

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRENO LACERDA TOBIAS

**DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS CONTENDO PELO
MENOS 25% DE MATERIAL FRESADO**

BELO HORIZONTE

2013

BRENO LACERDA TOBIAS

DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS CONTENDO PELO MENOS
25% DE MATERIAL FRESADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

BELO HORIZONTE

2013

BRENO LACERDA TOBIAS

**DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS CONTENDO PELO
MENOS 25% DE MATERIAL FRESADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 12 /08/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia

Prof.Msc. Chan Kou Wha

Dedico esse trabalho aos meus pais e ao meu
irmão e à minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Flávio Renato de Góes Padula, que aceitou fazer minha orientação, fornecendo muitos materiais de apoio e que muito me auxiliou no desenvolvimento do trabalho.

A Rogério Pedrosa e Leandro Parreiras da Silva do Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), que cederam materiais de grande assistência na montagem do trabalho.

Muito obrigado a todos que de forma direta ou indireta me ajudaram chegar ao final de um ciclo importante da minha vida.

"O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar de novo com mais inteligência."

Henry Ford

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------|------------|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES..... | I |
| LISTA DE TABELAS..... | II |
| LISTA DE GRÁFICOS..... | III |
| LISTA DE QUADROS..... | IV |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS..... | V |
| RESUMO..... | VI |
| ABSTRACT..... | VII |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.3. METODOLOGIA | 4 |
| | |
| 2. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁTICOS | 5 |
| 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 5 |
| 2.2. MATERIAIS BETUMINOSOS | 6 |
| 2.2.1. <i>Introdução</i> | 6 |
| 2.2.2. <i>Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)</i> | 6 |
| 2.2.3. <i>Emulsões Asfálticas (EAP)</i> | 7 |
| 2.2.4. <i>Asfalto diluído (ADP)</i> | 7 |
| 2.3. AGREGADOS | 8 |
| 2.3.1. <i>Introdução</i> | 8 |
| 2.3.2. <i>Tipos de agregados</i> | 8 |
| | |
| 3. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS..... | 10 |
| 3.1. HISTÓRICO..... | 10 |
| 3.2. TÉCNICAS DE RECICLAGEM..... | 11 |
| 3.2.1. <i>Considerações Iniciais</i> | 11 |
| 3.2.2. <i>Técnicas de reciclagem "in situ"</i> | 13 |
| 3.2.3. <i>Técnicas de reciclagem em central</i> | 16 |
| 3.3. TAXA DE RECICLAGEM | 18 |
| | |
| 4. METODOLOGIA MARSHALL..... | 19 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------|-----------|
| 4.1. | HISTÓRICO..... | 19 |
| 4.2. | TÉCNICA..... | 20 |
| 4.3. | NORMAS DE CONTROLE | 21 |
| 4.4. | ESTUDO DE CASOS | 22 |
| 5. | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 5.1. | ANÁLISE DO RAP..... | 24 |
| 5.2. | ANÁLISE DOS AGREGADOS NOVOS E DO CAP | 26 |
| 5.3. | DOSAGEM E CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 28 |
| 5.4. | ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 29 |
| 6. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 30 |
| 6.1. | ANÁLISE DO RAP..... | 30 |
| 6.2. | DOSAGEM ATRAVÉS DA METODOLOGIA MARSHALL | 31 |
| 6.3. | CARACTERÍSTICAS MARSHALL E ENSAIOS MECÂNICOS | 34 |
| 7. | CONCLUSÃO | 41 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 42 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento asfáltico

Figura 2 - Tipos de reciclagem de pavimentos

Figura 3 - Benefícios gerais das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Figura 4 - Fases da reciclagem à quente *"in situ"*

Figura 5 - Esquema de uma usina contínua adaptada para recebimento de RAP

Figura 6 - Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a frio

Figura 7 - Extrator de betume tipo Rotarex

Figura 8 - Corpos de prova de CBUQ

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para a tomada de decisão quanto a reciclagem a frio "*in situ*"

Tabela 2 - Taxa de reciclagem para alguns dos tipos de processos de reciclagem de pavimentos

Tabela 3 - Valores limites para os testes especificados

Tabela 4 - Quadro de requisitos mínimos de composição da mistura

Tabela 5 - Limites Recomendados para % de vazios do agregado mineral

Tabela 6 - Resultados da caracterização do RAP

Tabela 7 - Composição das misturas asfálticas

Tabela 8 - Densidade real da mistura de agregados

Tabela 9 - Especificações das características Marshall

Tabela 10 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 25

Tabela 11 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 37

Tabela 12 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica das misturas

Gráficos 2, 3 e 4 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 25 com os da norma DNIT 031/2006

Gráficos 5, 6 e 7 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 37 com os da norma DNIT 031/2006

Gráficos 8, 9 e 10 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 50 com os da norma DNIT 031/2006

Gráficos 11, 12 e 13 - Comparação das propriedades mecânicas das misturas com a norma DNIT 021/2006

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do CAP 50/70

Quadro 2 - Granulometria dos agregados virgens

Quadro 3- Composição das séries da mistura 25

Quadro 4 - Composição das séries da mistura 37

Quadro 5 - Composição das séries da mistura 50

Quadro 6 - Parâmetros volumétricos da mistura 25

Quadro 7 - Parâmetros volumétricos da mistura 37

Quadro 8 - Parâmetros volumétricos da mistura 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP - Asfalto diluído

AR - Agentes Rejuvenescedores

ARE - Agentes Rejuvenescedores Emulsionados

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

CAP - cimento asfáltico de petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EAP - Emulsões Asfálticas

MARQ - Mistura Asfáltica Reciclada a Quente

MBRQ - Mistura Betuminosa Reciclada a Quente

MR - Módulo de Resiliência

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement (material fresado de pavimentos)

RT - Resistência a Tração

TR - Taxa de Reciclagem

VAM - Vazios no Agregado Mineral

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi identificar um procedimento simples e prático para dosagem de misturas asfálticas recicladas contendo pelo menos 25% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) – material asfáltico fresado de pavimentos - com base em ensaios de laboratório da metodologia Marshall, como uma forma de proporcionar obras de pavimentação mais sustentáveis. Foram apresentados e discutidos resultados de dosagens de três misturas: 25%, 37% e 50% de RAP. Os resultados apontaram que as misturas contendo 25 e 37% de RAP atenderam plenamente as especificações impostas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT). A dosagem com 50% de RAP apresentou excesso de finos, porém tal problema pode ser solucionado através da separação da granulometria do RAP em duas partes. Essa pesquisa sugeriu, também, que a dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) pode ser simples e de fácil execução.

Palavras-chave: Reciclagem; Asfalto; Dosagem.

ABSTRACT

The goal of this work was to identify a simple and practical procedure for recycled asphalt mixtures design containing at least 25 % of reclaimed asphalt pavement (RAP), based on laboratory testing of Marshall's Methodology, as a way to provide more sustainable flooring works. The results of measurements of the three mixtures – 25%, 37% e 50% of RAP - was presented and discussed. The results indicated that the mixtures containing 25% and 37% of RAP attended the specifications imposed by DNIT. The 50% RAP mixture showed an excessive fine aggregate, but this problem can be solved by separating the grain size of the RAP in two different parts. This work suggested that the design of RAP mixtures can be simple and easy to perform.

Key-words: Recycling; Asphalt; Design Mixture

1. INTRODUÇÃO

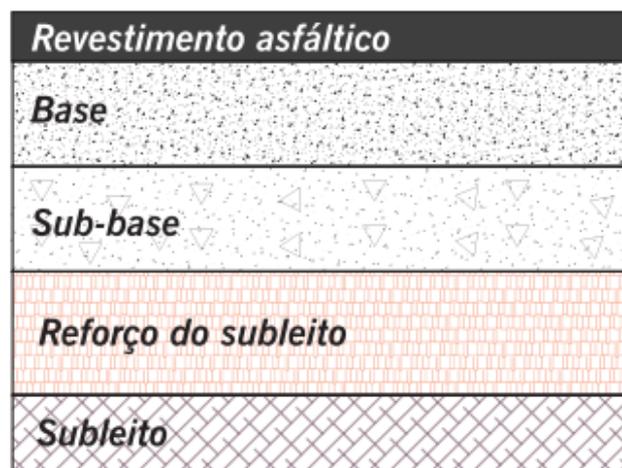
1.1. Contextualização e Justificativa

O Asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, e seu uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. A maioria dos países do mundo utilizam o pavimento asfáltico como a principal forma de revestimento.

Pavimento pode ser definido com uma estrutura de várias camadas, como mostra a figura 1, contendo um ou vários tipos de materiais diferentes sobre o terreno natural ou terraplanado, destinada a facilitar a circulação de pessoas ou veículos.

Figura 1 - Estrutura típica de um pavimento asfáltico

Fonte: BERNUCCI, 2006



Porém, o pavimento é uma estrutura não perene. O processo de degradação é inerente para qualquer tipo de pavimento construído. Exigências mecânicas realizadas pelo tráfego de veículos cada vez maior e diversificado além das variações climáticas e solicitações diversas, aceleram o processo de degradação do pavimento.

No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI, 2006). Aproximadamente 60% dos transportes de cargas são realizados pelo sistema rodoviário, e ainda 96% dos passageiros brasileiros circulam por esse modal (GEIPOT, 2001). Com isso, estima-se que 1 a

2 bilhões de reais são gastos, por ano, para manutenção de rodovias federais. Esse montante poderia ser drasticamente reduzido com a utilização do processo de reciclagem de misturas asfálticas.

A técnica de reciclagem de pavimentos não é uma novidade, com origem na década de 30, voltando a ser destaque apenas 40 anos mais tarde em meio a uma crise petrolífera nos Estados Unidos, com início no Brasil apenas nos anos 60. Há uma enorme malha rodoviária dentro do território brasileiro onde a manutenção e a restauração produzem grande quantidade de resíduos de pavimentos recicláveis fresados. Por questões ambientais esses materiais são condicionados a serem depositados em depósitos, alocando mais custos ao desperdício deste material de grande valia.

Ao reaproveitarmos o material fresado em uma nova mistura asfáltica potencializamos o uso deste material que seria descartado. Os resíduos da reciclagem contem agregados em formas granulométricas que se adequam a utilização direta na mistura, ligantes betuminosos com alto potencial de reaproveitamento, além de economia dos transportes nos mesmos. A escassez de jazidas de materiais agregados puros aumenta a cada dia, em consequência, a fiscalização e licença para exploração também ficaram mais rígidas pelas novas políticas ambientais.

1.2. Objetivos

O principal objetivo da pesquisa aqui proposta é identificar um procedimento simples e prático para dosagem de misturas asfálticas recicladas contendo 25%, 37% e 50% de material asfáltico reciclado. Para tal finalidade será utilizada a metodologia Marshall para fazer a dosagens das matérias-primas e montagem dos corpos de prova, para determinar as propriedades mecânicas e físicas do asfalto, a fim de verificar sua possibilidade de uso em campo.

O objetivo da pesquisa é:

- a) Classificar as propriedades de misturas asfálticas para três diferentes porcentagens de RAP - Reclaimed Asphalt Pavement - (25%, 37% e 50%).
- b) Identificar, classificar e ordenar os as propriedades físicas das misturas estudadas.
- c) Verificar a eficiência de procedimentos da metodologia Marshall para dosagem das misturas.
- d) Estudar procedimentos de misturas e ou usinagem de misturas asfálticas que possam ser utilizados em usinas asfálticas no Brasil.
- e) Estudar de forma comparativa os resultados dos ensaios de fluência e tração por compressão diametral para as três misturas.

1.3. Metodologia

A metodologia para desenvolver o presente trabalho consiste na aplicação da metodologia Marshall para a dosagem das misturas asfálticas, a confecção de corpos de provas para cada mistura, e posteriormente a determinação das propriedades físicas, volumétricas e mecânicas de cada mistura.

