

RELATÓRIO DE PESQUISA RDT CONCEPA/ANTT

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURA ASFÁLTICA ESTOCÁVEL

JUNHO DE 2017



D.D.D. Engenharia Ltda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	5
1.1.1 Objetivo geral	5
1.1.2 Objetivos específicos	6
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA	7
2.1.1 Roçada	7
2.1.2 Tapa-buracos	8
2.1.3 Microrrevestimento asfáltico a frio	11
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS	15
2.2.1 Misturas asfálticas a quente	19
2.2.2. Misturas asfálticas mornas	25
2.2.3 Misturas asfálticas a frio	33
2.3 ASFALTO ENSACADO	37
3 METODOLOGIA	41
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	41
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	42
3.2.1 Agregados	42
3.2.2 Ligante	44
3.2.3 Aditivo	44
3.3 ENSAIOS MECÂNICOS	45
3.3.1 Módulo de resiliência (MR)	45
3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)	46
4 RESULTADOS	52
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	52
4.1.1 Agregados	52
4.1.2 Ligante e aditivo	54
4.1.3 Mistura	56
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS	61
4.2.1 Módulo de resiliência (MR)	61
4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)	64
5 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa CNT avaliou, em 2016, 103.259 km de rodovias, incluindo toda a malha federal e as principais rodovias estaduais do Brasil. Desse total, 58,2% apresentam algum tipo de problema no estado geral. Considerando individualmente as características avaliadas, tem-se que 48,3% das rodovias pesquisadas possuem deficiências no pavimento, 51,7% na sinalização e 77,9% na geometria da via. Os resultados pouco satisfatórios das condições das rodovias são agravados pela sobrecarga de demanda nas estradas brasileiras, aliada à ausência de investimentos em manutenção e/ou conservação nos moldes necessários, o que, cada vez mais, tem contribuído para a depreciação da malha rodoviária brasileira (CNT, 2016).

A manutenção rodoviária compreende um processo sistemático a que, de forma contínua, deve ser submetida uma rodovia, no sentido de que esta, de conformidade com suas funções e magnitude de tráfego, venha a oferecer ao usuário, permanentemente, um tráfego econômico, confortável e seguro (DNIT, 2006). De maneira geral, a manutenção rodoviária se dá com a utilização de vários tipos de intervenções, dentre os quais se destacam a restauração do pavimento e a conservação rodoviária.

A restauração do pavimento é o conjunto de operações destinado a restabelecer o perfeito funcionamento do pavimento, e restabelecer, na íntegra, suas características técnicas originais. Envolve, portanto um conjunto de medidas destinadas a adaptar a rodovia, de uma forma permanente, às condições de tráfego atuais e futuras, prolongando seu período de vida (DNIT, 2005).

A conservação rodoviária compreende o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência realizadas com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário e das instalações fixas, dentro dos padrões de serviço estabelecidos. Existem três tipos de conservação rodoviária: conservação corretiva rotineira, conservação preventiva periódica e conservação de emergência (DNIT, 2005).

Uma das principais tarefas da conservação corretiva rotineira é a execução de tapa-buracos, que via de regra, é ser executado com misturas asfálticas. O serviço de tapa-buracos com emulsões asfálticas constitui o sistema mais simples para a manutenção de pavimentos e é comumente empregado em planos emergenciais rodoviários e de vias urbanas (ABEDA, 2010).

Conforme a norma DNIT 005/2003-TER, buraco ou panela é a cavidade que se forma no revestimento por diversas causas (inclusive por falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslocamento das camadas), podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas.

As principais causas da ocorrência de buracos ou painelas são: excesso de carga por eixo dos veículos; deficiência de projeto; deficiências construtivas; ação da água devido a infiltração; negligência na conservação e restauração, etc.

Analisando a condição da superfície do pavimento das rodovias brasileiras, 69,3% da extensão total avaliada apresentam algum tipo de problema, sendo que, em 48,3% (49.934 km), predominam o desgaste; 17,3% (17.907), a trinca em malha ou remendo; e em 2,8% (2.847 km), afundamentos, ondulações ou buracos. Há, ainda, 921 km (0,9%) totalmente destruídos, onde os trechos apresentaram grande quantidade de buracos ou ruína total da superfície de rolamento (CNT, 2016).

A presença de buracos nas rodovias brasileiras é algo inaceitável, já que contribui para a instabilidade do veículo, podendo causar acidentes e aumentando muito o custo operacional, a poluição e reduzindo o conforto e a segurança, ou seja, comprometendo severamente o uso da via.

Os materiais mais utilizados na execução de tapa-buracos são o pré-misturado a frio (PMF) e o concreto asfáltico (CA). Entretanto, as empresas que executam tapa-buracos com CBUQ estão tendo dificuldades justamente por ela ser uma mistura asfáltica a quente que exige um rigoroso controle de temperatura.

Muitas falhas prematuras nos revestimentos asfálticos têm sua origem na falta de homogeneidade das misturas asfálticas, pois processos inadequados durante a construção dos pavimentos podem produzir uma série de diferenciais térmicos que afetam essa homogeneidade, dando lugar a áreas de material mais frio que o previsto no projeto da mistura. Para se obter um bom desempenho de uma mistura asfáltica a quente, evitando falhas prematuras no pavimento, todos os processos durante a construção devem ser executados dentro de um intervalo de temperatura adequado e, para evitar a ocorrência de segregação térmica, deve ser dada uma atenção especial ao controle de temperatura. Percebe-se que a alteração da temperatura de compactação tem um efeito muito acentuado nos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas asfálticas a quente. As misturas a quente compactadas em temperaturas menores que as de projeto tendem a apresentar menor densidade e

mais vazios, facilitando a entrada de água na massa e contribuindo para uma redução das propriedades mecânicas (FACCIN et al., 2015).

Buscando refinar as técnicas já utilizadas através da potencialização do desempenho e diminuição dos custos de execução, torna-se fundamental a introdução de inovações tecnológicas na conservação de pavimentos. Uma dessas inovações é o asfalto ensacado ou mistura asfáltica estocável para utilização em tapa-buracos, mediante a incorporação de aditivos. Por se tratar de uma solução relativamente simples, o asfalto ensacado pode, dependendo do seu comportamento diante de ensaios, vir a ser uma alternativa para planos emergenciais envolvendo tapa-buracos em rodovias e vias urbanas.

Algumas vantagens operacionais desta técnica podem ser citadas:

- não necessita rodar a usina de asfalto para pequenas quantidades de massa;
- a aplicação é simples e não depende da temperatura;
- pode ser transportado em veículos leves;

Neste sentido, a presente pesquisa, de caráter exploratório e laboratorial pretende estudar as propriedades mecânicas de rigidez e resistência de misturas estocáveis/ensacadas.

A presente pesquisa intitula-se **“AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURA ASFÁLTICA ESTOCÁVEL”**. Teve duração de 3 meses (abril a junho de 2017) e se caracterizou como uma pesquisa de cunho laboratorial envolvendo a Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – CONCEPA.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar o comportamento mecânico e de misturas asfálticas estocáveis com vista a utilização de serviços de reparos emergenciais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Caracterizar os materiais (agregados e ligante) componentes do asfalto ensacado;
- b) Determinar as propriedades mecânicas do asfalto ensacado, por meio de ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a tração por compressão diametral (RT);
- c) Avaliar a viabilidade do asfalto ensacado obtido quanto a utilização em serviços de tapa-buracos e as variáveis tempo de estocagem e tempo de cura (pós compactação).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA

Dentre os inúmeros serviços de conservação rodoviária, destacam-se: roçada (manual e mecanizada), tapa-buracos e aplicação de Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF).

2.1.1 Roçada

A serviço de roçada consiste no corte da vegetação de pequeno porte, na faixa de domínio e no canteiro central, quando houver, com a finalidade de tornar as áreas marginais das rodovias livres de vegetação daninha, dando-lhes melhor aspecto, ou ainda com o objetivo de facilitar a drenagem e evitar o fogo. Esta tarefa poderá ser feita manual ou mecanicamente, de início, com a frequência de duas vezes ao ano, sendo uma delas no início do período de estiagem, quando a vegetação começar a secar. Nos trevos e interseções em nível - bem como nos prédios e áreas operacionais e de suporte, os serviços de roçada e poda manual e mecanizada devem ser executados até no mínimo dez metros de seu entorno (DNIT, 2005).

A Figura 1 e 2 mostram exemplos de roçada manual e mecanizada, respectivamente.

Figura 1 – Roçada manual



Figura 2 – Roçada mecanizada



2.1.2 Tapa-buracos

O serviço de tapa-buracos consiste em reparar buraco ou depressão secundária no revestimento, de modo a evitar maiores danos ao pavimento e se obter uma superfície de rolamento segura e confortável (DNIT, 2005).

O serviço de tapa-buracos com emulsões asfálticas constitui o sistema mais simples para a manutenção de pavimentos e é comumente empregado em planos emergenciais rodoviários e de vias urbanas (ABEDA, 2010).

Na execução do tapa-buracos, entre os inúmeros serviços que podem ser executados com emulsões asfálticas, um dos mais empregados é o Pré-Misturado a Frio (PMF) (ABEDA, 2010).

A facilidade da produção de massa asfáltica em usina apropriada ou betoneira, bem como na execução dos serviços, faz com que essa alternativa ganhe espaço em muitas obras em que não se dispõe de grandes recursos financeiros e operacionais (ABEDA, 2010).

A superfície dos pavimentos sofre deterioração sob a ação das características do tráfego e do intemperismo (ABEDA, 2010).

Inicialmente surgem os defeitos superficiais, representados por fissuras e trincas que afetam o revestimento asfáltico. Na sequência aparecem as degradações médias (panelas), ainda sem o comprometimento das camadas de base. No estágio final, surgem as degradações profundas (trincas de alta severidade e buracos) que afetam também as camadas subjacentes do pavimento (ABEDA, 2010).

Os primeiros defeitos oriundos de degradação superficiais, se não sanados através de ações preventivas, por exemplo, selagem de trincas e/ou lama asfáltica,

necessitarão, num curto período, de intervenções emergenciais para restabelecer as condições de serventia do pavimento. Nesse caso, devem ser empregados os serviços corretivos de tapa-buracos (ABEDA, 2010).

O retardamento da execução dessas operações poderá resultar no comprometimento estrutural demandando uma restauração mais pesada e onerosa, ou até mesmo a reconstrução total do pavimento (ABEDA, 2010).

De uma maneira geral a execução de tapa-buracos é realizada com PMFs empregando-se emulsão asfáltica catiônica que poderá ser de ruptura média, tipo RM-1C em PMF aberto e para misturas de PMF semidenso ou denso é utilizada emulsão lenta, tipo RL-1C. Antes da aplicação do PMF deverá ser aplicado sobre o substrato emulsão de ruptura rápida, RR-1C para promover a ligação entre as camadas (pintura de ligação). Se requerido no projeto, o ligante asfáltico pode conter polímeros, para atender as características especificadas de clima e tráfego (ABEDA, 2010).

É fundamental em qualquer tipo de mistura asfáltica, inclusive as empregadas no serviço de tapa-buracos, que os agregados sejam britados no mínimo em uma face e que possuam granulometria adequada à solução indicada (ABEDA, 2010).

Normalmente, são utilizados as faixas especificadas pelo DNIT para o PMF. Os principais equipamentos utilizados no serviço são usinas, rolo compressor e acessórios tais como pás, enxadas, ancinhos, soquetes, entre outros (ABEDA, 2010).

O buraco deve ser reparado conforme os seguintes procedimentos usuais (ABEDA, 2010):

- a) conformação de seus lados segundo figura geométrica regular (requadramento);
- b) varreção;
- c) aplicação da pintura de ligação;
- d) e se necessário aplicação de base.

O PMF para camada de rolamento deve ser aplicado na espessura máxima de 5 cm. Se a profundidade do buraco for maior deve-se completar a estrutura do pavimento com material de base ou colocar uma camada de PMF intermediária (faixa B do DNIT) (ABEDA, 2010).

Após a compactação da camada intermediária, completa-se o buraco com o PMF que servirá de camada de rolamento (ABEDA, 2010).

O PMF deve ser aplicado com espessura adicional de cerca de 1 cm em relação à superfície/cota do pavimento remanescente para evitar que o local reparado tenha

seu perfil alterado por efeito da compactação empregada no reparo pela ação do trânsito (ABEDA, 2010).

A compactação pode ser feita com rolos compressores, sapos mecânicos, placas vibratórias ou soquetes manuais, dependendo do montante da obra (ABEDA, 2010).

Após a compactação, para que o trânsito seja liberado de imediato, sugere-se cobrir o buraco tapado com pó de pedra ou areia para que a massa tenha sua cura completada com qualidade e segurança (ABEDA, 2010).

De qualquer maneira, a compactação será completada pelo próprio trânsito. Após alguns dias, o PMF estará completamente consolidado (ABEDA, 2010).

Um bom desempenho do serviço de tapa-buraco com PMF é garantido através da escolha de agregados de boa qualidade e emulsão adequada à mistura desejada. A mistura deverá ser dosada e controlada por laboratório especializado em asfaltos (ABEDA, 2010).

As principais vantagens do tapa-buracos com PMF são (ABEDA, 2010):

- a) dispensa qualquer aquecimento;
- b) apresenta excelente adesividade;
- c) possibilita o trabalho com agregados úmidos;
- d) pode ser produzido em simples betoneiras;
- e) permite a estocagem da mistura, possibilitando a usinagem dissociada da aplicação na pista;
- f) é de técnica simples, podendo ser praticada por pessoal sem grande experiência;
- g) possibilita a realização de serviços mais econômicos.

A Figura 3 mostra a execução de um tapa-buracos.

Figura 3 – Execução de tapa-buracos



2.1.3 Microrrevestimento asfáltico a frio

Atualmente, uma das soluções técnicas mais utilizadas em serviços de manutenção e conservação de rodovias é o Micro Revestimento Asfáltico a Frio (MRAF).

Segundo a Especificação de Serviço 035/2005 do DNIT (DNIT, 2005), micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero consiste na associação de agregado, material de enchimento (fíller), emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS, água e aditivos, caso necessário. Quando pronta para aplicação, apresenta consistência fluida e deve ser uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada.

O MRAF é um tipo de revestimento asfáltico derivado da lama asfáltica. A lama é uma solução técnica utilizada em manutenção de rodovias desde a década de 60 e tem como objeto de sua utilização a recuperação de pavimentos rodoviários desgastados superficialmente mas que não apresentem problemas estruturais (ISSA, 2016).

A lama asfáltica teve uso amplamente difundido em países como a França, Estados Unidos e Brasil em função dos bons resultados obtidos com custos de execução relativamente pequenos quando comparados com outras soluções regularmente utilizadas para os mesmos fins. Além disso, a utilização de lama

asfáltica, assim como o micro revestimento apresenta outras duas grandes vantagens em relação a outros serviços de recuperação funcional de pavimentos: a grande produtividade alcançada com equipes enxutas e a rápida liberação da pista após sua execução.

O MRAF surgiu na Europa durante os anos 70 e foi utilizada em maior escala durante os anos 80 nos Estados Unidos, com a mesma concepção e princípio das lamas asfálticas, porém, em sua mistura é adicionada emulsões asfálticas modificadas por polímero (BERNUCCI et al., 2008).

O micro revestimento asfáltico a frio pode ser considerado uma evolução das lamas asfálticas justamente por contar em sua composição com emulsões modificadas por polímeros. A emulsão empregada no MRAF, além de conter polímeros elastoméricos (SBR ou SBS), tem sua ruptura passível de controle. O tempo de ruptura/cura é ajustado compatibilizando a composição do fíller (cal hidratada ou cimento Portland) e os aditivos (se necessário) com os agregados e as condições climáticas da obra (umidade relativa e temperatura ambiente) (CERATTI; REIS, 2011).

Os polímeros elastoméricos conferem à mistura características elásticas que possibilitam maior vida útil ao revestimento, principalmente em função de que proporcionam a impermeabilização do pavimento por mais tempo, através da selagem das trincas pré-existentes e retardo da reflexão dessas trincas na nova superfície. Os polímeros adicionados também proporcionam à mistura maior adesividade do ligante aos agregados miúdos. Nessa direção, o desenvolvimento de emulsões asfálticas catiônicas impulsionou ainda mais os diversos tipos de tratamento superficial que utilizem tais componentes (ISSA, 2016).

A primeira experiência de MRAF em rodovia de intenso volume de tráfego, devidamente monitorada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), data de 1997, quando foi executado o trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra (BR-116/SP). Nos anos seguintes, houve crescente interesse dos órgãos e das concessionárias de rodovias, com utilização de MRAF em larga escala, em função dos bons resultados em pista e de sua efetividade econômica no incremento da vida do pavimento (CERATTI; REIS, 2011).

