serão apresentados os métodos propostos para avaliação das características mecânicas e volumétricas dos materiais constituintes do projeto de misturas asfálticas recicladas.

3.1.1 Material fresado

O material fresado estudado neste trabalho é proveniente do trecho da rodovia BR-290 situado entre os municípios de Rosário do Sul/ São Gabriel – RS. O agregado reciclado foi obtido através da técnica de fresagem à frio, da obra de conservação e restauração do revestimento asfáltico executada pela empresa Iccila Indústria, Comércio e Construções Ibagé Ltda.

A Figura 30 apresenta amostras do material fresado utilizado neste trabalho.

Figura 30 - Amostras do material fresado



Fonte: Elaboração própria

3.1.1.1 Ensaio de granulometria do material com betume

O material fresado passou por uma análise granulométrica, objetivando identificar a faixa granulométrica de enquadramento da amostra, de acordo com a classificação do DNIT.

O ensaio para definir a granulometria do fresado foi executado conforme as especificações da norma DNER-ME 083/98 de Análise Granulométrica, utilizando peneiras de malha quadrada e com aberturas regulamentadas conforme especificações normativas apresentadas na Revisão Bibliográfica (Tabela 4).

A Figura 31 mostra o conjunto de peneiras com a granulometria retida em cada peneira durante a execução do ensaio com as amostras fresadas.

Figura 31 - Conjunto de peneiras com material fresado



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos após a realização de três ensaios do mesmo material. Após foi realizada a média destas amostras, estes dados serviram para verificar a distribuição granulométrica das partículas do material fresado ainda envolto com o ligante que existia na mistura.

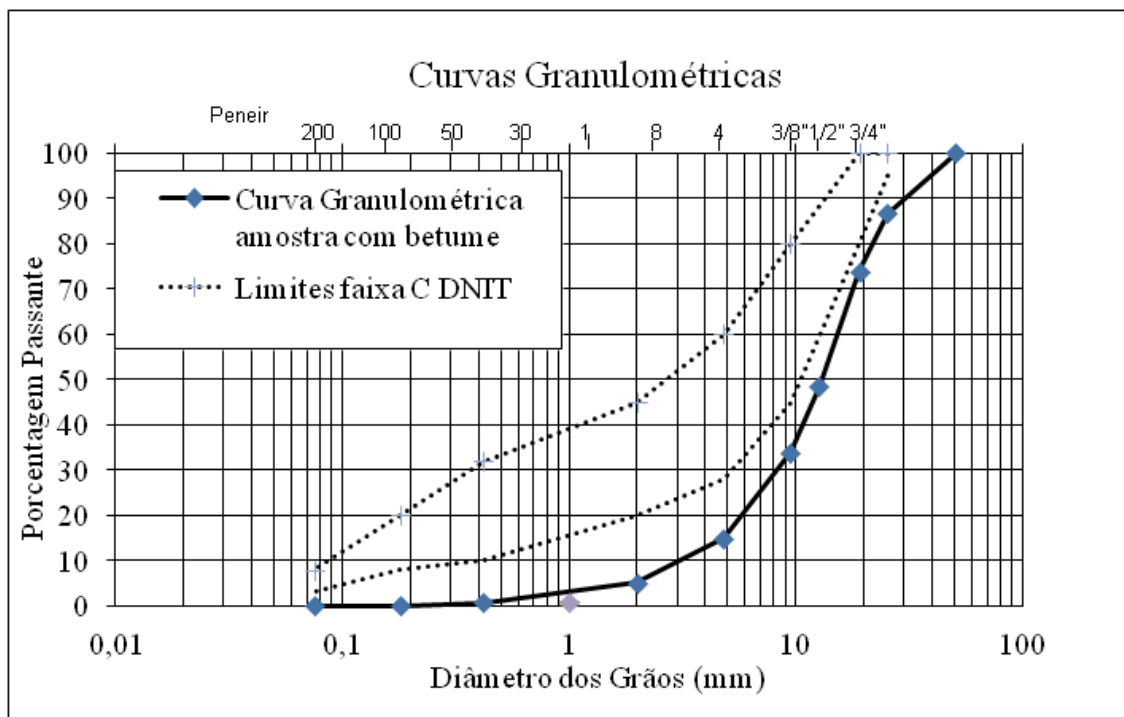
Tabela 8 - Ensaio de análise granulométrica do material fresado com betume

#	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		Média (%)
	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	
2"	-	100	-	100	-	100	100
1"	106,2	89,39	165,1	83,49	130,2	87,00	86,63
3/4"	238	76,23	315,6	68,44	233,7	76,66	73,78
1/2"	515,2	48,54	539,2	46,08	493,4	50,73	48,45
3/8"	666,7	33,40	673,4	32,66	646,4	35,45	33,84
4	850,6	15,03	857,8	14,22	846,1	15,51	14,92
10	949,5	5,15	951,1	4,89	948,7	5,26	5,10
40	994,5	0,66	993,4	0,66	993,4	0,80	0,71
100	999,9	0,12	998,8	0,12	999,8	0,16	0,13
200	1000,9	0,02	999,6	0,04	1001	0,04	0,03
Fundo	1001,1	-	1000	-	1001,4	-	-
Total	1001,1		1000		1001,4		

Fonte: Elaboração própria

Os valores da média de distribuição granulométrica apresentados na Tabela 8 foram plotados em um gráfico para comparação com as faixas de tolerância do DNIT. A Figura 32 exhibe a curva granulométrica do material fresado e os limites de tolerância admitidos para a faixa “C” do DNIT.

Figura 32 - Curva granulométrica do material fresado



Fonte: Elaboração própria

3.1.1.2 Extração do ligante

O ligante presente nas amostras de material fresado foi extraído conforme as especificações e procedimentos para execução do ensaio, indicados pela norma DNER-ME 053/94. Foram selecionadas três amostras de 1000 gramas e a média delas determinou a porcentagem de betume presente na mistura.

O solvente utilizado foi a gasolina devido a alta toxicidade do tetracloreto de carbono, indicado nas instruções normativas.

A determinação do teor de ligante foi calculada pela seguinte equação:

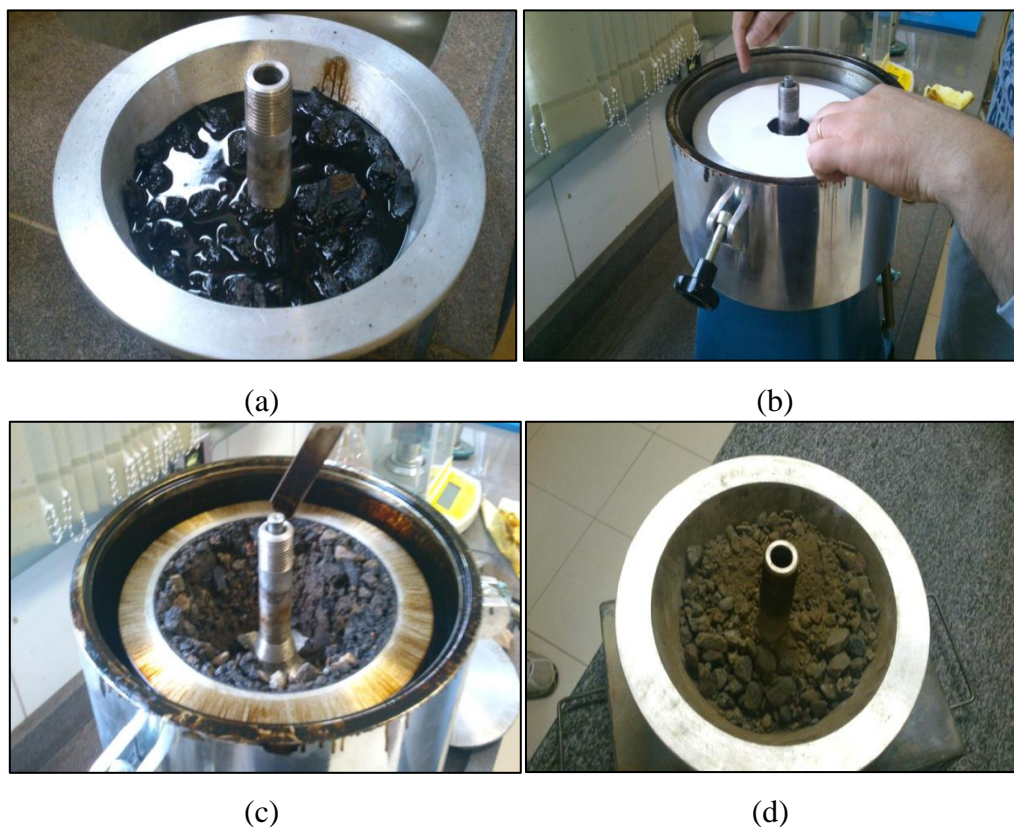
$$P = \frac{\text{peso do betume extraído}}{\text{peso da amostra total}} \times 100 \quad \dots (10)$$

Onde:

P = Porcentagem de betume extraído, %.