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

Nesse método a análise dos parâmetros mencionados acima, permite conhecer ou controlar as condições mais favoráveis de impermeabilidade e durabilidade da mistura, com a qual pode fixar margens para evitar o excesso ou escassez de aglutinante. O valor de estabilidade é um índice da resistência estrutural da mistura asfáltica compactada, e a fluência é um indicador de sua flexibilidade e perda de resistência a deformação.

2. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁTICOS

2.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo serão abordados os modelos de reciclagem aplicáveis em pavimentos de asfalto, com ênfase na técnica executada com aquecimento do mesmo.

Cada técnica de reciclagem apresenta determinadas especificidades, em termos construtivos, de desempenho, ambientais e até mesmo econômicos, que fazem com que essa mesma técnica de reciclagem possa ser uma solução viável para um determinado caso de reabilitação de um pavimento (CUNHA, 2010).

A escolha bem definida e analisada do método empregado de restauração ou reconstrução é o melhor caminho para empresas do ramo assegurem o retorno financeiro. Cabe ao Engenheiro selecionar a técnica de reciclagem que mais se adequa ao pavimento a reabilitar, de forma a conciliar a melhor solução do ponto de vista da funcionalidade requerida para esse pavimento, devendo ter sempre em atenção à relação custo / benefício da solução a executar.

A reciclagem é mais uma opção de reabilitação de pavimentos degradados e não deve reciclar-se simplesmente porque é um cenário ecológico, mas sim porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens econômicas, tanto para as empresas como para as administrações (AZEVEDO, 2009 b).

Os materiais com capacidade de reciclagem em obras de pavimentação rodoviária são diversos, assim, neste capítulo a abordagem desenvolve-se voltada essencialmente para as técnicas de reciclagem de misturas betuminosas e para os agregados e componentes betuminosos das mesmas. Com esta contextualização, ocorrerá apenas um breve referencial das técnicas de reciclagem e materiais constituintes, agregados e betuminosos, elucidando também um histórico do surgimento da reciclagem de material betuminoso.

Como o principal objetivo deste trabalho é a análise de uma metodologia para a realização da reciclagem misturas betuminosas contendo material fresado (em inglês, "*Reclaimed Asphalt Pavement*", RAP). Então, no capítulo seguinte será abordado uma revisão sobre a Metodologia Marshall, que é a metodologia utilizada no presente trabalho.

2.2. Materiais Betuminosos

2.2.1. Introdução

Os materiais betuminosos são hidrocarbonetos com propriedades de aglutinação divididos em duas categorias: asfaltos e alcatrões. O asfalto é obtido de forma natural ou destilação a partir do petróleo enquanto o alcatrão é obtido através de alterações químicas não naturais. Portanto, o asfalto e o alcatrão são materiais betuminosos porque contêm betume, mas não podem ser confundidos porque suas propriedades são bastante diferentes.

O alcatrão praticamente não é mais usado em pavimentação desde que se determinou o seu poder cancerígeno, além do fato de sua pouca homogeneidade e baixa qualidade em termos de ligante para pavimentação, derivada da própria forma de obtenção do mesmo (BERNUCCI, 2006). O betume, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto, é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilização de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (ROBERTS et al, 1996).

Há varias razões para os materiais betuminosos sejam usadas em pavimentação, sendo as principais: eles possuem um alto poder de aglutinação entre os agregados e ao mesmo tempo tendo uma flexibilidade controlada, são impermeáveis, possuem uma elevado tempo de vida útil, são "[...] resistentes à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos" (BERNUCCI, 2006, p. 25).

2.2.2. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Comumente conhecido como asfalto, utilizado em pavimentações, ele é obtido da destilação do petróleo é também conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP), apresentando características físicas que asseguram o desempenho aos diversos tipos de esforços solicitados em um pavimento.

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a baixas temperaturas, visco elástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas

(BERNUCCI, 2006). Existem cerca de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003).

Segundo Leite (1999), os CAPs possuem de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros possuem baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto que o cimento asfáltico petróleos árabe e venezuelano têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

2.2.3. *Emulsões Asfálticas (EAP)*

O CAP para realizar o recobrimento eficiente dos agregados precisa de uma determinada viscosidade de trabalho, que pode ser obtida através do aquecimento do CAP ou alterar a composição do ligante. A modificação pode ocorrer tanto por emulsões ou por utilização de asfalto diluído, que será detalhado no item a seguir.

A emulsão asfáltica representa uma classe particular de emulsão óleo-água na qual a fase hidrofóbica tem uma viscosidade elevada e os dois materiais não formam uma emulsão por simples mistura dos dois componentes, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar para manter a emulsão estável. Além disso, o asfalto precisa ser preparado por ação mecânica que o transforme em pequenas partículas ou glóbulos (IBP, 1999).

2.2.4. *Asfalto diluído (ADP)*

O Asfalto diluído é uma solução de CAP adicionada de um aditivo, tem como principal característica uma nova solução com uma menor viscosidade. O Aditivo adicionado à mistura na verdade é um diluente volátil, também derivado do petróleo, que evapora de acordo com o tempo necessário para trabalhar a mistura, asfaltos diluídos (ADP) são produzidos pela adição de um diluente volátil, obtido do próprio petróleo, que varia conforme o tempo necessário para a perda desse componente adicionado restando o asfalto residual após a aplicação. O diluente serve apenas para baixar a viscosidade e permitir o uso à temperatura ambiente, sem a necessidade do aquecimento da mistura.

2.3. Agregados

2.3.1. Introdução

Todos os pavimentos asfálticos resultam da combinação de ligantes betuminosos e agregados diversos. A combinação em variadas composições e proporções visam sempre atender a necessidades características de cada pavimento executado. A fim de assegurar a composição correta desta mistura, devemos conhecer a natureza do agregado.

O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço. (BERNUCCI, 2006)

2.3.2. Tipos de agregados

Agregado é um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural ou britadas em seu estado processado. Há ainda de se considerar também os agregados artificiais (BERNUCCI, 2006). Em outra definição os agregados são uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc. (WOODS, 1960).

Classificação dos agregados quanto à natureza

Segundo BERNUCCI (2006), agregados quando classificados quanto a sua natureza, possuem três classificações distintas: natural, artificial ou reciclado.

Natural: São todos aqueles que são obtidos por fontes naturais, por meio de processos tais como desmonte, escavação ou dragagem. São exemplos de agregados naturais: britas, areia, pedregulhos. Enfim, os agregados naturais podem e são empregados em pavimentação na forma e tamanho nos quais se encontram na natureza. Porém se esse tamanho e forma não forem adequados, esses materiais podem ser submetidos a processos como britagem e moagem para a redução de seu tamanho.

Artificial: São resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada. (CABRAL, 2005). Isso mostra que a pavimentação pode contribuir para eliminar parcialmente ou inteiramente, problemas de resíduos industriais de diferentes seguimentos. Porém, dependendo do tipo de resíduo, ele deve passar por um tratamento prévio antes de ser incorporado em um mistura asfáltica.

Reciclado: É a categoria onde estão os variados materiais reutilizados na pavimentação. Em alguns países, esses materiais reciclados provenientes da pavimentação são a principal fonte de agregados, devido a crescente preocupação com o meio ambiente, sem falar nas restrições impostas por esses governos na extração de alguns tipos de agregados. O desenvolvimento das técnicas de reciclagem possibilitou a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização.

Destaca-se também a utilização crescente de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição desses resíduos (FERNANDES, 2004).

Classificação dos agregados quanto ao tamanho

Os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em pavimentação, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou Fíler (DNIT 031/2006):

Graúdo – é o material com dimensões maiores do que 2,0 mm, ou seja, retido na peneira N° 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.;

Miúdo – é o material com dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2,0 mm. É o material que é retido na peneira de N° 200, mas que passa na de abertura N° 10. São as areias, o pó de pedra etc.;

Material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075 mm, correspondente à peneira de N° 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc. (BERNUCCI, 2006).

3. TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

3.1. Histórico

O processo de reciclagem utiliza uma mistura asfáltica já existente que está em uma condição bastante deteriorada. Essa mistura passa pelo processo de fresagem o qual retira as camadas superiores do pavimento, onde o desgaste é maior, obtendo-se então o RAP.

O uso desse material reciclado em novas misturas asfálticas reduz a exploração de novas jazidas de agregados atenuando o impacto ambiental, visto que esse material é depositado como passivo ambiental. Além disso, reduz a utilização de asfalto virgem, do greide do pavimento e dos custos de novas pavimentações ou recapeamentos.

É possível reaproveitar totalmente o material triturado ou cortado pelas fresadoras e recuperar as características do ligante com a adição de agentes de reciclagem ou rejuvenescedores (AR). No caso do presente trabalho, optou-se por não utilizar agente rejuvenescedores.

A técnica de reciclagem de pavimentos iniciou-se nos Estados Unidos em 1915. Uma quantidade considerável de pavimentos foi reciclada até a década de 30, principalmente pavimentos urbanos. Após essa década, a quantidade de obras com aplicação da técnica de reciclagem foi sendo reduzida, devido ao aumento na oferta de asfalto no mercado, o que tornava a construção de um novo revestimento mais barata que a reciclagem do mesmo.

Na década de 70, com a falta de materiais asfálticos e com a crise econômica internacional, em decorrência da crise do petróleo, técnicos rodoviários internacionais, juntamente com organismo de fomento, começaram a dar ênfase ao reaproveitamento dos materiais existentes nos pavimentos deteriorados, através da técnica da reciclagem (BONFIM, 2000).

São essas misturas betuminosas recicladas que lideram a lista de materiais reciclados na Europa, superando a sucata de ferro e representando mais do que a soma de todos os restantes materiais reciclados (AZEVEDO e CARDOSO, 2003). Nos EUA é a reciclagem de misturas betuminosas que é a primeira da lista em termos de percentagem de material reciclado.

Identificam-se várias técnicas de reciclagem, mas a reciclagem a quente em central, constitui uma das soluções mais adotadas em outros países da Europa, como é o caso da Holanda, da Alemanha e da Dinamarca (EAPA, 2006), onde atualmente representa mais de 75% do total de misturas recicladas.

A reciclagem foi empregada pela primeira vez no Brasil, em 1960, pela Prefeitura Municipal da cidade do Rio de Janeiro, onde os revestimentos asfálticos das ruas eram removidos com a utilização de marteletes e transportados para serem remisturados em usina (CASTRO, 2003).

Os anos de 1985 e 1986 foram marcos na tentativa de introdução dos processos de reciclagem de misturas asfálticas a quente, com obras da Via Anhanguera (SP), com emprego de fresagem a frio e reciclagem a quente em usina central, e na Via Dutra, com emprego de equipamentos de pré-aquecimento, fresagem e reciclagem, completamente *in situ* (BALBO e BODI, 2004).