No Brasil, as concessionárias e os órgãos públicos responsáveis pela manutenção de rodovias do país têm buscado de forma constante a introdução de inovações tecnológicas na conservação de pavimentos, buscando refinar as técnicas

já utilizadas através da potencialização do desempenho e diminuição dos custos de execução.

Assim, por se tratar de uma solução proporcionalmente barata, de aplicação relativamente simples e apresentar ótimos resultados de desempenho, o MRAF vem sendo amplamente utilizado em obras de manutenção e recuperação de pavimentos betuminosos. No âmbito do DNIT, além de serviços tradicionais utilizados nos contratos de manutenção e restauração rodoviária, a utilização de MRAF vem, cada vez mais, ocupando grande percentual dos serviços previstos.

Em contratos do tipo PIR IV (Programa Integrado de Revitalização), que tem como objetivo a recuperação funcional do pavimento, e do Programa CREMA (Conservação, Restauração e Manutenção Rodoviária), frequentemente têm em suas previsões de soluções técnicas a execução de MRAF em grandes extensões.

Embora possa ser utilizado em serviços de manutenção corretiva, o principal campo de aplicação do MRAF é na conservação de pavimentos que apresentam resistência remanescente para suportar o tráfego previsto em projeto, isto é, sem deficiências estruturais e que necessitam rejuvenescimento, impermeabilização e melhoria das condições de atrito e segurança (CERATTI; REIS, 2011).

A experiência brasileira tem se concentrado no emprego do MRAF como: camada selante, impermeabilização, rejuvenescedora e antiderrapante, conforme descrito na especificação de serviço MRAF - DNIT 035/2005 (DNIT, 2005). Suas características funcionais e construtivas possibilitam intervenções de menor "porte" e custo, fazendo com que a técnica seja amplamente utilizada em sistema de gerência de pavimentos (SGP) para a preservação do pavimento e/ou estratégias com ênfase na conservação preventiva, corretiva para retardar a evolução dos defeitos e postergar as obras de restauração mais onerosas, conforme previsto nas diretrizes do Programa CREMA.

Porém, por apresentar bons resultados o MRAF vem sendo utilizado nas mais diversas situações e, não raras vezes, em locais e condições de aplicação não recomendada. Pavimentos com problemas estruturais, elevado percentual de trincas do tipo FC3, exsudação ou condições climáticas adversas criam condições extremamente variáveis de aplicação que, em muitos casos, deveriam inabilitar o uso dessa solução ou, ao menos, exigir cuidados e controles de execução mais rígidos.

Mesmo em locais em que haveria indicação de aplicabilidade do MRAF, na maior parte das vezes, os projetos de mistura do micro revestimento não levam em

consideração variáveis importantes como o volume de tráfego, o tipo de pavimento existente, o tipo de intervenção anterior, a macrotextura desse pavimento, a severidade e percentual de trincas existentes, a heterogeneidade dos segmentos da rodovia, o clima típico do local bem com a época do ano em que será aplicada a mistura.

A Tabela 1 apresenta as faixas granulométricas e o consumo teórico de materiais segundo a especificação de serviço DNIT - MRAF 035/2005-ES.

Segundo a Norma DNIT 035/2005 – ES a faixa I é indicada para áreas urbanas e aeroportos, a faixa II para rodovias de tráfego pesado e trilhas de roda e a faixa III para regularização de rodovias e rodovias de tráfego pesado.

Tabela 1 – Faixas granulométricas utilizadas para composição do microrevestimento asfáltico a frio

Composição granulométrica da mistura de agregados					
Peneira de malha quadrada		Percentagem passando em peso			Tolerância da curva de projeto (%)
Peneiras					
Nome	Abertura (mm)	Faixa I	Faixa II	Faixa III	
1/2	12,5	-	-	100	-
3/8	9,5	100	100	85 - 100	± 5
4	4,75	90 – 100	70 - 90	60 - 87	± 5
8	2,36	65 - 90	45 - 70	40 - 60	± 5
16	1,18	45 - 70	28 - 50	28 - 45	± 5
30	0,6	30 - 50	19 -34	19 - 34	± 5
50	0,33	18 - 30	12 - 25	14 - 25	± 5
100	0,15	10 - 21	7 - 18	8 - 17	± 3
200	0,075	5 - 15	5 - 15	4 - 8	± 2

Fonte: DNIT, 2005.

A Figura 4 mostra um exemplo de execução de MRAF.

Figura 4 – Exemplo de execução de MRAF.



2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

A pavimentação tem como meta propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para as obras, garantido um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço desta infraestrutura social (BALBO, 2007).

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2010).

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento ou camada de rolamento misturas de agregados minerais e ligantes asfálticos com graduações e características próprias que, de forma adequadamente dosada e processada, garantam ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo

com o clima e o tráfego previstos para o local (CERATTI et al., 2015). Essa mistura de agregados minerais e ligantes asfálticos dá origem às misturas asfálticas.

O sucesso do revestimento asfáltico, segundo Preussler e Pinto (2010), depende de uma mistura com uma ótima graduação dos agregados e da porcentagem de ligante betuminoso. Esta camada deve ser durável, resistente à fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego esperado e às condições climáticas.

As misturas asfálticas devem apresentar algumas propriedades básicas como: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, e resistência ao cisalhamento. Para atingir estes critérios satisfatoriamente é necessário, entre outros fatores como qualidade dos materiais e execução correta, ter uma boa dosagem. Normalmente são dosadas baseadas nos seguintes critérios:

- escolha dos materiais: agregados, cal (caso houver) e material betuminoso;
- determinação das percentagens de agregados na composição da mistura, atendendo as especificações impostas, de acordo com as camadas do pavimento;
- determinação do teor ótimo de asfalto;
- comparação da mistura dosada com as exigências das especificações de parâmetros como: volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume vazios e estabilidade.

Dentre os métodos de dosagem de misturas betuminosas, destacam-se os métodos Marshall - utilizado nos projetos de rodovias brasileiras desde a década de 60 e SUPERPAVE pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), que apesar de ser utilizado e aprimorado em obras nos Estados Unidos há duas décadas, seu uso no Brasil ainda é restrito a pesquisas.

Ainda é importante ressaltar que além dos parâmetros de dosagem, os métodos de escolha da granulometria da estrutura de agregados devem ser considerados para obtenção de um pavimento de boa performance. Os métodos mais relevantes são o método Bailey e Metodologia Faixa de Agregado Dominante (FAD).

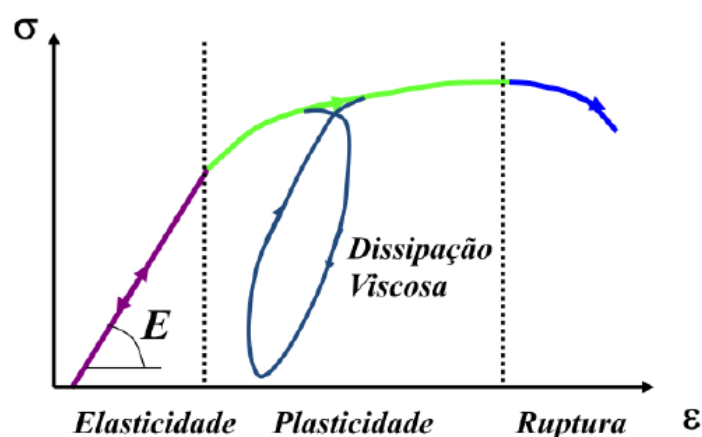
As propriedades mecânicas das misturas asfálticas são muito importantes para dominar o conhecimento a respeito das características e desempenho dos pavimentos. Entre as propriedades mais importantes das misturas asfálticas, destaca-se a rigidez.

O termo rigidez, utilizado principalmente no estudo de misturas asfálticas, indica a capacidade de o material resistir às deformações.

Para Kim (2009) a rigidez em concretos asfálticos é um parâmetro do material, onde nada mais é que a inclinação de curva de tensão-deformação, sendo essa uma propriedade única (independente do ensaio, do tamanho ou geometria da amostra). Kim também afirma que a rigidez em concreto asfáltico é influenciada por diversos fatores tais como: a taxa de deformação, temperatura, o estado de tensão, as partículas do agregado, o tipo de ligante, a película de ligante asfáltico que envolve os agregados, os finos na massa, os vazios, o envelhecimento da mistura asfáltica, a reatividade com o oxigênio, e os modificadores que foram adicionados à mistura asfáltica.

O diagrama tensão-deformação apresentado na Figura 5 mostra as várias etapas e a mudança da relação que se estabelece entre tensão atuante e deformação. Na primeira região do diagrama verifica-se uma proporcionalidade entre tensão e deformação apresentando o comportamento elástico, ou seja, toda forma de energia acumulada pela deformação do material não ocasiona dano permanente. A teoria da elasticidade (Lei de Hooke) equaciona o comportamento de alguns materiais de forma bastante simplificada, sem levar em consideração o tempo na caracterização da deformação do material.

Figura 5 – Diagrama tensão deformação genérico



Fonte: (Adaptado de Babadopoulos, 2013).

Após a zona elástica a deformação segue aumentando, no entanto deixa de ser linear e proporcional com a tensão. Na zona da plasticidade fica evidente que o material não consegue retornar ao estado original por completo. Já a terceira região, o material é levado ao rompimento total, conhecida por zona de ruptura.

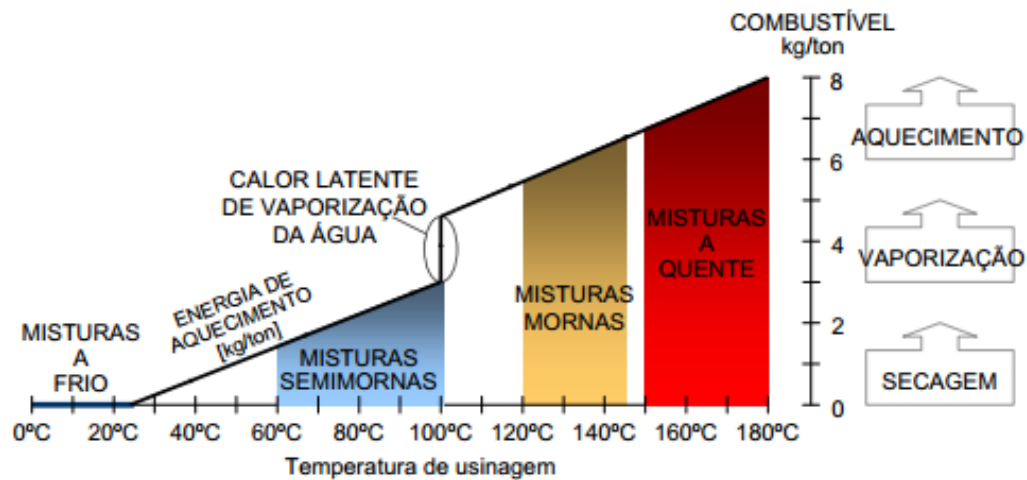
As misturas asfálticas não possuem a capacidade de armazenar e dissipar totalmente a energia que lhes é fornecida, sendo representadas satisfatoriamente por modelos diferenciados de Elasticidade (mola) e Viscosidade (amortecedor). Os materiais viscoelásticos possuem características de materiais elásticos e viscosos, onde a deformação depende do tempo.

No Brasil, a avaliação de rigidez dos pavimentos é pelo ensaio de Módulo de Resiliência (MR), também conhecido como módulo de elasticidade (E), tendo a mesma definição pela teoria da elasticidade, porém, determinado a partir de cargas repetidas. Em alguns países é utilizado corriqueiramente o módulo complexo para avaliar rigidez, enquanto no Brasil o módulo complexo está restrito ao meio acadêmico e de pesquisas.

As misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção, divididas basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (MOTTA, 2011).

A crescente preocupação em se produzir misturas asfálticas com maior economia e menor impacto ambiental tem instigado o setor de pavimentação ao desenvolvimento de novas tecnologias que mantenham as mesmas propriedades das misturas asfálticas convencionais quentes e que minimizem os impactos ambientais. Conforme o nível de aquecimento no processo de usinagem, há variação da energia consumida (combustível), como ilustrado na Figura 6, onde apresenta-se a classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem. Nota-se também, que nos processos anteriores, de secagem e vaporização da água, demandam grande quantidade energética para serem efetuados, mostrando a grande economia gerada com as misturas mornas se comparado as misturas quentes.

Figura 6 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados)



Fonte: D'Angelo et al. (2008) e Olard (2008), adaptado por Motta (2011)

2.2.1 Misturas asfálticas a quente

As misturas asfálticas a quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados pétreos e do ligante asfáltico, sendo a usinagem executada em níveis elevados de temperatura, da ordem de 145 a 180°C (BERNUCCI et al., 2010; BROWN et al., 2009; ASPHALT INSTITUTE, 2007).

As misturas asfálticas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destina (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo Bernucci et al. (2010) as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas, pela graduação dos agregados e fíler, em três tipos, são elas:

- graduação densa: curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante,

possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);

- graduação descontínua: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Exemplo: matriz pétrea asfáltica (stone matrix asphalt – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded).

Todos esses tipos de misturas asfálticas a quente são utilizados como revestimento de pavimentos de qualquer volume de tráfego, desde o muito baixo até o muito elevado, sendo que os tipos especiais, SMA e CPA, sempre são colocados sobre outra camada preexistente de concreto asfáltico ou de outro material, até de concreto de cimento Portland. Quando a espessura de projeto de revestimento for maior que 70mm é comum fazer uma subdivisão em duas camadas para fins de execução; a superior que fica em contato com os pneus dos veículos é chamada de camada de rolamento ou simplesmente de “capa” e tem requisitos de vazios bastante restritos, para garantir a impermeabilidade; a camada inferior é referida como camada de ligação ou intermediária (ou ainda de binder) e pode ser projetada com um índice de vazios ligeiramente maior, com a finalidade de diminuir o teor de ligante e baratear a massa asfáltica. Esse procedimento também modificará as características mecânicas e de flexibilidade da mistura, o que deve ser levado em conta no dimensionamento do pavimento. Os pré-misturados a quente que não atendem a requisitos granulométricos de camada intermediária ou de nivelamento, mas são preparados com tamanhos nominais máximos de agregados graúdos de grandes dimensões são referidos genericamente de PMQ, devendo atender a especificação de serviço particular para camada especial de correção de desnivelamentos ou regularização em pavimentos em uso (BERNUCCI et al., 2010).

Um dos tipos de misturas a quente mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico – CA, também denominado em alguns órgãos por CAUQ – concreto asfáltico usinado a quente ou CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente. O CA é um material para a construção de revestimentos de pavimentos, incluindo as capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos, obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais (naturais ou

artificiais, britados ou em sua forma disponível), em geral bem graduados, de material fino de enchimento – fíler (pó de pedra, finos calcários ou cimento Portland) – e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Trata-se de uma mistura elaborada a quente, em usina misturadora (central de usinagem), contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte (BALBO, 2007).

A norma DNIT 031/2004-ES define concreto asfáltico como sendo uma mistura asfáltica usinada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) se necessário e ligante asfáltico, espalhada e compactada a quente. As faixas granulométricas do concreto asfáltico são mostradas na Figura 7.

Figura 7 – Faixas granulométricas do concreto asfáltico especificadas pela norma DNIT 031/2004-ES

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%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		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%

Fonte: DNIT-ES 031/06.

Concretos asfálticos densos são as misturas asfálticas usinadas a quente mais utilizadas como revestimentos asfálticos de pavimentos no Brasil. Suas propriedades, no entanto, são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. Uma variação positiva, às vezes dentro do admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação permanente por fluência e/ou exsudação, com fechamento da

macrotextura superficial. De outro lado, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida. Uma das formas de reduzir a sensibilidade dos concretos asfálticos a pequenas variações de teor de ligante e torná-lo ainda mais resistente e durável em vias de tráfego pesado é substituir o ligante asfáltico convencional por ligante modificado por polímero ou por asfalto-borracha (BERNUCCI et al., 2010).

Entre as misturas asfálticas abertas, a mais utilizada é a camada porosa de atrito (CPA). Neste tipo de mistura asfáltica é utilizado o CAP modificado por polímeros elastoméricos. Essas misturas asfálticas, como indica o nome corrente, destinam-se especialmente a serem drenantes das águas superficiais evitando a formação da lâmina d'água e o fenômeno da hidroplanagem. Por isso não compõe camadas estruturais e devem sempre ser aplicadas sobre uma camada asfáltica densa (CERATTI et al., 2015).

