



**FATEC-SP**

**Faculdade de Tecnologia de São Paulo**

**Departamento de Transportes e Obras de Terra**

**FERNANDO AUGUSTO UYEHARA MANTUANI**

**Análise de características mecânicas de materiais reciclados com a  
utilização de espuma asfáltica.**

SÃO PAULO  
2014

**FERNANDO AUGUSTO UYEHARA MANTUANI**

**Análise de características mecânicas de materiais reciclados com a utilização de espuma asfáltica.**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Josué Alves Roso



**FATEC-SP**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Departamento de Transporte e Obras de Terra**

**Análise de característica mecânicas de materiais reciclados com a utilização de espuma asfáltica.**

  
Fernando Augusto Uyehara Mantuani

Monografia aprovada pela Banca Avaliadora constituída por

  
Prof. Me. Josué Alves Roso  
Presidente e Orientador

  
Prof.ª Leila Meneghetti

  
Prof. Rogério Marques Sant'Anna

São Paulo, 27 de maio de 2014.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos amigos, alunos e professores da graduação do curso de Tecnologia em Movimento de Terra e Pavimentação que colaboram de forma direta ou indiretamente, para que esta dissertação fosse concluída.

Em especial ao Professor Josué Alves Roso que auxiliou e incentivou do começo ao fim na dissertação.

## RESUMO

A pesquisa desenvolvida neste trabalho procurou apresentar informações sobre a utilização e desempenho nos processos de reciclagem de pavimentos flexíveis com espuma de asfalto.

O trabalho faz uma revisão bibliográfica, dissertando sobre os métodos de reciclagem conhecidos, expondo mais detalhadamente a definição da espuma asfáltica e seus vários tipos, métodos, equipamentos e processos.

As experimentações avaliaram algumas características mecânicas de misturas asfálticas realizadas com material reciclado de construção e demolição civil (RCD) e materiais extraídos de fresagem de asfalto RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*, moldando corpos de prova com a mistura destes com cimento, cal e asfalto espumado.

O comportamento das misturas recicladas e produzidas no laboratório, foi avaliado fundamentalmente, por meio de ensaios de resistência à tração (RT) por compressão diametral, ensaios de resistência Marshall.

Esse universo amostral demonstrou que, a utilização desses materiais e misturas propostas atendem as especificações brasileiras, tanto no parâmetro (RT), quanto no Marshall, demonstrando que as misturas com adição de cimento tem melhor desempenho que as com cal e que as misturas com maior quantidade de RAP tendem a ter melhor desempenho para o emprego em camadas de pavimento.

**Palavras-chave:** Reciclagem. Espuma.Asfalto. Espuma de asfalto.

## LISTA DE FIGURAS

<b><u>FIGURA 2.1: CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE FORMAS DE RECICLAGEM DOS PAVIMENTOS.....</u></b>	<b><u>6</u></b>
<b><u>FIGURA 2.2: ROLOS DE FRESAGEM CONVENCIONAIS .....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>FIGURA 2.3: FRESAGEM CONVENCIONAL.....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>FIGURA 2.4: ROLOS DE FRESAGEM DE MICROFRESAGEM .....</u></b>	<b><u>8</u></b>
<b><u>FIGURA 2.5: MICROFRESAGEM.....</u></b>	<b><u>8</u></b>
<b><u>FIGURA 2.6: USINAS DO TIPO GRAVIMÉTRICAS OU VERTICAIS (BATCH PLANTS)....</u></b>	<b><u>9</u></b>
<b><u>FIGURA 2.7:REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA USINA DE ASFALTO DO TIPO DRUM MIXER.....</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b><u>FIGURA 2.8:REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA USINA DE ASFALTO DO TIPO DRUM MIXER.....</u></b>	<b><u>11</u></b>
<b><u>FIGURA 2.9: RECICLAGEM A QUENTE <i>IN SITU</i> COM FRESAGEM A QUENTE.....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>FIGURA 2.10: RECICLAGEM A FRIO COM FRESAGEM A FRIO.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>FIGURA 2.11: FRESAGEM A FRIO EM VIA URBANA .....</u></b>	<b><u>14</u></b>
<b><u>FIGURA 2.12: RECICLAGEM COM FRESAGEM PROFUNDA (FULL DEPTH) .....</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b><u>FIGURA 3.1: ESQUEMA DA CÂMARA DE EXPANSÃO .....</u></b>	<b><u>23</u></b>
<b><u>FIGURA 3.2: CARACTERÍSTICA FÍSICA DE UMA MISTURA RECICLADA COM ESPUMA DE ASFALTO.....</u></b>	<b><u>24</u></b>
<b><u>FIGURA 3.3: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA A QUAL A ESPUMA DE ASFALTO FUNCIONA ADEQUADAMENTE.....</u></b>	<b><u>25</u></b>
<b><u>FIGURA 3.4:ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVOS NO PROCESSO WMA TEREX.....</u></b>	<b><u>27</u></b>
<b><u>FIGURA 3.5:PAINEL DE CONTROLE DO EQUIPAMENTO DE DOSAGEM.....</u></b>	<b><u>27</u></b>
<b><u>FIGURA 3.6:ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO MATERIAL ESPUMADO.....</u></b>	<b><u>28</u></b>

<b><u>FIGURA 3.7:ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE MISTURA SEMIMORNA NO PROCESSO LEA.....</u></b>	<b><u>30</u></b>
<b><u>FIGURA 3.8:REVESTIMENTO COM DB GREEN ESPUMADO .....</u></b>	<b><u>31</u></b>
<b><u>FIGURA 4.1:ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS COM A TEMPERATURA DE USINAGEM .....</u></b>	<b><u>34</u></b>
<b><u>FIGURA 5.1: PRENSA, SOQUETE E MOLDE MARSHALL.....</u></b>	<b><u>37</u></b>
<b><u>FIGURA 5.2: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS EM LABORATÓRIO.....</u></b>	<b><u>38</u></b>
<b><u>FIGURA 6.1: MATRIZ DE ENSAIOS COM MISTURAS RCD E RAP .....</u></b>	<b><u>43</u></b>
<b><u>FIGURA 6.2: QUANTIDADE DE ESPUMA DE ASFALTO A SER MISTURADO NAS MISTURAS.....</u></b>	<b><u>44</u></b>
<b><u>FIGURA 7.1: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....</u></b>	<b><u>46</u></b>
<b><u>FIGURA 7.2: GRÁFICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM MISTURAS PMF .....</u></b>	<b><u>47</u></b>

## **LISTA DE TABELAS**

**TABELA 2.1- SUGESTÕES PARA A SELEÇÃO DE MÉTODOS PARA RECICLAGEM ..... 17**

**TABELA 3.1: FAIXA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA PARA SERVIÇOS COM  
ESPUMA DE ASFALTO..... 25**

**TABELA 7.1: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RT INDIRETA SECA E SATURADA  
MÍNIMA COM ESPUMA..... 45**

**TABELA 7.2: RESULTADOS DOS ENSAIOS DA RESISTÊNCIA MARSHALL ..... 46**

**TABELA 7.3: RESULTADOS DOS ENSAIOS DA RESISTÊNCIA MARSHALL MISTURAS  
PMF ..... 46**



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**AASHTO** - American Association of State Highway and Transportation Officials.

**ASTM** - American Sistem Test Methods

**CAP** - Cimento Asfáltico de Petróleo

**CNT** - Confederação Nacional do Transporte CNT

**CP** – Corpo de Prova

**DERSA** -Desenvolvimento Rodoviário S.A.

**DER-SP** -Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

**DER-ES** - Departamento de Estradas de Rodagem de Espírito Santo

**DNER** -Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

**DNIT** -Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

**FHWA** -Federal Highway Administration

**HWMA** - Half-Warm Mixes Asphalt

**KGF** – Quilograma Força

**MPa** - Megapascal

**RAP** - Reclaimed Asphalt Pavement

**RCD** - Resíduos de Construção e Demolição

**VAM** - Vazios do Agregado Mineral

**VDM** - Volume Diário Médio

**VRD** - Valor de Resistência à Derrapagem

**VV** - Volume de Vazios

**VVc** - Volume de vazios dos CPs condicionados à água

**WMA** - Warm Mix(es) Asphalt

**WMA TWG** - Warm Mix Asphalt Technical Working Group

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	METODOLOGIA	3
<b>2</b>	<b><u>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</u></b>	<b>4</b>
2.1	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	4
2.2	HISTÓRICO	4
2.3	MÉTODOS DE RECICLAGEM	5
2.4	RECICLAGEM A QUENTE EM USINA	8
2.5	RECICLAGEM A QUENTE IN SITU	11
2.6	RECICLAGEM A FRIO	12
2.7	RECICLAGEM A FRIO IN SITU	13
2.8	RECICLAGEM A FRIO EM USINAS	15
2.9	RECICLAGEM DE CAMADAS DO PAVIMENTO	15
<b>3</b>	<b><u>A ESPUMA DE ASFALTO NA TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE ASFALTO</u></b>	<b>18</b>
3.1	HISTÓRIA DA ESPUMA ASFÁLTICA	18
3.2	ESPUMA DE ASFALTO	20
3.3	PROPRIEDADES DA ESPUMA ASFÁLTICA	22
3.4	TÉCNICAS DE ESPUMA DE ASFALTO	26
3.4.1	WMA TEREX®	26
3.4.2	WAMFOAM	28
3.4.3	LEA - LOW ENERGY ASPHALT	29
3.4.4	DOUBLLE BARRELL GREEN	31
3.4.5	ADVERA WMA E ASPHA-MIN	32
<b>4</b>	<b><u>MISTURAS ASFALTICAS</u></b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b><u>MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL</u></b>	<b>35</b>
5.1	MÉTODO DE ENSAIO	37
<b>6</b>	<b><u>ENSAIOS</u></b>	<b>42</b>
6.1	ENSAIO MARSHALL E DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	42
<b>7</b>	<b><u>RESULTADOS</u></b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b><u>ANÁLISES DE RESULTADOS</u></b>	<b>48</b>
<b>9</b>	<b><u>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO</u></b>	<b>50</b>



## 1 INTRODUÇÃO

---

A escolha dos governos brasileiros pelo transporte rodoviário traz embutidas diversas consequências ambientais, além do grande efeito poluidor dos gases liberados pelos escapamentos dos veículos automotores, há o impacto da construção das estradas que implica na movimentação de enormes quantidades de terra, desmatamento, alterações na forma de escoamento das águas, assoreamento de rios e os impactos advindos da manutenção das vias.

Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de julho de 2013 o Brasil soma com uma malha rodoviária de 1.584.402 km entre estradas federais, estaduais, municipais e concessionadas. Esta modalidade de transporte é responsável por 96,2% da locomoção de passageiros e a 61,8% da movimentação de cargas no país. Em uma avaliação recente foi descoberto que 69% da malha rodoviária está em péssimo, ruim ou regular estado de conservação.

Um dos fatores principais responsáveis pela situação de mal estado das rodovias, segundo a CNT (2013), é a má gestão dos recursos arrecadados com a Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (Cide).

Desde 2003, até setembro de 2009, a CNT mostra que foram investidos R\$ 23,8 bilhões na conservação das estradas. O valor, apesar de elevado, está longe do ideal considerado pela confederação. Dados divulgados pela CNT mostram que seria necessário o empenho de R\$ 32 bilhões para a **RESTAURAÇÃO** da malha rodoviária brasileira. (Globo, 2009)

Pavimentos deteriorados têm como características superfícies de baixa qualidade e defeitos, como trincas e desagregação. A deterioração do pavimento é influenciada, em grande parte, por condições climáticas severas, alto volume de tráfego e excesso de cargas, assim como pela qualidade da construção e manutenção da estrada que são abandonadas depois de concluídas. Essa deterioração tende a acelerar-se após vários anos de serviço, mas a recuperação oportuna com recapeamento ou reciclagem pode restaurar a serventia do pavimento e aumentar a vida útil da rodovia. A camada da superfície dos pavimentos asfálticos é composta de asfalto, um subproduto do petróleo, e agregado mineral, mistura de rocha de qualidade e areia. Em diversas regiões do mundo, estes materiais estão escassos, tornando-os mais caros. Esta situação é pior, já que as políticas ambientais atuais que condicionam o depósito em vazadouros e o funcionamento e abertura de locais de extração de agregados. Diversos métodos de restauração ou conservação rodoviária e tecnologias de

restauração já foram utilizados durante muitos anos, na tentativa de utilizar melhor os agregado e asfalto presentes nos pavimentos asfálticos deteriorados.

Um dos métodos mais promissores é a reciclagem de pavimentos, para a qual há uma variedade de equipamentos e processos consagrados. Estudos do Banco Mundial têm demonstrado que a reciclagem de pavimentos asfálticos é, particularmente, uma alternativa efetiva em termos de custo, quando realizada em momento oportuno. (BRASIL ENGENHARIA, 2011)

Segundo Cunha *et al.* (2010)

O consenso no meio técnico internacional sobre as vantagens da reciclagem vêm também justificar por si só o desenvolvimento desta técnica. Como principais vantagens pode referir-se que a utilização de pavimentos danificados como fonte de matéria prima reduz significativamente a utilização de recursos naturais nomeadamente de agregados e betumes, promove a diminuição das zonas de vazadoiro e depósito de resíduos provenientes do levantamento/fresagem de antigos pavimentos com os respectivos benefícios ambientais e por fim, reduz o custo da manutenção dos pavimentos.

Uma nova alternativa de reciclagem de pavimentos com adição de espuma de asfalto está ganhando importância no mercado.

A tecnologia de espuma de asfalto é uma modalidade de reciclagem *in situ* frio do pavimento, de forma que se obtém uma camada de base reciclada, utilizando-se revestimento asfáltico removido do pavimento, produtos de britagem, cimento Portland ou outro agente estabilizador. (PINTO, 2002)

A utilização da espuma de asfalto traz o benefício de poder construir, por meio da adição de pequenas quantidades de ligante betuminoso, uma camada com capacidade estrutural adequada para suportar as cargas do tráfego atuante e também auxilia o envolvimento dos componentes granulares da mistura e permite construir, de forma econômica, camadas de bases flexíveis. (WIRTGEN, 2012)

As vantagens do uso dessa tecnologia consegue entrar em harmonia com a proposta de preservar o meio ambiente, já que praticamente todo o material retirado (revestimento e/ou base) é reutilizado no mesmo momento em que o trabalho é realizado. Dessa forma, não há desperdício de materiais (quase nada é jogado fora) e, na maioria das vezes, não necessita de exploração de pedreiras e jazidas para retirada de materiais.(PINTO, 2002)

## **1.1 OBJETIVO**

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar algumas características do comportamento mecânico de materiais reciclados com espuma de asfalto utilizado em pavimentos flexíveis, visando contribuir para melhor entendimento desta técnica de pavimentação.

Confeccionar corpos de prova com a mistura de materiais recicláveis de construção civil, variando suas quantidades e adicionando estabilizantes químicos, tais como cal e cimento. Para avaliar suas características mecânicas quanto a resistência à tração e resistência Marshall, a fim de verificar seu desempenho na utilização em camadas de pavimentos flexíveis, utilizando-se de parâmetros especificados por normas brasileiras.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O fato desse procedimento utilizar materiais retirados (fresados) do pavimento existente, reutilizando esses materiais, faz com que este proporcione uma redução significativa do passivo ambiental, considerando que suas características atendam as necessidade técnicas, tanto estrutural como funcional, pode-se sugerir que este é um método executivo que apresenta um grande vantagem em relação a outros métodos, uma vez que, os materiais que esse método utiliza já estão no local, dispensando transporte e exploração de novas jazidas, preservando o meio ambiente, reduzindo, com isso, custo do projeto e prejuízo ambiental.