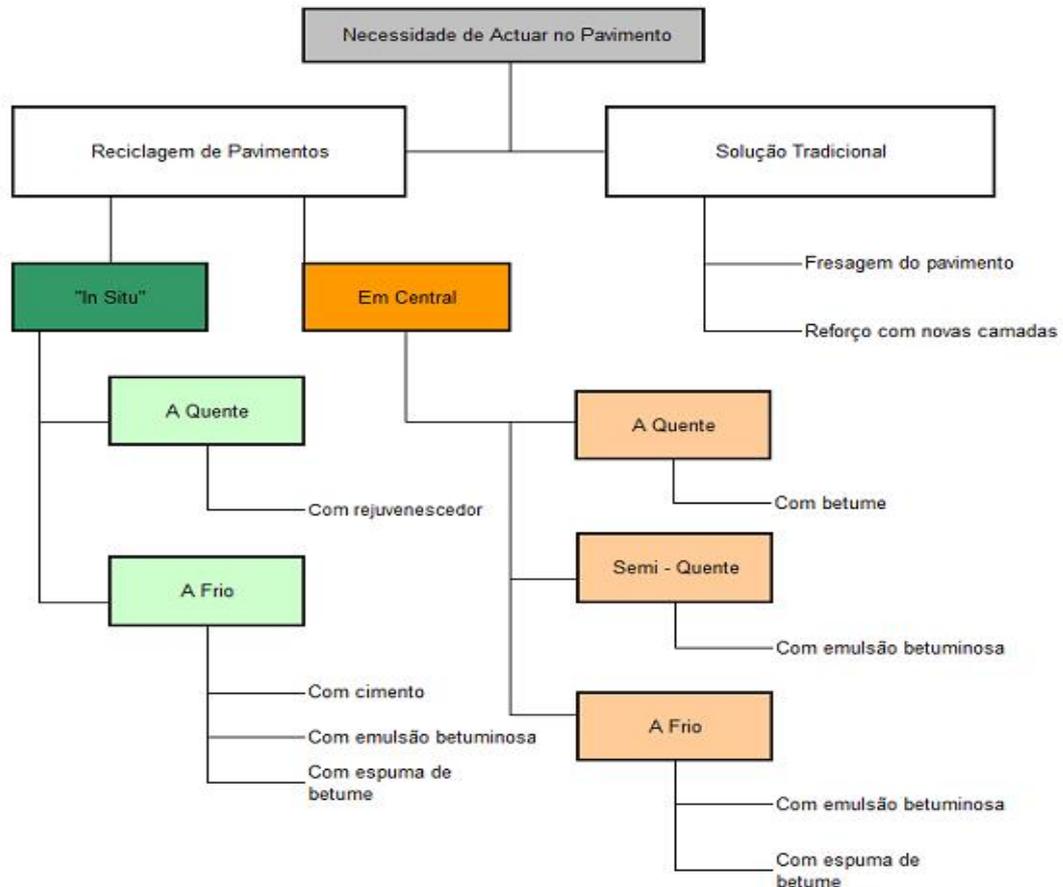
3.2. Técnicas de reciclagem

3.2.1. Considerações Iniciais

A diversificadas técnicas de reciclagem são classificadas quanto ao local de execução, “*in situ*” ou “em central”, quanto a sua temperatura, “a frio” ou “à quente”, como mostra a figura 2.

Figura 2 - Tipos de reciclagem de pavimentos

Fonte: PEREIRA e MOREIRA Adaptado, 2007.



Nas técnicas de reciclagem à quente utilizam o CAP, o agente rejuvenescedor (se necessário) e os agregados aquecidos a uma temperatura específica determinada por normas. Enquanto na reciclagem a frio utiliza emulsão asfáltica de petróleo (EAP), o agente rejuvenescedor emulsionado (ARE) e os agregados à temperatura ambiente. Pode ainda ser realizada em usina, a quente ou a frio – o material fresado é levado para a usina; *in situ*, a quente ou a frio – o material fresado é misturado com ligante no próprio local do corte, seja a quente (CAP), seja a frio (EAP) por equipamento especialmente concebido para essa finalidade; ou ainda *in situ*, com espuma de asfalto (COELHO, 2011).

As técnicas de reciclagem são uma alternativa a respostas convencionais para reabilitação dos pavimentos. O estudo e desenvolvimento com os anos fizeram com que as soluções em reciclagem cada vez mais competitivas e vantajosas dos pontos de vista ambiental, econômico, desempenho e técnico, como mostrado na figura 3.

Figura 3 - Benefícios gerais das técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis

Fonte: ALKINS, 2008



A reciclagem pode ser utilizada situações em que as camadas betuminosas do pavimento apresentam fendilhamento por fadiga; Em situações em que as camadas betuminosas apresentam deformações derivadas do impacto das condições térmicas; Em situações em que o pavimento se apresente em avançado estado de degradação.

Independentemente do tipo de reciclagem a utilizar, existe sempre a necessidade de se realizarem estudos preliminares, os quais deverão ser acompanhados pela execução de um trecho experimental, em que são considerados aspectos relativos à espessura aproximada da intervenção, materiais a reciclar e a previsão da evolução do seu comportamento ao longo do tempo, a formulação da mistura final a utilizar, de modo a aferir quais as melhores soluções para a reabilitação do pavimento degradado. (CUNHA, 2010).

3.2.2. Técnicas de reciclagem "in situ"

A reciclagem "in situ" como o próprio nome já elucida, é realizada no próprio local onde pavimento apresente algum tipo de patologia. Basicamente é a execução de fresagem em uma espessura específica, originando uma nova mistura com o material reciclado com adição de um ou mais ligantes. O novo pavimento reconstituído apresenta novas propriedades o que lhe confere uma maior resistência aos esforços solicitantes no pavimento.

No grupo de classificado na reciclagem "in situ", via de regra, todos os materiais reciclados são incorporados a nova mistura, ou seja, 100% de reaproveitamento da mistura. Na técnica, logo em após a fresagem é adicionado o ligante determinando a mistura, em

seguida incorporação do “novo” material ao pavimento. A ressalva na porcentagem total de aproveitamento neste grupo é perda do potencial dos agregados e ligantes constituintes do pavimento, reutilizando-os como materiais de base.

As técnicas de reciclagem “*in situ*” são vantajosas por terem características como: redução no transporte, ausência de vazadouros e depósitos intermediários, reaproveitamento completo dos materiais fresados, menores tempos de execução e investimento em relação às técnicas de reciclagem em central.

As possíveis deficiências das técnicas aplicadas no local constituem na maior susceptibilidade as condições climáticas, verificação adversa das condições locais, variabilidade das condições do pavimento e menor controle tecnológico das misturas.

Os pavimentos reciclados “*in situ*” preferencialmente são executados utilizando as técnicas a frio, uma vez que a técnica de reciclagem a quente não constitui em solução estrutural para recuperação dos pavimentos, apenas funcional da camada de rolamento. A reciclagem a frio é indicada principalmente para rodovias com baixo volume de tráfego e o material reciclado tem melhor desempenho quando utilizado em camadas de base ou ligação. Nem todas as obras viárias são adequadas à reciclagem a frio do pavimento. (RODGE, 1993). A tabela 1, a seguir, mostra os critérios nos quais não se utiliza a reciclagem “*in situ*” a frio.

Tabela 1 - Critérios para a tomada de decisão quanto a reciclagem a frio "in situ"

Fonte: RODGE, 1993

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A reciclagem a frio "in situ" não é recomendada: |
| Pavimentos que apresentem problema no subleito. |
| Incompatibilidade ao volume de tráfego. |
| Desagregação precoce do revestimento. |
| Pavimentos exibindo afundamentos de trilhas de roda devido a instabilidade da mistura, excesso de ligante. |
| Frio e umidade elevada, incluindo áreas sujeitas a alagamentos. |
| Revestimento asfáltico com espessura inferior a 4 cm. |
| A reciclagem a frio "in situ" é recomendada: |
| Pavimentos trincados devido a idade do revestimento. |
| Pavimentos com diversos recapeamentos sucessivos. |
| Pavimento com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço. |
| Desintegração do revestimento devido a idade. |
| Como "binder" e base no caso de recapeamento. |
| VMD inferior a 5000 veículos. |
| Reabilitação seletiva. |
| Insuficiência de agregados virgens na região. |

A execução da técnica de reciclagem a quente difere das técnicas de reciclagem a frio basicamente na temperatura de execução da reciclagem, onde o ligante é aquecido, e também difere quanto ao tipo de ligante e ao equipamento de execução. A reciclagem a quente no local ou "in situ" é um processo através do qual parte da estrutura do pavimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada à quente no próprio local (DNER, 1998).

A técnica de reciclagem "in situ" a quente, ao contrário de todos os outros tipos de reciclagem, não permite a reabilitação das características estruturais de pavimentos flexíveis degradados. Trata-se de uma técnica que permite apenas a reabilitação das características funcionais do pavimento ao nível da camada de desgaste, não podendo sequer ser utilizada em situações em que o pavimento apresente defeitos ao nível das camadas estruturais do

pavimento. Pode-se, deste modo, considerar-se que esta é uma técnica de reabilitação das características funcionais dos pavimentos flexíveis. (CUNHA, 2010)

A reciclagem “*in situ*” a quente envolve um “comboio” de equipamentos bastante complexos, (figura 4) sendo que um deles está munido de painéis radiantes, que no local elevam a temperatura da superfície do pavimento, facilitando assim, a desagregação do material superficial, por uma fresadora. O material depois de solto é então misturado de forma uniforme em um aquecedor-misturador, com um produto rejuvenescedor e eventualmente material corretivo, nomeadamente agregados virgens ou aditivos, caso seja necessário. (CUNHA, 2010).

Figura 4 - Fases da reciclagem à quente “*in situ*”

Fonte: BAPTISTA, 2006



3.2.3. Técnicas de reciclagem em central

As técnicas de reciclagem em central caracterizam pela necessidade de transporte do material fresado para uma central de localização específica, onde, após a reciclagem o material retorna para algum ponto da pista como solução em pavimentação. O material levado para a usina passa por processo que lhe assegura novo ciclo de vida, diferente das técnicas *in situ*, onde o processo atua no próprio local do pavimento danificado.

A reciclagem “*in situ*” tem a vantagem de não necessitar de transporte e armazenamento, que a torna mais econômica em relação à reciclagem em central. No entanto, em central, a vantagem é a de obter as misturas com mais qualidade, mas com custos mais elevados (AZEVEDO e CARDOSO, 2003).

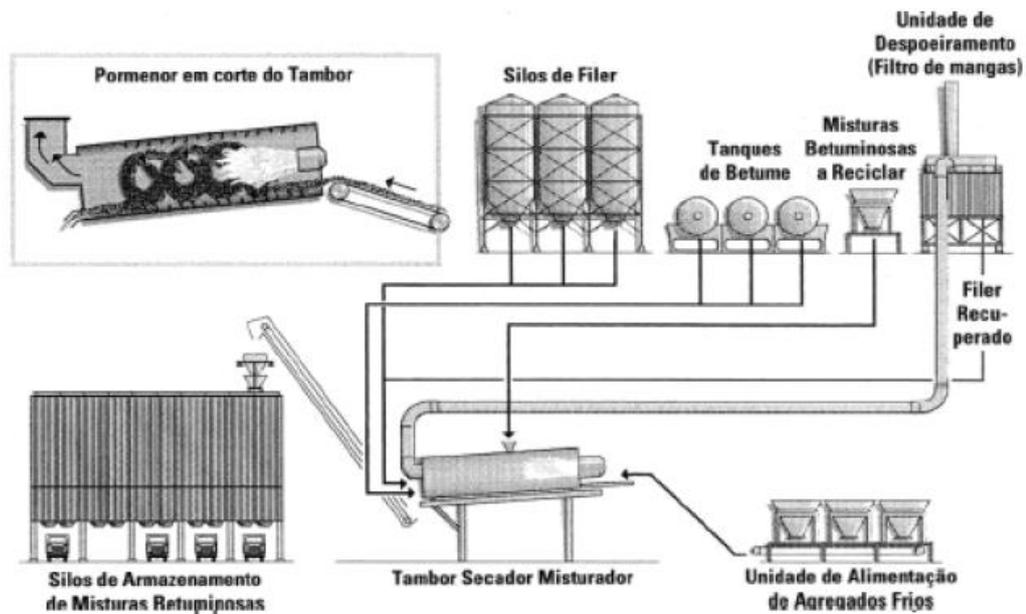
As mesmas usinas que produzem os pavimentos asfálticos reciclados (RAP) também produzem o asfalto convencional, porém, possuem adaptação para preparar, receber e tratar fresado recebido da pista quando optado pela reciclagem. Há dois grupos em que são

divididas as centrais de reciclagem: Contínuas, também conhecidas por tambor-secador, e descontínua, onde o processo é tratado em separado em um misturador.

As centrais contínuas se caracterizam pela reciclagem a quente, onde material fresado é aquecido no tambor antes de ser incorporado ao betume. O aquecimento da mistura a se reciclar ocorre de três maneiras diferentes: aquecimento por chama direta, aquecimento por chama indireta e também o aquecimento através do contato com os agregados virgens sobreaquecidos, como mostrado na figura 5. As mais utilizadas são as técnicas de chama direta e por aquecimento dos agregados.