As misturas asfálticas abertas do tipo CPA – camada porosa de atrito – mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Essas misturas asfálticas a quente possuem normalmente entre 18 e 25% de vazios com ar – DNER-ES 386/99. Na França essas misturas asfálticas podem conter até 30% de vazios com ar. A CPA é empregada como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Esse revestimento é responsável pela coleta da água de chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido à sua elevada permeabilidade, até a água alcançar as sarjetas. A característica importante dessa mistura asfáltica é que ela causa: redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distâncias de frenagem; redução do spray proveniente do borramento de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade; e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos. Todos esses aspectos conjuntos são responsáveis pela redução do número de acidentes em dias de chuva. Outro fator importante é a redução de ruído ao rolamento, amenizando esse desconforto ambiental em áreas nas proximidades de vias com revestimentos drenantes. Esta camada drenante é executada sobre uma camada de mistura densa e estrutural (BERNUCCI et al., 2010).

A especificação brasileira do DNER-ES 386/99 recomenda para CPA cinco faixas granulométricas e teor de ligante asfáltico entre 4,0 e 6,0%. Porém, devido à particularidade granulométrica, a quantidade de ligante é geralmente reduzida, ficando em média em torno de 3,5 a 4,5%, dependendo do tipo de agregado, forma, natureza, viscosidade e tipo de ligante. O ligante utilizado deverá ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Em geral recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação. A camada inferior à CPA deve ser necessariamente impermeável para evitar a entrada de água no interior da estrutura do pavimento (BERNUCCI et al., 2010).

O SMA (Stone Matrix Asphalt) é um revestimento asfáltico, usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. A mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos e, devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. O SMA é uma mistura rica em ligante asfáltico, com um consumo de ligante em geral entre 6,0 e 7,5%. Geralmente é aplicado em espessuras variando entre 1,5 a 7cm, dependendo da faixa granulométrica. São misturas que tendem a ser impermeáveis com volume de vazios que variam de 4 a 6% em pista, ao contrário da CPA vista anteriormente (BERNUCCI et al., 2010).

Devido à graduação e alta concentração de agregados graúdos, tem-se macrotextura superficialmente rugosa, formando pequenos “canais” entre os agregados graúdos, responsáveis por uma eficiente drenabilidade superficial e aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva. No país, pioneiramente foi construída a pista do autódromo de Interlagos em São Paulo em fevereiro de 2000, empregando-se o SMA. Em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, rodovia que interliga São Paulo a Santos, mostrando grande sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas. Desde então outros trechos vêm sendo executados usando ora graduações alemãs, ora americanas. As mais recentes obras são em rodovias dos estados de São Paulo e Minas Gerais, além de uso urbano em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador (BERNUCCI et al., 2010).

Outra opção mais recentemente introduzida no Brasil é a graduação com intervalo (gap) – descontínua densa, conhecida por gap-graded, que é uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado. Algumas utilizações dessa faixa vêm sendo realizadas com asfalto-borracha. Esse tipo de mistura asfáltica tem sido empregado como camada estrutural de revestimento, por exemplo na restauração da pavimentação e na duplicação de trechos na Rodovia BR-040, com asfalto-borracha, trecho Rio de Janeiro–Juiz de Fora, sob concessão da Concer S.A. (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas asfálticas descontínuas, gap-graded, são assim denominadas pois apresentam-se com graduação em intervalo. Nessas misturas, o ligante asfáltico utilizado é modificado por borracha moída de pneu ou por polímeros elastoméricos (CERATTI et al., 2015).

Ainda dentro do grupo das misturas a quente, têm sido utilizadas na prática as argamassas asfálticas, também denominadas areia asfalto usinada a quente (AAUQ). Em regiões onde não existem agregados pétreos graúdos, utiliza-se como revestimento uma argamassa de agregado miúdo, em geral areia, ligante (CAP), e fíler se necessário, com maior consumo de ligante do que os concretos asfálticos convencionais devido ao aumento da superfície específica. A AAUQ é normalmente empregada como revestimento de rodovias de tráfego não muito elevado. Como toda mistura a quente, tanto o agregado quanto o ligante são aquecidos antes da mistura e são aplicados e compactados a quente. Essas misturas, devido à elevada quantidade de ligante asfáltico e presença de agregados de pequenas dimensões, requerem muito cuidado na execução. Um dos problemas mais freqüentes dessas misturas é que comumente apresentam menor resistência às deformações permanentes, comparadas às misturas usinadas a quente vistas anteriormente (BERNUCCI et al., 2010).

Como outros exemplos de misturas asfálticas a quente, destacam-se: revestimentos asfálticos do tipo BBTM (*Béton Bitumineux Très Minces*); revestimento asfáltico ultradelgado (RAUD); misturas asfálticas de módulo elevado; e SAMI (*Stress Absorbing Membrane Intelayer*) (CERATTI et al., 2015).

2.2.2. Misturas asfálticas mornas

As misturas preparadas em temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio são denominadas de misturas semimornas e mornas. As misturas asfálticas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de mistura, sendo que, se a temperatura de mistura em usina for abaixo de 105°C, a mistura é considerada semimorna (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas asfálticas mornas são aquelas produzidas a temperaturas que não se encaixam na definição de misturas asfálticas frias, as quais são as produzidas à temperatura ambiente, entre 25° a 55°C, e também não estão enquadradas na faixa das misturas asfálticas quentes. As misturas asfálticas mornas são produzidas a temperaturas intermediárias, em uma faixa que varia de 105° a 145°C, conforme Bernucci et al. (2010).

As misturas usinadas a quente podem ser produzidas e compactadas em temperaturas inferiores as usuais. Essa categoria de mistura é denominada de mornas ou semimornas. Essas misturas utilizam procedimentos e/ou produtos que reduzem as temperaturas de usinagem e de compactação das misturas asfálticas. Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas e semimornas prevê o uso de: (i) técnica de asfalto espuma, (ii) aditivos orgânicos (ceras) ou (iii) aditivos químicos (surfactantes), introduzidos no ligante asfáltico ou durante o processo de mistura do ligante asfáltico com as agregados (CERATTI et al., 2015).

O emprego de misturas asfálticas mornas vem crescendo nos últimos anos devido às maiores exigências em relação ao desenvolvimento sustentável e na preservação das condições de segurança, meio ambiente e saúde (CERATTI et al., 2015).

As misturas mornas são aquelas produzidas em temperaturas entre 110°C e 140°C. Devido à redução aproximada de 20 a 40°C na temperatura de aquecimento dos agregados em relação ao processo convencional, essas misturas economizam entre 15% a 30% do combustível necessário para sua fabricação (CERATTI et al., 2015).

Dentre as várias tecnologias desenvolvidas para as misturas mornas destaca-se o processo que emprega aditivos químicos que não modificam as propriedades reológicas dos asfaltos e não introduzem água na mistura asfáltica. Esses produtos químicos atuam modificando a tensão interfacial entre os agregados e o ligante

asfáltico reduzindo o atrito interno da mistura asfáltica e possibilitando melhor poder de recobrimento, trabalhabilidade e de compactação em temperaturas mais baixas que as usualmente empregadas. Geralmente esses produtos químicos não alteram a viscosidade do ligante asfáltico e agem na interface agregado/ligante auxiliando no recobrimento em temperaturas mornas, podendo ainda atuar como melhoradores de adesividade. Entre alguns exemplos de aditivos químicos têm-se: Gemul XT14, Cecabase RT®, Evotherm™, QPR® QualiTherm, Rediset™ WMX, WarmGrip®, Revix. Nenhum desses processos/produtos exige modificações importantes nas práticas utilizadas nas usinas e em campo (CERATTI et al., 2015).

Segundo Logaraj e Almeida (2009), a incorporação de aditivos químicos modificadores de tensão interfacial ao ligante asfáltico confere os seguintes benefícios para as misturas mornas: reduz o envelhecimento da mistura asfáltica por ação do calor e ar, aumentando sua resistência à fadiga; melhora a resistência da mistura aos danos por umidade induzida (adesividade); facilita a maior incorporação de material reciclado ao processo; reduz a exposição dos trabalhadores a altas temperaturas, às emissões, fumaça e aos odores emanados ao meio ambiente; e possibilita aumentar o intervalo de tempo destinado ao transporte, bem como a eficiência na compactação da massa asfáltica, principalmente quando a misturas asfáltica é aplicada em espessuras delgadas sob condições de baixa temperatura ambiente.

Misturas asfálticas mornas ou Warm Mix Asphalt (WMA) são misturas asfálticas produzidas em temperaturas mais baixas, que reduzem o gasto com combustível, as emissões de gases poluentes e a exposição dos trabalhadores aos fumos durante a usinagem ou aplicação da mistura. O emprego de misturas mornas também viabiliza a incorporação de maiores quantidades de resíduos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos às misturas recicladas (BARTHEL et al., 2004; PROWELL et al., 2007).

As misturas asfálticas mornas também podem ser produzidas com asfaltos modificados por polímero e com material fresado de revestimento (D'ANGELO et al., 2008), intensificando muito os estudos e importância dessa nova tecnologia, pois alia melhor desempenho dos pavimentos com menor agressão ao meio ambiente.

A tecnologia é recente e está sob constante estudo no Brasil. De acordo com Cavalcanti (2010) as expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla WMA (Warm - Mix Asphalt) que agrupa uma série de tecnologias que permite a redução de temperatura na qual as misturas asfálticas são

produzidas e aplicadas. Estas tecnologias permitem a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Assim há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, há redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, que é responsável pelo melhor desempenho em termos de trincas e suscetibilidade da mistura.

De acordo com a European Asphalt Pavement Association – EAPA (2014), as misturas asfálticas mornas operam acima de 100°C, sendo várias técnicas usadas para reduzir a viscosidade efetiva do ligante e permitir o revestimento completo dos grãos da mistura e compactabilidade a temperaturas mais baixas.

Atualmente, existem diferentes tecnologias que objetivam reduzir a temperatura de usinagem das misturas asfálticas mornas. Perkins (2009) relata que as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas conforme o tipo de tecnologia empregada para reduzir a temperatura de trabalho. As WMAs são basicamente produzidas a partir de três tecnologias distintas: aditivos orgânicos/ceras, aditivos químicos/surfactantes, e, formação de espuma.

Budny (2012), em sua pesquisa, tabelou as principais referências em estudo de misturas asfálticas mornas, seus aditivos e processos empregados, assim como a redução da temperatura alcançada, apontando se o estudo foi feito experimentalmente em campo ou laboratório. Essa lista é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Aditivos mais empregados para produzir misturas asfálticas mornas

Aditivo	Processo	Experimento (Campo C ou Laboratório L)	Redução de Temperatura (°C)	Referências
Sasobit	Aditivo Orgânico	C/L	20 a 40	Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Zhang (2010); Hurley <i>et al.</i> (2009); Sullivan (2009)
Evotherm ET	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Davidson (2008); Zhang 2010); Hurley <i>et al.</i> (2009)
Rediset WMX	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Kristjansdottir (2006); Sampath (2010)
Aspha-min	Espuma Indireta	L	até 50	Kristjansdottir (2006); Hurley <i>et al.</i> (2009)
WAM Foam®	Espuma	L	até 50	Kristjansdottir (2006)
Zeólita	Espuma Indireta	C/L	até 50	Prowell & Hurley (2007)
Advera Synthetic Zeolite	Espuma Indireta	C/L	até 40	Zhang (2010); Sullivan (2009)
Cecabase RT	Aditivo Químico	L	20 a 30	Sheth (2010)

Fonte: Adaptado de Budny (2012)

Um resumo, apresentado na Tabela 3, foi elaborado por Ferreira (2009), onde o autor lista as principais tecnologias existentes, no qual foram inseridos os principais produtos disponíveis, as empresas proprietárias das patentes e sua temperatura de produção. Atualmente, já existem novos produtos, que tem o mesmo objetivo, porém os mais usuais estão compilados na tabela citada.

Tabela 3 – Resumo das principais tecnologias de produção de misturas asfálticas mornas

Tecnologia	Empresa proprietária da patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
ADITIVOS ORGÂNICOS		
Sasobit® (Ficher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Asphaltan B® (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	Romonta GmbH, Alemanha	
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	
ADITIVOS QUÍMICOS		
Rediset®	Akzo Nobel, Holanda	Redução de cerca de 15°C da temperatura referência das MBQ
Cecabase RT®	CECA, França	120-140°C
Interlow T®	Interchimica, Itália	120-140°C
Evotherm®	MeadWeastvaco, EUA	85-115°C
Revix® ou Evotherm 3G®	MeadWeastvaco Mathy-Ergon, EUA	130-140°C
ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS		
Aspha-Min® (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Advera® (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	
ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA		
WAM Foam®	Shell, UK, e Kolo-Veidekke, Noruega	110-120°C
Terez WMA System	Terex, EUA	130°C
Double-Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121-135°C
LEA - Low Energy Asphalt (EBT® e EBT®)	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	<100°C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	110-115°C
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009)

A redução das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas mornas pode trazer diversos benefícios relacionados ao meio ambiente, à exposição ocupacional e à qualidade da pavimentação. Croteau & Tessier (2008) relatam que os dados de desempenho, coletados na Europa e na América do Norte,

indicam que WMA tem uma performance igual ou possivelmente melhor do que a mistura convencional *Hot Mix Asphalt* - HMA. O mais antigo pavimento WMA foi colocado na Alemanha em meados dos anos 90, enquanto o mais antigo relatado na América do Norte está em serviço desde 2004 .

O mundo todo está investindo na busca de informações sobre o desempenho dos pavimentos com a técnica de misturas mornas. Todos os relatórios técnicos apresentados tratam-se de sistemas específicos, ou seja, que podem alterar as características do pavimento de local para local. Porém, todos indicam que o sistema WMA tem os seguintes aspectos (CROTEAU & TESSIER, 2008):

- Densificação do sistema WMA é melhorada;
- Rigidez da mistura não é prejudicada;
- Resistência não é prejudicada;
- O tempo de cura é mais curto;
- Endurecimento do ligante é menor;
- Resistência ao craqueamento térmico pode ser melhorada;
- Danos causados pela umidade requerem atenção específica;
- Sistemas WMA podem ser usados com qualquer tipo de misturas;
- Efeito sobre as propriedades da pasta se trata da pasta e do sistema específico, em estudo.

Além dos supracitados, pode-se listar ainda as vantagens de aumento da percentagem de material reciclado adicionado ao novo pavimento e aumento do tempo de compactação em condições meteorológicas mais difíceis. Pode-se dizer que uma das grandes vantagens das misturas asfálticas mornas é a redução na temperatura de mistura e compactação, pois a mesma gera uma série de benefícios adicionais, como:

- Menor consumo de energia;
- Menor emissão de gases de efeito estufa (CO_2) e poluentes (CO , SO_2 e NO_x);
- Maior trabalhabilidade, facilitando o trabalho manual, em especial na construção de juntas;
- Incorporação de maior quantidade de material fresado;
- Maior eficiência de compactação;
- Menor envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação;
- Menor exposição dos trabalhadores aos fumos.

Motta (2011) diz que com uma redução de 30°C no aquecimento das pedras, diminui-se em 15% ou mais os gastos necessários com combustível na fabricação da mistura, e assim, conseqüentemente, às emissões reduzem em até três vezes. Há uma diferença visível de redução de gases quando trabalhado com misturas mornas, se comparado à aplicação das misturas convencionais a quente, quando pode ser visto a formação de uma névoa no local da obra.

Alguns desses poluentes, presentes nas emissões ocorridas durante as operações de pavimentação, podem contribuir para o efeito estufa e, eventualmente, afetar a saúde dos trabalhadores deste ramo. Ponto chave de debate no Protocolo de Kyoto, o aumento do efeito estufa fez com que o mercado internacional buscasse tecnologias mais limpas e soluções de maior âmbito ecológico, criando assim, as WMA que trazem ao ramo de pavimentação um novo desafio e uma conscientização de trabalho com menor agressão ao meio ambiente.

D'Angelo *et al.* (2008) relatam que as emissões de poluentes nas usinas de produção de WMA chegam a redução de 30 a 40% de CO_2 e SO_2 , 50% de compostos orgânicos voláteis (VOC), 10 a 30% de monóxido de carbono (CO), 60 a 70% de óxidos nitrogenados (NO_x) e 20 a 25% de poeiras.

As emissões podem ser provenientes não só da menor queima de combustível em usina, mas também da decomposição térmica do asfalto, sendo compostas de elementos orgânicos, em fase gasosa e particulada. A fase particulada é constituída de componentes sólidos e líquidos (chamados de aerossóis), que ficam suspensos na atmosfera em função de sua pequena dimensão (inferior a 100 μm).

A temperatura de 150°C começam a ser produzidas as emissões de fumaças e vapores pela massa asfáltica. A massa asfáltica é constituída de hidrocarbonetos, H_2S e de compostos policíclicos aromáticos (HPA) liberados da massa asfáltica no processo de aquecimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

As misturas asfálticas mornas apresentam-se como uma ótima alternativa, pois sendo produzidas a temperaturas inferiores, esfriam a uma taxa menor, pois possuem um menor gradiente térmico (PROWELL & HURLEY, 2007). As misturas asfálticas mornas permitem aumentar a distância de transporte, ou ter mais frente de serviço, e mesmo assim a massa ter trabalhabilidade e compactação satisfatória, conforme Merighi (2014).