## **1.3 METODOLOGIA**

O trabalho desenvolve-se por meio de pesquisas bibliográficas sobre o assunto e, por intermédio da verificação dos resultados de ensaios de laboratório. Os resultados dos ensaios serão utilizados para analisar as características do comportamento mecânico de materiais recicláveis. Para avaliar o comportamento dessas misturas e condições de utilização desses materiais em camadas de pavimento são utilizados normas brasileiras como referência para estudo.

## 2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

---

### 2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A busca de técnicas de restauração de pavimentos que apresentem respostas cada vez melhores quanto ao seu comportamento e desempenho, vem sendo um desafio para o meio rodoviário. Procedimentos e técnicas são estudados, testados e aplicados para se atingir este objetivo.

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de restauração onde toda, ou parte da camada do pavimento existente, é reaproveitada na construção de uma nova camada. As vantagens da utilização da técnica da reciclagem na conservação de vias vão desde a economia de materiais, até a preservação do meio ambiente. A reciclagem contribui para a preservação ambiental, pois, além de reaproveitar materiais que seriam **BOTA FORA**, (camada fresada para manutenção de greide por exemplo), evita a exploração agressiva das áreas de exploração.

### 2.2 HISTÓRICO

O uso das técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos data do início do século passado, mais precisamente por volta de 1915. (Kandhal, 1997)

O uso do CAP na reciclagem de pavimentos é anterior aos anos 30, quando apareceram as primeiras máquinas de fresagem nos Estados Unidos, desenvolvidos por um empreiteiro de Utha (Terrel *et al.*, 1997). Taylor (1978) relata que no início dos anos 30 foi executada uma restauração de pavimentos em Singapura, usando a reciclagem com desempenho acima das expectativas, tendo sua vida útil variado entre 25 e 30 anos. Ele relata também que, novamente utiliza com sucesso a reciclagem de pavimentos em Bombay na Índia, com a vida do pavimento reciclado durando em torno de 30 anos.

Segundo Alvim (1999), no início dos anos 60, na Europa, particularmente na então Alemanha Ocidental, apareceram os primeiros trabalhos significativos com a reciclagem de pavimentos, que devido ao seu sucesso logo chegaram a outros países da Europa e América do Norte. O grande aumento do uso da técnica da reciclagem aconteceu na primeira metade da década de 70, por ocasião do conflito Árabe-Israelense, onde o embargo do petróleo produzido no oriente Médio proporcionou uma disparada no preço do produto (Kandhal, 1997).

Terrel *et al*, (1997) relata que, no período de 1975 até o final dos anos 90, o volume de pavimentos reciclados superou todas as reciclagens executadas entre os anos de 1915 e 1975.

No Brasil, a primeira vez em que se utilizou a técnica de reciclagem de revestimentos betuminosos foi na Prefeitura Municipal da Cidade do Rio de Janeiro já em 1960, onde, na época, o revestimento era removido por meio de marteletes e transportado para a usina e remisturado. (Pinto, 1989)

Experiências foram realizadas na década de 70, na Via Anhanguera em São Paulo sob a responsabilidade do Dersa-SP. Os primeiros serviços de fresagem urbana foram executados na cidade de São Paulo nos anos 1984/1985, e os primeiros testes de reciclagem em usinas do tipo Drum-Mixer em 1984, também na cidade de São Paulo (Alvim, 1999).

## **2.3 MÉTODOS DE RECICLAGEM**

A reciclagem de pavimentos tem se mostrado ao longo dos anos, como uma boa alternativa de restauração de pavimento. Diferentes métodos de reciclagem foram desenvolvidos especificamente para a situação do pavimento existente.

De maneira geral, os autores costumam classificar as técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos em duas modalidades, que são as técnicas de reciclagem a quente e a frio, que por sua vez podem ser processadas no próprio local, ou seja, "in situ", ou em usina apropriada. BONFIM (2001) classifica as reciclagens de forma abrangente como mostrado na figura 2.1 demonstra a classificação dos tipos de reciclagem.



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

Figura 2.1: Classificação dos tipos de formas de reciclagem dos pavimentos  
Fonte: BONFIM (2001)

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA), define cinco categorias principais de diferentes métodos de reciclagem (Kandhal, 1997):

- Reciclagem à quente (Hot recycling);
- Reciclagem à quente *in situ* (Hot in-place recycling);

- Reciclagem à frio (Cold planning);
- Reciclagem à frio in-situ (Cold in-place recycling);
- Reciclagem de camadas do pavimento (Full depth reclamation).

Conforme (Alvim, 1999), é importante notar a diferença entre reciclagem e fresagem. A reciclagem de pavimento é uma técnica de restauração, enquanto a fresagem do pavimento é uma operação onde o pavimento, ou parte dele, é cortado através de um equipamento dotado de um cortador giratório empregando movimento rotativo. A fresagem pode ser feita a frio ou a quente.

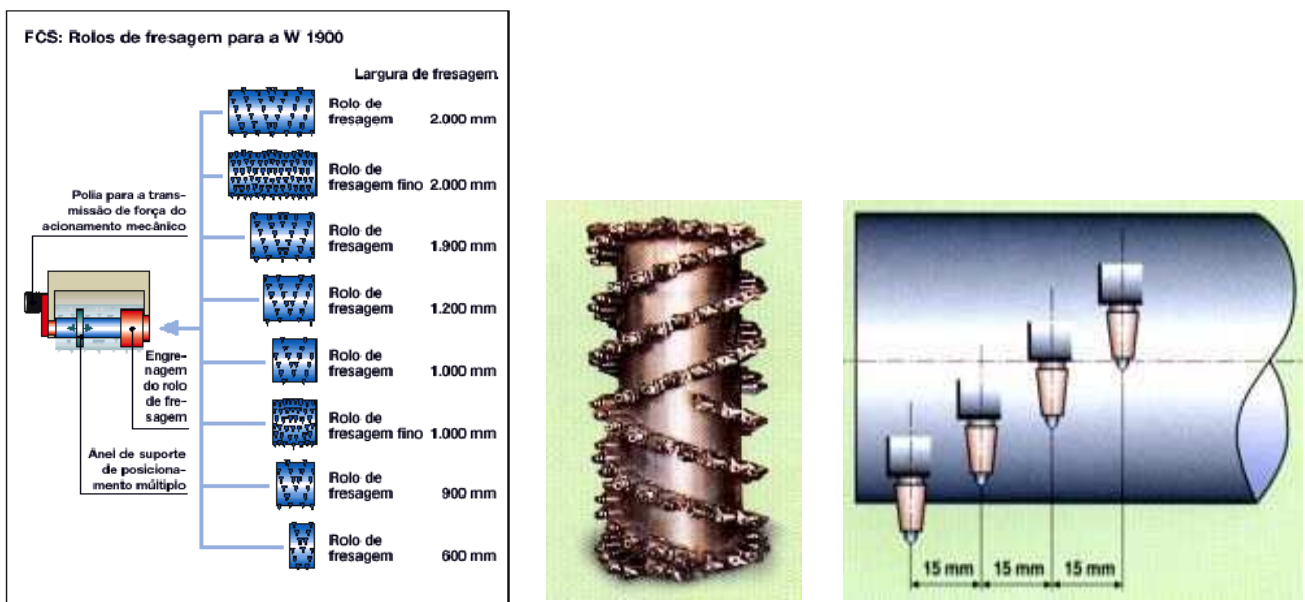


Figura 2.2: Rolos de Fresagem convencionais  
Fonte: WIRTGEN (1998)



Figura 2.3: Fresagem Convencional  
Fonte: WIRTGEN (1998)

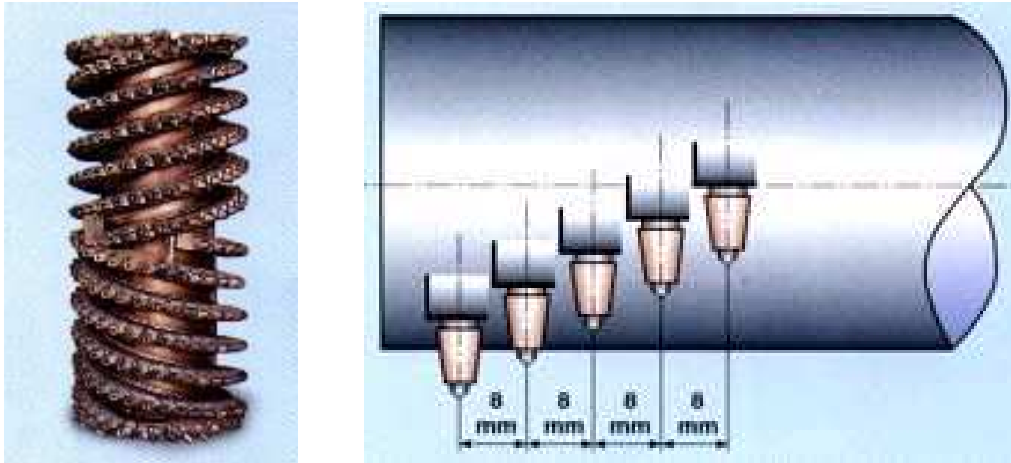


Figura 2.4: Rolos de Fresagem de microfresagem  
Fonte: WIRTGEN (1998)



Figura 2.5: Microfresagem  
Fonte: WIRTGEN (1998)

## 2.4 RECICLAGEM A QUENTE EM USINA

Consiste na remoção e redução a dimensões apropriadas do material por intermédio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente estabelecida que é depois transportada para um local de estocagem para que seja processada a reciclagem.

São utilizados dois tipos de usinas para a reciclagem do asfalto removido. Usinas do tipo gravimétricas ou verticais (Batch Plants) (Figura 2.6) e usinas horizontais (Drum Mixer) Figura 2.8. (Asphalt Institute, 1986)

As usinas gravimétricas consistem basicamente de um depósito para armazenar os agregados, um secador para retirar a umidade, e aquecer os mesmos, um depósito para o

material fresado, um elevador para transportar o material para a parte superior da torre, onde os mesmos serão separados através de peneiras vibratórias. Os agregados aquecidos e separados granulometricamente são descarregados dentro de um depósito, onde a correta proporção de cada agregado é determinada por peso e misturado com o asfalto (e AR, se for o caso) na proporção estabelecida no projeto de mistura dentro do pugmill (misturador). O tempo de mistura é de aproximadamente 25 a 30 segundos, tempo necessário para que o AR se disperse na mistura, já que entre outras coisas o desempenho da mistura reciclada depende; da eficiência de como o agregado virgem e o ligante (asfalto + AR) são misturados com o material fresado, e da forma com que o agregado é envolvido por este ligante. A distribuição do AR na mistura reciclada é função do tempo com que ela é executada (Lee *et al*, 1983). Quando a mistura está completada, a parte inferior do pugmill é aberta e a mistura asfáltica reciclada é descarregada dentro da carroceria do veículo de transporte. O material fresado pode ser adicionado aos novos agregados em três locais diferentes na usina, no fundo do elevador, nos depósitos aquecidos dos agregados dentro da torre ou, como é mais comum, no depósito alimentador para pesagem (weigh hopper) (USACE, 2000). A quantidade de material fresado a ser adicionada à mistura reciclada depende de três fatores: teor de umidade, temperatura desejada para a mistura asfáltica, e temperatura dos agregados novos previamente aquecidos. Se a temperatura do material fresado for próxima à temperatura ambiente, e se o seu teor de umidade for mínimo, é possível utilizar 50% de material fresado na nova mistura asfáltica reciclada, utilizando-se este tipo de usina (Asphalt Institute, 1986)

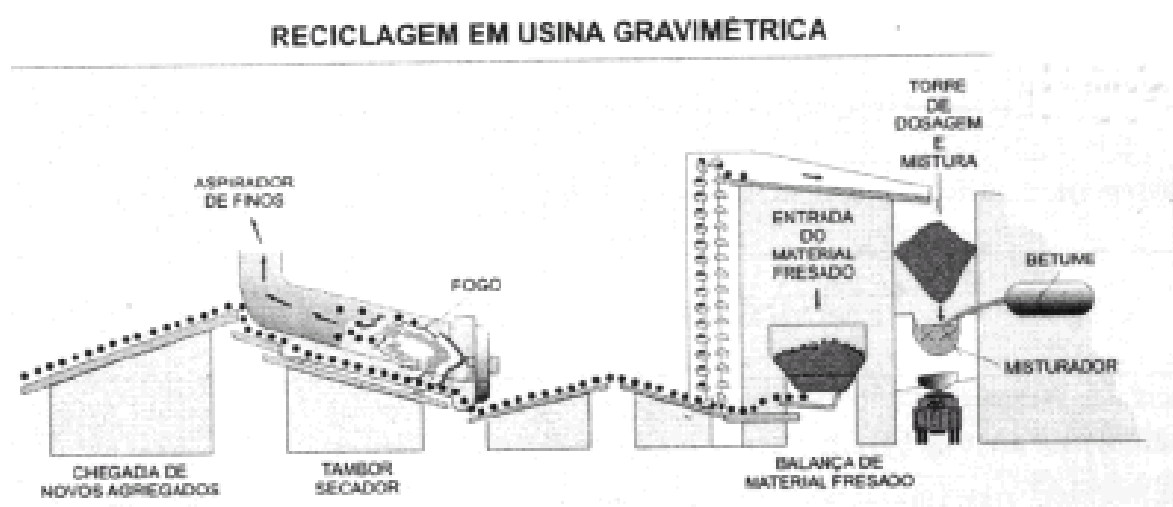


Figura 2.6: Usinas do tipo gravimétricas ou verticais (Batch Plants)

Fonte: ASPHALT INSTITUTE (1986)

As usinas do tipo Drum Mixer possuem cinco componentes principais: depósitos para estocagem dos agregados; tanque de suprimento de asfalto; tambor misturador; silos de armazenagem da mistura pronta e equipamento de controle de emissões poluentes. Os materiais agregados estocados são dosados conforme o projeto de mistura e transportados através de esteiras até o tambor onde se dá o aquecimento necessário para a mistura atingir aproximadamente 175°C. Uma usina convencional do tipo Drum Mixer possui um sistema de fluxo paralelo, ou seja, os gases da exaustão e os agregados movem-se dentro do tambor na mesma direção. O material fresado incorpora-se à mistura na porção média do tambor por intermédio de correia transportadora do local onde está estocado até o colar adaptado no tambor para essa finalidade. A entrada do material fresado na porção média do tambor é para evitar que o mesmo não sofra um super aquecimento, aumentando a emissão de hidrocarbonetos no fenômeno chamado de Blue Smoke. Após a mistura do agregado com o fresado no interior do tambor, adiciona-se asfalto novo e agente rejuvenescedor (se for o caso) na parte final do tambor misturador. Com a mistura pronta transporta-se a mesma até os silos de armazenagem, de onde são abastecidos os veículos transportadores da mistura (USACE, 2000). Usinas do tipo Drum Mixer permitem que sejam aproveitados até 70% de material fresado na mistura reciclada. (Asphalt Institute, 1986)