Figura 5 - Esquema de uma usina contínua adaptada para recebimento de RAP

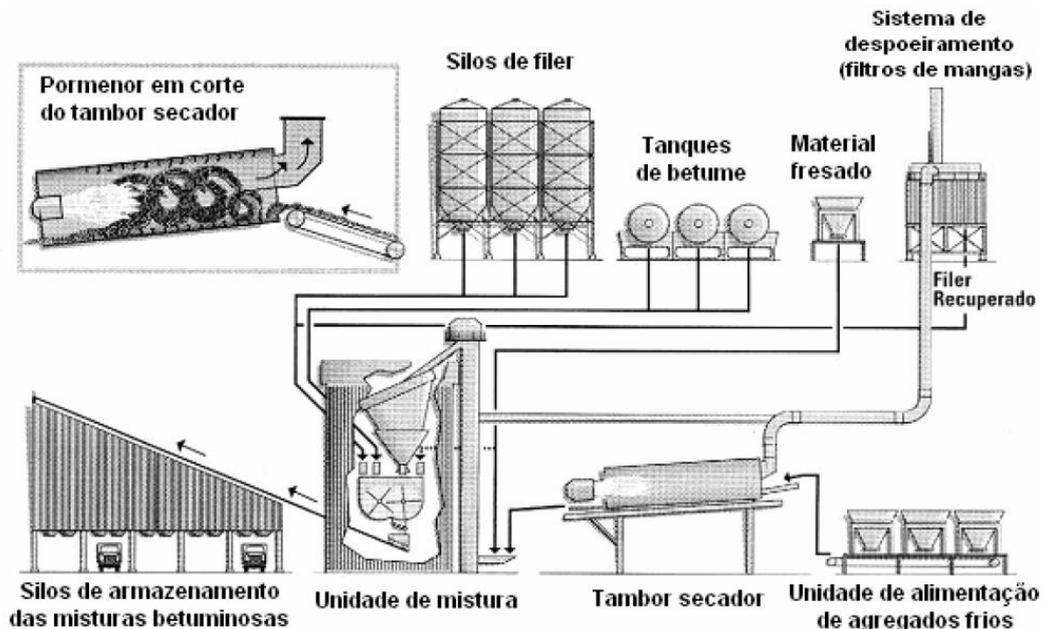
Fonte: AZEVEDO, 2009b.



Já as usinas descontínuas são caracterizadas pela unidade em separado destinada para tratamento específico da camada fresada, o chamado tambor-misturador. A central descontínua apresenta índices de reciclagem superiores se comparada a central contínua, evidenciando uma capacidade de até 70% de reaproveitamento, enquanto a central contínua limita-se a 50%. A figura 6 mostra um exemplo de central descontínua adaptada para o recebimento do RAP a frio.

Figura 6 - Esquema de funcionamento de uma central betuminosa descontínua com incorporação do material fresado a frio

Fonte: AZEVEDO, 2009b.



3.3. Taxa de reciclagem

A formulação da mistura depende de um estudo das condições e da taxa de reciclagem (TR), ou percentagem de reciclagem. A taxa de reciclagem corresponde aos valores percentuais de material fresado adicionados a nova mistura betuminosa, sendo assim, a proporção entre mistura virgem e a reciclada.

O conceito de taxa de reciclagem pode eventualmente ser usado em dois sentidos: referindo-se a proporção de material fresado usado no fabrico de uma mistura betuminosa reciclada a quente (MBRQ), o mais habitual; ou referindo-se à percentagem de material fresado disponível e que na realidade foi reutilizado.

Seguindo esse dois conceitos, na prática se a quantidade de material fresado for baixa, poderá ser observada uma reutilização de 100%, mesmo recorrendo a uma TR baixa (15% a 20%). Por outro lado, se a quantidade de material fresado for elevada, poderá não ser possível reciclar todo o material fresado, embora determinadas técnicas possam ter uma incorporação de 100%. Dessa forma, para uma mesma obra pode reutilizar-se todo o material fresado com

TR reduzidas e pode não ser possível reciclar todo o material fresado mesmo com incorporações elevadas (BAPTISTA, 2006).

Um dos aspectos importantes a considerar no processo de fabrico das misturas betuminosas recicladas à quente tem a ver com o sistema adotado para o aquecimento deste material, assim serão as percentagens permitidas para incorporar no fabrico de misturas betuminosas à quente (BATISTA, 2004). A tabela 2 mostra algumas dessas percentagens para algumas técnicas de reciclagem.

Tabela 2 - Taxa de reciclagem para alguns dos tipos de processos de reciclagem de pavimentos

Fonte: AZEVEDO adaptado, 2009b

| Método de Adição do Material | | % de Reciclagem |
|------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Centrais Descontínuas | Método a Frio | 10% a 30% |
| | Método a Quente | 70% |
| | Método <i>Recyclelean</i> | 40% |
| Centrais Contínuas | | 10% a 50% |

Quando define-se uma taxa reciclagem, alta ou baixa, interfere-se em toda linha de produção da reciclagem, afinal, quanto maior o nível de reutilização, maior o cuidado e tratamento do fresado, seccionando ainda mais as etapas da incorporação.

Para o presente trabalho, optou-se por três taxas de reciclagem: 25%, 37% e 50% de material fresado, afim de analisar quais faixas de reciclagem conseguirão atender as normas do DNIT.

4. METODOLOGIA MARSHALL

4.1. Histórico

No Brasil, para a elaboração do projeto de dosagem de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), dois são os métodos atualmente mais usados no meio rodoviário: o método granulométrico e o método Marshall. Em laboratórios, utiliza-se a metodologia Marshall para

realizar a dosagem das matérias primas e para determinar o teor ótimo de ligante, e o ensaio de compressão diametral para a determinação da resistência a tração (RT) e o módulo de resiliência (MR).

Os conceitos do método Marshall de dosagem de misturas asfálticas foram formulados na década de 30 por Bruce Marshall, engenheiro do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Mississippi, nos Estados Unidos. Durante o período da 2ª guerra mundial, o Corpo de Engenheiros do exército americano (USACE), após extensas pesquisas, aprimoraram os procedimentos do ensaio Marshall e desenvolveram critérios de dosagem de misturas asfálticas para a pavimentação. Este método tornou-se conhecido e utilizado internacionalmente, sendo simples, rápido, de baixo custo e de relativa eficiência. O método Marshall foi originalmente concebido para misturas asfálticas a quente, tendo se estendido para misturas asfálticas a frio (DAVID, 2006).

4.2. Técnica

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

Nesse método a análise dos parâmetros mencionados acima, permite conhecer ou controlar as condições mais favoráveis de impermeabilidade e durabilidade da mistura, com a qual pode fixar margens para evitar o excesso ou escassez de aglutinante. O valor de estabilidade é um índice da resistência estrutural da mistura asfáltica compactada, e a fluência é um indicador de sua flexibilidade e perda de resistência a deformação.

Ambas as propriedades ajudam a julgar as características de forma e superfície do material pétreo que integra a mistura. O método Marshall se aplica ao controle de todas ou algumas propriedades que ele envolve, de acordo com o projeto. Para um projeto de misturas asfálticas elabora-se corpos de prova com diferentes porcentagens de asfalto, a fim de conhecer quais são as porcentagens que proporcionam condições favoráveis ao uso, ou seja, aquelas que atendem as condições das normas de controle presentes na norma 043/1995 do DNER.

4.3. Normas de controle

Como um dos objetivos do trabalho é a discussão das variáveis para analisar a viabilidade da técnica de reciclagem, nesse tópico contem as exigências técnicas vigentes na legislação do Brasil que se aplicam ao estudo em questão. A norma que regulamenta o serviço é a – DNIT 33/2005 - Concreto asfáltico reciclado á quente na usina, que na verdade não especifica a % máxima de asfalto reciclado nas misturas. A outra norma de parâmetro é a DNIT 31/2006, que faz referência aos ensaios necessários a nova mistura, foco do estudo.

Nas normas citadas, a composição da mistura reciclada deve satisfazer alguns requisitos técnicos como percentuais de ligantes asfálticos (Tabela 3), granulometria (Tabela 4), e por percentuais mínimos de vazios dos agregados minerais (Tabela 5).

Tabela 3 - Valores limites para os testes especificados

Fonte: DNIT - 031/2006

| Características | Método de ensaio | Camada de Rolamento | Camada de Ligação (Binder) |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|----------------------------|
| Porcentagem de vazios, % | DNER-ME 043 | 3 a 5 | 4 a 6 |
| Relação betume/vazios | DNER-ME 043 | 75 – 82 | 65 – 72 |
| Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes) | DNER-ME 043 | 500 | 500 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa | DNER-ME 138 | 0,65 | 0,65 |

Tabela 4 - Quadro de requisitos mínimos de composição da mistura

Fonte: DNIT-031/2006

| Peneira de malha quadrada | | % em massa, passando | | | |
|---------------------------|---------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | A | B | C | Tolerâncias |
| 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 | - | - | 80 - 100 | ± 7% |
| 3/8" | 9,5 | 35 - 65 | 45 - 80 | 70 - 90 | ± 7% |
| Nº 4 | 4,8 | 25 - 50 | 28 - 60 | 44 - 72 | ± 5% |
| Nº 10 | 2,0 | 20 - 40 | 20 - 45 | 22 - 50 | ± 5% |
| Nº 40 | 0,42 | 10 - 30 | 10 - 32 | 8 - 26 | ± 5% |
| Nº 80 | 0,18 | 5 - 20 | 8 - 20 | 4 - 16 | ± 3% |
| Nº 200 | 0,075 | 1 - 8 | 3 - 8 | 2 - 10 | ± 2% |
| Teor de betume (ml) | | 4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder) | 4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento | 4,5 - 9,0 Camada de rolamento | ± 0,3% |

Tabela 5 - Limites Recomendados para % de vazios do agregado mineral

Fonte: DNIT-031/2006

| VAM – Vazios do Agregado Mineral | | |
|------------------------------------|------|--------------|
| Tamanho Nominal Máximo do agregado | | VAM Mínimo % |
| # | m m | |
| 1 ½" | 38,1 | 13 |
| 1" | 25,4 | 14 |
| ¾" | 19,1 | 15 |
| ½" | 12,7 | 16 |
| 3/8" | 9,5 | 18 |

4.4. Estudo de casos

Nessa sessão há alguns estudos de casos de pesquisadores que analisaram a incorporação de material fresado em uma mistura nova, juntamente com os resultados de suas pesquisas.

Vasconcelos e Soares (2003) estudaram a dosagem de uma mistura asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e de duas misturas asfálticas recicladas à quente (MARQ's) com 10% e 50% de material fresado, sendo todas com a mesma distribuição granulométrica. As misturas recicladas foram dosadas pela metodologia do Asphalt Institute (1995), que é semelhante à metodologia Marshall, com adição da análise do material fresado. Os resultados dos ensaios mecânicos apontam que a utilização de material fresado em misturas asfálticas não compromete o comportamento mecânico das mesmas.

Santana (2009) estudou misturas asfálticas (CBUQ) incorporando 10%, 30%, 50%, 75% e 100% de material fresado. De acordo com seus estudos, as misturas recicladas que apresentaram propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as especificações do DNIT e AASHTO, foram 10% e 30%, e estas continham 3% de fíler (cal). No entanto vale ressaltar que todas as misturas apresentaram valores de resistência à Tração acima do mínimo exigido pelo DNIT, que é de 0,65 MPa.

Apesar do consenso entre pesquisadores sobre o desempenho satisfatório de misturas recicladas, acredita-se ser muito difícil controlar alguns parâmetros de fabricação como a granulometria, teor de betume, grau de oxidação do asfalto, índice de vazios e sua estabilidade quando da fabricação dessas misturas em campo. Várias técnicas têm sido desenvolvidas para restaurar pavimentos, porém as que contemplam a reciclagem das camadas do pavimento apresentam significativo crescimento. Nessas técnicas atingem-se vários objetivos almejados no meio rodoviário, tais como: aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Análise do RAP

Antes de começar a dosagem dos materiais para obtenção da mistura para a formação dos corpos de prova, deve-se analisar o material fresado, material a ser reciclado, e também os materiais virgens.