A Figura 33 mostra a adição de solvente à amostra (a); colocação de filtro para posterior fechamento da panela de centrifugação (b); amostra sem solvente com teor de ligante parcialmente removido (c); e agregado do material fresado com 100% do betume removido (d). O ensaio de extração de ligante foi desenvolvido no laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Pampa.

Figura 33 - Etapas do ensaio de extração do ligante



Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 - Porcentagem de betume

Número da amostra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Porcentagem de betume (%)
1	1000	947,7	5,23
2	1000	944,5	5,55
3	1000	947,3	5,27
Média das porcentagens:			5,35
Desvio padrão (%):			0,174

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 9 estão os valores encontrados para três amostras e a média das porcentagens e o desvio padrão. Este valor pode ser considerado pouco significativo. Assim, validou-se a média dos teores encontrados como sendo representativa ao teor de ligante presente no material fresado de 5,35%.

3.1.1.3 Ensaio de granulometria do material sem betume

Após a extração do betume, as três amostras foram secas em estufa e passaram pelo processo de análise granulométrica, seguindo as mesmas especificações do ensaio adotado para a granulometria do material com ligante (Figura 34). Essa análise foi realizada para verificar a composição do esqueleto pétreo presente na mistura de material fresado.

Figura 34 - Peneiramento de amostras após extração do ligante



Fonte: Elaboração própria

A tabela 10 apresenta a média dos valores encontrados para as três amostras.

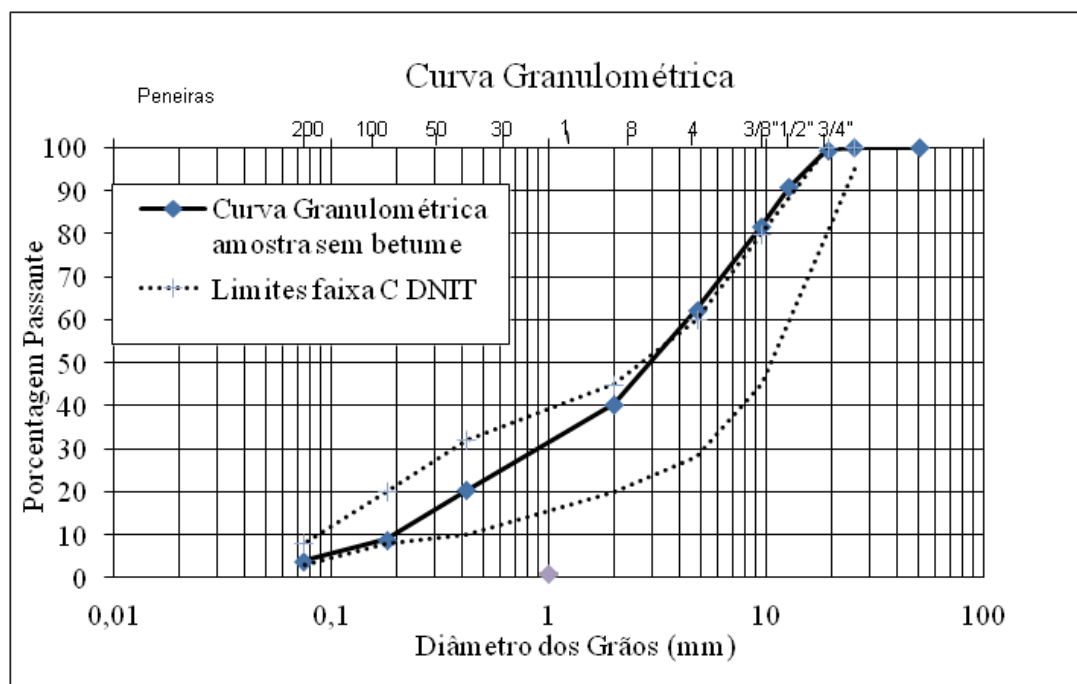
Tabela 10 - Ensaio de análise granulométrica do material fresado sem betume

#	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		AMOSTRA 3		Média
	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	
2"	-	100	-	100	-	100	100
1"	-	100	-	100	-	100	100
3/4"	8,8	99,07	5,6	99,41	0,8	99,92	99,46
1/2"	80,6	91,48	78,5	91,67	99,6	89,46	90,87
3/8"	186	80,34	148,1	84,29	183,3	80,60	81,75
4	372,1	60,67	330,1	64,99	366,7	61,19	62,28
10	579,3	38,78	547,6	41,92	563,9	40,32	40,34
40	766,4	19,00	738,6	21,66	752,8	20,33	20,33
100	864,4	8,65	847,4	10,12	867,6	8,18	8,98
200	911,3	3,69	896,7	4,89	916,5	3,01	3,86
FUNDO	946,2	-	942,8	-	944,9	-	-
TOTAL	946,2		942,8		944,9		

Fonte: Elaboração própria

Da mesma forma, os valores médios da granulometria do material fresado sem betume foram plotados, em um gráfico, e comparado com os limites da faixa "C" do DNIT (Figura 35).

Figura 35 - Curva granulométrica do fresado após extração do ligante



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Agregado virgem

Para composição da mistura II, foram utilizados agregados minerais virgens de diferentes graduações. O material foi enquadrado dentro da distribuição granulométrica da faixa “C” do DNIT, visto que a caracterização granulométrica do material fresado se enquadrou dentro desta faixa.

3.1.2.1 Análise granulométrica dos agregados

Para determinação da quantidade de cada graduação de agregado usada na mistura, utilizou-se o ensaio de granulometria para caracterização do material. Dessa forma, o ensaio regulamentado pela norma DNER-ME 035/95, foi executado para as graduações de brita 1, pedrisco, pó de pedra.

As tabelas de 11 a 13 indicam o percentual passante em cada peneira e a média das amostras.

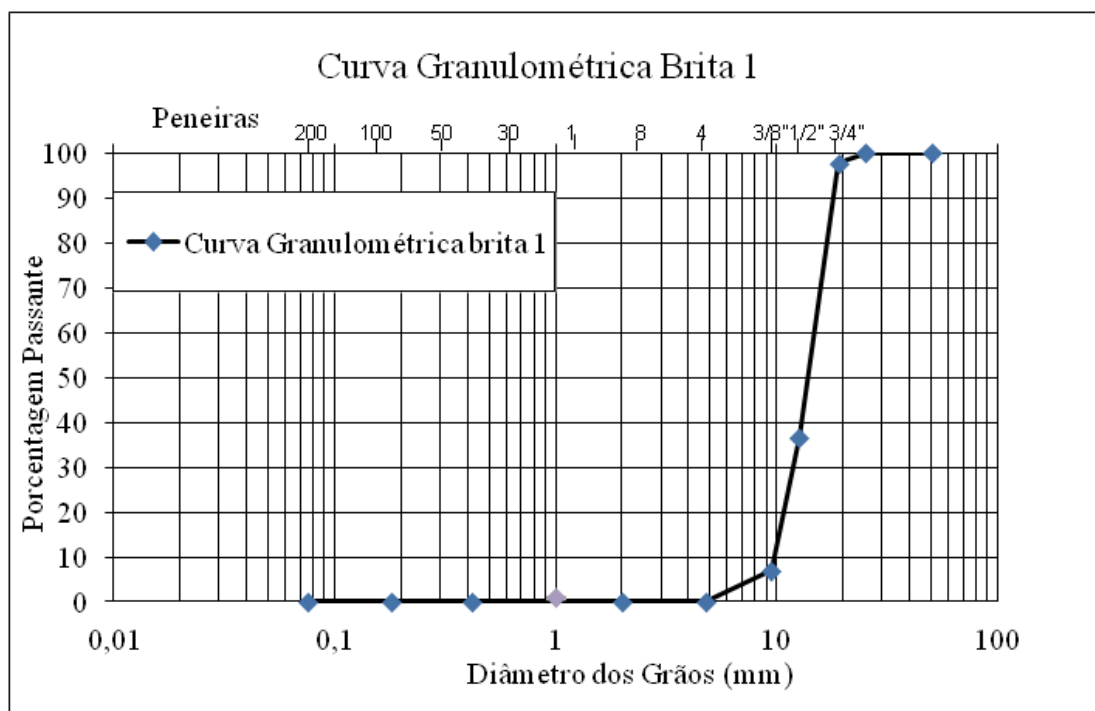
As Figuras 36 a 38 apresentam a curva granulométrica de cada graduação analisada.