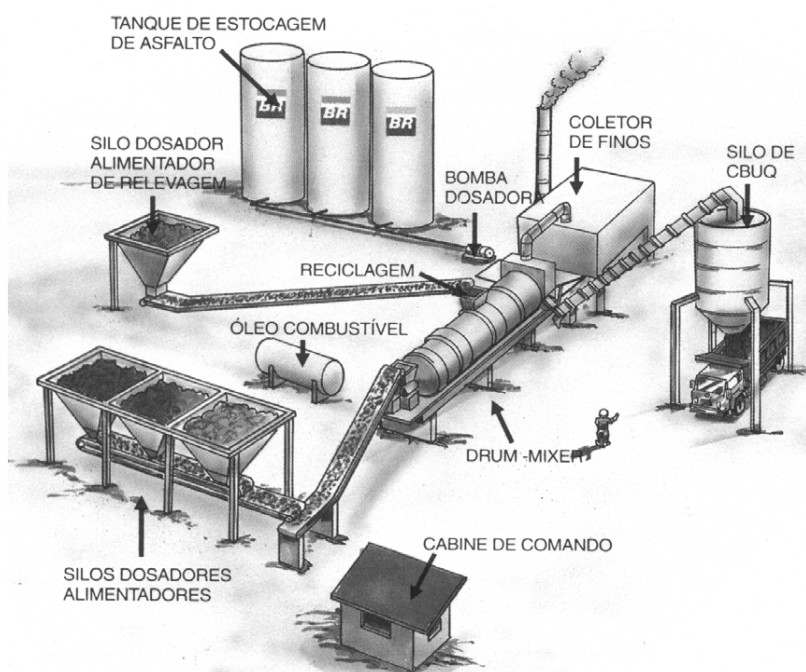


Figura 2.7: Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo Drum Mixer.  
Fonte: ASPHALT INSTITUTE (1986)

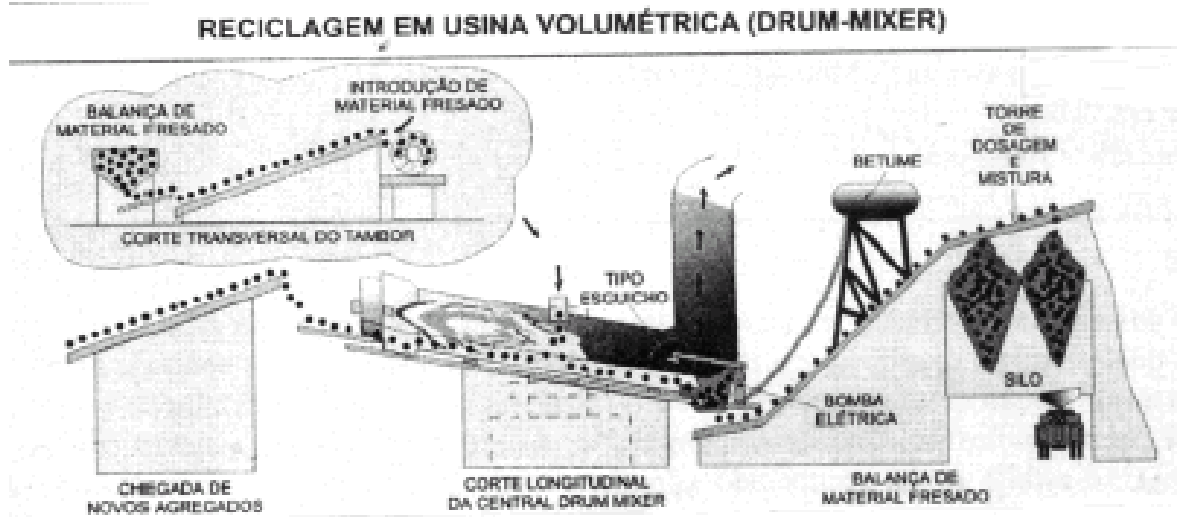


Figura 2.8: Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo Drum Mixer.  
Fonte: ASPHALT INSTITUTE (1986)

## 2.5 RECICLAGEM A QUENTE IN SITU

A reciclagem de misturas asfálticas a quente realizada *in situ* é definida como um processo de correção da superfície do pavimento asfáltico. Consiste na remoção mecânica da superfície asfáltica, através de aquecimento e conseqüente amolecimento (fresagem a quente). Esta superfície é então misturada com o ligante asfáltico, agregados virgens, e agentes rejuvenescedores (Figura 2.9). Após este processo, a mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento remanescente.

A reciclagem a quente *in situ* pode ser feita com uma operação de uma passagem única do equipamento reciclador, que combina o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é recompactado, seguido da aplicação de uma nova mistura asfáltica (Terrel *et al.*, 1997).

Existem três processos básicos de reciclagem a quente *in situ*:

- Escarificação com aquecimento (Heater-scarification), no qual o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado;
- Repavimentação (Repaving), onde é utilizado o mesmo procedimento citado acima, com a adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada;
- Remixing, processo similar aos anteriores, porém com um aquecimento mais efetivo, permitindo a colocação de revestimento mais espesso, e uma melhoria no revestimento



velho com correções na granulometria do agregado ou ajustes nas propriedades do ligante.



Figura 2.9: Reciclagem a quente *in situ* com fresagem a quente.

Fonte: WIRTGEN (2014)

Uma vez que a superfície reciclada é superficial, esta técnica é indicada apenas para a correção de defeitos de superfície, exclusivamente de classe funcional. Entre os defeitos que podem ser corrigidos por esta técnica estão (DNER, 1998):

- Trincas em bloco por retração;
- Desagregação;
- Exsudação;
- Perda de atrito;
- Oxidação excessiva;
- Afundamentos superficiais de trilha de roda;
- Corrugações superficiais.

## 2.6 RECICLAGEM A FRIO

A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento asfáltico é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado através da confecção de uma nova camada superficial. Este método permite a correção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações na camada superficial. Permite também a possibilidade de se corrigir problemas de rugosidade superficial, melhorando o atrito entre a superfície de rolamento e os

pneus dos veículos. A reciclagem a frio utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura pré-determinada. (Asphalt Institute, 1989)

## 2.7 RECICLAGEM A FRIO IN SITU

A reciclagem a frio *in situ* é a restauração do revestimento existente utilizando-se normalmente asfalto emulsionado a temperatura ambiente, para produzir uma nova camada asfáltica com características semelhantes a uma nova mistura pré-misturada a frio (PMF) conforme indica a figura 2.10.

O processo consiste basicamente da execução da fresagem do revestimento asfáltico existente a uma determinada profundidade adicionando-se emulsão asfáltica, aditivos, espalhando-a e compactando-a em seguida com o uso de um equipamento apropriado (trens de reciclagem). A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia normalmente entre 75 a 100 mm.

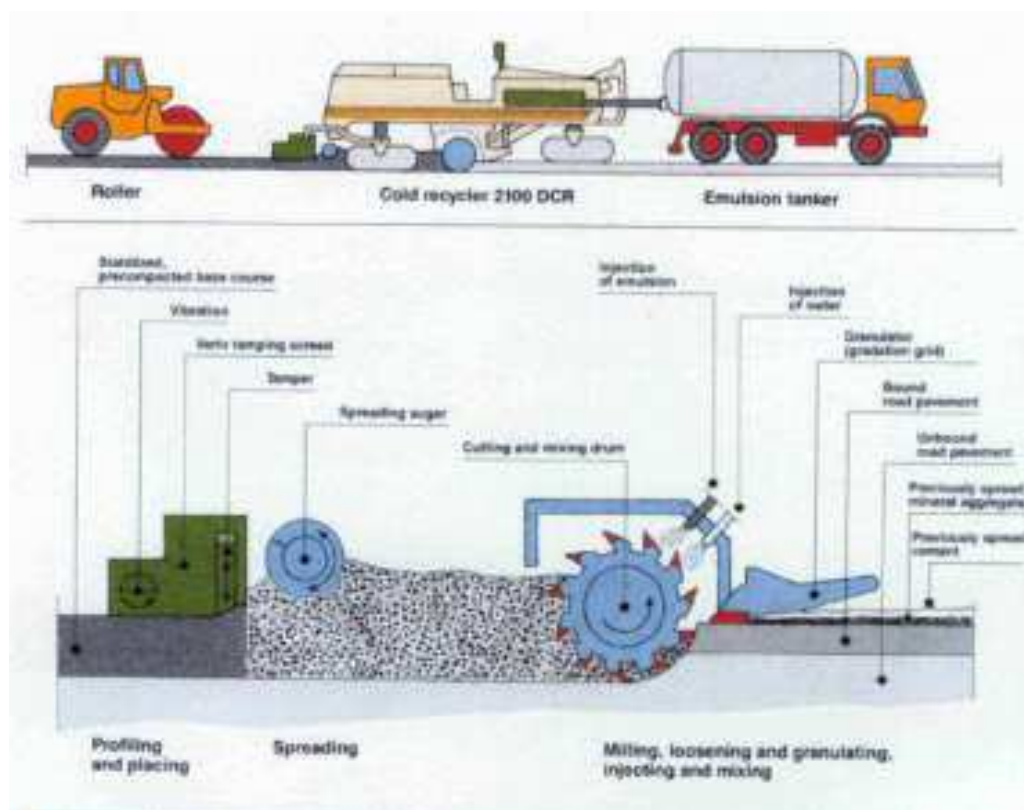


Figura 2.10: Reciclagem a frio com fresagem a frio.  
Fonte: WIRTGEN (2008)



As reciclagens a frio *in situ* têm sido indicadas para vias rurais e urbanas (Figura 2.11), com baixos e altos volumes de tráfego (Kearney, 1997). Esta técnica foi aplicada com sucesso em trechos da rodovia BR 393/RJ, para um tráfego considerado pesado ( $N = 1,8 \times 107$ ) (Pinto *et al.*, 1994). A técnica de reciclagem a frio *in situ* também se mostrou mais econômica que outros tipos de reciclagem, principalmente por eliminar a necessidade de aquecimento da mistura, e diminuir bastante o custo com o transporte de material, uma vez que somente o agente rejuvenescedor será transportado. Hoje em dia no Brasil utiliza-se basicamente este tipo de reciclagem, quando se indica reciclagem a frio.



Figura 2.11: Fresagem a frio em via urbana  
Fonte: WIRTGEN (2008)

A reciclagem a frio *in situ* não é recomendada:

- Pavimentos que apresentem problema no subleito.
- Incompatibilidade ao volume de tráfego.
- Desagregação precoce do revestimento.
- Pavimentos exibindo afundamentos de trilhas de roda devido a instabilidade da mistura, excesso de ligante.
- Frio e umidade elevada, incluindo áreas sujeitas a alagamentos.
- Revestimento asfáltico com espessura inferior a 4 cm.

A reciclagem a frio *in situ* é recomendada:

- Pavimentos trincados devido a idade do revestimento.
- Pavimentos com diversos recapeamentos sucessivos.
- Pavimento com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço.
- Desintegração do revestimento devido a idade.
- Como binder e base no caso de recapeamento.
- VMD inferior a 5000 veículos.
- Reabilitação seletiva.
- Insuficiência de agregados virgens na região.

## **2.8 RECICLAGEM A FRIO EM USINAS**

A reciclagem a frio em usina pode ser realizada em usinas estacionárias, valendo-se das usinas de solos, que recebe o material fresado e o processa com a adição de material de enchimento, caso necessário, e agente rejuvenescedor emulsionado. (DNER, 1996)

Essa técnica é muito utilizada em países europeus e a porcentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir cerca de 90%. (DNER, 1996) Também podem ser utilizadas usinas móveis, que podem produzir misturas com material virgem ou material proveniente de fresagem. Cita-se como exemplo de usina móvel a KMA, essa usina permite a execução de misturas com espuma de asfalto destinadas à camada de base, além de possibilitar também a execução de misturas com emulsão e/ou cimento. (WIRTGEN, 1998)

## **2.9 RECICLAGEM DE CAMADAS DO PAVIMENTO**

Finalmente a reciclagem incorporando as camadas do pavimento, com a camada asfáltica do revestimento, com ou sem adição de novos materiais, produzindo uma nova camada de base estabilizada, tem sido indicada na restauração de pavimentos deteriorados. Esta técnica nada mais é que uma variação do método de reciclagem a frio, diferenciando-se deste pelo fato de se incorporar diferentes tipos de aditivos tais como: cal hidratada; cimento, agregados, emulsões, agentes químicos (p/ex. polímeros e fibras sintéticas), etc.

Estes aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo. (Araújo *et al.*, 2001) Estudos realizados por Soares *et al.* (1999, 2000) mostram que a incorporação de brita as camadas de base tem quase sempre

aumentado o desempenho à resistência a deformação permanente, porem não indicando necessariamente aumento de módulo de Resiliência.

O método de reciclagem com incorporação de material, geralmente atinge profundidades entre 250mm (Huffman *et al.*, 1997) e 305mm (Kandhal, 1997) figura 2.12. A principal vantagem deste tipo de reciclagem é a possibilidade de se corrigir defeitos estruturais no pavimento, especialmente nas camadas abaixo do revestimento, afora todas as outras vantagens dos métodos citados anteriormente.



Figura 2.12: Reciclagem com fresagem profunda (Full Depth)  
Fonte: WIRTGEN (2008)

A escolha do método de reciclagem a ser adotado para a restauração de pavimentos depende dos tipos de defeitos que o mesmo apresenta a extensão e a severidade dos mesmos. Baseados em defeitos de superfície, deformações, trincamentos, correção de afundamentos do tipo trilha-de-roda, problemas nas camadas de base/subbase, e problemas relacionados à rugosidade da superfície de rolamento, The Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA) recomenda conforme tabela 2.1 um guia de sugestões para a escolha da alternativa de reciclagem (Kandhal, 1997; Huffman, 1997). Os números sobrescritos referem-se às observações colocadas após a tabela.

Condição do Pavimento		Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente "in situ"	Reciclagem a frio "in situ"
Defeitos de superfície				
	Desagregação	x	x	
	Exsudação	x	x	
	Empolamento	x	x	
Deformação				
	Corrugações	x	x	
	Afundamento de trilha de roda	x	x	
	Depressões	x		x
Trincamento (associado a carga)				
	Couro de jacaré	x		x
	Longitudinal(na trilha de roda)	x	x	x
	Trinca de borda	x		x
	Trincamento parabólico	x	x	
Trincamento (não associado à carga)				
	Blocos (retração)	x		x
	Longitudinal (juntas)	x	x	
	Transversal (térmica)	x		x
Reflexão de trincas		x		x
Remendos de manutenção		x		x
Qualidade de rolamento				
	Desnível generalizado	x	x	
	Adensamentos	x	x	
	Afundamentos localizados	x	x	

Tabela 2.1- Sugestões para a seleção de Métodos para Reciclagem

Fonte: FHWA (1993)

### **3 A ESPUMA DE ASFALTO NA TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE ASFALTO**

---

Na reciclagem de pavimentos, de modo geral, o asfalto pode ser aplicado de três maneiras diferentes: a quente, exigindo temperaturas elevadas (acima de 150°C), diluído em solventes (gasolina, querosene e óleos) sob a forma de asfalto diluído e também disperso em água para fabricação de emulsão asfáltica. Entretanto, uma quarta forma de aplicação está se tornando bastante utilizada na recuperação de rodovias, a espuma de asfalto.

A utilização da espuma de asfalto como alternativa de recuperação de camadas do pavimento (revestimento, base ou sub-base) vem sendo utilizada bastante em países como África do Sul, Austrália e Alemanha. ENGELBRECHT (1999). No Brasil, seu uso também vem crescendo principalmente devido à praticidade de utilização e aos bons resultados alcançados.