O material asfáltico fresado foi cedido pela prefeitura municipal de Belo Horizonte, porém não foi informado sua procedência. Foi analisado o teor de betume contido no material, a densidade real e por fim fez-se uma análise granulométrica do agregado do material fresado.

Foi utilizado um extrator de betume do tipo Rotarex para a extração do betume advindo do material fresado; o solvente foi gasolina. O processo foi feito com base na norma 053/1994 do DNER. Primeiramente foram pesadas duas amostras de 500g de RAP e em seguida colocou-se uma delas, de forma uniforme, no prato do extrator. Tampou-se o prato com um filtro de papel e a máquina foi fechada. Mediu-se 150 ml de gasolina que foram despejados sobre a amostra que permaneceu em repouso por 15 minutos antes do extrator ser ligado. A máquina foi ligada e através das forças centrifugas a gasolina passa pela amostra retirando o betume contido nela, saindo pelo coletor do extrator. Tendo esgotado a primeira carga de solvente e betume, parou-se o aparelho e uma nova porção de solvente foi adicionado ao prato. Esta operação foi repetida com sucessivas adições de 150 ml, até que o solvente saísse com uma coloração mais clara.

Figura 7 - Extrator de betume tipo Rotarex

Fonte: Autor



Esperou-se 24 horas até que toda a gasolina volatiliza-se e em seguida pesou-se a amostra. Calculou a diferença entre o peso final e inicial, significando a quantidade de betume que foi extraída, e em seguida, foi calculada a porcentagem em massa de betume, através da seguinte fórmula:

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

Para determinação da densidade real do RAP, fez-se uma picnometria utilizando água, cuja técnica baseia-se na razão da massa do sólido e da massa do líquido.

Feito isso, analisou-se os agregados contidos no RAP. Para isso foi feito uma análise granulométrica em peneiras de 3/4" até uma N° 200, num total de 8 peneiras. As peneiras foram ordenadas de forma decrescente, e as amostras foram colocadas no topo da pilha de peneiras que foram agitadas manualmente por meio de movimentos laterais e circulares alternados, durante 1 minuto.

Após a agitação, pesou-se o material retido em cada peneira e, em seguida, calculou-se a porcentagem, em massa, passante e retida. Em seguida os valores obtidos foram comparados entre si para determinar qual faixa granulométrica a amostra se enquadrava, de acordo com as faixas do DNER, contidas na norma 083/1998.

5.2. Análise dos agregados novos e do CAP

Já os materiais virgens, CAP e agregados, foram cedidos pela Greca Asfaltos e pelo DER-MG (Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais), respectivamente. Ambos já foram analisados pelos seus fornecedores; cujas características estão descritas nos quadros 1 e 2:

Quadro 1 - Características do CAP 50/70

Fonte: Greca Asfaltos

| Característica | Método | Especificação | Resultado | Unidade |
|-----------------------------------------|--------|---------------|----------------|-------------------|
| Penetração | D 5 | 50 a 70 | 56 | 0,1 mm |
| Ponto de Amolecimento | D 36 | 46 min | 49,8 | grau C |
| Viscosidade Brookfield 135GC-SP21 20RPM | D 4402 | 274 min | 345 | cp |
| Viscosidade Brookfield 150GC-SP21 | D 4402 | 112 min | 176 | cp |
| Viscosidade Brookfield 177GC-SP21 | D 4402 | 57 a 285 | 65 | cp |
| RTFOT Penetração retida | D 5 | 55 min | 345 | % |
| RTFOT- Aumento do ponto de amolecimento | D 36 | 8 max | 176 | grau C |
| RTFOT - Ductilidade a 25GC | D 113 | 20 min | 65 | cm |
| RTFOT variação em % massa | D 2872 | -0,50 a 0,50 | -0,093 | % |
| Ductilidade a 25 GC | D 113 | 60 min | >150 | cm |
| Solubilidade no Tricloroetileno | D 2042 | 99,5 min | 99,9 | % massa |
| Ponto de Fulgor | D 92 | 235 min | 342 | grau C |
| Índice de suscetibilidade térmica | X 018 | -1,5 a 0,7 | -1 | N/A |
| Densidade relativa a 20/4 °C | D 70 | X | 1,005 | g/cm ³ |

Quadro 2 - Granulometria dos agregados virgens

Fonte: DER-MG

| Peneiras | Agregados Novos | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|-------------|
| | Brita 1 | Brita 0 | Pó de pedra |
| | %Passante | %Passante | %Passante |
| #3/4" (19,1 cm) | 100 | 100 | 100 |
| #1/2" (12,7 cm) | 6,8 | 98,3 | 100 |
| #3/8" (9,5 cm) | 0,2 | 70,9 | 100 |
| Nº 4 (4,75 cm) | 0,2 | 17,7 | 99,5 |
| Nº 10 (2,0 cm) | 0,2 | 1,5 | 73,3 |
| Nº 40 (0,42 cm) | 0,1 | 0,6 | 20,5 |
| Nº 80 (0,18 cm) | 0,1 | 0,05 | 14,1 |
| Nº 200 (0,075 cm) | 0,1 | 0,4 | 10 |
| Densidade Real (g/cm ³) | 2,706 | 2,719 | 2,700 |

Com as matérias-primas todas definidas e suas granulometrias calculadas, utilizou-se o método Marshall para determinar o teor exato de asfalto a ser usado na mistura reciclada.

Através desses dados calculou-se a composição granulométrica pelo método das tentativas, obtendo-se 3 diferentes misturas de agregados virgens e agregados reutilizáveis, esse variando de acordo com a proposta do projeto (25%, 37% e 50%), afim de se enquadrarem nos limites da faixa C como definido na norma DNIT 31/2006 ES.

Estimou-se a porcentagem de ligante (asfalto) na mistura final, através da seguinte fórmula:

$$P = 0,035a + 0,045b + kc + F \quad (2)$$

Onde,

P - % de asfalto da mistura final.

a - % retida na peneira nº 8.

b - % que passa na peneira nº 8 menos a % retida na peneira nº 200.

c - % que passa na peneira nº 200.

k = 0,15 quando % que passa na peneira nº 200 for entre 11% e 15%.

0,18 quando % que passa na peneira nº 200 for entre 6% e 10%.

0,20 quando % que passa na peneira nº 200 for menor que 5%.

F – depende da absorção do agregado (varia entre 0% a 2%, geralmente usa-se 0,7%).

Tendo a porcentagem de ligante na mistura final, calculou-se a porcentagem de asfalto novo (esse valor está inserido na porcentagem P calculada acima). Para isso, calculou-se a porcentagem de asfalto envelhecido que será usada na mistura final.

$$\%ASF_{RAPM} = \frac{\%ASF_{RAP} \cdot \frac{\%AG_M \cdot \%AG_{RAPM}}{100}}{100 - \%ASF_{RAP}} \quad (3)$$

Onde:

$\%ASF_{RAPM}$ – Porcentagem de asfalto envelhecido na mistura final.

$\%ASF_{RAP}$ – Porcentagem de asfalto contido no RAP.

$\%AG_M$ – Porcentagem de agregado na mistura final.

$\%AG_{RAPM}$ – Porcentagem de agregado envelhecido do RAP na mistura final.

$\%ASF_{RAP}$ é calculada através do ensaio ASTM – D 2172-95, como descrito antes.

$\%AG_M = 100\% - P$.

$\%AG_{RAPM} = 25\%$ ou 37% ou 50% .

Tendo o valor de $\%ASF_{RAPM}$ obteve-se a porcentagem de asfalto novo:

$$\%ASF_{novo} = \%P - \%ASF_{RAPM} \quad (4)$$

5.3. Dosagem e confecção dos corpos de prova

Tendo sido determinada as 3 misturas, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova, essa parte experimental foi realizada no laboratório de solos do DER-MG. Foram preparados, pelo menos, três corpos-de-prova a serem ensaiados pelo método Marshall, a fim de que se possa obter um valor médio das características da mistura, para cada teor de asfalto. Foram feitas outras quatro séries de corpos de prova, onde a variação do teor de asfalto foi de meio por cento em relação ao percentual calculado (P) de cada uma das 3 misturas. Portanto, obteve-se teores de asfalto de $P - 1,0\%$, $P - 0,5\%$, $P\%$, $P + 0,5\%$ e $P + 1,0\%$, correspondendo a 5 séries de corpos-de-prova, sendo 3 moldados para cada teor de ligante, totalizando 15 corpos de prova por mistura. Ao final, produziu-se 45 corpos de prova, por ser 3 misturas.

Os corpos de provas foram feitos de acordo com a norma DNER-ME 043-95, que consiste em primeiramente pesar as frações das matérias-primas, de forma que com o ligante o peso do corpo de prova seja 1200g e a altura de $63,5 \pm 1,3$ mm.

Em seguida determinou-se a temperatura de aquecimento do ligante e de compactação. A temperatura de aquecimento do ligante é aquela em que o ligante apresente uma viscosidade (170 ± 20) cSt ou (85 ± 10) sSF. Já a temperatura de compactação é aquela em que o ligante apresenta uma viscosidade de (280 ± 30) cSt ou (140 ± 15) sSF.

A seguir aqueceram-se os agregados a uma temperatura de 10°C a 15°C superior à temperatura de aquecimento do ligante, não devendo ultrapassar 177°C . Em uma panela com os agregados aquecidos, abriu-se uma cratera para receber o ligante. Após despejado o ligante, efetuou-se a mistura rapidamente (de 2 a 3 minutos) até a completa cobertura dos agregados para ser colocada no molde de compactação.

O molde de compactação junto com a base do soquete foram aquecidos em água fervente a uma temperatura de 90°C a 150°C . Colocou-se o molde em posição no suporte de compactação e despejou-se a mistura de uma só vez no molde. Acomodou-se a mistura com golpes de espátula no centro da massa, no interior e cantos do molde.

Aplicou-se 75 golpes de cada lado do corpo prova, totalizando 150 golpes. Após a compactação, o corpo de prova foi retirado do molde e colocado em uma superfície plana e lisa e deixado resfriar a temperatura ambiente por um período de 12 horas. Em seguida mediu-se as dimensões do corpo de prova a fim de verificar se então dentro das dimensões especificadas por norma. Repetiu-se todo esses procedimentos para os 45 corpos de prova.

5.4. Ensaio e Caracterização dos corpos de prova

Determinaram-se algumas propriedades dos corpos de provas feitos com a mistura de asfalto reciclado, dentre elas a densidade real da mistura (D_{ag}), a densidade aparente (D_a) e a densidade teórica (D_t) do corpo de prova, os parâmetros volumétricos do mesmo. Os parâmetros volumétricos são:

- Porcentagem de vazios (% Vv);
- Porcentagem de vazios cheios com betume (% VCB);
- Porcentagem de vazios de agregado mineral (% VAM);
- Relação Betume-Vazios (RBV);

Em seguida determinou-se algumas propriedades mecânicas do material, tais como estabilidade e fluência. Para isso, fez-se um ensaio de compressão diametral nos corpos de

prova. Primeiramente, eles foram imersos em um banho-maria a 60°C por um período de 30 minutos. Após o banho, eles são imediatamente levados para a máquina de compressão diametral onde foram comprimidos até sua ruptura. O valor é então anotado e convertido para Estabilidade Marshall. O valor de fluência é obtido simultaneamente ao valor de estabilidade, por meio de um medidor de fluência que foi colocado na máquina de compressão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Análise do RAP

Após a caracterização dos RAP pelos ensaios de determinação do teor de betume, picnometria e peneiramento, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 6 - Resultados da caracterização do RAP

| Peneira | Abertura (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------------------------------|---------------|----------|--------------------|
| #3/4" | 19,10 | 0,00 | 0,00 |
| #1/2" | 12,70 | 2,21 | 2,21 |
| #3/8" | 9,50 | 2,22 | 4,43 |
| Nº 4 | 4,75 | 19,17 | 23,60 |
| Nº 10 | 2,00 | 21,08 | 44,68 |
| Nº 40 | 0,42 | 18,74 | 63,42 |
| Nº 80 | 0,18 | 14,01 | 77,43 |
| Nº 200 | 0,075 | 8,50 | 85,93 |
| Teor de betume no RAP (%) | | 4,80 | |
| Densidade real (g/cm ³) | | 2,56 | |

Pela granulometria do RAP apenas pode-se perceber que o material apresenta uma elevada quantidade de finos, já que a porcentagem passante da peneira Nº 200 foi de 14,07% o que é um valor relativamente alto. Porém, ao se juntar aos agregados novos esse erro pode ser corrigido.