Tabela 11 - Granulometria brita 1

#	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		Média
	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	
2"	-	100	-	100	100
1"	-	100	-	100	100
3/4"	17,80	98,22	25,00	97,49	97,86
1/2"	666,40	33,32	599,90	39,88	36,60
3/8"	935,80	6,36	921,30	7,67	7,02
4	998,00	0,14	996,50	0,13	0,14
10	998,00	0,14	996,50	0,13	0,14
40	998,50	0,09	996,60	0,12	0,11
100	998,70	0,07	997,10	0,07	0,07
200	999,10	0,03	997,50	0,03	0,03
FUNDO	999,40	-	997,80	-	-
TOTAL	999,40		997,80		

Fonte: Elaboração própria

Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica da brita 1



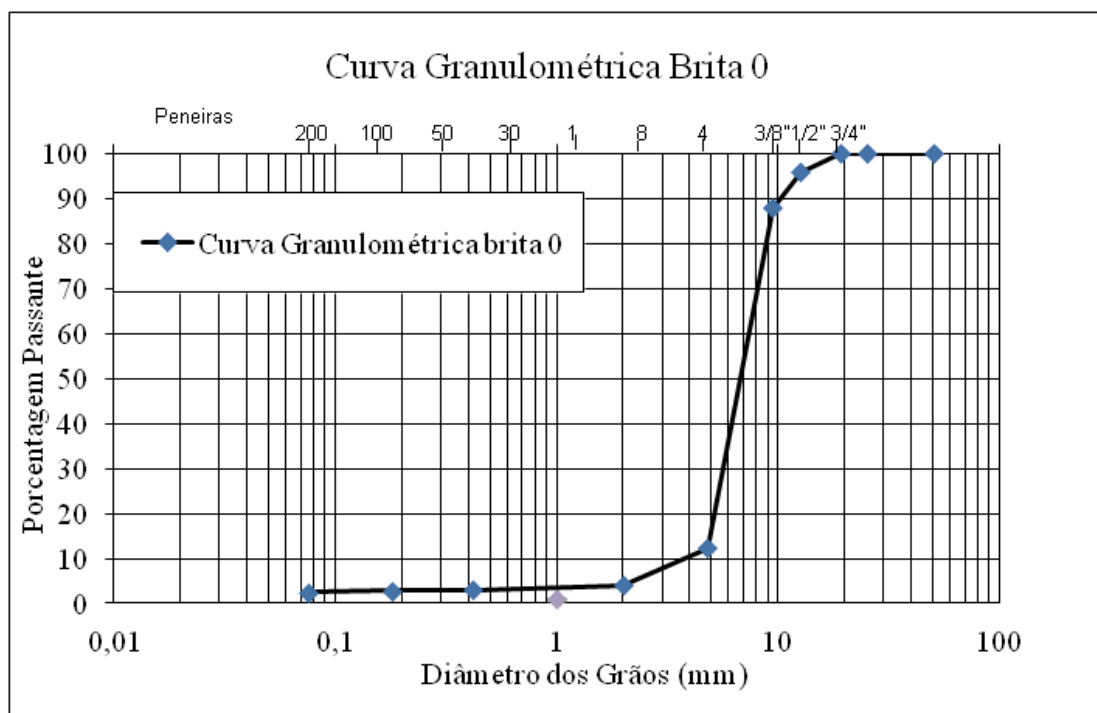
Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Granulometria pedrisco (brita 0)

#	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		Média
	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	
2"	-	100,00	-	100	100
1"	-	100,00	-	100	100
3/4"	-	100,00	-	100,00	100
1/2"	42,50	95,94	40,40	95,79	95,86
3/8"	123,70	87,80	117,60	88,06	87,93
4	896,00	10,37	855,90	14,20	12,28
10	976,70	2,28	939,30	5,85	4,06
40	986,90	1,25	948,60	4,92	3,09
100	989,40	1,00	951,40	4,64	2,82
200	993,50	0,59	953,40	4,44	2,52
FUNDO	997,40	-	999,50	-	-
TOTAL	997,40		999,50		

Fonte: Elaboração própria

Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica do pedrisco (brita 0)



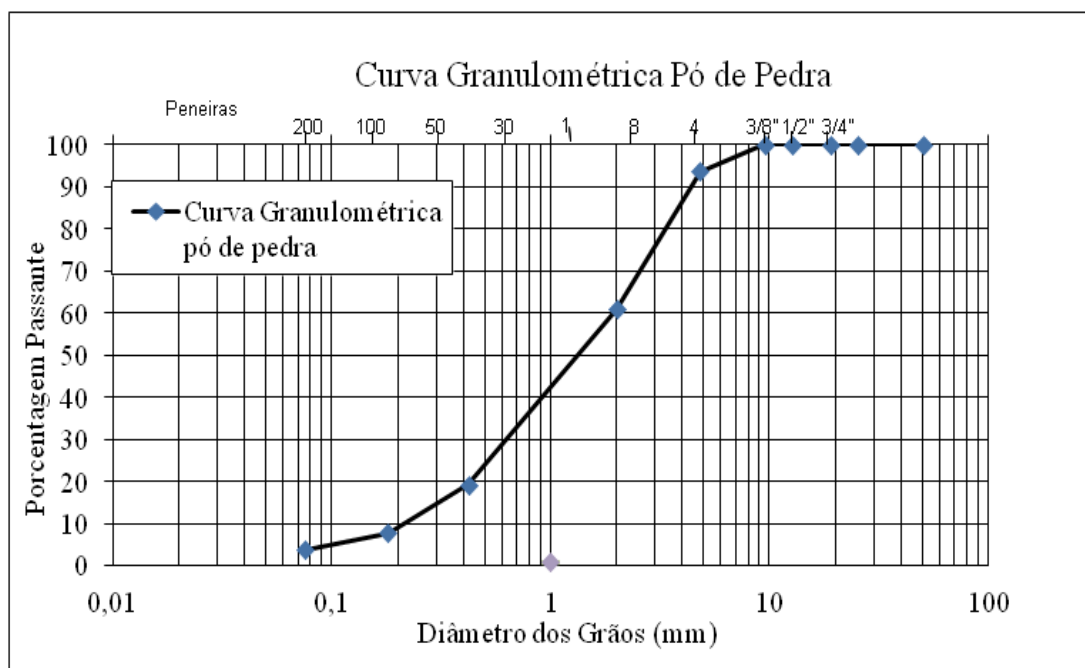
Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 - Granulometria pó de pedra

#	AMOSTRA 1		AMOSTRA 2		Média
	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	Amostra retida (g)	Amostra passante (%)	
2"	-	100,00	-	100,00	100
1"	-	100,00	-	100,00	100
3/4"	-	100,00	-	100,00	100
1/2"	-	100,00	-	100,00	100
3/8"	-	100,00	-	100,00	100
4	64,30	93,54	61,80	93,80	93,67
10	394,20	60,79	389,70	61,05	60,92
40	807,80	19,25	805,90	19,27	19,26
100	926,70	7,30	917,90	8,02	7,66
200	960,60	3,90	962,90	3,50	3,70
FUNDO	995,50	-	996,00	-	-
TOTAL	995,50		996,00		

Fonte: Elaboração própria

Figura 38 - Curva de distribuição granulométrica do pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 da Petrobras, proveniente do petróleo Bachaquero. Para fins deste trabalho, não foi necessário determinar todas as propriedades de caracterização deste material, uma vez que, não é o foco principal da pesquisa.

Apesar disso, é indispensável conhecer as características de trabalhabilidade com a qual se pode aplicar o ligante em misturas. Com base nisso, foi executado o ensaio de viscosidade, de forma a determinar a temperatura com a qual as diferentes misturas poderiam ser executadas.

3.1.3.1 Ensaio de viscosidade

A viscosidade do ligante foi determinada no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, utilizando o viscosímetro rotacional, conhecido como viscosímetro de Brookfield.

O ensaio determinou as temperaturas para bombeamento, mistura e compactação do CAP.

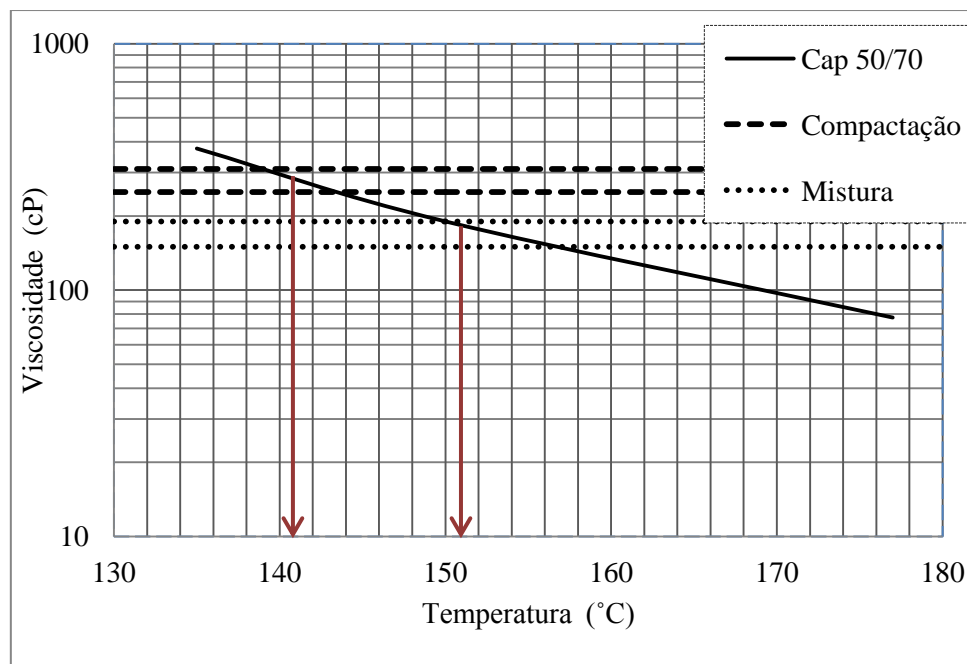
A Tabela 14 apresenta a faixa de mistura, compactação e a curva de viscosidade para os dados apresentados na Figura 39.