#### **3.1 HISTÓRIA DA ESPUMA ASFÁLTICA**

Há muito tempo já é estudado um método que possibilitasse diminuição da temperatura da mistura asfáltica para economizar energia e diminuir a emissão de gases na atmosfera. O fato inicial que se tem registro é de 1956, quando o Prof. Dr. H. Ladis Csanyi, da Universidade do Estado de Iowa nos EUA, realizou estudos com espuma de asfalto que indicavam que era possível misturar asfalto a quente com agregados frios e mesmo úmidos, sem a necessidade de adição de solventes ou emulsificantes, através da mudança do asfalto do estado líquido para o estado de espuma de asfalto. (WIRTGEN,1998)

O experimento consistia em utilizar o vapor da água como forma de promover a homogeneização da água no asfalto quando aquecido a temperaturas elevadas propícias para mistura asfáltica a quente. Como um dos elementos da espuma era o vapor, sua utilização em pequenas dosagens passou a ser o grande problema por falta de regulação conveniente.

Em meados dos anos 1960 a 1970, a Companhia Móbil Oil Austrália Ltda, percebeu o potencial da espuma de asfalto e desenvolveu um sistema onde a água pulverizada era injetada diretamente no asfalto em uma câmara de expansão e com isto o processo ficou mais prático. A Móbil Oil fez o registro da patente para proteção do seu investimento em pesquisa e desenvolvimento e que ocasionou uma desfavorável aceitação pelo mercado por muitos anos. Em meados dos anos 90, após o período de validade das patentes perderem o prazo, a espuma de asfalto passou a ser utilizada na pavimentação, devido à disponibilidade

de sistemas de espuma de asfalto no mercado. Maiores esforços foram feitos em laboratório e alguns testes de campo foram conduzidos.

Por volta de 1996 o setor rodoviário estava preocupado com o meio ambiente e estava procurando desenvolver novas tecnologias no âmbito da pavimentação com o objetivo de contribuir com essa questão.

Na mesma época aconteceram dois fatos importantes, onde a União Européia começou a buscar formas de cumprir as metas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto, que determinava a estabilização da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e assim frear o aquecimento global e seus possíveis impactos. E o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais alemão passou a considerar limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto em 1996. Por causa desses acontecimentos começou a produzir misturas asfálticas com temperaturas mais baixas que àquelas usuais a quente para reduzir a emissão de poluentes e o consumo energético. (NEWCOMB, 2006; PROWELL; HURLEY, 2007)

Em 1999, na França foi introduzido um novo processo chamado de misturas asfálticas semimornas (em inglês Half-Warmed Mixex Asphalt – HWMA). Esta nova mistura faz considerações e explora possíveis benefícios do aquecimento de uma ampla variedade de agregados a temperaturas acima da temperatura ambiente, mas inferior a 100°C antes da aplicação de espuma de asfalto. JENKINS *et al.*, (1999)

Na 1ª Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney no ano de 2000, foi apresentado, por Harrison e Christodoulaki (2000), um processo de misturas mornas desenvolvido na Europa e que, no Congresso Eurobitume em 2000 foi relatado de forma mais completa por Koenders *et al.*, (2000). Este inovador processo foi testado em laboratório e no campo na Noruega, Reino Unido e Holanda, e resultou no desenvolvimento da mistura morna com asfalto espumado.

Nas tecnologias que fazem uso deste recurso, a água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, por agregado úmido ou na forma de material hidrofílico como as zeólitas. Quando esta água se dispersa no asfalto aquecido e se torna vapor há a expansão do ligante, resultando em diminuição da viscosidade da mistura. (PROWELL; HURLEY, 2007)

Em 2002, a National Asphalt Pavement Association (NAPA) realizou um estudo na Europa examinando algumas tecnologias de asfalto morno (WMA), e a partir daí começou a haver interesse nos EUA. A Federal Highway Administration (FHWA) designou como área de foco as misturas mornas e juntamente com a NAPA criou um grupo técnico para avaliação desta tecnologia no campo. Agências de pesquisas como a National Center for Asphalt Technology (NCAT) e várias universidades conduziram os testes em laboratórios.

Como continuação da avaliação do processo a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e a FHWA organizaram uma pesquisa na qual especialistas americanos tivessem contato com as agências européias pioneiras no uso da tecnologia, assim como com os fornecedores e empreiteiros que desenvolveram o WMA.

Este trabalho também possibilitou a análise do desempenho de alguns antigos projetos de WMA. (D'ANGELO *et al.*, 2008)

Segundo Barthel *et al.*, (2004) com a introdução do uso da zeólitas, que espumam o asfalto e permite alta trabalhabilidade da mistura como uma das técnicas de WMA.

As zeólitas são silicatos cristalinos alumino-hidratados (naturais ou sintéticos) que contêm alta porcentagem de água em sua estrutura (cerca de 20%). Como têm a capacidade de liberar a água de maneira gradativa na medida em que são aquecidas em temperaturas acima do ponto de vaporização da água (aproximadamente entre 90 e 180°C), existem tecnologias de misturas mornas que se valem desta propriedade das zeólitas para produzir o efeito de espuma. (RÜHL, 2008; D'ANGELO *et al.*, 2008)

A tecnologia de reciclagem com adição de espuma de asfalto gera alguns benefícios como, por exemplo, o aproveitamento de parte do pavimento antigo na nova mistura, pequeno volume de materiais importados, já que no processo foi possível recuperar as características dos ligantes, alívio da pressão sobre o meio ambiente devido ao menor consumo de matéria-prima e não necessidade de bota-fora dos materiais removidos, redução dos custos de restauração e melhoria da condição estrutural do pavimento. (PEREIRA *et al.*, 2002)

### **3.2 ESPUMA DE ASFALTO**

Segundo DNER-ES (2000), reciclagem à frio com espuma de asfalto consiste no reaproveitamento de estruturas de pavimento danificadas através da adição de agregados pétreos, cimento Portland e de espuma de asfalto obtendo-se, assim, bases recicladas de boa qualidade.

Vários autores definem a espuma asfáltica de varias maneiras, mas que são equivalentes, sendo algumas apresentadas a seguir.

Fresar (2013) afirma que

A reciclagem com espuma de asfalto é um processo particular de reciclagem profundo que é o asfalto (CAP) em forma de espuma que se adere à parte

final dos materiais gerados na trituração pavimento que está sendo reutilizado. E o processo é realizado por equipamento projetados, dotados de tambor reciclador e controle eletrônico que adiciona água e CAP.

DER-PR (2005) define como

O estado temporário obtido a partir da injeção de mistura de ar comprimido e pequena quantidade água sobre cimento asfáltico de petróleo CAP, este é aquecido por volta de 175°C (ou outra temperatura mais adequada para o tipo de cimento asfáltico de petróleo selecionado para a execução da obra), gerando forte expansão volumétrica do ligante. Nesta condição o produto obtido é trabalhável à temperatura ambiente.

Proetel (2012), fala

A espuma de asfalto é uma mistura de ar, água e betume (asfalto), ela é produzida pela injeção de uma pequena quantidade de água a temperatura ambiente, no asfalto quente (180°C), o que gera uma expansão do asfalto, no caso o CAP (cimento asfáltico de petróleo) formando a espuma, ideal para unir os agregados. Trata-se de um método de reciclagem *in situ*, ou seja, na própria pista de rolamento.

López (2002) define como

Uma técnica que permite expandir o cimento asfáltico de petróleo e misturá-lo a diversos tipos de agregados para produzir uma estrutura de pavimento com melhor capacidade de suporte que a existente com um custo mais econômico. O mecanismo que produz a espuma de asfalto é o seguinte: Quando se injeta uma pequena quantidade de água fria, em torno de 1 a 2%, ao asfalto quente (160 a 180°C), se produz uma troca de energia entre o asfalto e a água, levando a mais de 100°C a temperatura das gotas de água, fazendo com que haja uma evaporação instantânea. As bolhas de vapor são forçadas a se introduzir na fase contínua do asfalto devido à pressão da câmara de expansão, ficando assim aprisionadas. O asfalto, junto com o vapor aprisionado é liberado da câmara de expansão através de uma válvula e o vapor começa a se expandir formando bolhas de asfalto contidas pela tensão superficial deste. A expansão termina quando as forças de tensão superficial do asfalto se equilibram com as tensões do interior das bolhas (estado de equilíbrio). À medida que a temperatura da espuma se reduz, o vapor aprisionado se condensa causando o colapso das bolhas e a desintegração da espuma. A desintegração da espuma produz milhares de gotículas de asfalto as quais ao se unirem recuperam seu volume inicial sem alterar significativamente as propriedades reológicas do asfalto original.

Resumindo todos, podemos dizer o material asfáltico CAP é inserido em uma câmara onde é aplicado ar comprimido se misturando com uma quantidade de 1 a 2% de água, a partir da troca de energia do asfalto quente com a água fria que sobre uma mudança de estado da água instantânea e assim gerando a espuma de asfalto.



### 3.3 PROPRIEDADES DA ESPUMA ASFÁLTICA

O CAP em temperatura ambiente apresenta-se em estado semi-sólido e consistente, o que impede sua mescla com agregados nessas condições, sendo necessário, portanto, aquecê-lo para seu emprego nas misturas asfálticas. Uma alternativa de preparação do CAP, tornando-o aplicável mesmo em temperatura ambiente, seria uma redução brutal em sua consistência, o que pode ser conseguido com seu aquecimento (a temperaturas de usinagem, 175°C) e sua imediata disposição em contato com água, o que causa uma expansão em seu volume muito grande. O CAP, nessas condições, após resfriamento, com muitas “bolhas”, é denominado espuma de asfalto. O processo consiste no lançamento de água (em jatos) diretamente sobre o asfalto aquecida em uma câmara de expansão (um tubo relativamente pequeno com paredes espessas de aço, aproximadamente 50mm de profundidade e diâmetro, com pressão de 0,3 MPa a 0,4 MPa).

A quantidade de água injetada no CAP quente não ultrapassa 3%, e, quando colocada em contato com a massa de CAP, em temperatura muito acima de 100°C, evapora-se, sendo, no entanto, os vapores retidos dentro da massa, que se expande ao sair da câmara, atingindo um equilíbrio de tensão superficial nas bolhas. A espuma de asfalto tem emprego preferencial na estabilização de solos e na reciclagem de camadas com incorporação de ligante asfáltico *in situ*.

Todo o processo é realizado com câmara de expansão móvel em pista, pois o tempo de ruptura das bolhas de asfalto com a queda de temperatura, o que gerará as gotículas de asfalto a serem misturadas com os agregados ou solos, é bastante curto, devendo, a operação não ultrapassar cerca de 20s. A qualidade do material em termos de características de aglutinação e de compactação serão dependentes da temperatura e do tipo de CAP empregado, bem como da quantidade de água adicionada.

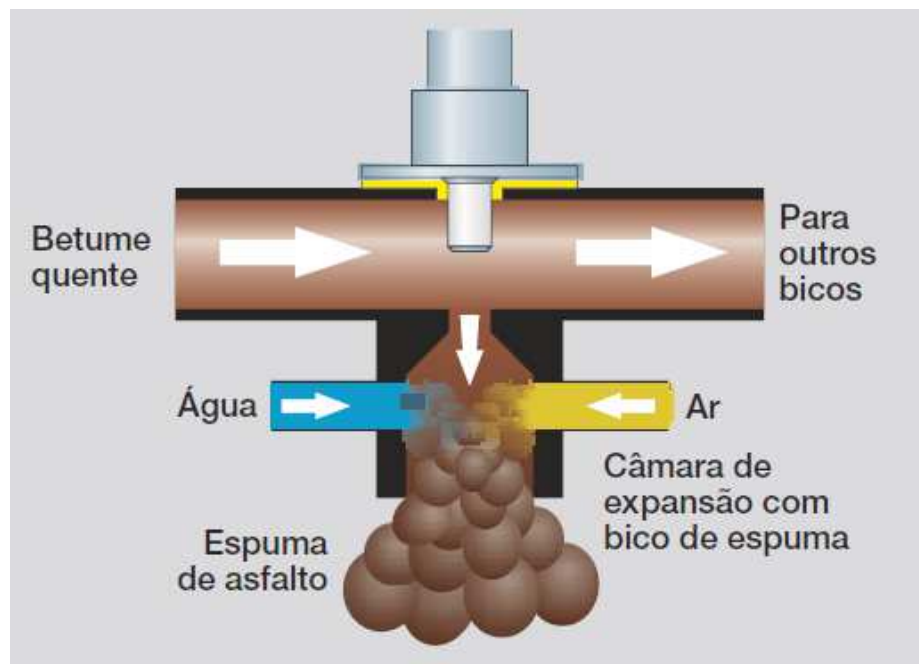


Figura 3.1: Esquema da câmara de expansão  
Fonte: WIRTGEN (2012)

A espuma de asfalto é produzida na câmara de mistura e incorporada ao agregado enquanto ainda estiver em seu estágio espumoso **instável**. Quanto maior o volume da espuma, melhor será a distribuição do betume no agregado. Durante a mistura, as bolhas betuminosas estouram, produzindo pequenas divisões betuminosas que se dispersam pelo agregado pela adesão de partículas mais finas (areia fina e menor) para formar um mástique. O teor de umidade do material antes da mistura desempenha um papel importante na dispersão do betume. Com a compactação, as partículas de betume no mástique são pressionadas fisicamente contra as partículas de agregados maiores, onde se aderem, resultando em ligações localizadas e não contínuas **solda a ponto**. Os materiais estabilizados com espuma de asfalto são chamados de espuma de materiais estabilizados com betume (BSM).

A cobertura parcial é percebida pela cor mais clara da mistura de espuma de asfalto como pode ser observado na figura 3.2, onde se pode notar o mástique (de cor mais escura) envolvendo o esqueleto mineral formado pelos agregados graúdos (de cor mais clara).

É na fração fina que a espuma de asfalto vai atuar com maior intensidade devido à sua maior superfície específica deixando descoberto os agregados graúdos. Os finos envolvidos com a espuma de asfalto formam uma argamassa que promove a coesão da mistura. (MOTTA *et al.*, 2000)

Portanto, observa-se a importância da existência de uma quantidade mínima de finos em qualquer mistura que contemple a espuma de asfalto. O mínimo recomendado de material passante na peneira #200 (0,075 mm) é de 5% segundo DNER (2000).

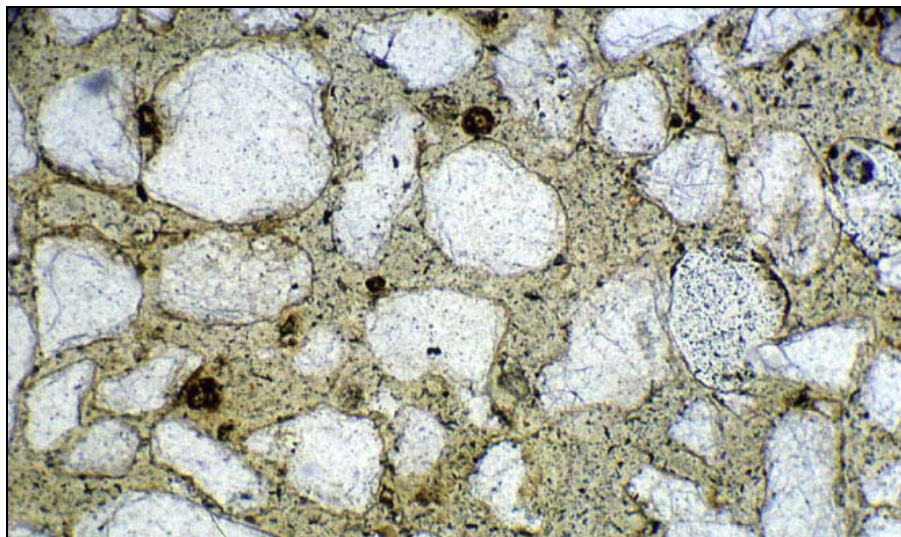


Figura 3.2: Característica Física de uma Mistura Reciclada com Espuma de Asfalto  
Fonte: SOUZA e BARROS (2001)

A utilização de finos de qualidade como por exemplo o cimento a baixos teores na proporção de 1 a 2%, em peso, em relação ao peso dos agregados da mistura, complementa a necessidade de finos miscíveis da reciclagem e ainda agrega maior resistência ao pavimento em si (LUCAS *et al*, 2000). Segundo Barreno e Saiz (1999) a distribuição granulométrica dos agregados que são tratados com espuma de asfalto deve se enquadrar na faixa apresentada na tabela 3.1 e representada na figura 3.3.