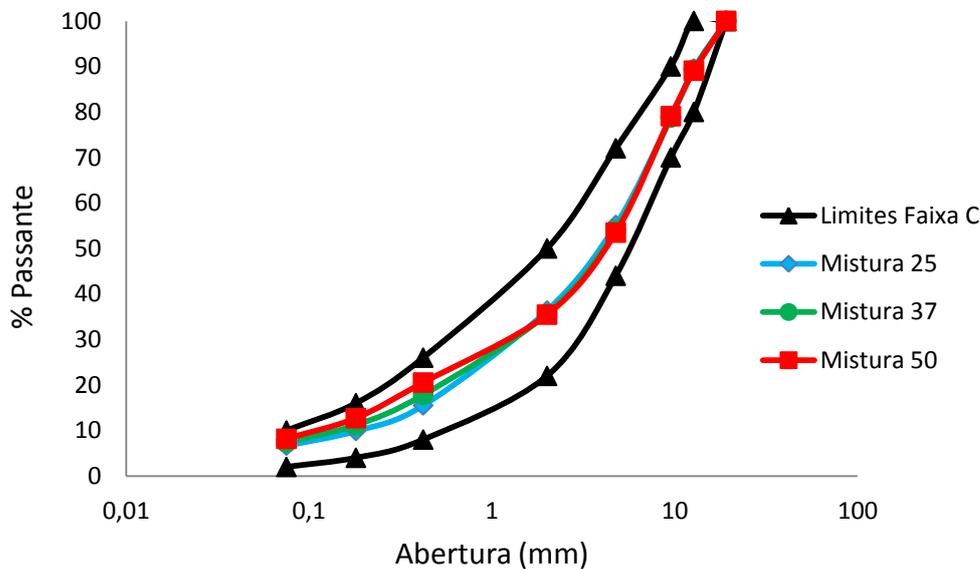
6.2. Dosagem através da Metodologia Marshall

Para fazer a dosagem dos materiais foi utilizada a Dosagem Marshall e o primeiro passo dessa metodologia é o método das tentativas, que consiste em variar as quantidades dos agregados virgens, já que a quantidade de RAP é fixa, até atingir a granulometria correta. Dessa forma, obteve-se 3 misturas com as quantidades de RAP fixadas pelo projeto como mostrado na tabela 7:

Tabela 7 - Composição das misturas asfálticas

| Mistura 25 | Mistura 37 | Mistura 50 |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| 25% RAP | 37% RAP | 50% RAP |
| 35% Brita 0 | 33% Brita 0 | 30% Brita 0 |
| 10% Brita 1 | 10% Brita 1 | 10% Brita 01 |
| 30% Pó de Pedra | 20% Pó de Pedra | 10% pó de Pedra |

Gráfico 1 - Curva granulométrica das misturas



Como mostrado no gráfico 1 as misturas se enquadraram nos limites da Faixa C do DNER. Faixa na qual faz-se camadas de rolamento que são as camadas mais superiores de um pavimento e que são as mais utilizada para CBUQ em obras no Estado de Minas Gerais.

Com todas as misturas já dosadas, foi determinada a densidade real da mistura dos agregados (D_{ag}). Para este estudo foi utilizado uma fórmula que leva em consideração as densidades dos agregados e suas respectivas porcentagens em cada mistura, como mostrado abaixo:

$$D_{ag} = \frac{100}{\frac{\%Brita0}{Drb0} + \frac{\%Brita1}{Drb1} + \frac{\%Pó}{Drpó} + \frac{\%RAP}{DrRAP}} \quad (5)$$

Tabela 8 - Densidade real da mistura de agregados

| Misturas | D_{ag} (g/cm ³) |
|----------|-------------------------------|
| 25% RAP | 2,671 |
| 37% RAP | 2,653 |
| 50% RAP | 2,634 |

Atendendo aos limites do DNER e continuando com a metodologia Marshall, o próximo passo foi a determinação do teor ótimo de asfalto de cada mistura, usando a equação (2), bem como a composição real de agregados exatos para a confecção dos corpos de prova. Foram feitos 5 séries para cada mistura e 3 corpos de prova para cada série, num total de 45 no final. As composições dos corpos de prova estão evidenciadas nos quadros 3, 4 e 5 abaixo:

Quadro 3- Composição das séries da mistura 25

| Item | Discriminação | % em peso de matérias-primas das 5 séries da mistura 25 | | | | |
|------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | | |
| (1) | % de asfalto na mistura | 4,60 | 5,10 | 5,60 | 6,10 | 6,60 |
| (2) | % de agregado na mistura | 95,40 | 94,90 | 94,40 | 93,90 | 93,40 |
| (3) | % do asfalto envelhecido do RAP na mistura (ASF_{RAPM}) | 1,20 | 1,20 | 1,19 | 1,18 | 1,18 |
| (4) | % de asfalto novo | 3,40 | 3,90 | 4,41 | 4,92 | 5,42 |
| (5) | % de Brita 1 | 9,54 | 9,49 | 9,44 | 9,39 | 9,34 |
| (6) | % de Brita 0 | 33,39 | 33,215 | 33,04 | 32,865 | 32,69 |
| (7) | % Pó de Pedra | 28,60 | 28,50 | 28,30 | 28,20 | 28,00 |
| (8) | % de agregado recuperado | 23,90 | 23,70 | 23,60 | 23,50 | 23,40 |
| (9) | % do revestimento asfáltico recuperado na mistura (3+8) | 25,10 | 24,90 | 24,80 | 24,70 | 24,50 |
| (10) | Mistura (4+5+6+7+9) | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Quadro 4 - Composição das séries da mistura 37

| Item | Discriminação | % em peso de matérias-primas das 5 séries da mistura 37 | | | | |
|------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| (1) | % de asfalto na mistura | 4,70 | 5,20 | 5,70 | 6,20 | 6,70 |
| (2) | % de agregado na mistura | 95,30 | 94,80 | 94,30 | 93,80 | 93,30 |
| (3) | % do asfalto envelhecido do RAP na mistura (ASF_{RAPM}) | 1,20 | 1,19 | 1,19 | 1,18 | 1,18 |
| (4) | % de asfalto novo | 3,50 | 4,01 | 4,51 | 5,02 | 5,52 |
| (5) | % de Brita 1 | 9,53 | 9,48 | 9,43 | 9,38 | 9,33 |
| (6) | % de Brita 0 | 31,45 | 31,28 | 31,12 | 30,95 | 30,79 |
| (7) | % Pó de pedra | 19,10 | 19,00 | 18,90 | 18,80 | 18,70 |
| (8) | % de agregado recuperado | 35,30 | 35,10 | 34,90 | 34,70 | 34,50 |
| (9) | % do revestimento asfáltico recuperado na mistura (3+8) | 36,50 | 36,30 | 36,10 | 35,90 | 35,70 |
| (10) | Mistura (4+5+6+7+9) | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Quadro 5 - Composição das séries da mistura 50

| Item | Discriminação | % em peso de matérias-primas das 5 séries da mistura 50 | | | | |
|------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| (1) | % de asfalto na mistura | 4,80 | 5,30 | 5,80 | 6,30 | 6,80 |
| (2) | % de agregado na mistura | 95,20 | 94,70 | 94,20 | 93,70 | 93,20 |
| (3) | % do asfalto envelhecido do RAP na mistura (ASF_{RAPM}) | 1,20 | 1,19 | 1,19 | 1,18 | 1,17 |
| (4) | % de asfalto novo | 3,60 | 4,11 | 4,61 | 5,12 | 5,63 |
| (5) | % de Brita 1 | 9,52 | 9,47 | 9,42 | 9,37 | 9,32 |
| (6) | % de Brita 0 | 28,56 | 28,41 | 28,26 | 28,11 | 27,96 |
| (7) | % Pó de pedra | 9,50 | 9,50 | 9,40 | 9,40 | 9,30 |
| (8) | % de agregado recuperado | 47,60 | 47,40 | 47,10 | 46,90 | 46,60 |
| (9) | % do revestimento asfáltico recuperado na mistura (3+8) | 48,80 | 48,50 | 48,30 | 48,00 | 47,80 |
| (10) | Mistura (4+5+6+7+9) | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Com todas as composições das misturas já determinadas iniciou a confecção dos corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados, a 165°C, em um compactador automático com 75 golpes em cada face como diz a norma DNER ME 043-95.

Figura 8 - Corpos de prova de CBUQ

Fonte: Autor



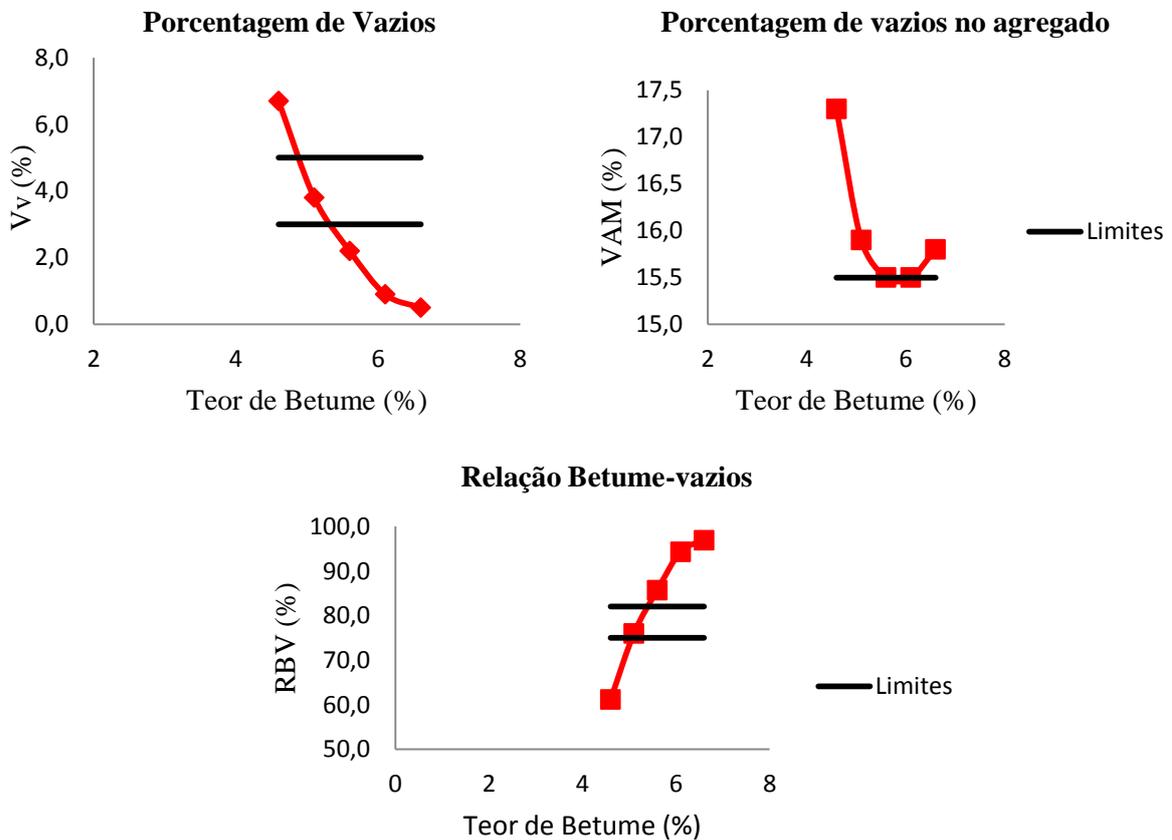
Com todos os 45 corpos de prova moldados, determinou-se a densidade aparente de cada série em cada mistura. Como são 3 corpos de prova por série, então utilizou-se de um valor médio da densidade aparente. Esse parâmetro foi calculado pelo método de Arquimedes que consiste em pesar o corpo ao ar livre, em seguida pesá-lo imerso em água e verificar o volume deslocado.