Prowell *et al.* (2012) dizem que o uso de misturas asfálticas mornas ajudam a aumentar a distância de transporte entre a usina e o trecho de aplicação devido à taxa

reduzida de esfriamento e viscosidade reduzida, no caso de alguns tipos de aditivos. Os autores citam um caso de obra na Austrália, que a mistura morna foi transportada por mais de nove horas em caminhão, com isolamento, e mesmo assim foi satisfatória sua compactação.

As misturas asfálticas mornas permitem pavimentar em ambientes frios sem perder qualidade, pois sua temperatura é menor que a mistura asfáltica convencional. Prowell *et al.* (2012) discorrem que o potencial de estender o período de pavimentação, nos países que são castigados por condições meteorológicas no inverno, é uma vantagem da tecnologia. Testes realizados na Alemanha apontaram que, misturas asfálticas mornas apresentam bom resultado de compactação (com misturas mornas obtém-se melhor densidade da massa com menos passadas do rolo compressor) quando aplicadas às temperaturas ambientes de -3°C e -4°C (D'ANGELO *et al.*, 2008).

O aquecimento do ligante, em temperaturas elevadas, mesmo ocorrendo por curto período de tempo, similar ao que acontece durante a usinagem, pode causar o envelhecimento elevado do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2006). No caso das misturas asfálticas mornas, há a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico devido à produção da mistura em temperaturas menores. Esta diminuição ajuda a compensar os ligantes já envelhecidos no caso de utilização de material reciclado na mistura asfáltica, similarmente a utilizar um asfalto de grau menos rígido (D'ANGELO *et al.*, 2008).

A diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico resulta também em melhoria na flexibilidade, resistência à fadiga da mistura e, também, resistência ao surgimento de trincas térmicas (SABITA, 2011). Segundo a mesma fonte, estes ganhos aumentam o desempenho do pavimento e o tempo entre suas manutenções, o que promove economia financeira para os órgãos responsáveis pelas vias.

Para misturas que utilizam grande porcentagem de material reciclado, a melhoria de compactação permite incorporar mais quantidade de material reciclado e esta característica é vantajosa na utilização de misturas mais rígidas (PROWELL *et al.*, 2012). A melhoria na trabalhabilidade da massa asfáltica, devido a técnica WMA, aumenta a coesão da mistura, lubrificando-a, e garantido melhor compactação, devido a redução da fricção interna do ligante asfáltico (SABITA, 2011).

A redução de temperatura tanto na produção da mistura asfáltica quanto na sua aplicação em pista promove melhores condições de trabalho. Segundo Sabita (2011),

a segurança ao trabalhador é beneficiada diretamente pela redução da temperatura da mistura asfáltica, que reduz o risco de acidentes relacionados com temperatura e aumenta a produtividade. Além de ganhos com conforto, referentes à redução da emissão dos gases e de temperatura.

2.2.3 Misturas asfálticas a frio

São denominadas misturas asfálticas a frio aquelas nas quais as etapas de usinagem e compactação são feitas a temperatura ambiente, conseguida com a utilização de emulsões asfálticas. Para a produção dessas misturas asfálticas é necessário pouco ou nenhum aquecimento dos materiais e estas podem frequentemente ser produzidas *in situ* sem a necessidade de usina (CERATTI et al., 2015).

As vantagens das misturas asfálticas a frio estão ligadas principalmente ao uso de equipamentos mais simples, trabalhabilidade à temperatura ambiente, boa adesividade com quase todos os tipos de agregado britado, possibilidade de estocagem e flexibilidade elevada (ABEDA, 2010).

Pré-misturado a frio (PMF) é uma técnica utilizada na execução de camada intermediária de regularização das estruturas do pavimento, também conhecida como binder, em revestimentos asfálticos e serviços rotineiros de conservação do tipo tapa-buracos. Entre os inúmeros serviços que podem ser executados com emulsão asfáltica, talvez o mais empregado seja o PMF (ABEDA, 2010).

Os pré-misturados a frio (PMF) consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente. Dependendo do local da obra, podem ser usadas para misturar os PMFs: usinas de solo ou de brita graduada, usinas de concreto asfáltico sem ativar o sistema de aquecimento dos agregados, usinas de pequeno porte com misturadores tipo rosca sem fim, ou usinas horizontais dotadas de dosadores especiais (BERNUCCI et al., 2010).

A facilidade com que se pode obter a massa asfáltica, bem como sua aplicação na pista com vibroacabadora e até com motoniveladora, faz com que essa alternativa ganhe espaço em muitas cidades que querem pavimentar e não dispõem de grandes recursos financeiros (ABEDA, 2010).

Basicamente o PMF consiste numa mistura, em equipamento apropriado, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filler) e emulsão asfáltica catiônica convencional ou modificada por polímeros (ruptura média, ou lenta) espalhada e compactada a frio. Os PMFs são classificados em aberto, semidenso e denso, segundo a porcentagem de vazios e a granulometria (ABEDA, 2010).

As emulsões de ruptura média (RM) são responsáveis pela produção das misturas de PMF do tipo abertas que, de acordo com as normas brasileiras, tem como maior agregado a brita de 1" ou $\frac{3}{4}$ ", ou seja agregado graúdo com diâmetro máximo de 25,4 mm ou 19 mm, respectivamente (ABEDA, 2010).

Como revestimento asfáltico apresenta a vantagem de elevada rugosidade, o que permite uma qualidade superior de aderência pneu-pavimento, aumentando a segurança quanto à derrapagem (ABEDA, 2010).

Como camada intermediária ou de transição pode servir de ligação, compatibilizando as o módulo resiliente ou a resistência estrutural da camada de rolamento em concreto asfáltico com a camada granular subjacente de menor módulo de resiliência (ABEDA, 2010).

Devido a facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio no campo é uma excelente solução para vias de tráfego médio e leve. O PMF aberto pode ser armazenado por períodos maiores que o PMF denso (em geral, até 30 dias, desde que devidamente estocado em pilhas e protegido com lonas impermeáveis).

Essa característica proporciona flexibilidade na programação do serviço, ou seja, pode-se priorizar a fase de produção da massa asfáltica e, posteriormente, a aplicação na pista. Além disso, apresenta a grande vantagem de liberação imediata da camada executada ao tráfego, permitindo a construção da obra em etapas (ABEDA, 2010).

Os PMFs com emulsões de ruptura lenta RL-1C proporcionam misturas asfálticas de granulometria densa e semidensa. Devido ao baixo índice de vazios, esse revestimento asfáltico apresenta excelente comportamento estrutural e funcional para vias de médio volume de tráfego, conferindo bom desempenho tanto do ponto de vista mecânico como de segurança e conforto da superfície de rolamento (ABEDA, 2010).

O PMF de graduação densa ou aberta, além do seu emprego como revestimento de novos pavimentos, é uma excelente opção para melhorar as condições da superfície de rolamento de pavimentos confeccionados em

paralelepípedos, lajotas e pedra irregular, corrigindo as depressões e irregularidades altimétricas existentes e reforçando a capacidade de suporte da estrutura original (ABEDA, 2010).

O PMF denso pode ser estocado até 7 dias. Em caso de chuva, a execução da camada só poderá ser iniciada após a completa secagem da base (ABEDA, 2010).

Os trabalhos só devem ser conduzidos quando as condições ambientais forem apropriadas, isto é, com temperatura ambiente acima de 10°C e tempo estável, sem chuvas (ABEDA, 2010).

Geralmente, a emulsão utilizada é catiônica, de ruptura média ou lenta empregada em pré-misturados abertos, semidensos ou densos, respectivamente. Se requerido no projeto, a emulsão asfáltica poderá conter polímeros elastoméricos (ABEDA, 2010).

A mistura dos agregados com a emulsão deverá ser processada em equipamentos específicos tais como betoneiras e usinas mecânicas, estas últimas podem ser estacionárias ou móveis com capacidade de produção de 10 t/h a 200 t/h (ABEDA, 2010).

As usinas do tipo móvel, montadas em chassi de caminhão, são práticas e funcionais, podendo ser colocadas em operação em poucas horas (ABEDA, 2010).

Já as usinas menores de produção in situ, em sua maioria, tem seu emprego restrito a pequenas quantidades de pré-misturados, para conservações corretivas rotineiras do tipo tapa-buracos (ABEDA, 2010).

Inicialmente deve-se fazer a aplicação de uma pintura de ligação que deverá ser executada com emulsão apropriada, lançada através de barra espargidora acoplada a um caminhão tanque (ABEDA, 2010).

A massa asfáltica produzida é transferida para caminhões basculantes que transportam e descarregam o PMF em depósito apropriado, ou na via para ser espalhado com motoniveladora ou também, diretamente na vibroacabadora (ABEDA, 2010).

O espalhamento manual deve ficar restrito ao serviço de tapa-buracos ou de pequenos segmentos descontínuos. Inicialmente deve-se fazer a aplicação de uma pintura de ligação que poderá ser executada com a própria emulsão, lançada através de barra ou caneta espargidora acoplada a um caminhão-tanque. Essa pintura deverá ter um consumo aproximado de 0,70 kg/m² (ABEDA, 2010).

A espessura da camada compactada de PMF deverá estar entre 1,5 e 3,0 vezes o tamanho máximo do agregado, para evitar desagregações prematuras ou deformações/ondulações, respectivamente (ABEDA, 2010).

A espessura máxima a ser compactada do PMF não deverá ultrapassar 7 cm. Para espessuras maiores a aplicação e compactação deverão ser feitas em duas camadas (ABEDA, 2010).

A compactação deverá ser iniciada com a utilização de rolo pneumático de pressão variável e prosseguirá até que não haja mais desnível entre a faixa a compactar e a adjacente já compactada. A compactação deverá ser concluída com a aplicação de rolo liso. Na falta de rolo pneumático de pressão variável, pode-se utilizar rolo conjugado com pneus lisos no eixo traseiro e chapa no tambor dianteiro. Todos os equipamentos de compactação devem ser devidamente lastrados e livres de vazamentos de óleo hidráulico (ABEDA, 2010).

Nos trechos em tangente, a compactação deverá ser iniciada do bordo para o eixo, e nos trechos em curva do bordo mais baixo para o mais alto (ABEDA, 2010).

A compactação será dada como concluída quando a camada apresentar uma superfície desempenada, uniforme, isenta de ondulações e sem saliência ou rebaixos. Antes da liberação do tráfego a camada de PMF poderá receber um tratamento tipo capa selante, executada com uma aplicação de emulsão apropriada através de barra ou caneta espargidora seguida da distribuição de areia grossa ou pó de pedra na taxa de projeto. Essa etapa visa promover proteção à ação das intempéries (ABEDA, 2010).

Recomenda-se uma passada de rolo liso sem vibração para promover a acomodação e penetração da areia ou pó de pedra nos vazios superficiais do PMF. O tráfego poderá ser liberado imediatamente, com a devida sinalização de alerta quanto à existência de material solto na superfície da pista a fim de evitar acidentes (ABEDA, 2010).

As principais vantagens do PMF são operacionais e econômicas:

- a) Utilização de equipamentos de baixo custo para usinagem e aplicação;
- b) Trabalhabilidade a temperatura ambiente, sem necessidade de aquecimento dos materiais empregados;
- c) Possibilidade de trabalhar com agregados úmidos;
- d) Possibilidade de utilizar agregados britados provenientes de quase todos os tipos de rocha, devido a adesividade impar das emulsões catiônicas;

- e) Alta produtividade, possibilitando a estocagem do PMF para posterior aplicação, tais como serviços de tapa-buracos e pequenas intervenções;
- f) Baixo consumo de energia térmica e elétrica envolvida durante as operações de produção, transporte, manuseio, estocagem e aplicação dos materiais (cerca de 60 a 70 % da energia total consumida em misturas asfálticas a quente);
- g) Possui capacidade de suporte às deflexões das camadas subjacentes, apresentando baixo grau de fissuramento e trincamento;
- h) Reduzida emissão de gases tóxicos e poluentes melhorando as condições de segurança, meio ambiente e saúde.

2.3 ASFALTO ENSACADO

Diversas empresas no Brasil produzem aditivos para asfalto ensacado/estocável, a exemplo da Betunel e da Greca.

A empresa Betunel, que é uma das mais antigas e tradicionais distribuidoras de asfalto do país, produz um tipo de asfalto ensacado denominado AsfaltoFácil® (BETUNEL, 2017).

O AsfaltoFácil® é um concreto asfáltico betuminoso usinado a quente, conforme especificação DNIT, dosado com CAP aditivado com composto químico exclusivo, que irá permitir a massa usinada a quente ser aplicada à temperatura ambiente. O aditivo permite prolongar o poder aglutinante do CAP, possibilitando a massa asfáltica ser estocável, dependendo do tipo (Ka149) até 30 dias a granel, ou até 20 meses (ka146) ensacado. Trata-se de um aditivo utilizado na produção de CBUQ tornando-o aplicável à temperatura ambiente.

As vantagens do AsfaltoFácil® são: pode ser aplicado até mesmo com chuva (permite aplicação em dias de chuva sem perder desempenho); é ensacado eletronicamente (25kg ou a granel); é estocável até 20 meses; possui estoques disponíveis em várias cidades brasileiras; possui a mesma qualidade do CBUQ; e é fácil de aplicar.

A Figura 8 mostra o modo de aplicação do AsfaltoFácil®.

Figura 8 – Modo de aplicação do AsfaltoFácil®



Fonte: Betunel (2017).

Outra empresa, que também é uma das mais antigas e tradicionais distribuidoras de asfalto do país, a Greca Asfaltos produz outro tipo de asfalto ensacado denominado Aditivo TB® (GRECA, 2017).

O Aditivo TB®, um produto desenvolvido pelo Centro de Pesquisa & Desenvolvimento GRECA Asfaltos que quando misturado ao Cimento Asfáltico de Petróleo, promove o aumento de sua capacidade lubrificante e quebra da tensão superficial de partículas. O CAP modificado com o Aditivo TB têm maior facilidade de envolvimento aos agregados, além de desenvolver a propriedade de manuseio e aplicação a frio, característica incomum em misturas convencionais usinadas a quente do tipo CBUQ.

O processo consiste em adicionar o Aditivo TB® ao CAP 50/70, em proporção pré-definida em projeto, modificando-o e permitindo que a usinagem se processe a temperaturas mais baixas (agregado a 140°C e CAP 50/70 modificado com Aditivo TB® entre 125 a 130°C), para posterior aplicação e compactação a frio em serviços de manutenção preventiva ou emergencial tipo tapa-buracos. Depois de aplicada no buraco, a mistura asfáltica se comporta de forma similar a de um CBUQ convencional, pois o aditivo foi especialmente formulado para promover a trabalhabilidade da massa asfáltica à temperatura ambiente e não interferir na sua qualidade final após compactação.

O CAP 50/70 que receberá o Aditivo TB® deve estar numa temperatura entre 140 a 150°C. O Aditivo TB deve ser misturado ao CAP 50/70 numa proporção de 15%

em peso, por exemplo, para produzir 2.000 kg de CAP 50/70 modificado por Aditivo TB®, deverão ser utilizados 1700 kg de CAP 50/70 e 300 kg de Aditivo TB®. Após a adição de todo o Aditivo TB, o asfalto deve ser homogeneizado utilizando agitadores mecânicos do próprio tanque. A recirculação pode ser usada desde que garanta a total mistura entre o CAP 50/70 e o Aditivo TB. O cuidado que se deve ter em relação à aditivação, refere-se ao fato de que alguns tanques retêm uma quantidade de CAP que a bomba não puxa. Nesse caso, devemos considerar o percentual de dosagem do teor a operacionalizar acrescido do residual retido no tanque. Vale lembrar que esse resíduo em nada compromete a reposição de CAP no mesmo tanque, para a operação normal de CBUQ, desde que seja uma carga de maior quantidade (Ex: Encher o tanque).

As temperaturas de usinagem indicadas para a produção de mistura ou massa asfáltica com CAP 50/70 modificado com Aditivo TB são:

- Ligante Asfáltico (pré-usinagem): 125 – 130°C;
- Agregados (momento da mistura): 130 – 135°C;
- Mistura Asfáltica (pós-usinagem): 125 – 135°C;

Devem-se evitar as variações de temperatura da massa que ocorrem nas primeiras cargas do dia e também após um período de chuvas em que os agregados se encontrem mais úmidos. A temperatura da massa após usinagem deve ser checada a cada traço, em cima do caminhão durante a descarga da usina. Devem-se utilizar termômetros analógicos que são mais adequados. Os termômetros digitais podem servir como equipamentos auxiliares. No caso de utilização de usina de asfalto, tipo drum-mixer, é importante procurar calibrar o maçarico de tal forma que esta regulagem conduza a uma chama mais curta e mais larga.