Tabela 14 - Ensaio de viscosidade Brookfield do ligante

Unidade	Temperaturas			Mistura	Compactação
	135°C	150°C	177°C		
Viscosidade (cP)	375	190	77,5	153 – 154	142 – 143

Fonte: Elaboração própria

Figura 39 - Curva viscosidade x temperatura



Fonte: Elaboração própria

3.2 Dosagem e definição do teor de projeto

Nos itens que seguem neste trabalho, são apresentados os procedimentos desenvolvidos para definição do teor ótimo de ligante para este projeto.

3.2.1 Projeto de dosagem

Optou-se pela verificação do Vv, correspondente a 4%, como parâmetro para encontrar o teor de ligante asfáltico necessário para a mistura. Partindo deste princípio, foram desenvolvidas duas misturas, sendo a mistura 1 composta de 100 % de material fresado, e a mistura 2 com 50% de fresado e 50% de agregado novo. Para composição da segunda mistura, foram utilizados agregados classificados como brita 1, brita 0 ou pedrisco, e pó de pedra.

Com a mistura 1, foram moldados conjuntos de 5 corpos-de-prova para diferentes teores de CAP. Partindo do teor médio de ligante de 5,35%, obtido através do

ensaio de extração de uma amostra fresada, considerou-se uma adição de 2,5 a 4,0% de ligante novo.

Estimou-se, inicialmente, que o ligante envelhecido não teria uma contribuição significativa nas propriedades mecânicas da mistura de projeto, devido a isso se utilizou teores de CAP semelhantes aos usuais em misturas novas.

Não foi considerada a utilização de agentes rejuvenescedores para recuperar o ligante envelhecido.

Para a mistura 2, optou-se por começar a dosagem com um teor de ligante maior, devido a presença de agregados novos. A granulometria dos agregados novos foi ajustada em percentual adequado para se enquadrar dentro da faixa C do DNIT. Definidas as temperaturas de mistura e compactação, foram moldados 3 CP's para cada teor de ligante novo, adicionados a mistura, variando de 2,5% a 4,5%.

A Tabela 15 apresenta a composição da mistura 2, para misturas com cimento asfáltico dentro da faixa "C" do DNIT.

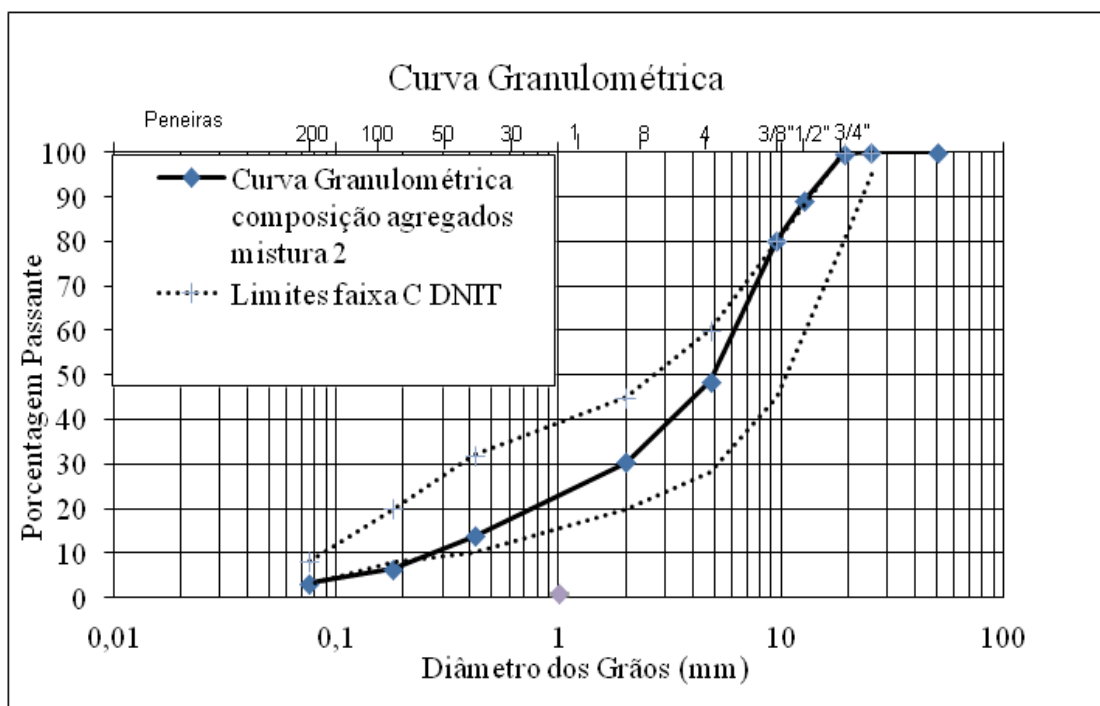
Tabela 15 - Proporções de agregados na composição da mistura 2

Peneira	Dosagem – 50% agregado virgem 50% agregado fresado				Mistura (%)	Especificação	
	A (brita 1)	B (pedrisco)	C (pó de pedra)	D (fresado)		Faixa "C" DNIT	
#						% Min	% Máx
	8,00%	27,00%	15,00%	50,00%			
2"	8,00	27,00	15,00	50,00	100,00	-	100
1"	8,00	27,00	15,00	50,00	100,00	-	100
¾"	7,83	27,00	15,00	49,73	99,56	-	100
½"	2,93	25,88	15,00	45,44	89,25	80	100
3/8"	0,56	23,74	15,00	40,88	80,18	70	90
4		3,32	14,05	31,14	48,51	44	72
10		1,10	9,14	20,17	30,41	22	50
40		0,83	2,89	10,17	13,89	8	26
100		0,76	1,15	4,49	6,40	4	16
200		0,68	0,56	1,93	3,16	2	10

Fonte: Elaboração própria

Os valores percentuais para cada uma das faixas granulométricas foram ajustados, em unidade de massa, de acordo com os diferentes teores adicionados as misturas.

Figura 40 - Curva de distribuição granulométrica da mistura 2



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 16 indica os teores de CAP utilizados para desenvolvimento das duas misturas e o teor total considerando o ligante presente no material reciclado.

Tabela 16 - Porcentagens de acréscimo de ligante novo nas misturas

Mistura	CAP envelhecido presente no fresado (%)	CAP novo adicionado a mistura (%)	CAP total da mistura (%)
100% de material fresado	5,35	2,5	7,85
	5,35	3	8,35
	5,35	3,5	8,85
	5,35	4	9,35
50% fresado / 50% agregado novo	2,67	2,5	5,15
	2,67	3	5,67
	2,67	3,5	6,17
	2,67	4	6,67
	2,67	4,5	7,17

Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Com a definição das misturas e da variação do teor de cada dosagem foram moldados os corpos-de-prova.

As misturas foram executadas para cada teor, com as medidas sendo determinadas em massa e unidade de medida em gramas. Primeiro foram realizadas as misturas com 100% de material fresado e em seguida as misturas com metade de agregado fresado e metade de agregado novo. A quantidade de cada componente da mistura foi definida com auxílio de uma balança de 0,1g de precisão.

A Figura 41 apresenta amostras de dosagem da mistura 1 (a) e mistura 2 (b), respectivamente.

Figura 41 - Amostras de misturas com diferentes dosagens



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Em seguida, foram moldados os corpos-de-prova da seguinte forma:

Mistura 1: Moldagem de 12 CP's, sendo 3 para cada dosagem. As dosagens tiveram adição de ligante novo variando de 2,5% a 4,0%.

Mistura 2: Moldagem de 15 CP's, sendo 3 para cada dosagem. As dosagens tiveram adição de ligante novo variando de 2,5% a 4,5%.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com misturas de aproximadamente 1150 g. A mistura foi compactada a uma temperatura em torno de 142°C, respeitando os limites encontrados no ensaio de viscosidade, com auxílio de um compactador Marshall (Figura 42). Foram aferidos 75 golpes como energia de compactação, definidos pela norma DNER-ME 043/95.

Após a moldagem, os CP's foram mantidos em repouso por 24 horas à temperatura ambiente. A desmoldagem dos corpos-de-prova ocorreu logo após o resfriamento dos mesmos utilizando um macaco hidráulico do tipo garrafa (Figura 43).

A Figura 44 apresenta um conjunto de 3 corpos-de-prova, após a desmoldagem.