6.3. Características Marshall e Ensaio Mecânicos

Feitos os corpos de prova, iniciou-se o cálculo dos parâmetros volumétricos de cada série em cada mistura e comparou com os valores descritos na norma DNIT 031-2006.

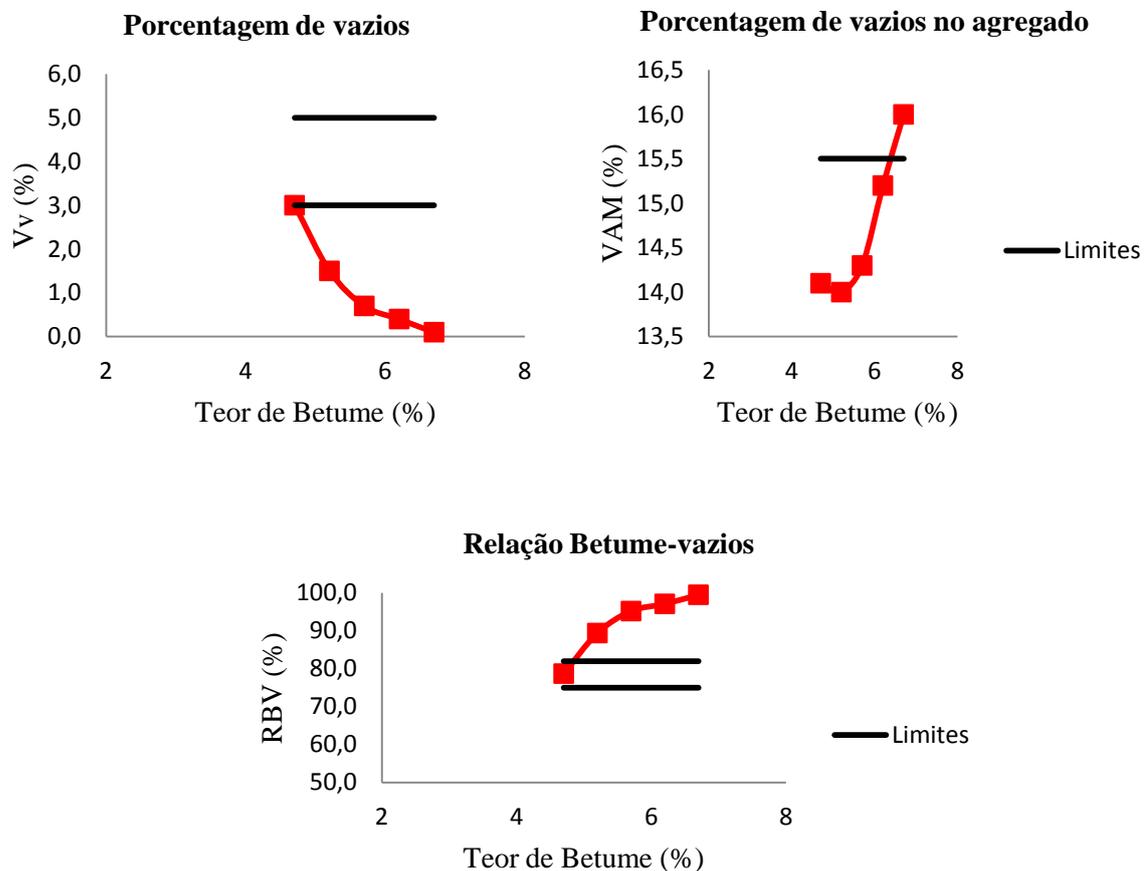
Quadro 6 - Parâmetros volumétricos da mistura 25

| Parâmetros | Série (% asfalto na mistura) | Densidades (g/cm ³) | | Vazios | VCB | VAM | RBV |
|------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-------------------|
| | | Aparente | Teórica | % Vv | % | % | % |
| | a | b | c | d | e | f | G |
| Fórmulas | | | $\frac{100}{\frac{a}{DrCAP} + \frac{100-a}{Dag}}$ | $\left(1 - \frac{b}{c}\right) 100$ | $\frac{b * c}{DrCAP}$ | d + e | $\frac{e}{f} 100$ |
| %P - 1 | 4,6 | 2,316 | 2,482 | 6,7 | 10,6 | 17,3 | 61,2 |
| %P - 0,5 | 5,1 | 2,368 | 2,462 | 3,8 | 12,1 | 15,9 | 76 |
| %P | 5,6 | 2,391 | 2,445 | 2,2 | 13,3 | 15,5 | 85,7 |
| %P + 0,5 | 6,1 | 2,404 | 2,425 | 0,9 | 14,6 | 15,5 | 94,3 |
| %P + 1 | 6,6 | 2,394 | 2,406 | 0,5 | 15,8 | 16,3 | 96,9 |

Gráficos 2, 3 e 4 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 25 com os da norma DNIT 031/2006

Quadro 7 - Parâmetros volumétricos da mistura 37

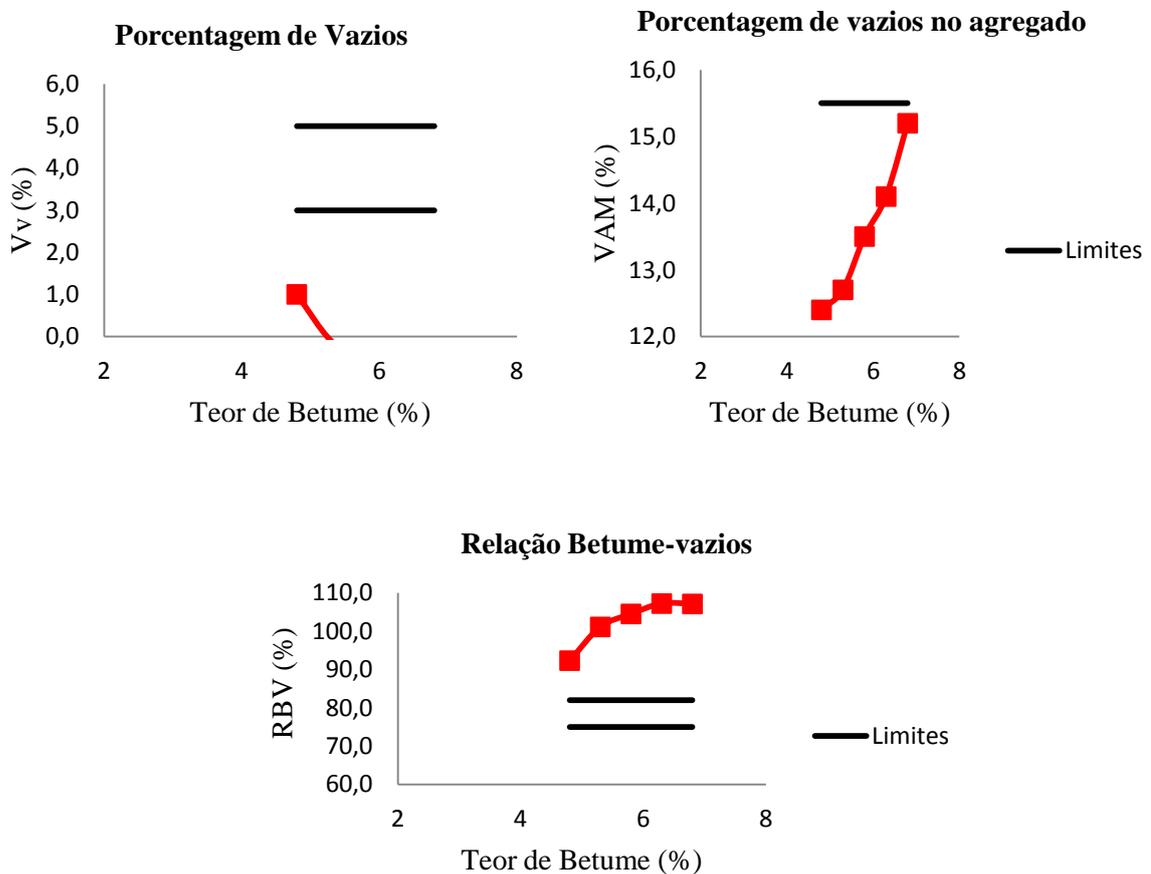
| Parâmetros | Série (% asfalto na mistura) | Densidades (g/cm³) | | Vazios | VCB | VAM | RBV |
|------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-------------------|
| | | Aparente | Teórica | % Vv | % | % | % |
| | a | b | c | d | e | f | G |
| Fórmulas | | | $\frac{100}{\frac{a}{DrCAP} + \frac{100-a}{Dag}}$ | $\left(1 - \frac{b}{c}\right) 100$ | $\frac{b * c}{DrCAP}$ | d + e | $\frac{e}{f} 100$ |
| %P - 1 | 4,7 | 2,390 | 2,464 | 3 | 11,1 | 14,1 | 78,7 |
| %P - 0,5 | 5,2 | 2,408 | 2,444 | 1,5 | 12,5 | 14,0 | 89,4 |
| %P | 5,7 | 2,411 | 2,428 | 0,7 | 13,6 | 14,3 | 95,2 |
| %P + 0,5 | 6,2 | 2,398 | 2,408 | 0,4 | 14,8 | 15,2 | 97,1 |
| %P + 1 | 6,7 | 2,388 | 2,390 | 0,1 | 16,0 | 16,0 | 99,5 |

Gráficos 5, 6 e 7 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 37 com os da norma DNIT 031/2006

Quadro 8 - Parâmetros volumétricos da mistura 50

| Parâmetros | Série (% asfalto na mistura) | Densidades (g/cm ³) | | Vazios | VCB | VAM | RBV |
|------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-------------------|
| | | Aparente | Teórica | % Vv | % | % | % |
| | a | b | c | d | e | f | G |
| Fórmulas | | | $\frac{100}{\frac{a}{DrCAP} + \frac{100-a}{Dag}}$ | $\left(1 - \frac{b}{c}\right) 100$ | $\frac{b * c}{DrCAP}$ | d + e | $\frac{e}{f} 100$ |
| %P - 1 | 4,3 | 2,422 | 2,445 | 1,0 | 11,5 | 12,4 | 92,3 |
| %P - 0,5 | 5,3 | 2,429 | 2,426 | -0,1 | 12,8 | 12,7 | 101,1 |
| %P | 5,8 | 2,421 | 2,406 | -0,6 | 14,1 | 13,5 | 104,5 |
| %P + 0,5 | 6,3 | 2,415 | 2,391 | -1,0 | 15,1 | 14,1 | 107,2 |
| %P + 1 | 6,8 | 2,398 | 2,372 | -1,1 | 16,2 | 15,2 | 107,1 |

Gráficos 8, 9 e 10 - Comparação dos parâmetros volumétricos da mistura 50 com os da norma DNIT 031/2006



De acordo com a norma DNIT 031-2006, os parâmetros volumétricos devem se enquadrar as especificações da mesma que são:

Tabela 9 - Especificações das características Marshall

| Características | Camada de Rolamento |
|------------------------------------------------------------|---------------------|
| Porcentagem de vazios (% Vv) | 3 a 5 |
| Relação Betume/Vazios (%RBV) | 75 a 82 |
| Estabilidade Mínima (Kgf) (75 golpes) | 500 |
| Resistência a tração por compressão diametral mínima (MPa) | 0,65 |
| Fluência (mm) | 2,0 a 4,5 |

Analisando todos os parâmetros volumétricos das 3 misturas, pode-se perceber que apenas 2 traços estão dentro das especificações. Na mistura 25 a série que contém 5,1% de ligante e na mistura 37 a série que contém 4,7%. Nenhum traço da mistura 50 conseguiu atender as especificações, isso se deve a alta concentração de finos presente no RAP e como nessa mistura a quantidade do fresado é elevada certamente essa mistura não conseguiria atender as normas do DNIT.