Wirtgen (2001) define as das propriedades de uma espuma de asfalto sendo:

- Taxa de expansão: é a relação entre o volume máximo do CAP em estado de espuma e o volume de CAP remanescente, após a espuma estar completamente assente.
- Meia Vida: é o tempo em segundos necessário para uma espuma regredir do seu volume máximo até à metade deste volume.

A Taxa de Expansão indica a trabalhabilidade da espuma de asfalto e sua capacidade de cobrimento e mistura com os agregados, já a meia vida é um índice de

estabilidade da espuma e uma idéia do tempo disponível para misturar o asfalto espuma com os agregados antes que a essa se assente. (LÓPEZ, 2002)

Peneiras (tipo)	Peneiras (mm)	Faixa Granulométrica
1"	26,5	70-100
3/4"	19	60-100
1/2"	13,2	55-90
3/8"	9,5	45-75
1/4"	6,7	35-65
Nº4	4,75	30-55
Nº8	2,36	20-45
Nº16	1,15	18-35
Nº30	0,6	15-30
Nº50	0,3	10-25
Nº100	0,15	8-22
Nº200	0,075	5-20

Tabela 3.1: Faixa Granulométrica Especificada para Serviços com Espuma de Asfalto  
Fonte: BARRENO e SAIZ (1999)

Segundo Pinto (2002), a composição granulométrica do agregado deve ser levado em consideração no processo de espuma de asfalto.

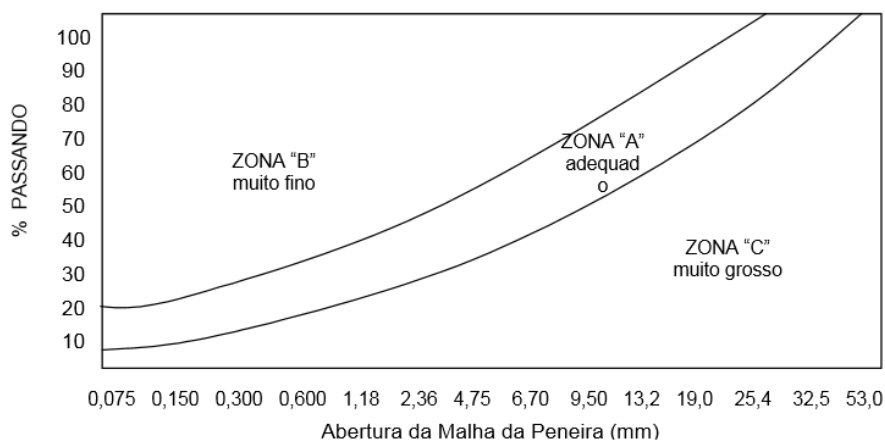


Figura 3.3: Distribuição granulométrica para a qual a espuma de asfalto funciona adequadamente  
Fonte: WIRTGEN (2001)

Os materiais que se enquadram na Zona “A” são os mais adequados. Por outro lado, os de granulometria localizada na Zona “B”, por serem constituídos de grãos muito finos, necessitam adição de agregado mais graúdo para um tratamento eficiente com espuma de asfalto. Por fim, os materiais que se encaixam na Zona “C” não são recomendados exceto se misturados com materiais mais finos. (PINTO, 2002)

WIRTGEN (2012) fala que quando a mistura dos agregados não apresenta porcentagem suficiente de finos (no mínimo 5% passando na peneira 200), deve-se acrescentar material fino para melhorar a curva granulométrica. Considera-se recomendável em torno de 8% a 10% desse material a fim de permitir uma boa aglutinação da mistura.

A porcentagem de finos na mistura é importante para a utilização de espuma de asfalto como ligante. A granulometria do material deve ser devidamente ajustada por meio de adição de agregados necessários para enquadrá-la na faixa granulométrica escolhida. (PINTO, 2002)

### **3.4 TÉCNICAS DE ESPUMA DE ASFALTO**

Segundo Motta (2011):

Dependendo da tecnologia utilizada é possível reduzir a temperatura de usinagem em até cerca de 50°C. Dentre alguns exemplos de técnicas de espuma de asfalto têm-se: LEA®, LT Asphalt® (misturas semimornas), Advera® WMA, AQUABlack® Warm Mix Asphalt, Aspha-Min®, Double Barrel® Green, LEA B®, Ultrafoam GX2™, WAMFoam®, WMA Terex® (misturas mornas).

#### **3.4.1 WMA Terex®**

A técnica WMA Terex utiliza o asfalto espumado como ligante no processo de usinagem da massa asfáltica, e as características excepcionais da mistura resultante permitem que se reduza a temperatura de compactação para um intervalo de 90 a 130°C (mistura morna), essa tecnologia foi desenvolvida pela empresa norte-americana Terex.

Esta técnica é indicada para usinas contínuas de contrafluxo, requerendo a instalação de um tanque e de uma bomba de água na planta da usina, além de uma caixa de expansão acoplada a uma barra espargidora de injeção que adentra o tambor secador, como mostra o esquema da figura 3.4. (MOTTA, 2011)

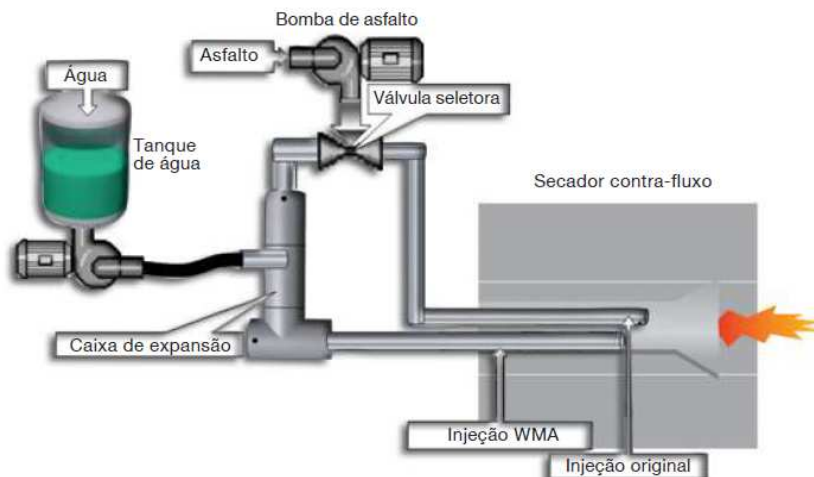


Figura 3.4:Esquema de instalação de dispositivos no processo WMA Terex  
Fonte: TEREX [20--]

O processo de fabricação é iniciada pelo bombeamento da água armazenada no tanque e do asfalto para a caixa de expansão, a quantidade de materiais adicionados é controlada por um painel de controle instalado junto ao tanque de água conforme figura 3.5.

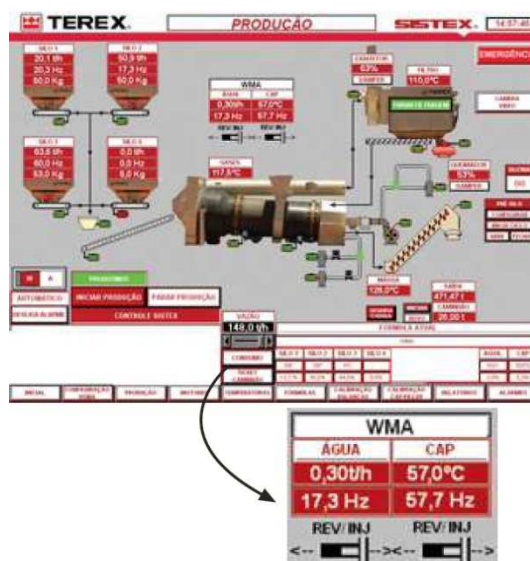


Figura 3.5:Painel de controle do equipamento de dosagem  
Fonte: TEREX [20--]

Nesta câmara o ligante expande a uma taxa de aproximadamente 20 vezes, formando o asfalto espumado, cuja meia-vida é de cerca de 20 segundos. (MOTTA, 2011)

O material da mistura é então levado pela barra espargidora (Figura 3.6) de injeção para o tambor de contrafluxo, para que seja misturado com os agregados em temperatura de 135 a 145°C.

Cabe mencionar que a quantidade de água usualmente empregada nesta técnica é de 2% em massa de ligante, o que corresponde a 1 kg de água por tonelada de uma mistura asfáltica com 5% de asfalto. (ANTONELLO; MORILHA JR, 2010)



Figura 3.6: Esquema de distribuição do material espumado  
Fonte: TEREX [20--]

### 3.4.2 WAMFoam

Conhecido também como *Warm Mix Asphalt Foam Emulsion* é um produto produzido em parceria entre a Shell International Petroleum Company Ltd, e Kolo-Veidekke. Mistura formada utilizando dois componentes ligantes separados na fase de mistura. Dividindo-se o ligante em dois componentes separados, um ligante macio e um ligante sólido na forma de espuma, são possíveis atingir temperaturas mais baixas de produção de mistura asfáltica. O componente ligante macio é misturado com o agregado na primeira fase a cerca de 110°C para conseguir uma cobertura completa do agregado. O componente ligante duro é misturado em uma segunda fase para os agregados pré-revestidas, sob a forma de espuma. A evaporação rápida da água através da injeção de água fria para o ligante duro aquecida, uma vez que é adicionado à mistura produz um grande volume de espuma. A espuma ligante duro combina com o ligante macio para atingir a composição e as propriedades do produto final de asfalto requerida. (D'ANGELO *et al*, 2008)

A desenvolvedora do processo afirma que o sucesso da WAM-Foam depende de uma cuidadosa seleção dos componentes macios e duros. Em alguns casos recomenda-se a utilização de um melhorador da adesão no primeiro passo de mistura. Também é indicada que o revestimento inicial de agregado na primeira fase de mistura é vital para evitar que a água alcance o ligante e a interface de agregado e de entrar no agregado e que a água deve ser removida a partir da mistura de asfalto para garantir um produto final de maior qualidade.

Segunda a Shell, as temperaturas da produção diminuiu, e com isso ocasionando uma economia de combustível em 30%, e redução de 30% nas emissões de CO<sub>2</sub>, se comparada com o método de mistura a quente.

### 3.4.3 LEA - Low Energy Asphalt

Processo desenvolvido na França com nome de *Enrobé à Basse Energie* e *Enrobé à Basse Température* (EBE) ou (EBT), também conhecido como *Low Energy Asplalt* (LEA), é uma tecnologia de mistura semimorna francesa Lea-Co e pela norte americana McConnaughay Technologies.(LAPAV, 2008)

Motta (2011) fala

[...] a produção desta mistura semimorna se dá por espumejo do asfalto quente em contato com a água contida na fração miúda dos agregados. O processo pode ser dividido em 5 fases conforme a figura 3.7 abaixo:

Fase 1: Os agregados graúdos (geralmente 60 a 70% do total) passam por secagem/aquecimento em temperatura mais baixa que o usual (cerca de 120 a 150°C, ao invés de 180°C). O ligante também é aquecido, porém na temperatura habitual de mistura a quente (aproximadamente 170°C, dependendo do tipo de asfalto), sendo em seguida misturado a um aditivo melhorador de adesividade e de recobrimento (em uma taxa de 0,2 a 0,5% em massa de ligante).

Fase 2: Os materiais aquecidos são então misturados entre si, resultando em agregados recobertos por uma espessa camada de filme asfáltico.

Fase 3: Os agregados miúdos (que também podem ser provenientes de fresagem), contendo entre 3 a 4% de água e mantidos em temperatura ambiente, são finalmente misturados aos agregados graúdos com o ligante (Fase 2). Assim, o contato do asfalto quente com a umidade dos agregados finos levará ao espumejo do ligante.

Fase 4: A expansão do ligante em torno dos agregados, resulta em uma redução de temperatura da mistura a até cerca de 100°C.

Fase 5: Ocorre o equilíbrio térmico entre o esqueleto mineral, a água residual e o ligante asfáltico, que permitirá que esta mistura semimorna possa ser aplicada em pista em temperaturas de até aproximadamente 60°C.



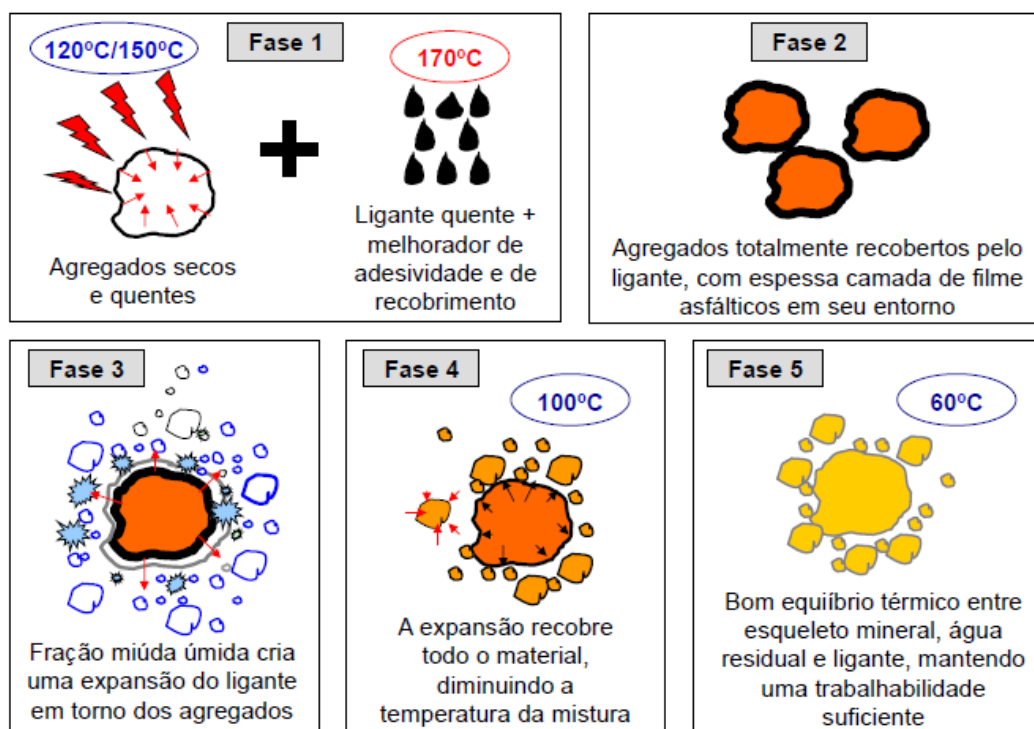


Figura 3.7: Esquema de produção de mistura semimorna no processo LEA

Fonte: D'ANGELO *et al.* (2008) *apud* MOTTA (2011)

O parâmetro de produção, temperatura de aquecimento do agregado gráudo, temperatura da mistura final e teor de água são definidos em função do projeto da mistura, das condições climáticas e do teor de água presente na fração areia dos agregados. (LAPAV, 2008)

A produção de misturas semimornas pelo processo LEA® pode ser realizada tanto em usinas gravimétricas quanto drum-mixer, desde que sejam efetuadas alterações na planta, principalmente no que se refere ao controle de umidade dos agregados. (OLARD, 2008)

Para viabilizar a adição do aditivo ao ligante, deve-se fazer a instalação de uma bomba volumétrica para o produto e de uma porta na linha de asfalto que vai para o misturador (usinas contínuas) ou para o pugmill (usinas de batelada). (PROWELL; HURLEY, 2007)

Em usinas drum-mixer, no caso de uso de material reciclado, deve-se implementar um silo alimentador frio para a entrada dos fresados úmidos, e também é necessária a mudança de posição da linha de asfalto dentro do misturador, de forma que se garanta que os agregados gráudos sejam eficientemente recobertos pelo ligante antes da entrada do material fino úmido. (PROWELL; HURLEY, 2007)

Já em usinas gravimétricas deve-se instalar um silo frio próprio para o material fino úmido, que deve ter sua quantidade de água monitorada. A propósito, quando houver áreas secas no montante de material miúdo, pode ser necessária a Adição de água. (PROWELL; HURLEY, 2007)

#### 3.4.4 Double Barrell Green

Processo desenvolvido e comercializada pela Astec Industries, a Double Barrel Green tem como objetivo a produção de mistura morna por formação de espuma, porém ela não é uma aditivo e sim um processo. É indicada para usina drum-mixer.