Figura 42 - Compactador Marshall



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 - Macaco hidráulico tipo garrafa



Fonte: Elaboração própria

Figura 44 - Corpos-de-prova



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Rompimento dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova resultantes das misturas 1 e 2 foram ensaiados para determinação da estabilidade e fluência, através do método da Estabilidade Marshall.

Os corpos-de-prova resultantes do projeto de mistura foram ensaiados à compressão diametral para obter a resistência à tração das misturas moldadas com o teor ótimo de ligante determinado para este trabalho.

O ensaio de estabilidade e fluência foi executado utilizando um molde de compressão Marshall instalado na prensa EMIC modelo DL2000 (Figura 45).

Figura 45 - Prensa EMIC modelo DL2000



Fonte: Elaboração própria

A carga foi aplicada aos corpos-de-prova a uma temperatura de 60°C com taxa de velocidade de aplicação de carregamento de 5 cm/ minuto. Através da configuração do programa da prensa, foram obtidos os valores da estabilidade lida em N e da deformação (fluência) em mm. A estabilidade foi corrigida com o fator de correção determinado pela equação 8, em função da altura do CP em mm.

A Figura 46 apresenta os corpos-de-prova em banho a 60°C e o molde com CP pronto para ensaio.

O ensaio para determinação da resistência à tração foi executado conforme a norma DNER – ME 138/94, também utilizando a prensa EMIC modelo DL2000. O modelo de ensaio foi ajustado no software da prensa, de modo que os corpos-de-prova receberam aplicação de carga com taxa de velocidade de 0,8 mm/s e rompidos a

temperatura ambiente (Figura 47). Deste ensaio obteve-se a carga de ruptura F expressa em N. Com esta carga a resistência à tração foi determinada a partir da equação 9, com resultados expressos em MPa.

Figura 46 - Corpos-de-prova em banho e molde do ensaio Marshall



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria

Figura 47 - Ensaio de ruptura à tração por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização volumétrica, estabilidade e fluência das dosagens desenvolvidas para as misturas 1 e 2 e os valores de resistência à tração encontrados para os teores ótimos de cada mistura.

4.1 Ensaio de caracterização mecânica e volumétrica

Os parâmetros volumétricos necessários para determinar o V_v das misturas, foram determinados de acordo com as equações expressas no item 2.8 da Revisão Bibliográfica.

Os valores de G_{mb} foram encontrados com base na média de 3 corpos-de-prova para cada teor de ligante novo adicionado as dosagens das misturas 1 e 2.

Os resultados de G_{mm} são relativos a média de duas amostras, de cada uma das dosagens desenvolvidas para as misturas, obtidos através do procedimento de Rice, executado conforme a descrição no item 2.9.1.

As misturas foram dosadas de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior.

Quanto a análise do comportamento mecânico das misturas recicladas, foram realizados os ensaios de estabilidade e fluência, obtidos ambos pelo método da Estabilidade Marshall. O ensaio foi desenvolvido conforme os procedimentos e critérios descritos no item 2.8 da Revisão Bibliográfica, conforme a norma DNER – ME 043/95.

Para a mistura 1, as dosagens tiveram como limite inferior 2,5% e limite superior de 4,0%, variando 0,5% o teor de ligante em cada dosagem. Dessa forma, foram produzidas 4 dosagens para essa mistura e moldados 12 CP's, sendo 3 para cada teor. A Tabela 17 indica os parâmetros volumétricos encontrados para o grupo de CP's da mistura 1 e os limites especificados pelo DNIT para a faixa "C".

Tabela 17 - Média dos parâmetros da mistura 1 e os limites do DNIT

Parâmetros	Mistura 1: 100% fresado				Especificação DNIT - ES (033/2005) - FAIXA "C"
	2,50%	3,00%	3,50%	4,00%	
Ga (g/cm ³)	1,1	1,1	1,1	1,1	-
Gmb (g/cm ³)	2,15	2,16	2,17	2,2	-
Gmm (g/cm ³)	2,27	2,275	2,28	2,285	-
Teor de projeto (%)	7,85	8,35	8,85	9,35	-
Teor de CAP envelhecido (%)	5,35	5,35	5,35	5,35	-
Vv (%)	5,28	4,95	4,86	3,72	3 - 5
VCB (%)	15,34	16,41	17,45	18,7	-
VAM (%)	20,63	21,37	22,31	22,42	-
RBV (%)	74,39	76,81	78,21	83,41	75 - 82

Fonte: Elaboração própria

Onde:

Ga: Massa específica do ligante (g/cm³);

Gmb: Massa específica aparente da mistura (g/cm³);

Gmm: Massa específica máxima medida (g/cm³);

Vv: Volume de vazios (%);

VCB: Vazios com betume (%);

VAM: Vazios do agregado mineral (%);

RBV: Relação betume vazios (%).

De acordo com os valores apresentados na Tabela 17, o Vv da mistura 1 não está dentro dos limites especificados pelo DNIT apenas na dosagem de 2,5% . Quanto aos valores de RBV, as misturas com adição de ligante de 2,5% e 4,0%, não atendem as especificações da norma.

A Tabela 18 apresenta os valores dos ensaios de estabilidade e fluência encontrados para os corpos-de-prova, moldados com diferentes teores de ligante, da mistura 1.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de estabilidade e fluência da mistura 1

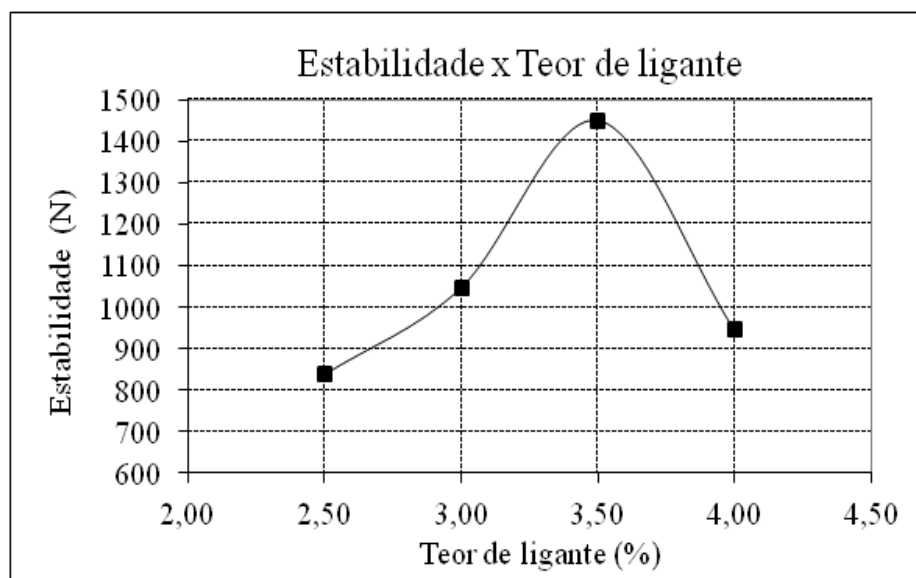
Mistura 1 - 100% fresado	Identificação dos corpos-de-prova						Especificações DNIT - ES 033/2005	
	CP 1		CP2		CP3		Est. Cor. (Kgf)	Fluência (mm)
	Est. Cor. (Kgf)	Fluência (mm)	Est. Cor. (Kgf)	Fluência (mm)	Est. Cor. (Kgf)	Fluência (mm)		
4,00%	875,90	3,59	970,20	3,80	994,57	3,62	> 500	3 a 5
3,50%	1352,36	4,13	1414,79	4,10	1583,86	3,89	> 500	3 a 5
3,00%	1018,03	4,20	999,82	4,13	1122,19	4,42	> 500	3 a 5
2,50%	850,32	3,66	807,97	4,12	856,32	3,92	> 500	3 a 5

Fonte: Elaboração própria

A tabela 18 apresenta os valores de estabilidade e fluência obtidos para 3 CP'S de cada dosagem da mistura 1. É possível notar que todos os valores de fluência e estabilidade, de todas as dosagens, atendem os limites especificados pelas normas de referência.