Esse problemas de finos poderia ser resolvido, simplesmente, repeneirando o RAP e retirando essa quantidade excessiva de finos. Proporcionando a mistura uma distribuição granulométrica mais uniforme, e assim provavelmente essa mistura atenderá as especificações das normas do DNIT.

A alta concentração de finos pode estar associado ao modo que o pavimento foi fresado, ao transporte e quanto tempo ele está sujeito as intempéries climáticas. Já que na maioria das vezes esse fresado é armazenado ao ar livre.

Após a determinação dos parâmetros volumétricos foi feito ensaio de tração por compressão diametral para a determinação da resistência a tração, estabilidade e fluência. Todos os corpos de prova foram previamente colocados em banho-maria a 60 °C durante 30 minutos. As tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados desse ensaio para cada mistura e os gráficos 11, 12 e 13 a comparação dos resultados com a norma DNIT 031/2006.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 25

| Traços (%) | Estabilidade (Kgf) | Resistência a tração (MPa) | Fluência (mm) |
|------------|--------------------|----------------------------|---------------|
| 4,6 | 1030 | 5,21 | 3,0 |
| 5,1 | 1128 | 5,81 | 3,0 |
| 5,6 | 1244 | 6,35 | 3,3 |
| 6,1 | 1182 | 6,14 | 3,3 |
| 6,6 | 1164 | 6,00 | 3,5 |

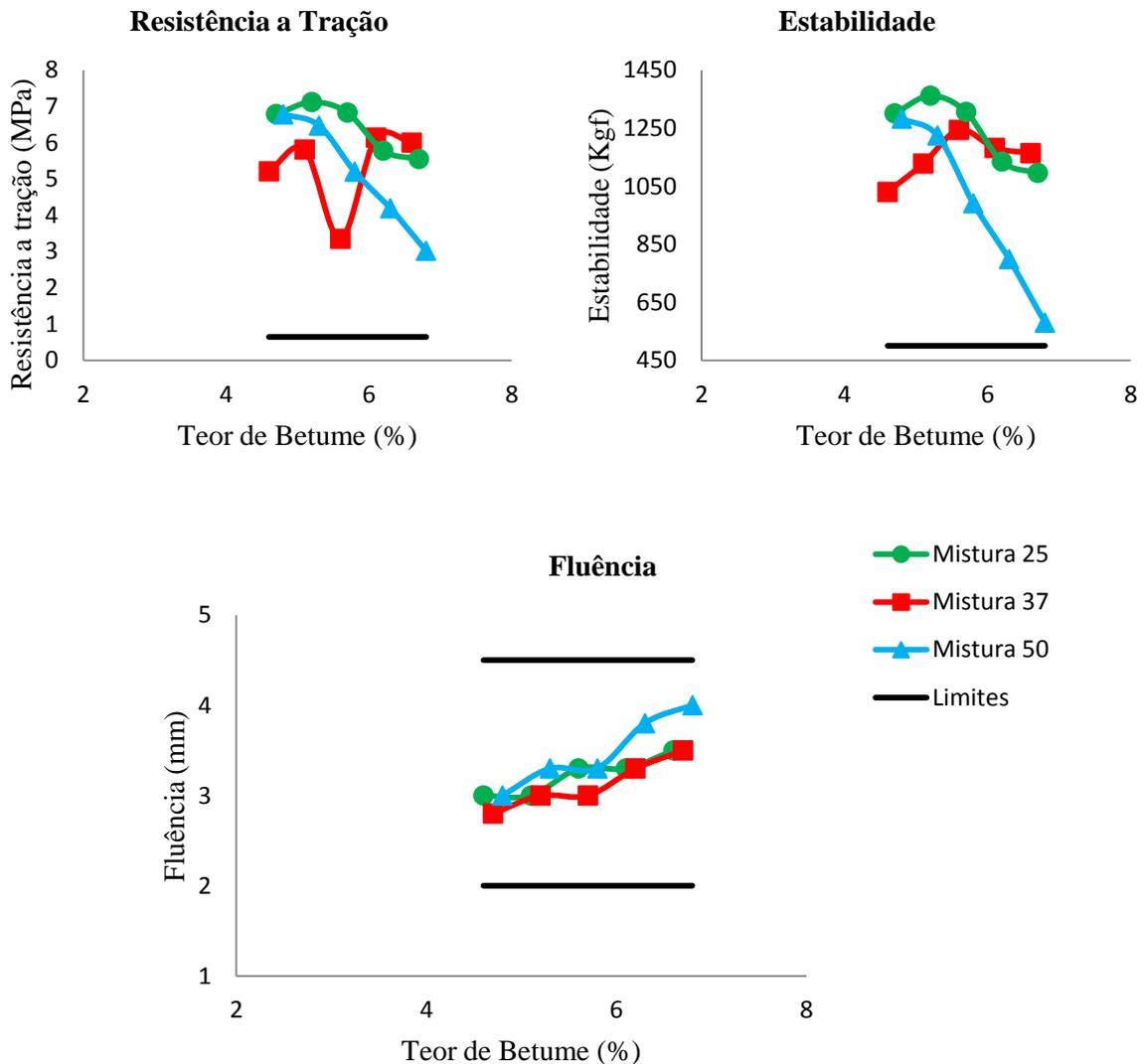
Tabela 11 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 37

| Traços (%) | Estabilidade (Kgf) | Resistência a tração (MPa) | Fluência (mm) |
|------------|--------------------|----------------------------|---------------|
| 4,7 | 1301 | 6,79 | 2,8 |
| 5,2 | 1362 | 7,12 | 3,0 |
| 5,7 | 1306 | 6,83 | 3,0 |
| 6,2 | 1135 | 5,78 | 3,3 |
| 6,7 | 1096 | 5,55 | 3,5 |

Tabela 12 - Resultados dos ensaios mecânicos para a mistura 50

| Traços (%) | Estabilidade (Kgf) | Resistência a tração (MPa) | Fluência (mm) |
|------------|--------------------|----------------------------|---------------|
| 4,8 | 1283 | 6,78 | 3,0 |
| 5,3 | 1225 | 6,47 | 3,3 |
| 5,8 | 991 | 5,20 | 3,3 |
| 6,3 | 799 | 4,19 | 3,8 |
| 6,8 | 580 | 3,02 | 4,0 |

Gráficos 11, 12 e 13 - Comparação das propriedades mecânicas das misturas com a norma DNIT 021/2006



De acordo com a tabela 9, percebeu-se que a estabilidade, resistência a tração e fluência de todos os traços de todas as misturas estão dentro das especificações da norma DNIT 031-2006.

A mistura que contém 25% de RAP foi a que apresentou maiores valores de estabilidade e resistência a tração, devido a possuir maiores quantidades de agregados virgens que são o que dão ao pavimentos sua resistência estrutural. Já a mistura que contém 50% de material fresado foi a que apresentou maiores valores de fluência devido a essa mistura possuir alta quantidade de finos, sendo assim proporcionando uma mistura extremamente densa (sem vazios), fazendo com que ela apresente altos valores de fluência.

7. CONCLUSÃO

Estudou-se a potencialidade do emprego do concreto asfáltico reciclado fresado a taxas de reciclagem de 25%, 37% e 50%. Tais estudos mostraram a viabilidade do uso de tais materiais, porém não foram todas as misturas que conseguiram atingir as especificações (031/2006 do DNIT) para ser usada na camada de rolamento de um pavimento. Principalmente, a mistura contendo 50% de RAP, pois pelo RAP usado possuir uma grande quantidade de finos, que por sua vez faz com que a mistura não possua uma determinada porcentagem de vazios para que o ligante possa penetrar exercendo seu papel adesivo. Sugere-se para uma futura pesquisa o enquadramento da mistura contendo 50% de RAP às normas, para isso recomenda-se um repeneiramento do RAP com a finalidade da retirada de um percentual da parte fina desse material. Isso possivelmente fará com que a mistura fique de acordo com as especificações do DNIT.

As misturas asfálticas recicladas estudadas apresentaram elevados valores para a estabilidade Marshall e para a resistência a tração por compressão diametral, valores esses bastante acima dos usualmente desejados para concreto asfáltico. Os valores de fluência para as misturas estudadas mostraram-se dentro dos padrões aceitáveis convencionalmente.

A dosagem para as MARQ mostrou-se simples e de fácil execução. Pode ser usada integralmente em usinas de grande porte ou em "*in situ*". Além disso, com o uso desse material reciclado em novas misturas asfálticas reduz a exploração de novas jazidas de agregados atenuando o impacto ambiental, visto que esse material é depositado como passivo ambiental. Além disso, reduz a utilização de asfalto e agregados virgens, do greide do pavimento e dos custos de novas pavimentações ou recapeamentos. Mostrando que essa metodologia pode gerar uma economia relativamente elevada, principalmente em países cuja a base do transporte rodoviário, como o Brasil.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. - **Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos. Documento Base**, INIR, Lisboa, 2009. (AZEVEDO, 2009b).

AZEVEDO, M. e CARDOSO, M. **Reciclagem a Quente em Central Betuminosa**. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ISBN: 972-752-062), Porto, 2003.

BALBO., J. T. e BODI, J. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade**". *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis, 2004.

BAPTISTA., A. M. C. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu estudo e aplicação**. Tese (Doutorado), Universidade de Coimbra, Portugal, 2006.

BATISTA, F. **Novas técnicas de reabilitação de pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio**. Tese (Doutorado) , Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2004.

BERNUCCI., L. B.; L. M. G. MOTTA.; J. A. P. CERATTI e J. B. Soares **“Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros”**. *PETROBRÁS. ABEDA*, Rio de Janeiro, 2006

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. São Paulo,. Ed Fazendo Arte. 111p, 2000.

CABRAL, G.L.L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

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

COELHO, H.O. **Sistemas de transportes II**. Universidade Católica de Pelotas,2011. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/70455912/Aula-4-dada-em-07-04-11>>. Acessado em 2 jan 2014.

CUNHA, A.; PEÇANHA, C.; LEÃO, L.; MEDEIROS, T.- **Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto**, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

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

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Concreto Betuminoso Reciclado à Quente na Usina**, DNER-ES 318/97, Rio de Janeiro, 1997.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

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

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 031 - **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Especificação de Serviço**, 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ES 033 - **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Especificação de Serviço**, 2006.

EAPA . “Asphalt in Figures - 2005”. **European Asphalt Pavement Association**, Bruxelas, Bélgica, 2006.

FERNANDES, C.G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. 204 f. Tese (Mestrado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

GEIPOT - GRUPO EXECUTIVO DE INTEGRAÇÃO DA POLITICA DE TRANSPORTES. **Anuário estatístico dos transportes**. Ministério dos transportes, 2001.

IPB - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETROLEO. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. Rio de Janeiro: IBP - Comissão de asfalto, 1999.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em ciência e tecnologia de polímeros) - Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W. **Hot mis asphalt materials, mixture, design and construction**. 2ª ed. Lanham: Napa Education Foundation, 1996.

SANTANA, E. P. **Estudos das propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas recicladas com materiais fresados: estudo de caso - BR-230**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Centro Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande - PB, 2009.

SHELL - **The shell bitumen handbook**. 5ª ed. Cambridge, 2003.

VASCONCELOS, K. L. ; SOARES, Jorge Barbosa . **Projeto de Mistura de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado**. In: XII Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto, 2003, Quito. Anais do XII Congresso Ibero-Latino Americano del Asfalto, 2003.

WOODS, K.B. **Highway engineering handbook**. New York: McGraw Hill, 1960.