O dispositivo consiste de uma série de válvulas, misturando câmaras, e os bocais de espuma fornecidos por um coletor de asfalto. O coletor de asfalto é rodeado por uma camisa de óleo quente. Cada bocal é desenhado para fornecer espuma suficiente para a mistura de 50 toneladas por hora de mistura asfáltica morna. (D'ANGELO *et al*, 2008)

Um sistema controlado por computador ajusta a número de injetores usados com base na taxa de produção. Um deslocamento positivo da bomba controla a injeção de água. A velocidade da bomba de água varia com a velocidade da bomba de asfalto, cerca de 454 g de água fria é introduzido através da bicos por tonelada de mistura , fazendo com que o ligante se expanda cerca de 18 vezes.(D'ANGELO *et al*, 2008)

A Figura 3.8 mostra esquematicamente como funciona um bocal de espumejo do sistema Double Barrel Green.

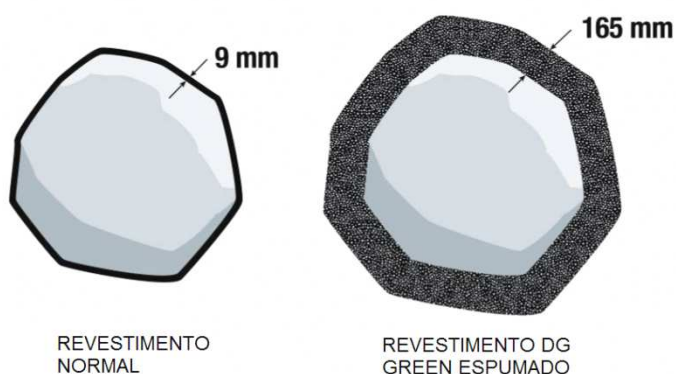


Figura 3.8:Revestimento com DB Green espumado  
Fonte: WARMMIXASPHALT [20--]

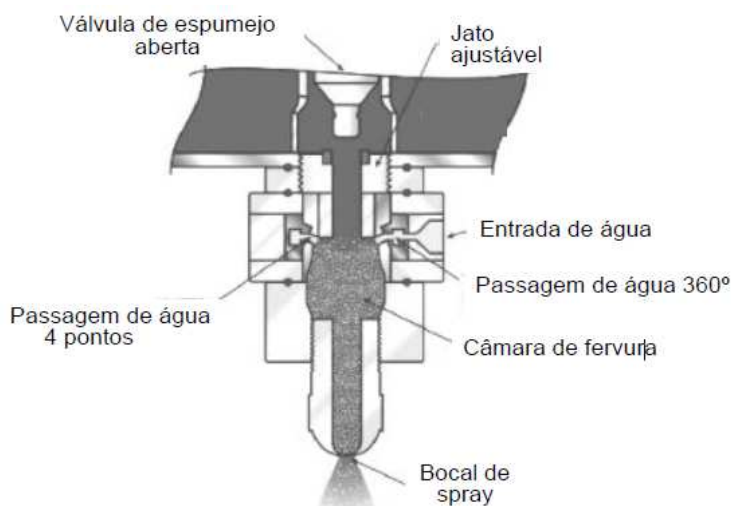


Figura 3.9: Esquema de um bocal de espumejo do sistema Double Barrel Green

Fonte: Astec [20--], *apud* MOTTA (2011)

As temperaturas de produção típicas são 135°C, com a mistura sendo colocada abaixo de 115°C. Teste realizado por Astec indica que a produção de compostos orgânicos voláteis podem ser significativamente reduzidos se as temperaturas são mantidas abaixo de 141°C.

Embora os agentes antistripping líquidas possam ser adicionadas à ligante, nenhum aditivo é necessário para produzir a espuma e, conseqüentemente, o WMA. (D'ANGELO *et al*, 2008)

### 3.4.5 Advera WMA e Aspha-Min

Advera® WMA e Aspha-Min® são zeólitas sintéticas em pó (Figura 3.10 e Figura 3.11, respectivamente) que permitem a produção de misturas mornas por meio da formação de espuma. O Advera® WMA é produzido pela empresa norte-americana PQ Corporation e o Aspha-Min® é fabricado pela alemã Eurovia Services GmbH. (MOTTA, 2011)

As zeólitas sintéticas são compostas de silicatos de alumínio e metais alcalinos. Contém na sua composição aproximadamente 18-21% de água cristalizada que é liberada pelo aumento da temperatura acima do ponto de ebulição da água. LAPAV (2008) As zeólitas liberam uma pequena quantidade de água, criando um efeito controlado de expansão, reduzindo a viscosidade do ligante, a liberação gradual da água da zeólita garante trabalhabilidade por um período de 6 a 7 horas. A trabalhabilidade é mantida até que a temperatura atinja aproximadamente 100°C, As zeólitas sintéticas são adicionadas as misturas

convencionais sem alterar as características de projeto, o teor da ordem de 0,3% sobre o peso total da mistura é normalmente adicionado ao mesmo tempo que o asfalto. (LAPAV, 2008)



Figura 3.10:Advera WMA  
Fonte: ADVERA [20--]



Figura 3.11:Aspha-Min  
Fonte: ASPHA-MIN [20--]

## 4 MISTURAS ASFÁLTICAS

Os diferentes tipos de misturas asfálticas de usina podem ser classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção, podendo ser divididos basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas meio-mornas e misturas a frio.

- Misturas a frio: Normalmente são produzidas e aplicadas à temperatura ambiente com emulsões asfálticas sem aquecimento dos agregados do petróleo.
- Misturas meio-mornas: As suas temperaturas são inferiores à vaporização da água, ou seja, entre 60°C e 100°C.
- Misturas mornas: As suas temperaturas se situam entre 100°C a 150°C.
- Misturas quentes: São preparadas a partir do aquecimento dos agregados do petróleo e do ligante asfáltico, sendo a usinagem executada em níveis elevados de temperatura, que variam entre 150°C a 180°C.

Conforme a temperatura do aquecimento no processo de usinagem vai aumentando, o consumo de combustível também, com isso é possível classificar cada tipo de mistura em sua categoria, como ilustrado na Figura 4.1.

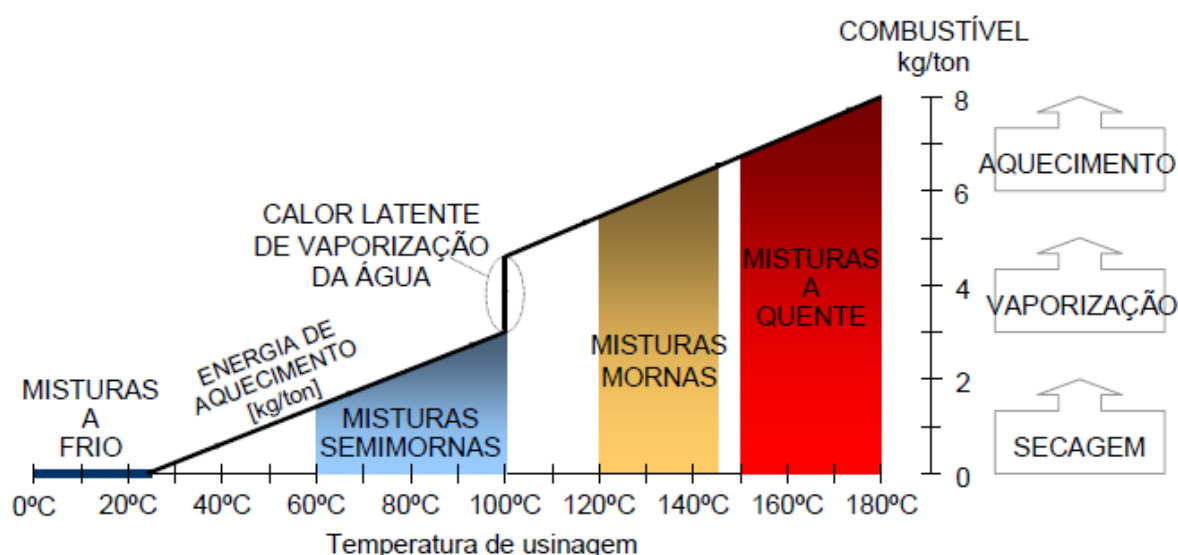


Figura 4.1: Esquema de classificação das misturas asfálticas com a temperatura de usinagem  
Fonte: OLARD (2008); FHWA (2008); adaptado por MOTTA (2011)

## 5 MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL

---

Segundo (UFBA, 20--), o primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field, originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto (agregado miúdo e ligante asfáltico) e, posteriormente, modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos. O método de dosagem de maior uso em nível mundial faz uso de compactação da mistura asfáltica por impacto (golpes), sendo denominado de Método Marshall, em referência ao engenheiro Bruce Marshall, que deu origem ao desenvolvimento desse procedimento na década de 1940, no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares.

A norma DNER-ME 043/95, que trata do método de dosagem Marshall, recomenda o esforço de compactação de 50 golpes em cada face do corpo-de-prova, para pressão de inflação do pneu até 7 kgf/cm<sup>2</sup>, e de 75 golpes em cada face do corpo-de-prova, para pressão de inflação do pneu de 7 kgf/cm<sup>2</sup> até 14 kgf/cm<sup>2</sup>.

No Brasil, tem-se empregado principalmente o método Marshall, devido à sua simplicidade equipamento relativamente econômico e experiência comprovada, adotado pelo DNIT (DNER-ME 043/95 e DNER-ME 138/94), sendo utilizado no projeto de misturas de concreto asfáltico (cimento asfalto de petróleo e agregados, estes últimos com diâmetro máximo igual a 1”), que determina estabilidade juntamente com a fluência das misturas betuminosas.

O objetivo do método consiste em determinar-se o teor ótimo de asfalto (teor de projeto, também denominado de teor ótimo) que deverá ser adicionado à mistura de agregados (que respeita a faixa granulométrica pré-fixada), a fim de que sejam satisfeitas às seguintes condições, conforme prescrito na Especificação de Serviço do DNIT (DNER-ES 031/2004):

- **Porcentagem de Vazios (% V<sub>v</sub>):**

CAMADA DE ROLAMENTO : 3 % a 5 %

CAMADA DE LIGAÇÃO : 4 % a 6 %

- **Relação Betume-Vazios (RBV)**

CAMADA DE ROLAMENTO : 75 % a 82 %

CAMADA DE LIGAÇÃO : 65 % a 72 %

▪ **Estabilidade mínima**

CAMADA DE ROLAMENTO : 600 kgf (75 golpes)

CAMADA DE LIGAÇÃO : 500 kgf (75 golpes)

▪ **Resistência à Tração (RT a 25°C, mín., MPa)**

CAMADA DE ROLAMENTO : 0,65

CAMADA DE LIGAÇÃO : 0,65

A mistura a ser dosada deve manter na pista certa percentagem de vazios (% V), pois com o tempo os agregados tendem a se compactar sob a ação do tráfego e o asfalto tende a subir para a superfície da capa de rolamento (exsudação). Este fato cria o conhecido problema das pistas derrapantes, devido à película de asfalto que aparece no topo de uma camada de concreto asfáltico. Outra razão de se manter os vazios em certo intervalo de valor é a característica da variação de volume do asfalto por influência da temperatura, o que causaria o mesmo problema, se os vazios não existissem.

A relação betume-vazios (RBV) fixa a proporção de betume dentro dos vazios deixados pelos agregados e se deve ao mesmo fato anterior.

A estabilidade corresponde à ruptura do corpo de prova devido ao esforço de compressão, valor expresso em kgf, exercido durante o ensaio de compressão diametral.

Para realizar o ensaio é necessário utilizar determinados equipamento:

- Moldes: cilindros de aço de 100 mm de diâmetro (originalmente 4") e altura final de 63 mm (2,5"). Considerando que o ensaio apresenta dispersão elevada, sempre se executa 3 cp por teor de asfalto.
- Soquete: soquete com martelo de 10 libras ou aproximadamente 4,54 kg de peso caindo em queda livre de uma altura de 45,72 cm (1,5 ft) sobre uma sapata de diâmetro 100 mm, plana e que se apóia sobre a mistura asfáltica. Recomenda-se a utilização de equipamentos compactadores eletromecânicos, providos de um sistema que levanta o martelo e o deixa cair em queda livre.

- Prensa: consiste basicamente num sistema eletromecânico que aciona o soerguimento do prato onde está fixado o molde com o cp. A velocidade de aplicação de carga deve ser contínua e de 5 cm/min. A prensa deve estar equipada com anel dinamométrico ou célula de carga com capacidade até 2265 kg e com sensibilidade de 4,5 kg .



Figura 5.1: Prensa, soquete e molde Marshall

Fonte: <http://2.imimg.com/data2/OY/AL/MY-520171/marshall-stability-testing-apparatus-500x500.jpg>

- Medidor de fluência: a prensa deve ser equipada com um medidor de fluência ou seja, dispositivo que possa medir deslocamento provido de arrasto e com sensibilidade de 0,25 mm.

Os demais equipamentos e ferramentas utilizados são: banho-maria, termômetro, estufa, balança, extrator de CP, peneiras e etc.