A massa ou mistura asfáltica deve ser armazenada em pilhas de, no máximo, 25 toneladas, num local protegido do sol e de preferência fechado, como um galpão por exemplo. O processo de ensacamento deve ocorrer pelo menos 24 horas após a produção da massa asfáltica, quando esta já estiver fria. Os sacos devem ser de 20 kg e podem ser empilhados num número máximo de 5 sacos. Caso a opção seja não ensacar, o monte de massa asfáltica deve ser coberto com uma lona, mesmo estando em ambiente fechado, pois o contato com o ar acelera o processo de reação entre o Aditivo TB® e o oxigênio, diminuindo a capacidade de trabalhabilidade da massa asfáltica. A mistura asfáltica produzida pode ser estocada em sacos de 20 kg ou

mantida amontoada, devidamente enlonada para que a mesma não venha reagir com o oxigênio.

Antes da aplicação da massa asfáltica no buraco é aconselhável realizar a sua limpeza, retirando o material solto e aplicar uma pintura de ligação, com emulsão asfáltica RR-1C diluída em água numa proporção de 50%. Caso isso não seja possível, é importante que o aplicador esteja ciente de que poderão ocorrer desprendimentos devido à falta de ligação entre a massa asfáltica e a superfície do buraco. A aplicação da massa asfáltica é realizada a temperatura ambiente, a mesma (armazenada em sacos ou não) deve ser despejada até preenchimento total do buraco. Após, proceder com a compactação através de placas vibratórias, compactadores de percussão ou rolos de diversos tamanhos conforme a área a ser compactada. Dependendo do grau de urgência para liberação do tráfego pode-se optar por não rolar, mas o aplicador deve estar ciente do risco de desprendimento da massa asfáltica. Para a execução das bordas dos buracos é normal a utilização de rastelos comuns nos acertos manuais necessários. O trânsito pode ser liberado imediatamente após a execução do procedimento.

O asfalto ensacado, que será objeto desta pesquisa, é uma mistura que até então não possui enquadramento oficial. Acredita-se que esse material seja uma mistura de classificação intermediária, sendo enquadrado entre o CBUQ e o PMF.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada na CONCEPA em Porto Alegre, na pedreira localizada no km 30 da rodovia BR 290, em Santo Antônio da Patrulha, bem como no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento da pesquisa seguiu as seguintes etapas:

- Coleta e caracterização dos agregados;
- Mistura do agregado ao CAP 50/70 e ao aditivo KA-146U da Betunel (10/04/2017, segunda-feira);
- Moldagem de 8 corpos de prova (CPs) – 1 dia ensacado (11/04/2017, terça-feira);
- Ensaio de módulo de resiliência (MR) e resistência a tração por compressão diametral (RT) de 4 CPs – 7 dias de cura (18/04/2017, terça-feira);
- Ensaio de MR e RT de 4 CPs – 15 dias de cura (25/04/2017, terça-feira);
- Moldagem de 8 CPs – 15 dias ensacado (25/04/2017, terça-feira);
- Ensaio de MR e RT de 4 CPs – 7 dias de cura (02/05/2017, terça-feira);
- Ensaio de MR e RT de 4 CPs – 15 dias de cura (09/05/2017, terça-feira);
- Moldagem de 8 CPs – 30 dias ensacado (09/05/2017, terça-feira);
- Ensaio de MR e RT de 4 CPs – 7 dias de cura (16/05/2017, terça-feira);
- Ensaio de MR e RT de 4 CPs – 15 dias de cura (23/05/2017, terça-feira).

A pesquisa consistiu em produzir uma mistura de CBUQ, com CAP 50/70 e adição do aditivo KA-146U da Betunel, o que deu origem a uma massa asfáltica estocável que foi mantida ensacada em sacos plásticos por 3 períodos de tempo (3, 15 e 30 dias) e então preparadas amostras (corpos de prova) para realização de ensaios mecânicos de módulo de resiliência (MR) e resistência a tração por compressão diametral (RT) depois de 7 e 15 dias de cura. A Tabela 4 mostra o plano de amostragem em função dos tempos ensacados e de cura.

Tabela 4 – Plano de amostragem em função dos tempos ensacados e de cura

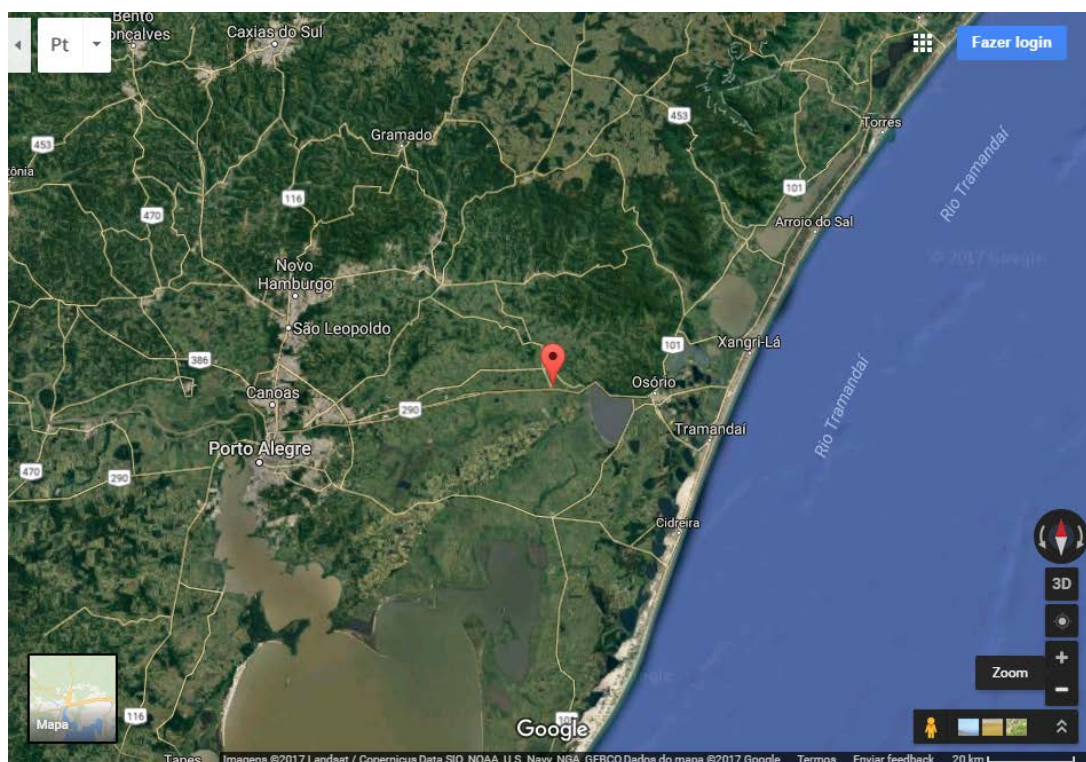
Tempo ensacado (dias)	1		15		30	
Tempo de cura (dias)	7	15	7	15	7	15
Número de amostras	4	4	4	4	4	4

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.2.1 Agregados

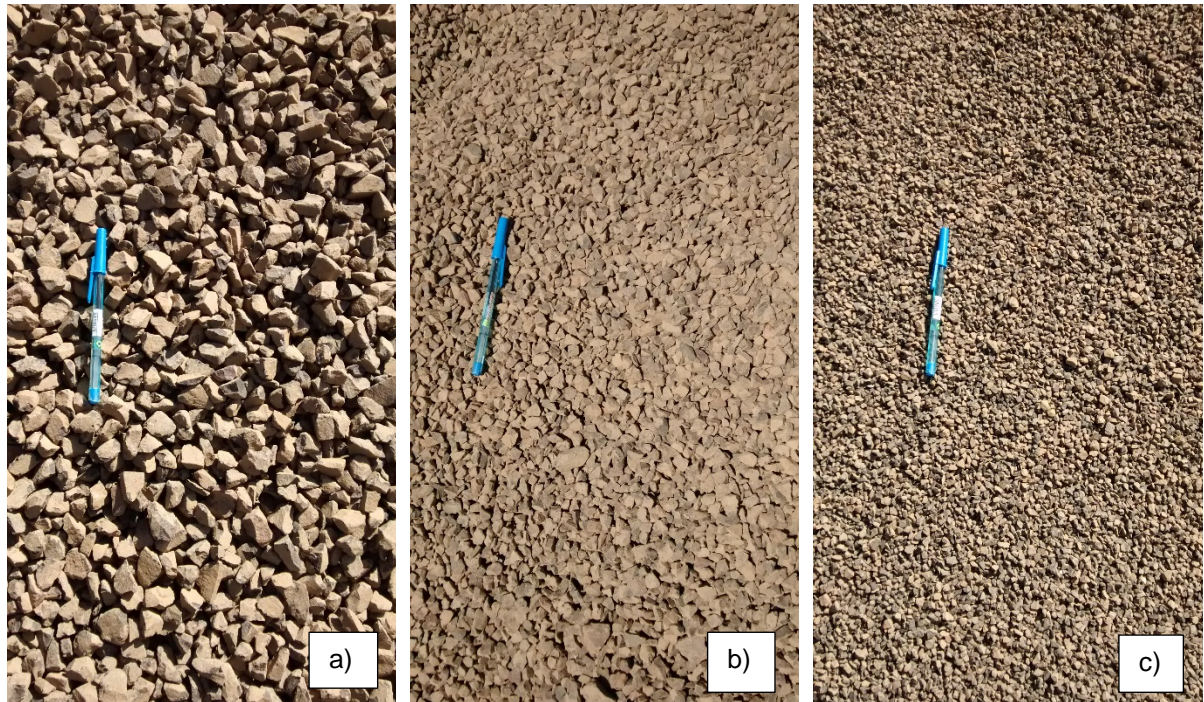
Os agregados utilizados nesta pesquisa foram obtidos através do processo de britagem de rocha basáltica, encontrada na região geomorfológica da depressão central (BOEIRA, 2014) e coletados diretamente da unidade de produção, localizada de acordo com a Figura 9, no Km 30, da BR-290 (FreeWay/RS), provenientes da pedreira da Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – CONCEPA.

Figura 9 – Localização da pedreira da Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – CONCEPA, às margens da BR 290 - Km 30, em Santo Antônio da Patrulha/RS



Foram utilizadas as frações brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra, conforme ilustradas na Figura 10.

Figura 10 – Agregados utilizados: a) brita 3/4"; b) brita 3/8"; c) pó de pedra



As composições granulométricas das misturas asfálticas foram enquadradas na Faixa C, conforme DNIT - ES 031/2006, que prescreve os mesmos requisitos das normas de reciclagem a quente DNIT - ES 033/2005 e DNIT - ES 034/2005. De forma a atender as especificações do órgão nacional, constantes nessa norma, peneirou-se os agregados em 8 peneiras distintas (3/4", 1/2", 3/8", nº 4, 10, 40 80 e 200), além do

fundo (passante na peneira nº 200), separando em cada fração de agregado as peneiras que eram pertinentes.

Também foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização dos agregados.

3.2.2 Ligante

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o ligante convencional CAP 50/70, cedido pela empresa Conpasul, em Itaara – RS. O CAP 50/70 teve suas características determinadas em laboratório.

3.2.3 Aditivo

O aditivo utilizado nesta pesquisa foi o KA-146U, fabricado pela Betunel (Figura 11).

Figura 11 – Aditivo



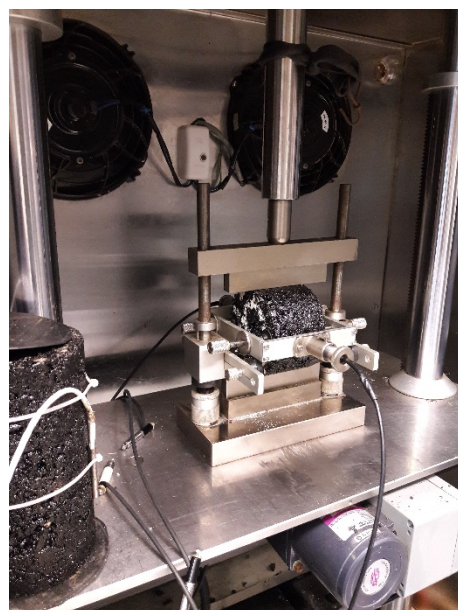
3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

3.3.1 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é determinado através das prescrições da norma DNIT - ME 135/2010 - Pavimentação asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência e da norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D 4123:1982 - *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. O intuito do ensaio é determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial.

O equipamento utilizado, mostrado na Figura 12, é a Universal Testing Machine UTM - 25, a qual utiliza a norma ASTM D 4123:1982 como base para realizar o ensaio de módulo de resiliência. A UTM - 25 é composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante, com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz (BOEIRA, 2014). Devido ao equipamento funcionar dentro de uma câmara com temperatura controlada, permite que sejam realizados ensaios em diversas temperaturas, sendo nessa pesquisa, ensaiadas as amostras a 10, 25 e 35°C.

Figura 12 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25



Após condicionados a temperatura do ensaio, por no mínimo 12 horas, o corpo-de-prova é colocado no suporte e posiciona-se os LVDTs, na face do mesmo, alinhando-o na vertical, horizontal e centralizado no cilindro de aplicação da carga. O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso. Dessa forma, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador, que coleta e arquiva todas as informações. A carga de ensaio adotada foi aquela de menor magnitude que mobilizasse a deformação, de modo a não causar dano na amostra.

As dimensões dos corpos-de-prova foram de, aproximadamente, 6,3 cm de altura e 10 cm de diâmetro. As mesmas amostras utilizadas para esse ensaio, foram rompidas, posteriormente, à RT.

A Equação 1 foi utilizada para o cálculo do módulo de resiliência.

$$M_R = \frac{P}{\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (1)$$

Em que:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga (P) (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm);

μ = o coeficiente de Poisson (0,30).

3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Após a realização do ensaio de Módulo de Resiliência, os mesmos corpos de prova foram ensaiados à resistência à tração por compressão diametral (RT).

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu as prescrições da norma DNIT 136/2010-ME Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio em que são utilizadas amostras com dimensões de altura entre

3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm. O equipamento utilizado para realização deste ensaio também foi a Universal Testing Machine UTM - 25 (Figura 13).

Figura 13 - Ensaio de RT realizado no equipamento UTM-25



Esse ensaio consistiu na aplicação de uma carga estática de compressão, com velocidade controlada, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicular à carga, onde a medida resultante é a resistência à tração, calculada conforme a Equação 2.

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

Onde:

RT = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo-de-prova (cm);

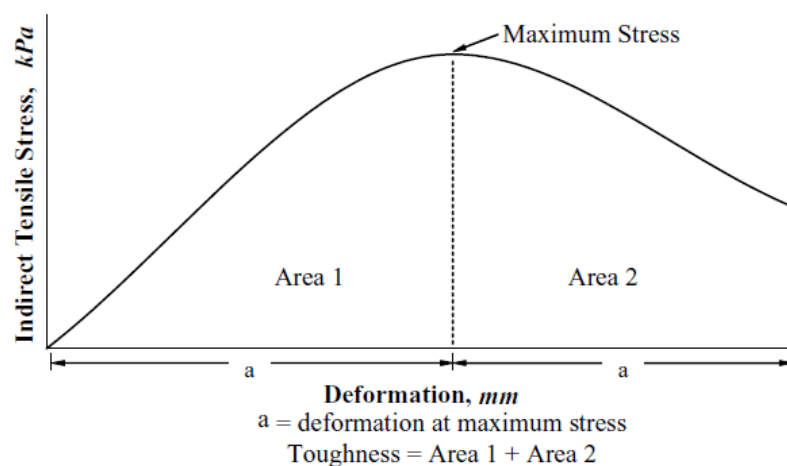
H = altura do corpo-de-prova (cm).

Além disso, com as medidas de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo, calcularam-se os parâmetros de Tenacidade, Índice de Tenacidade, bem

como a Energia de Fratura. Também foi avaliada a utilização do Índice de Flexibilidade, adaptando-o ao ensaio de RT.

Tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura. Uma maneira de medir a tenacidade é calculando a área sob a curva resistência à tração indireta versus deformação horizontal (Figura 14), até uma deformação do dobro da máxima tensão de tração, sendo este valor denominado de "tenacidade do material" (PUTMAN; AMIRKHANIAN, 2004). A deformação horizontal é calculada considerando a teoria da elasticidade.