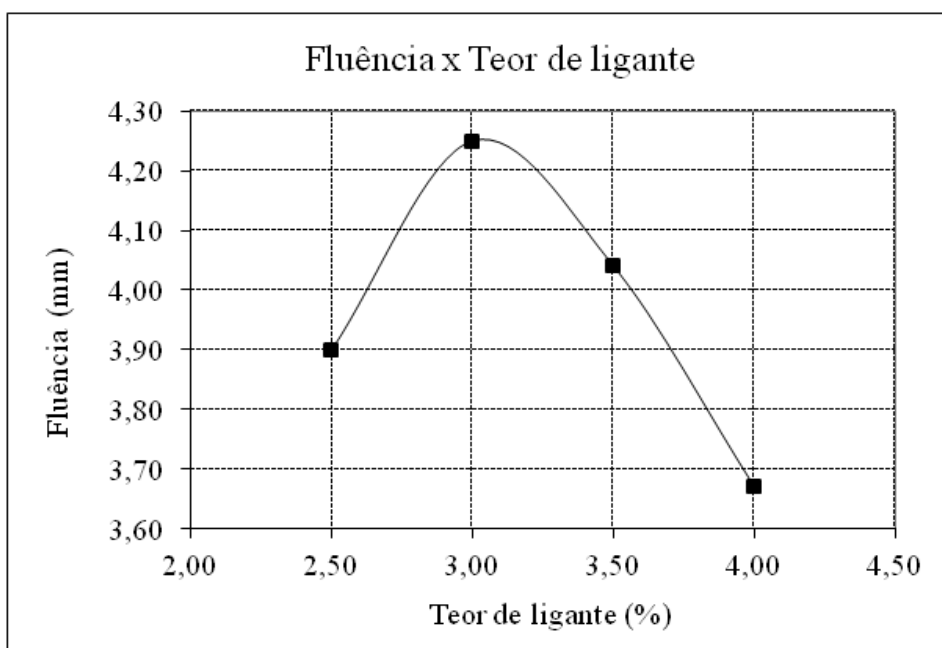
As Figuras 48 e 49 apresentam as curvas de estabilidade e fluência, respectivamente, obtidas para a mistura 1.

Figura 48 - Curva de estabilidade x teor de ligante da mistura 1



Fonte: Elaboração própria

Figura 49 - Curva de fluência x teor de ligante da mistura 1



Fonte: Elaboração própria

Analisando a mistura 2, as dosagens tiveram como limite inferior 2,5% e limite superior de 4,5%, variando 0,5% o teor de ligante em cada dosagem. Foram produzidas 5 diferentes dosagens para a mistura e moldados 15 CP's, sendo 3 para cada teor. A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros volumétricos dessa mistura.

Tabela 19 - Média dos parâmetros da mistura 2 e os limites do DNIT

Parâmetros	Mistura 2: 50% fresado / 50% agregado novo					Limites DNIT - ES (033/2005) -FAIXA "C"
	2,50%	3,00%	3,50%	4,00%	4,50%	
Ga (g/cm ³)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	-
Gmb (g/cm ³)	2,21	2,24	2,26	2,28	2,33	-
Gmm (g/cm ³)	2,35	2,355	2,36	2,365	2,37	-
Teor de projeto (%)	7,85	8,35	8,85	9,35	9,85	-
Teor de CAP envelhecido (%)	5,35	5,35	5,35	5,35	5,35	-
Vv (%)	5,82	4,67	4,13	3,46	1,8	3 - 5
VCB (%)	17,37	18,75	20,02	21,35	22,92	-
VAM (%)	23,2	23,42	24,16	24,81	24,73	-
RBV (%)	74,9	80,04	82,89	86,05	92,7	75 - 82

Fonte: Elaboração própria

Onde:

Ga: Massa específica do ligante (g/cm^3);

Gmb: Massa específica aparente da mistura (g/cm^3);

Gmm: Massa específica máxima medida (g/cm^3);

Vv: Volume de vazios (%);

VCB: Vazios com betume (%);

VAM: Vazios do agregado mineral (%);

RBV: Relação betume vazios (%).

Na tabela 19, os volumes de vazios da mistura 2 não se enquadram dentro dos limites para os teores de 2,5% e 4,5%. Analisando os dados obtidos da relação betume vazios, observou-se que apenas a mistura com o teor de 3% atende os limites especificados.

Na Tabela 20 estão indicados os valores obtidos na verificação da estabilidade e fluência para os corpos-de-prova da mistura 2.

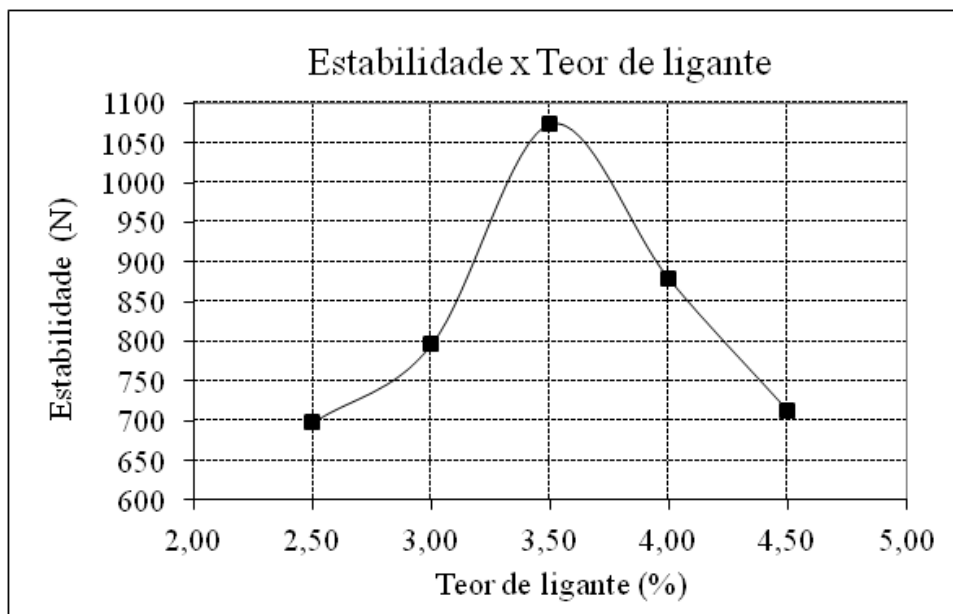
Tabela 20 - Resultados do ensaio de estabilidade e fluência da mistura 2

Mistura 2 - 50% fresado / 50% agregado novo	Identificação dos corpos-de-prova						Especificações DNIT - ES 033/2005	
	CP 1		CP2		CP3		Est. Cor. (Kgf)	Fluência (mm)
4,50%	684,59	3,00	742,25	2,70	269,25	3,94	> 500	3 a 5
4,00%	897,58	4,11	910,29	3,16	828,70	3,23	> 500	3 a 5
3,50%	1035,01	4,11	1113,98	4,01	1073,00	4,30	> 500	3 a 5
3,00%	803,92	3,22	814,95	2,96	770,48	3,39	> 500	3 a 5
2,50%	657,24	3,62	739,04	3,30	212,08	3,54	> 500	3 a 5

Fonte: Elaboração própria

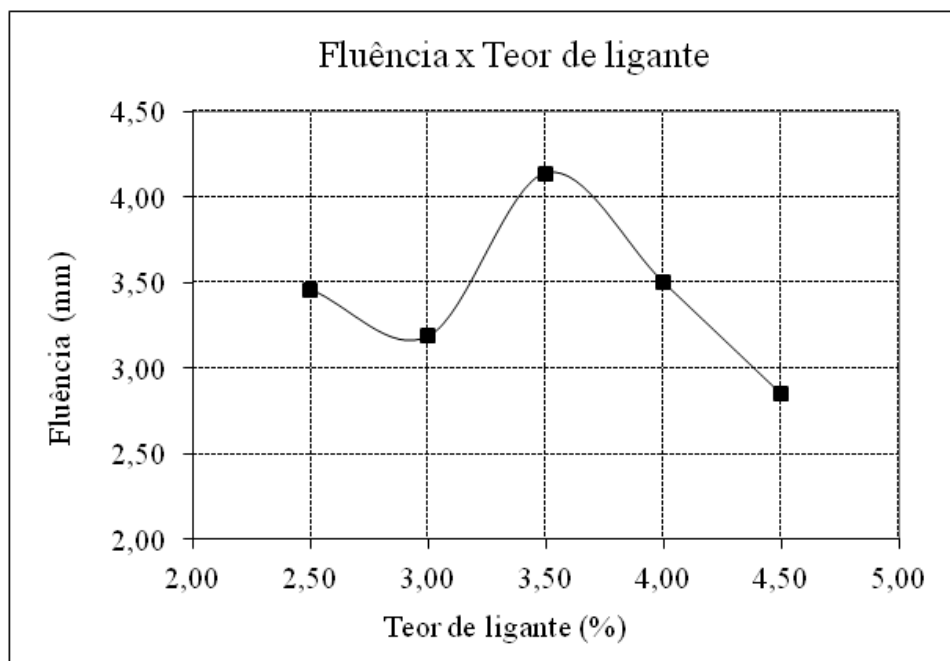
As Figuras 50 e 51 apresentam as curvas de estabilidade e fluência obtidas para a mistura 2, respectivamente.