## 5.1 MÉTODO DE ENSAIO

Os procedimentos para a determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para concreto asfáltico usado em camada de rolamento são, os seguintes:



- Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada na mistura asfáltica considerando, principalmente o tipo de tráfego;
- Determinação das massas específicas reais do ligante e dos agregados;
- Projeto de mistura dos agregados para a definição da composição granulométrica que deverá ser enquadrada nos limite da faixa especificada;
- Escolha das temperaturas de mistura e compactação, a partir da curva viscosidade temperatura do ligante escolhido;
- Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos-de-prova a serem moldados. Cada grupo deverá ter, no mínimo, três corpos-de-prova;

Os agregados e o asfalto são aquecidos separadamente, até a temperatura especificada (175°C a 190°C) e, então, misturados. A mistura betuminosa é colocada no molde aquecido (90°C – 150°C), numa única camada, e compactada com 75 golpes (tráfego pesado) com o soquete padrão em cada face do corpo de prova;

Após moldagem, os corpos-de-prova são esfriados em água, extraídos dos moldes e vão para um banho em água na temperatura igual a 60 °C. Permanecem nesta temperatura por um período de cerca de meia hora, antes de serem submetidos ao ensaio de compressão radial;

A figura dada a seguir sintetiza os procedimentos metodológicos em laboratório:



Figura 5.2: Procedimentos metodológicos em laboratório.  
Fonte: UFBA – ENG 216 Pavimentação 20XX.

Deverão ser preparados, pelo menos, três corpos-de-prova a ser ensaiado pelo método Marshall, a fim de que se possa obter um valor médio das características da mistura, para cada teor de asfalto. Devem ser ensaiadas outras quatro séries de corpos-de-prova, onde se faz variar de meio por cento o teor de asfalto em relação ao percentual arbitrado, por exemplo, 6 %. Portanto, teremos teores de asfalto de 5,0 %, 5,5 %, 6,0 %, 6,5 % e 7,0 %, correspondendo a cinco (5) séries de corpos-de-prova, sendo três (3) moldados para cada teor de ligante, totalizando quinze (15) corpos-de-prova a serem ensaiados.

Moldados os corpos-de-prova (três de cada mistura), obtém-se para cada um deles o seu peso ao ar e o seu peso na água, mediante a utilização de balanças apropriadas para cada situação (peso no ar e imerso em água).

Imediatamente, após a retirada do banho-maria, os corpos-de-prova são colocados dentro do molde de compressão e levados à prensa do aparelho Marshall, sendo a carga aplicada continuamente, ao longo da superfície lateral do cilindro, à medida de 2" (50,8 mm) por minuto (0,8 mm/segundo), até o rompimento do corpo de prova.

A carga máxima, em kgf, que o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, é o valor da estabilidade Marshall. A estabilidade é definida como um deslocamento ou quebra do agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8 mm/segundo). A fluência é a deformação máxima apresentada pelo corpo-de-prova, correspondente à aplicação da carga máxima, sendo medido em centésimo de polegada, sofrida pelo corpo de prova durante o teste de compressão diametral para a determinação da estabilidade e da resistência à tração (RT).

### **Cálculos e interpretação dos resultados**

O método Marshall proporciona a análise dos seguintes parâmetros:

Porcentagem de vazios da mistura betuminosa é calculada mediante o uso da seguinte relação física:

$$\%V = (D_{teórica} - d) \times 100 / D_{teórica}$$

Onde, d: densidade aparente da mistura (cujo valor é calculado pela relação entre o peso no ar e o volume do corpo de prova; o volume do corpo de prova é obtido pela diferença em o peso do corpo de prova no ar e o peso do corpo de prova obtido por imersão do mesmo em água).

Dteórica : densidade teórica, cujo valor é obtido pela seguinte expressão

$$D_{teórica} = 100 / [(\% \text{ de brita}/DB) + (\% \text{ de areia}/DA) + (\% \text{ de filler}/DF) + (\% \text{ de CAP}/DCAP)]$$
, em que DA, DB, DF e DCAP representam a densidade real destes materiais componentes da mistura betuminosa.

Volume cheio de betume tem seu valor calculado pela expressão

$$VCB (\%) = \%CAP_{xd} / DCAP$$

Vazios do agregado mineral

$$V.A.M (\%) = \% V + VCB (\%)$$

Relação betume-vazios

$$R.B.V (\%) = V.C.B (\%) / V.A.M (\%)$$

Além dos valores citados acima, determinam-se a estabilidade Marshall e a fluência dos corpos de prova preparados segundo as especificações próprias.

A estabilidade medida deverá ser multiplicada por um fator de correção, conforme procedimento estabelecido no método de ensaio.

Dos dados medidos e calculados em decorrência do ensaio Marshall é possível observar, de uma forma geral, as seguintes tendências:

- O valor da estabilidade Marshall aumenta com o conteúdo de asfalto até certo valor máximo, a partir do qual decresce;
- O valor da fluência aumenta com o conteúdo de asfalto;
- O valor da densidade aumenta com o conteúdo de asfalto até um valor máximo (correspondendo a uma quantidade de asfalto um pouco superior à da máxima estabilidade), a partir do qual decresce;

A porcentagem total de vazios da mistura betuminosa decresce com o aumento do conteúdo de asfalto, tendendo para um valor mínimo.

Com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são desenhadas seis curvas em função do teor de asfalto que podem ser usadas na definição do teor de asfalto de projeto.

Para facilitar a determinação do teor ótimo de asfalto, é interessante alinhar verticalmente os gráficos.

Para determinar-se o teor ótimo de asfalto, elaboram-se as curvas de resultados dos cálculos e medidas feitas durante o ensaio Marshall, conforme citado, em que o teor ótimo deve satisfazer aos seguintes critérios: máxima densidade aparente, máxima estabilidade, média dos limites estabelecidos para a porcentagem total de vazios da mistura, média dos limites estabelecidos para a porcentagem dos agregados cheios de betume e origine uma fluência que não ultrapasse determinado valor máximo especificado. A média de porcentagem de asfalto é calculada a partir destes quatro valores. Se esse teor de asfalto der uma mistura que satisfaça o mínimo de estabilidade, ele será tomado como o teor ótimo de ligante para o traço da mistura betuminosa.

Se esse valor médio não satisfizer o mínimo de estabilidade, podem-se fazer pequenos ajustes na porcentagem de asfalto, até que o valor de estabilidade seja atingido.

Se não for possível atingir esse valor, é necessário ensaiar outra mistura. Para uma dada granulometria de agregados, a porcentagem de vazios preenchidos da mistura e a porcentagem de vazios preenchidos com asfalto, oferecem meios para se aquilatar as propriedades da mistura. Entretanto, quando há necessidade de se testar nova mistura, o primeiro passo é alterar a granulometria.

## 6 ENSAIOS

---

### 6.1 Ensaio Marshall e de Resistência à Tração por compressão diametral

Como principais parâmetros para definição de comparação e análise foram escolhidos os resultados dos ensaios Marshall e Resistência à Tração, portanto, busca-se com os ensaios determinar a estabilidade Marshall e a Resistência à Tração de materiais utilizados em camadas de pavimento flexível. Essa pesquisa visa, dentro do universo amostral proposto, determinar se o composto escolhido para determinada camada de pavimento resistirá aos esforços de tração a que são submetidos ao longo de sua vida de serviço, atendendo as especificações estabelecidas para cada parâmetro verificado.

Foram utilizados para os ensaios misturas de materiais Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em proporções distintas e misturados com cal e cimento com emprego da espuma de asfalto para estabilização das misturas.

Resistência à tração por compressão diametral é definida como a tensão de tração que ocorre no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, no momento da ruptura, quando o mesmo é solicitado diametralmente por uma carga de compressão (PREUSSLER, 1983).

Para os ensaios de resistência à tração, os corpos de prova Marshall, após a compactação, passam por um período de cura de 72 horas em estufa a 60°C, e é determinada de acordo com o método de ensaio DNER - ME 138/94.

O DNER em sua especificação de serviço ES-405/2000 define os seguintes valores mínimos de resistência à tração:

- 0,25 MPa para valores de resistência à tração por compressão diametral seca
- 0,15 MPa para valores de resistência à tração por compressão diametral saturada a 250°C

O DER-SP em sua especificação de serviço ET-DE-P00/033/06 define os seguintes valores mínimos de resistência à tração:

- 0,40 MPa para valores de resistência à tração por compressão diametral seca
- 0,20 MPa para valores de resistência à tração por compressão diametral saturada a 25°C.

Para os ensaios de Resistência Marshall foram empregados os procedimentos de acordo com a norma DNER-ME 107/94 Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall.

O DNER em sua especificação de serviço DNER-ES 317/97 define os seguintes valores mínimos de resistência Marshall:

- 250 Kgf para valores de Estabilidade mínima a 75 golpes.

O DER-SP em sua especificação de serviço ET-DE-P00/025/06 define os seguintes valores mínimos de resistência Marshall:

- 350 Kgf para valores de Estabilidade mínima a 75 golpes, para misturas densas.

Foram utilizados para os ensaios misturas de materiais RCD e RAP em proporções distintas misturados com cal e cimento com emprego da espuma de asfalto para estabilização das misturas.

A matriz de ensaios conforme figura 6.1 foi definida de acordo com amostras fornecidas pela usina FREMIX para confecção dos corpos de prova.

Foram realizados 6 tipos de misturas distintas, e para observar e analisar as condições propostas, foram confeccionados cinco corpos de prova para ruptura de Resistência à Tração a seco, cinco corpos de prova para ruptura de Resistência à Tração saturado (úmido) para cada mistura proposta e mais cinco corpos de prova de cada mistura, para ruptura a resistência Marshall.

	MISTURAS EM %			
MISTURA	RCD	RAP	CAL	CIMENTO
1	29	70	1	
2	29	70		1
3	99			1
4	50	49	1	
5	50	49		1
6		99		1

Figura 6.1: Matriz de ensaios com misturas RCD e RAP  
Fonte:Própria (2014)

O teor de asfalto utilizado para as misturas foram definidos pelo ensaios Marshall a frio DNER-ME107-94.

Para a mistura 1 os resultados dos ensaios demonstraram que o teor mínimo de espuma admissível foi de 2,3%, o teor ótimo recomendável 2,6% e o teor Máximo admissível de 2,9%.

Para a mistura 2 os resultados dos ensaio foram: teor mínimo de espuma admissível 2,2%, teor ótimo recomendável 2,5%, teor Máximo admissível 2,8%.

Para a mistura 3 os resultados dos ensaio foram: teor mínimo de espuma admissível 3,0%, teor ótimo recomendável 3,3%, teor máximo admissível 3,6%.

Para a mistura 4 os resultados dos ensaios demonstraram que o teor mínimo de espuma admissível foi de 2,4%, o teor ótimo recomendável 2,7% e o teor Máximo admissível de 2,9%.

Para a mistura 5 os resultados dos ensaio foram: teor mínimo de espuma admissível 2,3%, teor ótimo recomendável 2,7%, teor Máximo admissível 2,9%.

Para a mistura 6 os resultados dos ensaio foram: teor mínimo de espuma admissível 3,2%, teor ótimo recomendável 3,4%, teor máximo admissível 3,8%.

A figura 6.2 demonstra o resultado da mistura de asfalto nas seis misturas indicadas.

MISTURA	MISTURAS % de ESPUMA DE ASFALTO	
	MINIMO	MÁXIMO
1	2,3	2,6
2	2,2	2,5
3	3,0	3,3
4	2,4	2,7
5	2,3	2,7
6	3,4	3,8

Figura 6.2: Quantidade de espuma de asfalto a ser misturado nas misturas

Fonte: Própria (2014)

## 7 RESULTADOS

A seguir, são resumidos os resultados obtidos com os ensaios, de modo a permitir uma apreciação global da consistência do estudo realizado.

### Resultados dos ensaios de Resistência à tração (RT):

A tabela 7.1 mostra os resultados obtidos com o ensaio de Resistência à Tração, demonstrando os tipos de mistura e de ruptura de cada corpo de prova, visualizando ainda os valores médios em cada tipo de mistura.

	MISTURAS Resistência a Tração (Mpa)											
	1		2		3		4		5		6	
	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP
	29	70	29	70	99	0	70	29	70	29	0	99
	cal (1%)		cimento (1%)		cimento (1%)		cal (1%)		cimento (1%)		cimento (1%)	
CP	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido
1	0,41	0,23	0,55	0,30	0,43	0,23	0,43	0,23	0,50	0,26	0,58	0,29
2	0,48	0,22	0,54	0,27	0,42	0,23	0,42	0,20	0,48	0,25	0,56	0,32
3	0,44	0,24	0,56	0,26	0,44	0,24	0,40	0,21	0,45	0,26	0,58	0,30
4	0,45	0,23	0,52	0,27	0,43	0,25	0,44	0,21	0,48	0,24	0,59	0,33
5	0,41	0,22	0,53	0,24	0,45	0,23	0,45	0,22	0,46	0,23	0,57	0,31
MÉDIA	0,44	0,23	0,54	0,27	0,43	0,24	0,43	0,21	0,47	0,25	0,58	0,31

Tabela 7.1: Resultados dos ensaios de RT indireta seca e saturada mínima com espuma

Fonte: Própria (2014)

A figura 7.1 demonstra graficamente os valores médios da Resistência à tração, dos resultados das amostras secas, das amostras úmidas e os valores médios das duas rupturas.



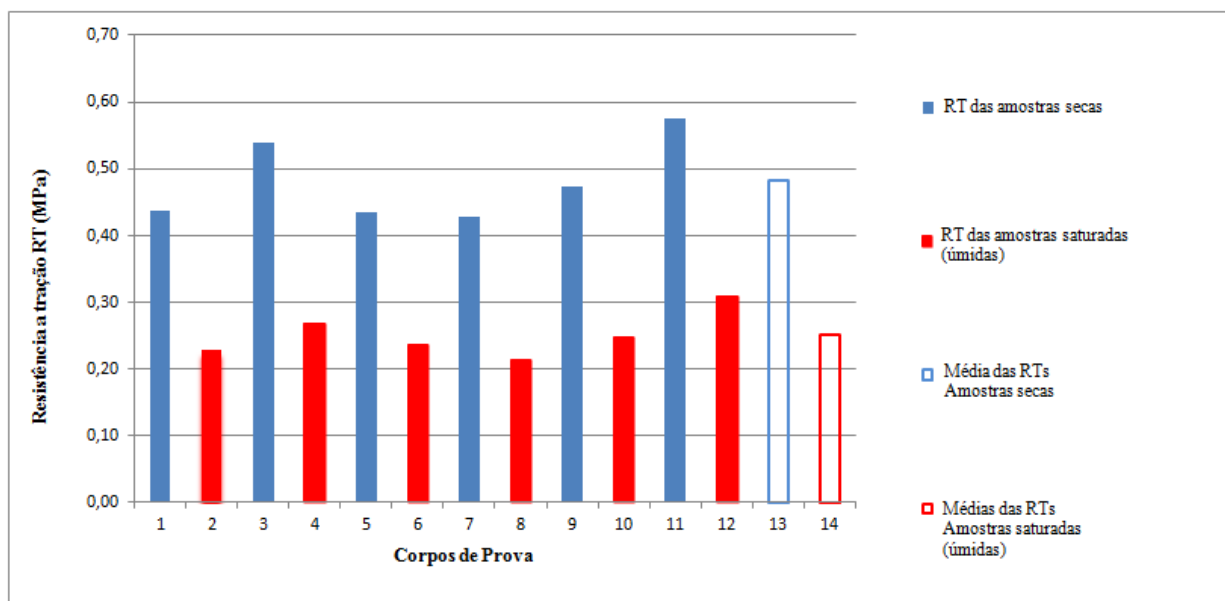


Figura 7.1: Representação gráfica dos resultados de ensaio de Resistência à Tração  
Fonte: Própria (2014)

### Resultados dos ensaios de Resistência Marshall:

A tabela 7.2 mostra os resultados obtidos com o ensaio de resistência a compressão pelo método Marshall com a utilização de espuma e PMF:

	MISTURAS - Resistência - Resistência Marshall (Kg)											
	1		2		3		4		5		6	
	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP	RCD	RAP
	29	70	29	70	99	0	70	29	70	29	0	99
	cal (1%)		cimento (1%)		cimento (1%)		cal (1%)		cimento (1%)		cimento (1%)	
CP	1		2		3		4		5		6	
1	325,00		529,00		430,00		385,00		564,00		686,00	
2	398,00		506,00		428,00		387,00		562,00		656,00	
3	378,00		472,00		397,00		404,00		521,00		690,00	
4	328,00		466,00		445,00		416,00		584,00		604,00	
5	325,00		430,00		432,00		393,00		567,00		557,00	
MÉDIA	328,00		472,00		430,00		393,00		564,00		656,00	

Tabela 7.2: Resultados dos ensaios da resistência Marshall  
Fonte: Própria (2014)

PMF	MISTURA	Marshall (Kgf)
A	RL-1C	428
B	RL-1C	472
C	RL-C modificada	596
D	RL-C modificada	696

Tabela 7.3: Resultados dos ensaios da resistência Marshall misturas PMF  
Fonte: Própria (2014)

A figura 7.2 demonstra graficamente os dos ensaios de Resistência Marshall das misturas realizadas com os materiais reciclados, e os resultados de Resistência Marshall de misturas de pré-misturados a frio utilizados para revestimento de pavimentos de baixo tráfego e também como camada intermediária em estrutura de pavimentos com tráfego mais pesados.