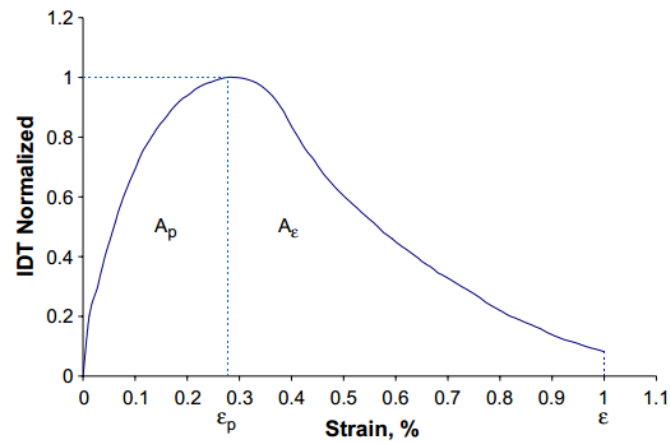
Figura 14 – Definição de tenacidade



Fonte: Putman e Amirkhanian (2004)

O índice de Tenacidade (IT) é um parâmetro adimensional que descreve a tenacidade na região pós-pico, também calculado a partir dos resultados do ensaio de RT. A Figura 15 apresenta a tensão de tração indireta típica (em relação à carga de pico) e a deformação de tração indireta. O IT compara o desempenho de uma amostra com o de um material de referência perfeitamente elastoplástico ($IT = 1$), neste sentido, o IT é zero para um material frágil ideal sem capacidade de carga pós-pico (HUANG; SHU; LI, 2005). Calcula-se, então, a tensão indireta a partir do deslocamento vertical e da carga, utilizando-se a teoria da elasticidade. Esses autores calcularam os valores do índice de resistência à tração indireta até à deformação de tração de 0,4%, mas esse valor varia conforme o caso.

Figura 15 – Definição do índice de tenacidade



Fonte: Huang, Shu e Li (2005).

O índice de tenacidade (IT) é calculado conforme Equação 3.

$$IT = \frac{A_{\varepsilon} - A_p}{\varepsilon - \varepsilon_p} \quad (3)$$

Onde:

A_p é a área sob a curva de tensão-deformação normalizada até a deformação ε_p ;

A_{ε} é a área sob a curva de tensão-deformação normalizada até a deformação ε ;

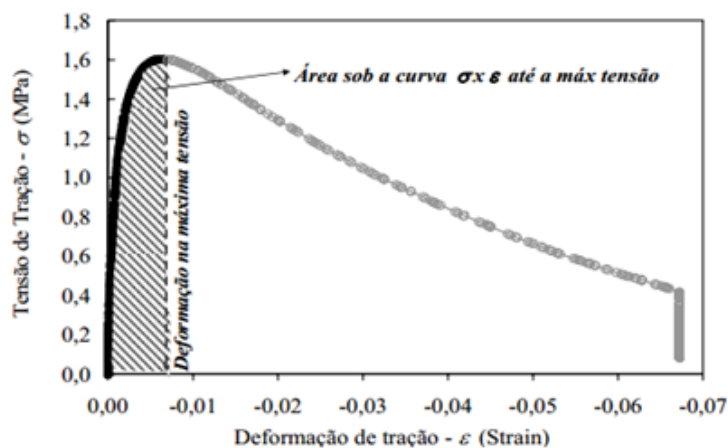
ε é a deformação no ponto de interesse;

ε_p é a deformação correspondente à tensão máxima.

Em relação a energia de fratura, Kim e Wen (2002 apud BRITO; CERATTI; VICTORINO, 2008) apresentam um estudo sobre a energia de fratura, determinada no ensaio de RT como indicador de performance de trincamento por fadiga de misturas asfálticas, correlacionando ensaios de laboratório com o desempenho de pavimentos durante ensaios acelerados. Os autores determinaram, a partir do ensaio de RT, a tensão de tração última, a deformação horizontal central durante o pico de carregamento e a energia de fratura até a ruptura. Como resultado da pesquisa, os autores indicam que a RT e a deformação, durante o pico de carregamento, não servem como indicadores de resistência à fadiga, mas que a correlação entre energia

de fratura, determinada no ensaio de RT, e o trincamento por fadiga é muito bom. O parâmetro é a área sob a curva até a deformação de tração no momento de ruptura (máxima tensão), conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Tensão versus deformação no ensaio de RT



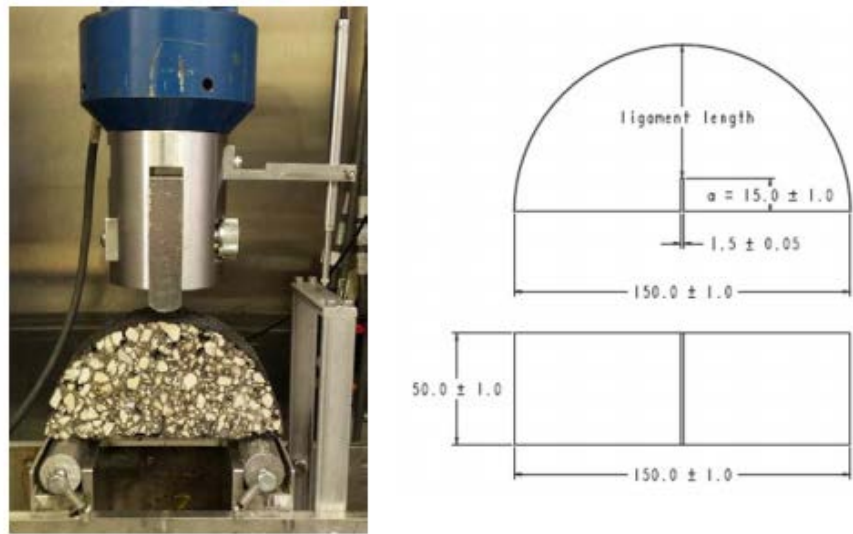
Fonte: Brito, Ceratti e Victorino (2008).

Além desses parâmetros, uma alternativa é avaliar a viabilidade de adaptação do ensaio brasileiro para obter o Índice de Flexibilidade (IF). Esse índice foi introduzido para determinar os parâmetros de resistência à fratura de uma mistura asfáltica por meio do teste de flexão semicircular modificado de Illinois (IL-SCB) sendo calculado a partir da curva carga x deslocamento e fornecendo um critério para identificar misturas frágeis que são propensas a trincamento prematuro.

Embora o IF seja novo, apresenta mérito para uso devido à sua simplicidade, relevância física e boa correlação com o crescimento da propagação de trincas em campo.

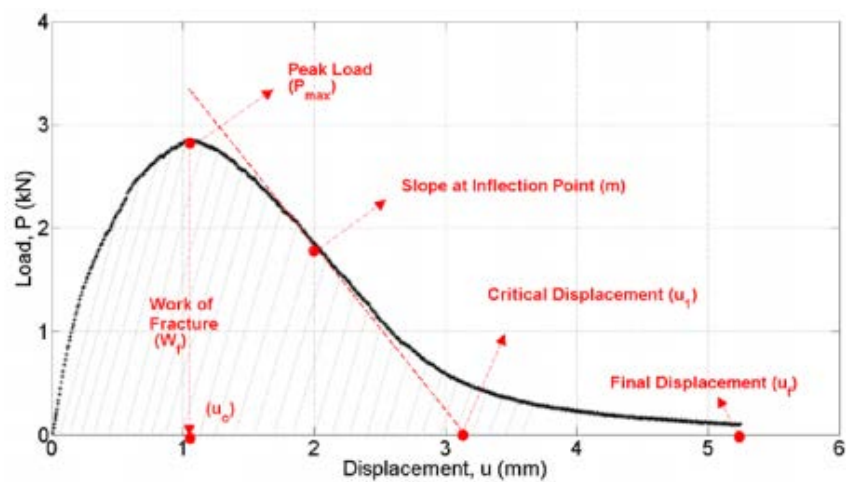
O tamanho da amostra de teste utilizado é de 50 mm de largura, 63 mm de altura e 150 mm de comprimento, como mostrado na Figura 17. Os corpos de prova são condicionados a temperatura de 25 ° C durante 2 horas antes do teste. Aplica-se uma taxa de carga de 50 mm/min. Um resultado típico do teste I-FIT, a curva carga x deslocamento, é mostrado na Figura 18.

Figura 17 – Amostra de teste IL-SCB e configurações (dimensões em milímetros)



Fonte: Al-Qadi et al. (2015).

Figura 18 – Resultado típico do teste de IL-SCB ilustrando os parâmetros derivados da curva de deslocamento versus carga.



Fonte: Al-Qadi et al. (2015)

Com base nesse gráfico, o IF é calculado de acordo com procedimento detalhado em Al-Qadi et al. (2015).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados

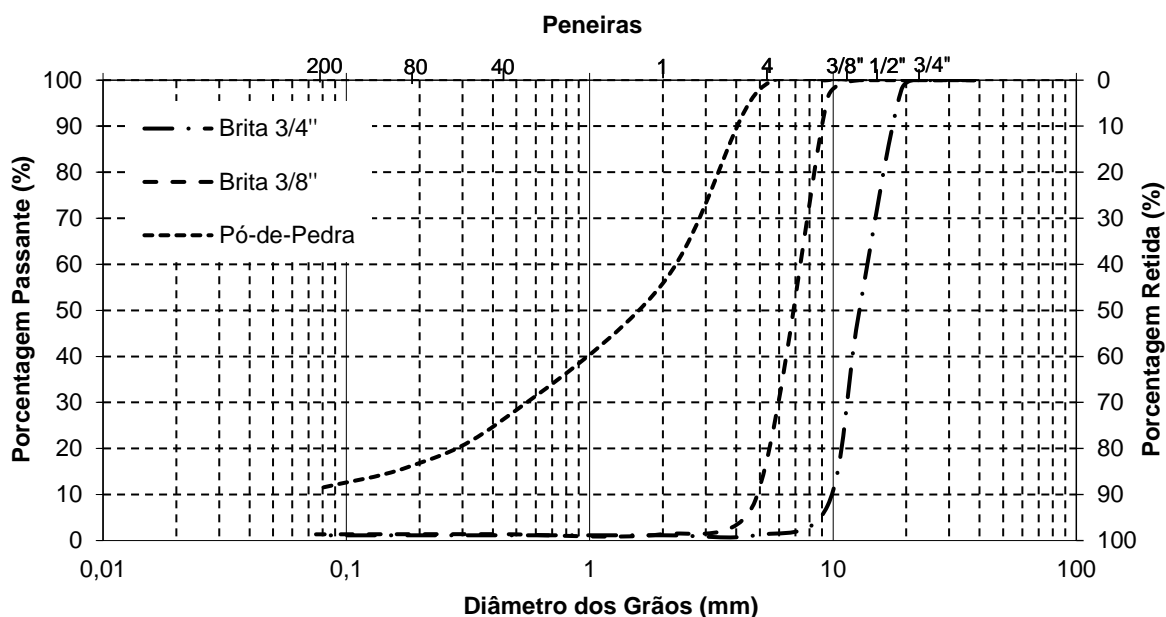
A granulometria dos agregados é apresentada na Tabela 5, mostrando assim a distribuição granulométrica média de todos os materiais utilizados na presente pesquisa. Foram peneiradas três amostras de cada fração de agregado mineral, conforme quantidade estipulada na norma DNER - ME 083/98 - Agregados - Análise granulométrica, após lavados e secos a constância de massa, e por fim, apontado seu peso final.

Tabela 5 – Resultados da granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa

		Porcentagem Média Passante (%)		
Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	97,9	100,0	100,0
1/2"	12,7	48,6	100,0	100,0
3/8"	9,5	7,6	96,1	100,0
n 4	4,8	1,2	8,8	97,0
n 10	2,0	1,1	1,4	55,9
n 40	0,42	1,1	1,4	25,5
n 80	0,18	1,1	1,4	16,0
n 200	0,075	1,1	1,4	11,2

A Figura 19 mostra a curva granulométrica dos agregados (brita 3/4", brita 3/8", e pó de pedra) utilizados nesta pesquisa.

Figura 19 – Curva granulométrica dos agregados utilizados na pesquisa



Os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
Densidade real/Massa específica real (g/cm ³)	DNER - ME 081/98 - Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo e	2,829	2,849	-
Densidade aparente/Massa específica aparente (g/cm ³)	DNER-ME 195/97 - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo	2,769	2,739	-
Absorção (%)		0,773	1,406	-
Massa específica real (g/cm ³)	ABNT/NBR 6508:1984 - Ensaio de Massa Específica dos Grãos	-	-	2,667
	DNER - ME 194-98 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman	-	-	2,625
Desgaste ou perda a abrasão (%)	DNER - ME 035/98 - Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles	8,93		-
Sanidade (%)	DNER - ME 089/94 - Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	3,47		-

4.1.2 Ligante e aditivo

As características do ligante convencional CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa, determinadas em laboratório, são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do CAP 50/70

Propriedades	Norma	CAP 50/70	
		Especificação	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm	NBR 6576	50 a 70	70
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	Mínimo 46	49
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	NBR 15184	Mínimo 274	333
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	NBR 15184	Mínimo 112	138
Viscosidade Brookfield a 177°C, cP	NBR 15184	Mínimo 57 a 285	68
Temperatura de Mistura, °C	Cálculo	Indicativo	146 a 152 (Média 149)
Temperatura de Compactação, °C	Cálculo	Indicativo	134 a 140 (Média 137)
Ponto de Fulgor °C	NBR 11341	Mínimo 235	334
Densidade Relativa, 20/4°C	NBR 6296	NA/Anotar	0,999

Para obtenção das temperaturas de trabalho do ligante do ligante convencional CAP 50/70, foi feita a caracterização através do ensaio de Viscosidade Brookfield, utilizando a média do intervalo das temperaturas obtidas, conforme consta na Tabelas 7 e 8.

Tabela 8 – Temperaturas de trabalho do ligante asfáltico utilizado

Temperaturas de Trabalho	CAP 50/70
Mistura (°C)	149
Compactação (°C)	137

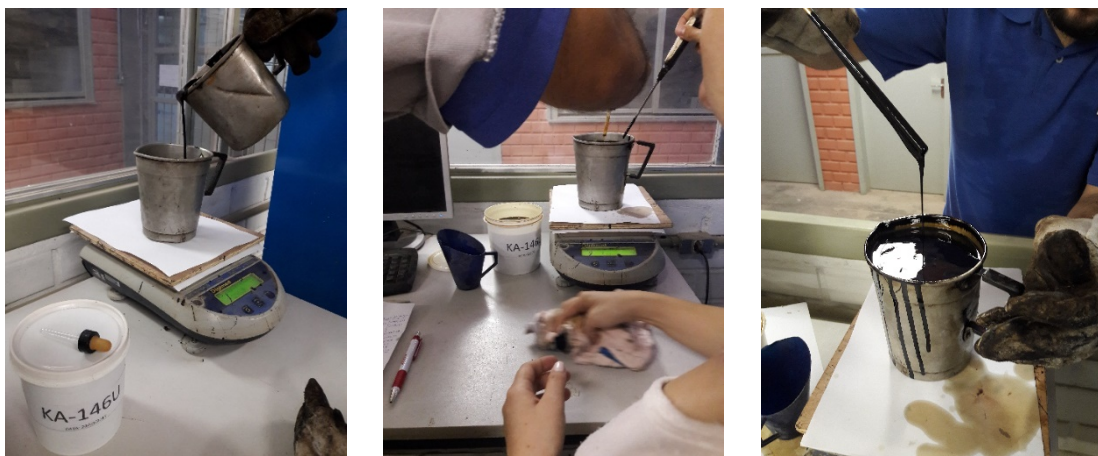
Para preparação da mistura do ligante convencional CAP 50/70 ao aditivo KA-146U, o ligante convencional CAP 50/70 foi aquecido na estufa (Figura 20) até a temperatura de 120 °C.

Figura 20 – Estufa utilizada para aquecimento do ligante



Colocou-se o aditivo KA-146U, com auxílio de um conta gotas, no ligante convencional CAP 50/70, que estava a temperatura de 120°C, e misturou-se, com auxílio de um bastão metálico (Figura 21), até que a temperatura da mistura atingisse 110 °C.

Figura 21 – Mistura do ligante convencional CAP 50/70 ao aditivo KA-146U



4.1.3 Mistura

Os resultados da dosagem da mistura de agregados (brita 3/4", brita 3/8", e pó de pedra) com o ligante convencional CAP 50/70 e o aditivo KA-146U é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da dosagem

Brita 3/4" (30%)	Peneira 1/2"	4998,51
	Peneira 3/8"	4237,88
Brita 3/8" (20%)	Peneira nº 4	6765,38
Pó-de-pedra (50%)	Peneira nº 10	7139,28
	Peneira nº 40	4924,80
	Peneira nº 80	1539,00
	Peneira nº 200	777,60
	Passante na peneira 200	2011,88
Quantidade total de agregado (g)		32394,34
Teor de CAP (%)		5,09
Quantidade total de CAP (g)		1737,60
Quantidade total de aditivo (g)		191,14

A curva granulométrica da mistura asfáltica e a percentagem em cada peneira é mostrada na Figura 22 e na Tabela 10, a seguir.