Figura 50 - Curva de estabilidade x teor de ligante da mistura 2



Fonte: Elaboração própria

Figura 51 - Curva de fluência x teor de ligante da mistura 2



Fonte: Elaboração própria

Analisando os resultados encontrados para a mistura 2, nota-se que os valores obtidos para estabilidade e fluência também estão coerentes com os limites expressos por norma, exceto em 2 corpos-de-prova de diferentes dosagens. A estabilidade nos CP's de número 3, da mistura 2, com dosagens de 4,5% e 2,5% respectivamente, não foram satisfatórias. A inconsistência dos resultados ocorreu devido a deformações

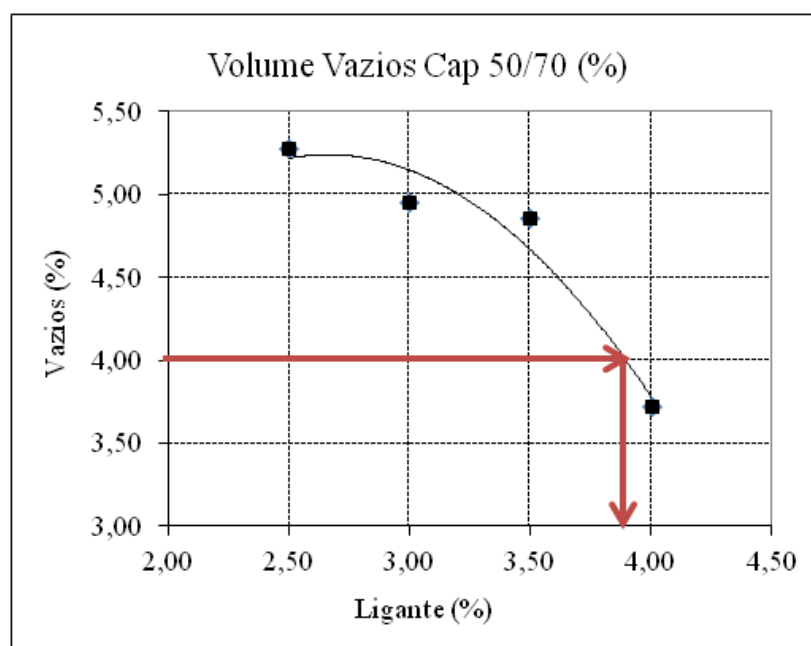
nestes corpos-de-prova reduzindo drasticamente sua resistência a aplicação de carga. Como estes parâmetros tiveram significativa diferença para os demais CP's de mesma dosagem, foram desconsiderados na média dos valores de estabilidade para construção da curva de caracterização da amostra em relação ao teor de ligante utilizado.

4.2 Definição do teor de projeto

A definição do teor de projeto seguiu o procedimento descrito no item 3.2 da Metodologia.

Com base nos parâmetros de V_v encontrados nas Tabelas 17 e 18, foi possível traçar o gráfico de V_v x teor de ligante e verificar a porcentagem de betume correspondente a um V_v de 4,0%, para ambas as misturas, sendo este volume especificado pelo DNIT.

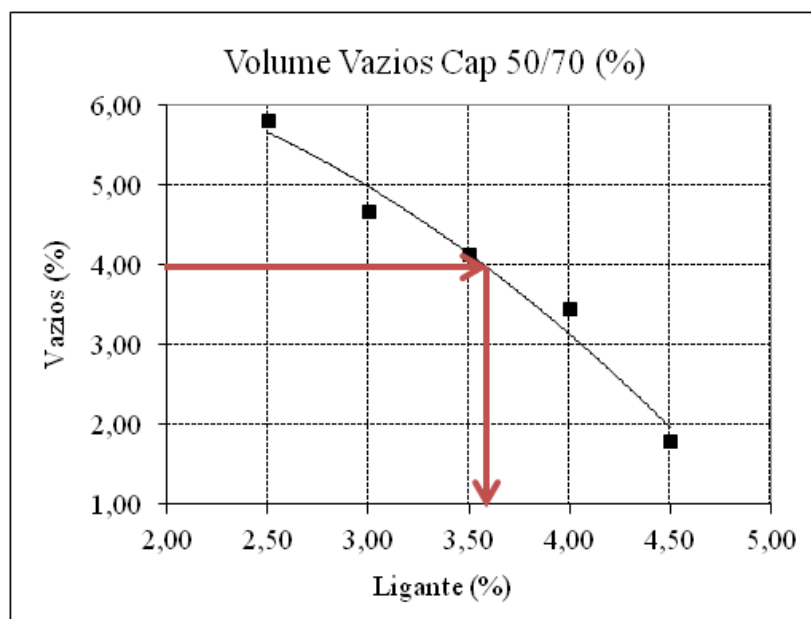
Figura 52 - Curva volume de vazios x teor de ligante da mistura 1



Fonte: Elaboração própria

Para a mistura 1, observa-se na figura 52 que o teor ótimo de ligante correspondente a um V_v de 4,0% será de 3,87%.

Figura 53 - Curva volume de vazios x teor de ligante da mistura 2



Fonte: Elaboração própria

Analisando a figura 53, determina-se que o teor de projeto, correspondente a um V_v de 4,0% para a mistura 2, é igual a 3,6%.

A partir da determinação dos teores ótimos para atender as especificações de projeto, foram moldados 3 corpos-de-prova para cada mistura. Os CPs foram submetidos a verificação da resistência à tração, através do ensaio de compressão diametral.

4.3 Caracterização mecânica do teor de projeto

O ensaio para obtenção de resistência à tração das misturas foi desenvolvido conforme os procedimentos indicados pela norma DNER – ME 138/94, descrito no item 2.9.4 da Revisão Bibliográfica.

Os corpos-de-prova, assim como os anteriores, foram moldados seguindo as mesmas considerações da metodologia Marshall.

A Tabela 21 indica os valores encontrados para os CP's das duas misturas, comparando seus valores com o mínimo indicado pelo DNIT.

Tabela 21 - Resistência à tração por compressão diametral do teor ótimo da mistura 1

Mistura 1: Teor ótimo 3,87%	H (cm)	F (N)	Resistência à tração (MPa)	Especificações DNIT 136/2010 - ME
CP1	7,08	6309	1,13	> 0,65 MPa
CP2	7,3	8615	1,50	> 0,65 MPa
CP3	7,66	8476	1,41	> 0,65 MPa

Fonte: Elaboração própria

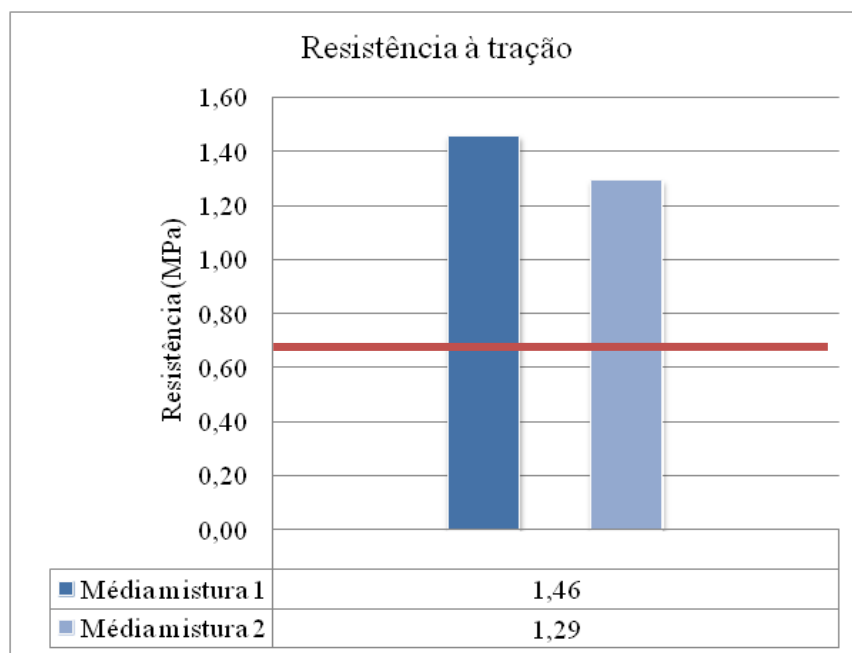
Tabela 22 - Resistência à tração por compressão diametral do teor ótimo da mistura 2

Mistura 2: Teor ótimo 3,6%	H (cm)	F (N)	Resistência à tração (MPa)	Especificações DNIT 136/2010 - ME
CP1	7,41	7513	1,29	> 0,65 MPa
CP2	7,32	8351	1,45	> 0,65 MPa
CP3	7,22	7320	1,29	> 0,65 MPa

Fonte: Elaboração própria

A Figura 54 apresenta a média da resistência à tração obtida para os corpos-de-prova das misturas 1 e 2, rompidos 24 horas após a moldagem. Note ainda que a partir da Figura é possível verificar a resistência mínima preconizada por norma, em comparação com os resultados encontrados.

Figura 54 - Média da resistência à tração das misturas 1 e 2



Fonte: Elaboração própria

Comparando as resistências apresentadas nas tabelas 21 e 22 com a especificação da norma, observou-se que os valores encontrados foram satisfatórios para ambos os tipos de mistura avaliados no estudo.

Ainda é possível ressaltar que as resistências encontradas estão coerentes com os valores típicos verificados em corpos-de-provas de recém-moldados de misturas asfálticas. Segundo Bernucci et. al. (2008), essas misturas apresentam valores médios de resistência à tração situados entre 0,5 MPa e 2,0 MPa.