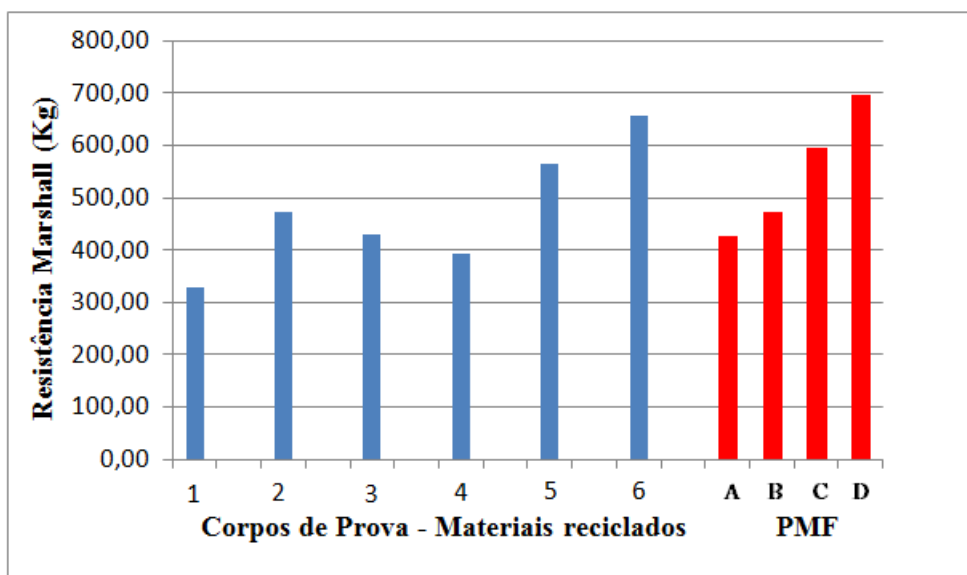


Figura 7.2: Gráfico dos resultados dos ensaios da resistência à compressão com misturas PMF  
Fonte: Própria (2014)

## 8 ANÁLISES DE RESULTADOS

---

A utilização da Reciclagem a Frio com Espuma de Asfalto pode proporcionar algumas vantagens, tais como:

- Aproveitamento dos materiais resultantes de demolição da construção civil e também dos pavimentos existentes diminuindo geração de depósito de materiais inservíveis;
- Ajustes do greide de pavimento no caso dos RAPs quanto da fresagem das capas.
- Diminuição da exploração de jazidas de agregados, uma vez que reaproveita-se grande parte dos materiais recicláveis.
- O processo de execução é realizado a frio diminuindo o emprego de energia;
- O processo é muito menos poluente;
- Menor eliminação de gases voláteis ao ar durante a fase de cura;
- A mistura realizada com espuma de asfalto tem maior tempo em condições de trabalho, pois, o tempo de ruptura da emulsão pode ser lento.

Quanto aos resultados observa-se que:

- As misturas com cimento apresentaram resultados de resistência à tração maiores que as com cal;

RT Seco:

Média das misturas com cimento = 0,53 MPa.

Média das misturas com cal = 0,43 MPa.

RT Úmido:

Média das misturas com cimento = 0,27 MPa.

Média das misturas com cal = 0,22 MPa.

- As misturas com RAP puro e cimento apresentaram melhor desempenho nos parâmetros avaliados, tanto na RT, como no Marshall.

- As misturas com quantidades maiores de RAP apresentaram desempenho melhor nos parâmetros avaliados que as com quantidades maiores de RCD.

Esse fator pode ser atribuído pelo resíduo de asfalto que situa-se no material fresado de revestimento de pavimento (RAP), atribuindo-lhe maior estabilidade devido a este fato, mas, esse fator, depende de experimentação para certificar-se dessa conjectura.

- Os valores verificados nos ensaios de Resistência à Tração foram maiores que os especificados, tanto no DNER, como no DER-SP, pode-se observar que todos os valores da RT estão acima de 0,20 MPa para as amostras saturadas (úmidas) e de 0,40 MPa para as amostras secas.

- Os valores de Resistência Marshall estão todos acima do especificado pelo DNER e pelo DER-SP.

- Os valores de Resistência Marshall encontrados para os materiais reciclados apresentaram, com exceção dos reciclados misturados com cal, valores acima dos apresentados nas misturas de PMF, geralmente utilizadas para revestimento e camadas intermediárias, dependendo da condição.

## **9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO**

---

As técnicas de reciclagem com asfalto espuma são promissoras, pois, verificou-se que os parâmetros analisados mostraram sua viabilidade, podendo ser aplicada para incorporação do revestimento à base e em camadas intermediárias da estrutura do pavimento. Também há tendência de uso desta técnica em construções novas quando o projeto prevê base tratada com asfalto como opção estrutural.

Nas misturas analisadas verificou-se que os parâmetros estão acima dos especificados no DER-SP e DNER, viabilizando sua utilização em estruturas de pavimento.

A principal vantagem dessa técnica está no fato de que, a maior parte dos materiais já estão no local para utilização, reduzindo o transporte e a exploração de jazidas, preservando assim, o meio ambiente e diminuindo o custo na obra.

## REFERÊNCIAS

---

ALVIM, I.M. Fresagem & Reciclagem de Pavimentos e Suas Aplicações na Restauração de Rodovias. 1999.

ANTONELLO, E. L.; MORILHA JR, A. WMA: Misturas mornas através do processo de espuma em usinas de asfalto. In: 4º CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. São Paulo, 2010. **Anais...** São Paulo: CONINFRA, 2010. p. 13-14

ARAÚJO, L.M.D.; FARIAS, M.M. e JÚNIOR, F.M.V. Estudo de Propriedades Mecânicas de Material Fresado Visando Incorporação em Camadas de Base Rodoviária. Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control,. Alabama, 2001, USA.

ASPHALT INSTITUTE The Asphalt Handbook. **Manual series nº 4**, Lexington, KY, USA. 1989.

BARRENO, I. P.; SAIZ, G.; Estudo em Laboratorio de La Aplicacion de La Espuma de Beún em El Reciclado de Mezclas Bituminosas. In: CONGRESSO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO, 10, 1999, Sevilla. **Anais...**Sevilla. [s.n.], 1999. Paginação irregular.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J. P.; VON DEVIVERE, M., 2004, Warm mix asphalt by adding a synthetic zeolite. In: 3rd Eurasphalt and Eurobitume Conference. 2004. Vienna **Anais...** Vienna: *Foundation Eurasphalt*, 2004. p. 354

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. Ed. 1. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 112 p.

BRASILENGENHARIA –O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil, **Revista Engenharia**, São Paulo, n. 602, p. 96-102, 2011  
<[http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao602/602\\_EngRodovias.pdf](http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao602/602_EngRodovias.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2013.

CASTRO, Luciana Nogueira de. **Reciclagem A Frio "In Situ" com Espuma De Asfalto**. 2003. p. 183. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim Estatístico – julho 2013**. Brasília, 2013. Disponível em:  
<[http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%C3%ADstico/bolletim\\_estatistico\\_julho.pdf](http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%C3%ADstico/bolletim_estatistico_julho.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2013.

CUNHA, A. *et al.* **Reciclagem a Frio “in situ” com Espuma de Asfalto.** Minas Gerais: UFMG, 2010. 83 p. Seminário apresentado para a disciplina de Sistemas Construtivos –Curso de Especialização de Sistemas Construtivos – Universidade Federal de Minas Gerais.

D’ANGELO *et al.* **Warm-Mix Asphalt: European Practice.** International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

Globo.com<<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL1357353-5598,00-BRASIL+TEM+DA+MALHA+RODOVIARIA+ENTRE+PESSIMO+E+REGULAR+ESTADO+DE+CONSERVACA.html>>. Acesso em: 03 nov. 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 32/05: PAVIMENTAÇÃO: RECICLAGEM DE PAVIMENTO A FRIO “IN SITU” COM ESPUMA DE ASFALTO.** Paraná, 2005. 17 p. Disponível em: <[http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf\\_Pavimentacao/ES-P32-05ReciclaPavFrioInSituEspumaAsfalto.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P32-05ReciclaPavFrioInSituEspumaAsfalto.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM . **DNER-ES405/00: PAVIMENTO – RECICLAGEM DE PACIMENTO A FRIO “in situ” COM ESPUMA DE ASFALTO.** Rio de Janeiro, 2000. 10 p

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM . **DNER-ES317/97: PAVIMENTAÇÃO: PRÉ-MISTURADO A FRIO.** Rio de Janeiro, 1997. 14 p

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM . **DNER-ES107/94: MISTURAS BETUMINOSA A FRIO, COM EMULSÃO ASFÁLTICA .** Rio de Janeiro, 1994. 9 p

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM . **ET-DE-P00/025: PRÉ-MISTURADO A FRIO.** Rio de Janeiro, 2006. 31 p

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM . **ET-DE-P00/033: RECICLAGEM IN SITU A FRIO COM ESPUMA DE ASFALTO.** Rio de Janeiro, 2006. 28 p

ENGELBRECHT, D. C. Manufacturing foam bitumen in a standard drum mixing asphalt plant. In: 7TH CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA (CAPSA), 1999. Victoria Falls: **Anais...** Victoria Falls. 1999. p. 1-8

FRESAR. Espuma de Asfalto. [S.I.: s.n.]

FHWA. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Federal Highway Administration, USA. 1997.

HARRISON, T.; CHRISTODULAKI, L. Innovative processes in asphalt production and application. In: 1ST INTERNATIONAL WORLD OF ASPHALT PAVEMENTS CONFERENCE, 2000, Sydney. **Anais...** Sydney: ARRB Group Limited, 2000. p. 24-33

HUFFMAN, J.; BROWN&BROWN e KANSAS, S. Full-Depth Pavement Reclamation, State-of-the-Practice. **Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT**, vol.66, USA. 1997.

JENKINS, K. J, *et al*, Halfwarmfoamed bitumen treatment, a new process. In: 7TH CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA (CAPSA), 1999. Victoria Falls: **Anais...** Victoria Falls 1999. p. 3

KANDHAL, P. Recycling of Asphalt Pavements-an Overview. **Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT**, vol. 66, USA. 1997.

KEARNEY, E. Cold Mix Recycling State-of-the-Practice. **Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT**, Vol. 66, USA. 1997.

KOENDERS, B. G, *et al*, Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. In: 2ND EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 2000, Barcelona. **Anais...** Barcelona: Book II, 2000. p 830-840

KRISTJANSDOTTIR, O. **Warm mix asphalt for cold weather paving**. 2006. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Department of Transportation, University of Washington, Olympia-Washington, 2006.

LEE, T.; TERREL, R.L. e MAHONEY, J. P. Test for Efficiency of Mixing of Recycled Asphalt Paving Mixture. **Transportation Research Record 911**, TRB, National Research Council. Washington. D.C. 1983.

LÓPEZ, ROBERTO ORELLANA. Asfalto Espumado - Tecnología y Aplicaciones. INSTITUTO CHILENO DE ASFALTO, Chile, n. 2, p. 26-29, 2002.

LUCAS, PEDRO V.Z., *et al*, Reciclagem de Pavimento *in situ* com Adição de Espuma de Asfalto – Uma Experiência Pioneira no Paraná. In: Encontro de Asfalto, 15ª, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, IBP, 2000. p 12

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético**. 2011. 236 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NEWCOMB, DAVE. An introduction to Warm-mix Asphalt, [S.I.: s.n.]



OLARD, F. Low energy asphalts. Routes Roads. In: 23World Road Congress: General Report and Conclusions, 23. 2008, Paris. **Anais...** Paris: PIARC Prizes, 2008 p. 131-145

PEREIRA, D. R. M. et al. Estudo da Influência de Aglomerantes em Pó e do Tipo de Ligante Asfáltico no Comportamento de Misturas Recicladas com Espuma de Asfalto. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 11. 2002, Porto Alegre. **Anais...**Rio Grande do Sul: ABPv, 2002. p. 14-16

PINTO, Isaac Eduardo E. **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS RECICLADAS COM ESPUMA DE ASFALTO**. 2002. 236 p. Tese (Mestrado) Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 1991. 489p. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.

PREUSSLER, E.S. **Estudo de deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. 1983. 268p. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1983.

PROETEL. Reciclagem de pavimentos a frio “in situ” com espuma de asfalto. [S.I.: s.n.]

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; CREWS, E. Field performance of warm mix asphalt at the NCAT test track. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 86., 2007, Washington. **Anais...** Washington: TRB, 2007.

RÜHL, R. Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4ª, 2008, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen. 2008. p 500-513

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S; BROWN, R.E.; LEE, D. e KENNED, Y. T. W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA, Maryland, USA. 1996.

SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.; LEITE, L.M. e BRANCO, J. V.C. O Efeito da Consistência do CAP no Teor Ótimo e nas Propriedades das Misturas Asfálticas. In: XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 1999, São Carlos. **Anais...** São Carlos. ANPET, vol. 1, 1999.

SOUZA, FIRMINO S. V.; BARROS, RODRIGO M. V., Balanço Técnico dos Três Anos da Experiência Brasileira em Reciclagem de Pavimentos com Espuma de Asfalto. In: 4ª Conferência Anual de projeto, Construção, Manutenção e Operação de Rodovias, 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro. IBC. 2001. p 8

UFBA – Misturas Asfálticas à Quente, [S.I.: s.n.]

USACE. Hot-Mix Asphalt Paving Handbook, **U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS**, USA. 2000.

TAYLOR, N.H. Life Expectancy of Recycled Asphalt Paving, **ASTM STP 662 L.E.** Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA. 1978

TERREL, R. L.; EPPS, J.A. e SORENSON, J.B. Hot-in-Place Recycling State of the Practice. **Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT**, Vol. 66, USA. 1997.

TERREL, R.L. e FRITCHEN, D.R. Laboratory Performance of Recycled Asphalt Concrete. **ASTM STP 662 L.E.** Wood, Ed. American Society for Testing and Materials, USA. 1978.

WIRTGEN GROUP. Espuma de asfalto – o ligante inovador para a construção de rodovias. Wirtgen GmbH, 2001.

WIRTGEN GROUP. Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. Wirtgen GmbH, 2012. p. 370