Figura 22 – Curva granulométrica da mistura asfáltica e a percentagem em cada peneira

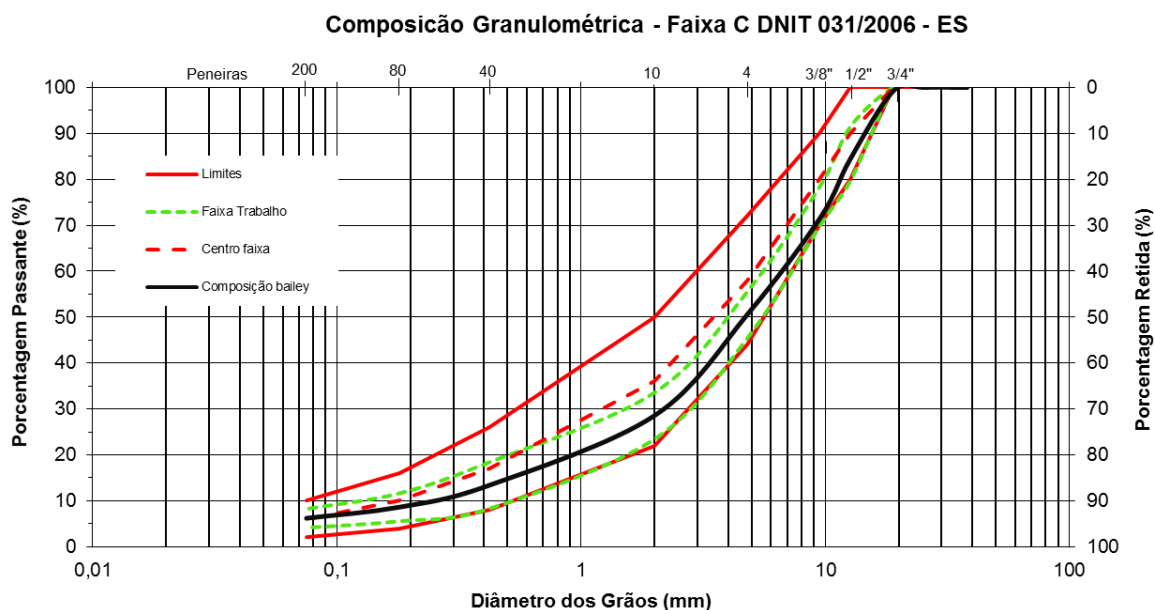


Tabela 10 – Ajuste granulométrico da mistura

PENEIRA	mm	Limites faixa		Centro faixa	Faixa trabalho		MISTURA
1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4
1/2"	12,7	80,0	100,0	90,0	80,0	91,6	84,6
3/8"	9,5	70,0	90,0	80,0	70,0	78,5	71,5
n 4	4,8	44,0	72,0	58,0	45,6	55,6	50,6
n 10	2	22,0	50,0	36,0	23,6	33,6	28,6
n 40	0,42	8,0	26,0	17,0	8,4	18,4	13,4
n 80	0,18	4,0	16,0	10,0	5,6	11,6	8,6
n 200	0,075	2,0	10,0	6,0	4,2	8,2	6,2

Foi utilizado 10 % em peso de aditivo, conforme indicação do fornecedor (Betunel).

Os agregados foram misturados ao ligante convencional CAP 50/70 e ao aditivo KA-146U em um misturador da marca *Infratest testing system* (Figura 23), modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version*, por 400 s.

Figura 23 – Misturador *Infratest testing system* utilizado



A mistura de CBUQ, com ligante convencional CAP 50/70 e aditivo KA-146U da Betunel, foi retirada do *Infratest* e colocada em recipientes metálicos até a temperatura atingir 40°C. Posteriormente, a mistura foi ensacada em sacos em plásticos por 3 períodos de tempo (3, 15 e 30 dias). A Figura 24 ilustra essas etapas.

Figura 24 – Etapas da mistura



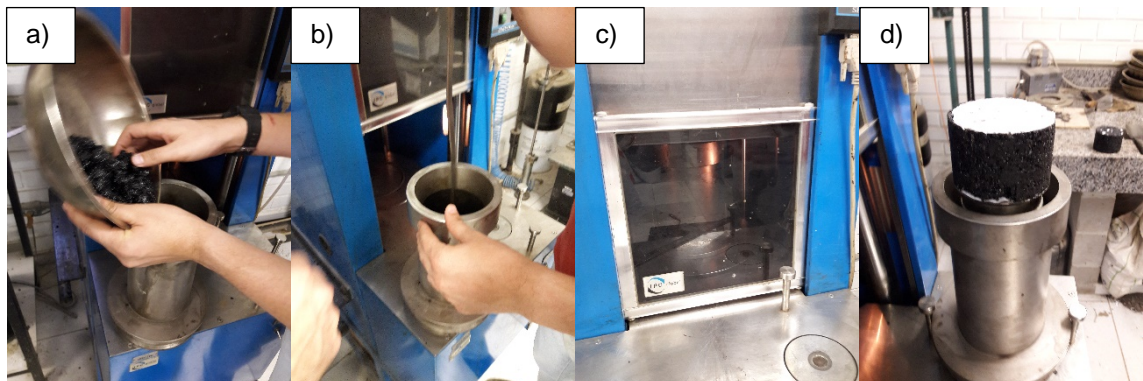
A moldagem dos corpos de prova foi feita no Compactador Giratório Superpave (CGS), que é mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Compactador Giratório Superpave (CGS)



No total, foram moldados 24 corpos de prova (CPs). O parâmetro de moldagem fixado no CGS foi o número de giros, que foi de 100 giros. As dimensões dos corpos-de-prova foram de, aproximadamente, 6,3 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A DMT utilizada na moldagem dos CPs foi $2,779 \text{ g/cm}^3$. O volume de vazios estimado pelo CGS foi de aproximadamente 18 %. A Figura 26 mostra as etapas da moldagem.

Figura 26 – Compactador Giratório Superpave (CGS)



A Figura 27 mostra alguns dos CPs obtidos.

Figura 27 – Alguns dos CPs obtidos.



Os corpos de prova foram pesados ao ar, submerso (ou imerso) e com a superfície seca. Foi calculado a G_{mb} e em seguida calculou-se o volume de vazios. O volume de vazios calculado para os CPs foi de aproximadamente 13 %. Por fim, foram determinadas, com auxílio de paquímetro digital, 3 medidas de diâmetro e 3 medidas de altura de cada CP, para realização dos ensaios mecânicos, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Medição dos CPs



4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

4.2.1 Módulo de resiliência (MR)

A Tabela 11 mostra os resultados de MR para todos os CPs.

Tabela 11 – Resultados de MR para todos os CPs

Tempo ensacado (dias)	Tempo de cura (dias)	CP	Graus	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	Carga (N)
1	7	1	0	Rompeu durante o ensaio de MR			100
			90				100
		2	0	Rompeu durante o ensaio de MR			100
			90				100
		3	0	796	103,61	13,02	100
			90	453	84,37	18,63	100
		4	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100
	15	5	0	1009	224,93	22,29	100
			90	606	120,05	19,82	100
		6	0	1011	83,57	8,26	100
			90	208	13,29	6,39	100
		7	0	3959	1648,37	41,64	100
			90	624	87	13,94	100
		8	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100
15	7	9	0	725	148,20	20,43	100
			90	428	25,14	5,87	100
		10	0	1458	257,33	18,88	100
			90	492	38,55	7,84	100
		11	0	Rompeu durante o ensaio de MR			100
			90				100
		12	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100
	15	13	0	906	179,5	19,81	100
			90	1571	194,61	12,38	100
		14	0	1549	284,64	13,38	100
			90	338	15,04	4,45	100
		15	0	1041	106,95	10,28	100
			90	334	9,24	2,77	100
		16	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100
		18	0	696	40,22	5,78	100
			90	611	76,49	12,52	100
		19	0	2804	474,88	16,94	100
			90	637	86,71	13,62	100

Continuação:

Tempo ensacado (dias)	Tempo de cura (dias)	CP	Graus	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	Carga (N)
30	7	17	0	532	14,17	2,66	100
			90	476	46,09	9,68	100
		18	0	696	40,22	5,78	100
			90	611	76,49	12,52	100
		19	0	2804	474,88	16,94	100
			90	637	86,71	13,62	100
		20	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100
	15	21	0	1554	210,33	13,53	100
			90	473	40,85	8,64	100
		22	0	1423	388,82	23,81	100
			90	863	127,45	14,83	100
		23	0	601	68,56	11,42	100
			90	415	17,70	4,26	100
		24	0	Não foi feito o ensaio de MR, somente o ensaio de RT			100
			90				100

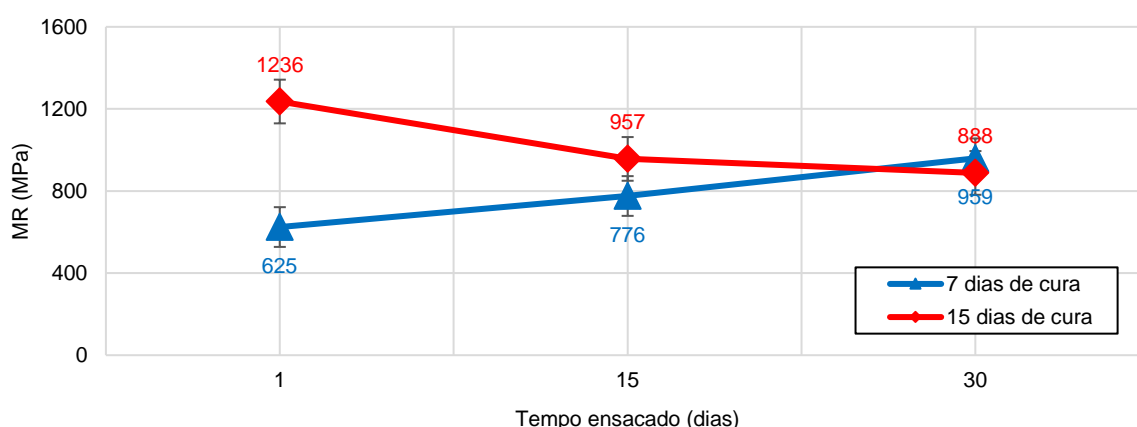
A Tabela 12 mostra os valores médios de MR em função do tempo ensacado e do tempo de cura.

Tabela 12 – Valores médios de MR em função do tempo ensacado e do tempo de cura

Tempo de cura (dias)	Tempo ensacado (dias)		
	1	15	30
7	625 MPa	776 MPa	959 MPa
15	1236 MPa	957 MPa	888 MPa

A Figura 29 ilustra o gráfico com os valores médios de MR para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados. Não é possível generalizar os resultados sobre os tempos, apenas afirmar que os valores obtidos são compatíveis com misturas asfálticas a frio e suficientes para serviços emergenciais. Esperava-se que com o aumento do tempo de cura ou do tempo de estocagem os valores pudessem alterar, ou pela saída do aditivo, como acontece e uma emulsão, ou com a dificuldade de compactar as amostras que levaria a queda dos valores. Com o auxílio das barras de erro no gráfico é possível verificar que apenas para a tempo de 1 dia de ensacado o tempo de cura é importante, o que faz todo sentido, visto que o agente químico ainda está bastante presente.

Figura 29 – Gráfico com os valores médios de MR para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



É possível pontuar também que o período entre 1 e 30 dias, que simularia o estoque com material, não trouxe dificuldades executivas do ponto de vista da compactação, ou seja, com a mesma energia aplicada (100 giros no CGS) o material pode ser compactado e não teve queda no comportamento.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A Tabela 13 mostra os resultados de RT para todos os CPs.

Tabela 13 – Resultados de RT para todos os CPs

Tempo ensacado (dias)	Tempo de cura (dias)	CP	Altura do CP	Diâmetro do CP	Força de pico (KN)	Força de pico (N)	RT (MPa)
1	7	1	7,24	9,96	Rompeu durante o ensaio de MR		
		2	6,69	9,99	Rompeu durante o ensaio de MR		
		3	6,64	9,97	1,188	1188	0,114
		4	6,63	9,96	1,341	1341	0,129
	15	5	6,64	9,97	1,252	1252	0,120
		6	6,62	9,97	1,141	1141	0,110
		7	6,61	9,98	1,462	1462	0,141
		8	6,62	9,99	1,201	1201	0,116
15	7	9	6,63	10,00	1,183	1183	0,114
		10	6,64	10,01	1,389	1389	0,133
		11	6,70	9,97	Rompeu durante o ensaio de MR		
		12	6,66	10,00	1,609	1609	0,154
	15	13	6,61	10,00	1,435	1435	0,138
		14	6,66	10,02	1,509	1509	0,144
		15	6,68	10,02	1,382	1382	0,132
		16	6,69	10,01	1,530	1530	0,145
30	7	17	6,69	10,00	1,559	1559	0,148
		18	6,70	9,99	1,628	1628	0,155
		19	6,69	10,00	1,441	1441	0,137
		20	6,69	9,99	1,396	1396	0,133
	15	21	6,69	10,00	1,566	1566	0,149
		22	6,69	10,00	1,500	1500	0,143
		23	6,70	10,00	1,475	1475	0,140
		24	6,70	9,99	1,322	1322	0,126

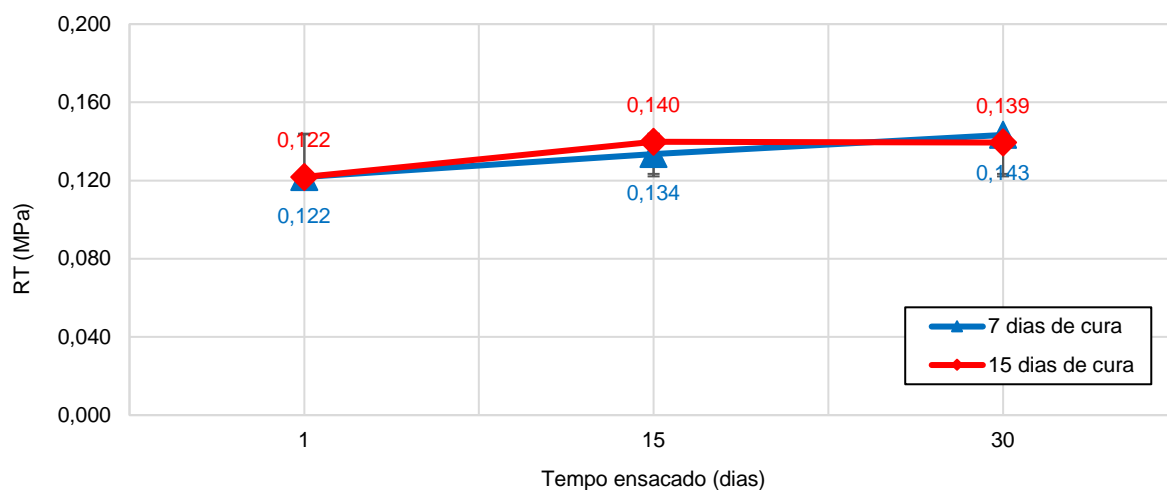
A Tabela 14 mostra os valores médios de RT em função do tempo ensacado e do tempo de cura.