De acordo com Nascimento (2011), a partir da incorporação de material fresado a taxas superiores a 25%, encontram-se valores menores de resistência à tração. Isso deve ao fato de materiais fresados acarretarem a mistura um volume de vazios maior e conseqüentemente queda na sua resistência.

No entanto, não houve queda na resistência à tração no presente estudo, uma vez que a média das resistências a tração obtidas para a mistura, contendo 100% de material fresado, foi maior que a encontrada para a mistura 2, na qual é composta por 50% de agregados novos. Isso se explica devido ao teor de ligante novo necessário na mistura 1, ser maior que o da mistura 2, tornando a mistura com 100% de material reciclado mais densa e conseqüentemente com valores de resistência maiores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando as características das misturas estudadas ao longo da pesquisa, fica claro que a incorporação de material fresado em novas misturas de revestimentos asfálticos é uma técnica que atende aos requisitos mínimos para o bom desempenho de uma pista de rolamento. Isto se justifica desde que sejam realizadas as análises necessárias para definição das proporções de materiais reciclados e novos, a serem introduzidos na composição da nova mistura. Entretanto, torna-se indispensável realizar ensaios com carregamento dinâmico como, por exemplo, ensaios de módulo de resiliência e fadiga para verificar se o comportamento nestes ensaios continuará viabilizando o uso dessas misturas.

Para as duas misturas propostas no estudo, houve diferenças significativas nas propriedades volumétricas da mistura com 100% de material reciclado e da mistura com adição de 50% de material virgem, e desta forma, qualquer pequena variação nas características do material fresado deve ser levada em conta e, portanto deve ser feita uma classificação do material fresado para que seja o mais uniforme possível ao longo do seu uso.

Ambas as misturas foram enquadradas na faixa "C" do DNIT. Dessa maneira os parâmetros volumétricos obtidos foram comparados aos especificados por norma para esta faixa de classificação de pavimento.

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas 17 e 18, verificou-se que em relação ao Vv a mistura 1, composta de 100% de material fresado, obteve apenas um dos teores estudados dentro dos limites especificados pelo DNIT, o qual permite volume de vazios entre 3% e 5%. Para a mistura 2, três dosagens apresentaram resultados que atenderam este critério.

É importante ressaltar que na avaliação da estabilidade da mistura 2, CPs com adição de teores de 2,5% e 4,5% se desmancharam antes mesmo da aplicação de carga durante o ensaio. O CP com teor de 2,5% de ligante apresentou pouca aderência entre os grãos, pela falta de ligante. Enquanto o CP com teor de 4,5% apresentou uma mistura saturada de ligante e pouco estável.

Em relação à fluência, os valores das misturas 1 e 2, para as mesmas dosagens, também tiveram diferenças significativas.

Em geral, a média das duas misturas, para os diferentes teores de ligante, enquadraram-se aos valores especificados para estabilidade mínima e intervalo de variação de fluência permitido para uma camada de rolamento.

Para definição do teor de projeto, considerou-se neste estudo, apenas o volume de vazios de 4% requerido pelo DNIT. Com isso, obteve-se para a mistura 1, um teor de projeto de 3,87% e para a mistura 2, de 3,6%. Nota-se que o teor de asfalto necessário para a mistura 1 alcançar um V_v de 4% é um pouco maior do que o necessário para a mistura 2. Isto se justifica devido a mistura 2 ter passado por uma correção granulométrica, no momento de sua composição com adição de agregados virgens, o que proporcionou uma maior quantidade de finos na mistura. O mesmo não ocorreu para a mistura 1, já que o material fino presente no fresado estava na forma de grumos com granulometria maior, em praticamente todas as amostras.

Na avaliação da resistência à tração por compressão diametral, as misturas 1 e 2 foram ensaiadas com o teor de projeto definido e a temperatura ambiente. Ambas as misturas obtiveram valores de resistência superiores a 0,65 MPa, indicado por norma. Logo, ambas as misturas tiveram resultados satisfatórios para os CPs rompidos. Ainda nota-se que os resultados encontrados estão entre 0,5 MPa e 2,0 MPa que são, segundo bibliografias consultadas, os valores comumente encontrados para corpos-de-prova recentemente moldados.

Ressalta-se que é importante avaliar outros critérios como o RBV, a fluência e a estabilidade para determinação do teor de ligante ótimo para um projeto de mistura.

Com base no exposto, é possível destacar que o estudo proporcionou maior conhecimento a respeito da aplicação de material fresado em misturas asfálticas, para camadas de revestimento, e que os valores encontrados foram satisfatórios, para os projetos de misturas desenvolvidos nesta pesquisa. Com isso, a pesquisa tende a auxiliar projetistas e órgãos executores, no momento da escolha de materiais adequados para os revestimentos.

Sugestões de trabalhos futuros:

Para estudos futuros é importante que sejam avaliadas outras características de misturas asfálticas recicladas, como o ensaio de módulo de resiliência, ensaio de fadiga, resistência ao dano por umidade induzida.

Sugere-se também analisar o comportamento do ligante envelhecido presente na mistura e verificar o seu comportamento com a adição de agentes rejuvenescedores.

Verificar se existe alguma diferença nas misturas com a utilização de material fresado produzido por diferentes equipamentos.

Verificar se o efeito de um ligante mais mole ou mais duro pode produzir misturas mais resistentes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, I. M. **Fresagem e reciclagem de pavimentos e suas aplicações na restauração de rodovias**, 1999.

ARTC – Association des Routes et Transport Du Canadá. **Guide de la Gestion Routière**. Montréal, 1987.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. São Paulo, ed. Fazendo Arte, 2001.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L.P. **Pavimentos rodoviários**. 1 ed. Coimbra: Almedina, 2008.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CUNHA, A.; PEÇANHA, C.; LEÃO, L.F.; MEDEIROS, T. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto**. Curso de Especialização em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

DANTAS, T.N.; NETO, E.L.; FILHO, F.F.; SOUZA, R.I. **Reciclagem de material asfáltico fresado com a utilização de solventes e microemulsões**, 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, PDPETRO, Campinas, 2007.

DAU, F. N. F. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio em usina em área urbana**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER/RS. **Banco de dados Institucional e Administrativo**. 2012. Disponível em:

<www.daer.rs.gov.br/site/institucional_distritos_rodoviaros.php>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – análise granulométrica** . DNER-ME 083/98, p. 05.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Concreto asfáltico reciclado “in situ”**. Especificação de Serviço. DNER-ES 88/87.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Concreto asfáltico reciclado “in situ”**. Especificação de Serviço. DNER-ES 87/87.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica – Ensaio Marshall**. DNER-ME 107/94.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**. DNER-ME 043/1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – percentagem de betume**. Método de Ensaio. DNER-ME 053/94, p. 05.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pavimentação – concreto betuminoso**. Especificação de Serviço. DNER-ES 313/97, p. 16.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT 136/2010 - ME. Rio de Janeiro, 2010, p. 06.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina**. DNIT 033/2005 - ES. Rio de Janeiro, 2005, p. 13.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006, p. 274.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006, p. 310.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente. DNIT 117/2010 - ES.
Rio de Janeiro, 2010.

GEWEHR, J. **Métodos de reciclagem a frio.** In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana, 2012, São Luis. p. 47.

GONÇALVES, F. J. P. **O diagnóstico e a manutenção de pavimentos – notas de aula.** 1999. 77p.

JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Agregate tests for hot mix asphalt: state of the practice in North America.** Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol XLII, novembro, 1997.

NBR NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003, p. 06.

PAEZ, J. L. G. **Reciclagem de pavimento asfáltico.** Dissertação de conclusão do curso de Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

PEREIRA, P. **Desempenho técnico de pavimentos rodoviários flexíveis usinados a quente com adição de pavimentos fresados.** Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil. Universidade de Uberaba, Uberlândia, 2011.

PEREIRA, P.; MIRANDA, C. **Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários.** Universidade do Minho, Braga, 1999.

REIS, A.C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida.** Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

RESOLUÇÃO CONAMA nº307, de 5 de julho de 2002. Publicada no DOU nº136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96.

RODRIGUES, R. M. **Engenharia de pavimentos – Parte II – gerência de pavimentos.** Centro Técnico Espacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Divisão de engenharia de infra-estrutura aeronáutica. 2003, p. 188.

SACHET, T. **Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *in situ* de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

SACHET, T.; GONÇALVES, F. P. **Reciclagem *in situ* de bases granulares de pavimentos asfálticos**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TAMININI, F. **Revestimento asfáltico: Caracterização mecânica e volumétrica de concreto asfáltico enquadrado na faixa I da Prefeitura Municipal de Porto Alegre**. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação de desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC 303**, 7º Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões, CBR&C e 7ª Exposição Internacional de Produtos para Rodovias, BRASVIAS, Foz do Iguaçu, 2011.

ZUBARAN, M. **Utilização de reciclado em mistura a quente**. In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana, 2012, São Luis. p. 47.