Tabela 14 – Valores médios de RT em função do tempo ensacado e do tempo de cura

Tempo de cura (dias)	Tempo ensacado (dias)		
	1	15	30
7	0,122 MPa	0,134 MPa	0,143 MPa
15	0,122 MPa	0,140 MPa	0,139 MPa

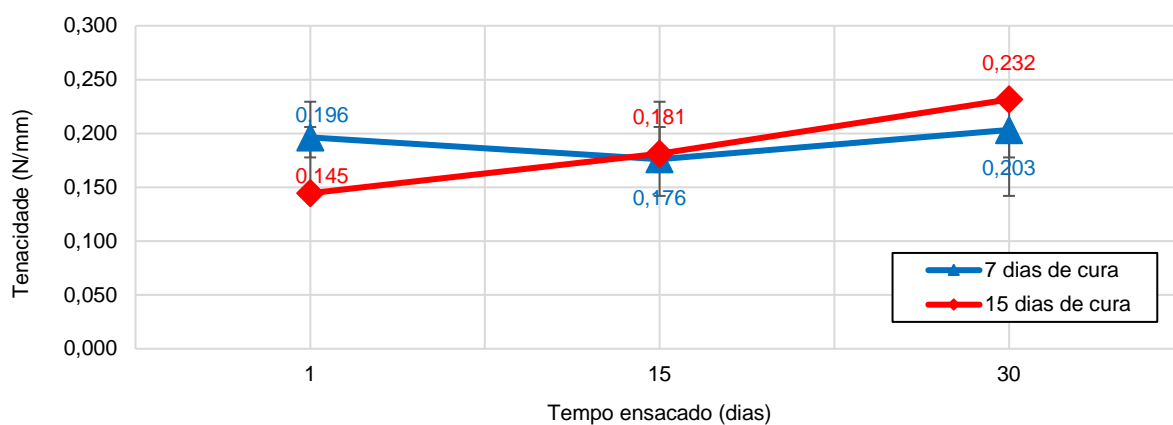
A Figura 30 ilustra o gráfico com os valores médios de RT para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 30 – Gráfico com os valores médios de RT para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



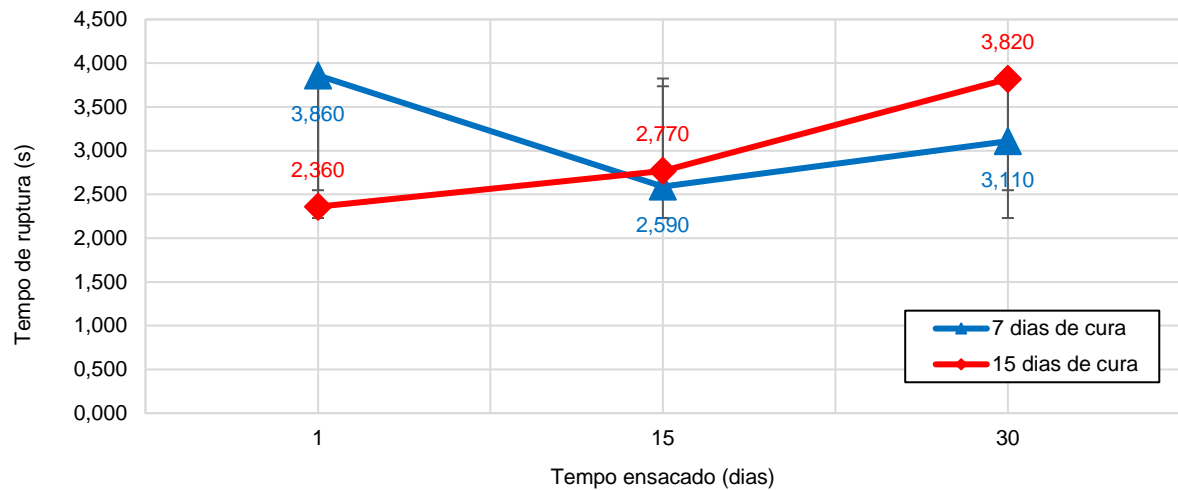
A Figura 31 ilustra o gráfico com os valores médios de tenacidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 31 – Gráfico com os valores médios de tenacidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



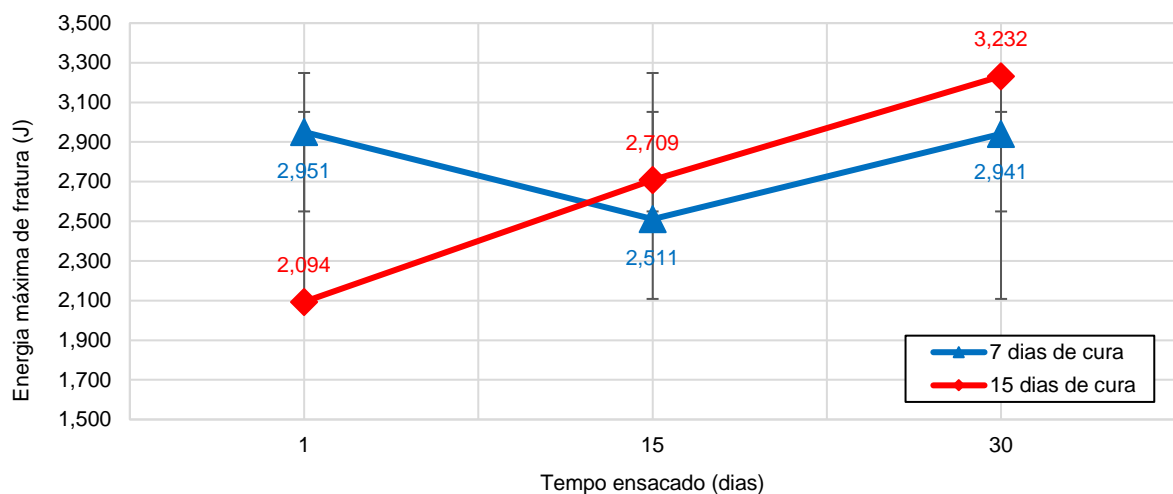
A Figura 32 ilustra o gráfico com os valores médios de tempo de ruptura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 32 – Gráfico com os valores médios de tempo de ruptura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



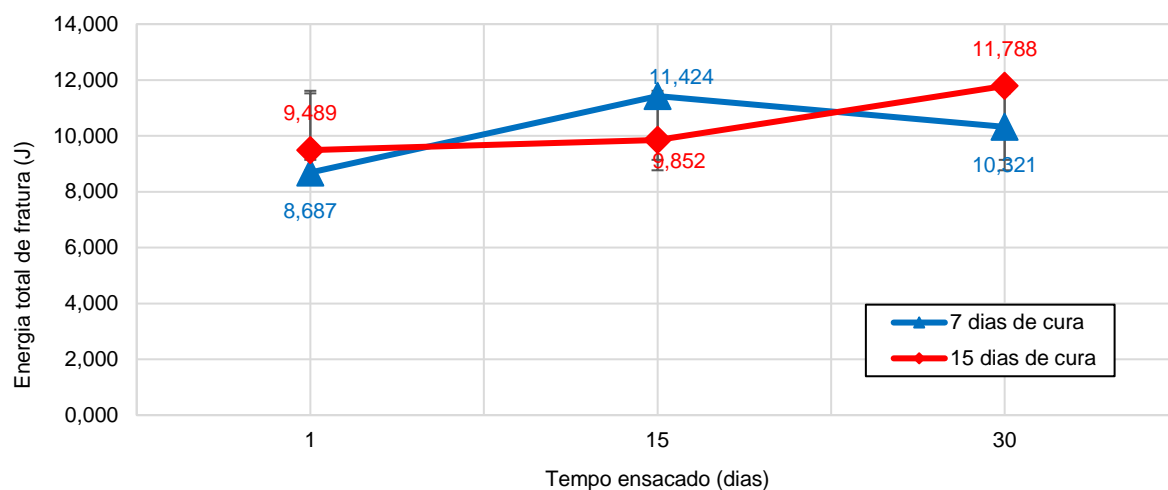
A Figura 33 ilustra o gráfico com os valores médios de energia máxima de fratura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 33 – Gráfico com os valores médios de energia máxima de fratura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



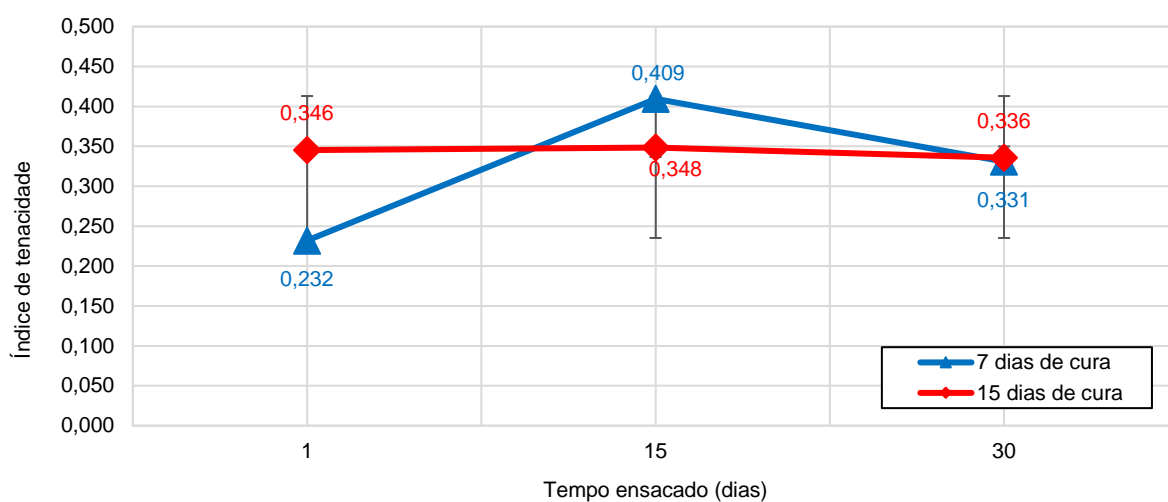
A Figura 34 ilustra o gráfico com os valores médios de energia total de fratura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 34 – Gráfico com os valores médios de energia total de fratura para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



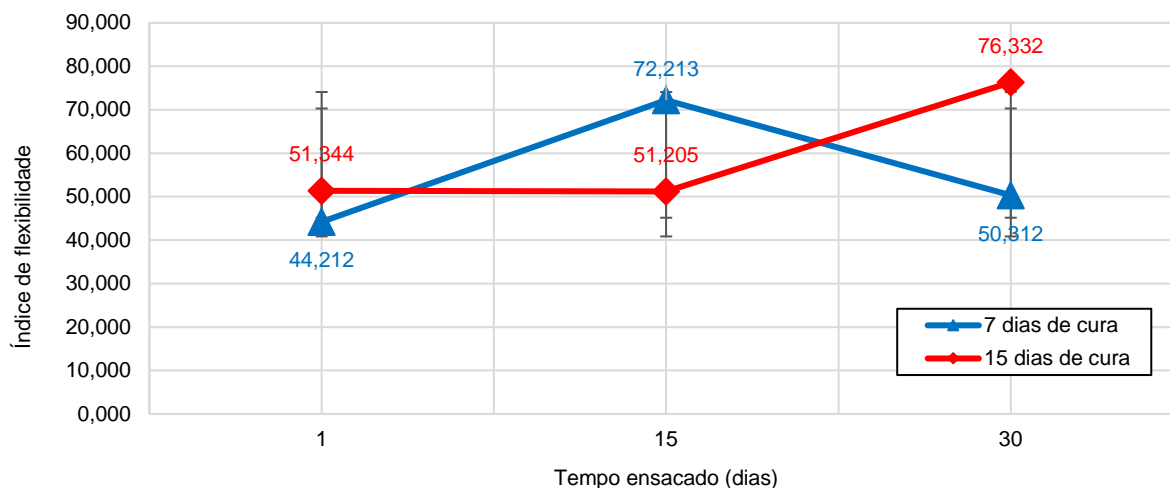
A Figura 35 ilustra o gráfico com os valores médios de índice de tenacidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 35 – Gráfico com os valores médios de índice de tenacidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



A Figura 36 ilustra o gráfico com os valores médios de índice de flexibilidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados.

Figura 36 – Gráfico com os valores médios de índice de flexibilidade para os dois tempos de cura em função dos três tempos ensacados



Assim como a RT e os demais índices extraídos do ensaio de tração por compressão diametral, (tenacidade, tempo de ruptura, índice de flexibilidade, energia máxima de fratura, índice de tenacidade, e índice de flexibilidade) não se mostraram sensíveis ao tempo de estocagem ou a cura das amostras após compactação, ou seja, no intervalo de tempo estudado, a mistura tem possibilidade de aplicação.

Para o valor de RT, que é mais comum, é possível afirmar que os valores são baixos, se comparados com os encontrados para concretos asfálticos (que segundo a especificação de serviço DNIS ES – P 031/2006 deveria ser maior que 0,65MPa) todavia se imaginarmos uma equipe de tapa buracos emergencial trabalhando com massa em condições de temperatura longe da ideal (massa fria) o resultado pode ser muito aquém do esperado. Para buracos pequenos em que o volume de massa é baixo possivelmente os esforços de compressão serão dominantes e em remendos maiores os esforços de tração e nestes casos é viável o uso de misturas a quente.

Uma questão que pode ser levantada é a influência da curva granulométrica adotada que, se fosse mais fina, ou seja, com menor quantidade de grãos, poderia permitir a maior densificação do material. Outro aspecto é que tanto as temperaturas de estocagem quanto de cura foram muito próximas a 25°C e que em pista,

possivelmente, esta temperatura de cura seria maior, acelerando as reações e talvez, enrijecendo e dando maior resistência ao material.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa teve caráter exploratório e laboratorial e obteve êxito em cumprir seus objetivos propostos de caracterizar materiais e produzir misturas asfálticas estocáveis em laboratório de forma a avaliar suas propriedades mecânicas.

A tempo de estocagem estudado e o tempo de cura empregado parecem não ter influência na compactabilidade da mistura refletido em suas propriedades mecânicas, indicando possibilidade de emprego neste intervalo; os valores obtidos de M_r ficaram entre 625 e 1236 MPa e os de RT entre 0,12 e 0,14 MPa, valores este compatíveis com mistura tipo pré-misturado a frio.

Os índices ligados aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (tenacidade, energia e índice de flexibilidade) apesar de promissores, não apresentaram diferenças significativas (como era de se esperar a partir da RT).

O tempo de estocagem de até 30 dias se mostrou adequado para aplicação do material e neste contexto tem alto potencial de aplicabilidade em campo.

Na perspectiva de continuidade, novos testes serão realizados em laboratório, bem como uma pesquisa de aplicação in situ com coleta de amostras para avaliação do comportamento frente a ação climática e do tráfego.

REFERÊNCIAS

- ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Manual básico de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- AL-QADI, I. L. et al. **Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS**. Report No. FHWA-ICT-15-017. Illinois Center for Transportation, 2015, Rantoul, IL.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4. 7th. Asphalt Institute, 2007.
- BABADOPULOS, L. F. A. **Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará. 2013.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- BARTHEL, W.; MARCHAND, J. P.; VON DEVIVERE, M. Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite. 3th. In: Eurasphalt & Eurobitume Congress. **Anais...** Paper 354. Vienna, Austria. 2004.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ª Ed (3ª reimpressão). Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2010. 504p.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 504 f. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.
- BETUNEL. **AsfaltoFácil®**. Disponível em: <http://www.betunel.com.br/asfaltofacil_carac.html>. Acesso em: 21 mar. 2017.
- BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 2014. 148 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2014.
- BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral. **Transportes (Rio de Janeiro)**, v. 16, p. 36-44, 2008.
- BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; ROBERTS, F. L.; KIM, Y. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt: materials, mixture design and construction**. 3rd ed. Lanham: NCAT at Auburn University, 2009.
- CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. 2010. 196p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2015. 146p.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011. 151p.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de Microrrevestimento Asfáltico a frio - MRAF**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 166 p.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. Brasília, 2016. 20. ed. 399 p. Disponível em: <<http://http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

CROTEAU, J.-M.; TESSIER, B. **Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. 2008.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 135/2010-ME**: Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. **DNIT 031/2006** - ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 035-ES: Pavimentos flexíveis – Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero**: Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **DNIT 035/2005-ES**: Pavimentos flexíveis – Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero: Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **DNIT 136/2010-ME**: Misturas Asfálticas – Determinação de resistência à tração por compressão diametral – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. **Manual de conservação rodoviária**. 2º Ed. Rio de Janeiro, 2005, 568p.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2º Ed. Rio de Janeiro, 2006, 314p.

EAPA – European Asphalt Pavement Association. **The use of Warm-Mix Asphalt**. 2014.

FACCIN, C.; SPECHT, L. P.; LIMA, R. C. A.; TOMBEZI, V. M.; TANSKY, M. C.; JUST, M. L. Utilização de câmera infravermelha no controle executivo de misturas asfálticas a quente. **Revista Estradas**. Porto Alegre, p. 34 - 41, 2015.

FERREIRA, C. I. G. **Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas**. 2009. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área de especialização: Engenharia Rodoviária) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2009.

GRECA. **Aditivo TB®**. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/produtos/aditivos/aditivos-tb-tapa-buraco>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, O. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, 2005.

ISSA. **Why use Slurry surfacing**. Pavement Performance histogram. Disponível em: <<http://www.slurry.org/why.htm>>. Acesso em: 07 jun2016.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1ª Ed. 2009.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia - Área de concentração: Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2011.

PERKINS, S. W. **Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for Use in Montana Highway Construction**. Report N° FHWA/MT-09-009/8117-38. The State of Montana Department of Transportation in cooperation with The U.S Department of Transportation Federal Highway Administration. USA, 2009.

PREUSSLER, ERNESTO; PINTO, SALOMÃO. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia: IBP, 2010.

PROWELL, B. D., HURLEY, G.C.; CREWS, E. Field Performance of Warm Mix Asphalt at the NCAT Test Track. Proceedings (CD), 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington. **Anais...** Washington, D.C., 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement, Series 125. Lanham: NAPA. 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement Publication 125, 3^a ed. Lanham: NAPA. 2012.

PUTMAN, B. J.; AMIRKHANIAN, S. N. Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures. **Journal of Resources, Conservation, and Recycling**, v. 24, Issue 3, 2004.

SABITA - Southern African Bitumen Association. **Manual 32: Best practice guideline for warm mix asphalt**. ISBN 978- 1-8974968-55-1. South Africa, 2011.