



FATEC-SP
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
Departamento de Transportes e Obras de Terra

JAMILLE DA SILVA LIRA

MISTURA ASFÁLTICA MORNA

SÃO PAULO
2014

JAMILLE DA SILVA LIRA

MISTURA ASFÁLTICA MORNA

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

Orientador: Prof. Me. Kendi Sanbonsuge

SÃO PAULO
2014



FATEC-SP

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transporte e Obras de Terra

Mistura Asfáltica Morna

Jamille da Silva Lira

Monografia aprovada pela Banca Avaliadora constituída por

Prof. Me. Kendi Sanbonsuge
Presidente e Orientador

Prof. Me. Sidney Isidro da Silva Júnior

Prof. Odair de Oliveira Rosa

São Paulo, 29 de novembro de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças para chegar até aqui.

Ao Engenheiro André Pita, pela escolha do tema.

A minha mãe, Áurea, e ao meu pai José Carlos, que sempre me incentivaram, apoiaram e cuidaram de mim em todos os momentos da minha vida.

A minha querida e amada Daniele Melo, por estar comigo em todos os momentos, por me ajudar nas traduções, nos ensaios, por cuidar de mim, por estar comigo sempre.

Ao meu orientador professor Kendi Sanbonsuge, por toda sua dedicação, paciência, competência, me motivando a seguir em frente, buscando sempre me ajudar nos momentos mais difíceis.

Ao laboratório de pavimentação da USP, que cordialmente forneceu o material para realização dos ensaios e em especial ao meu querido professor Edson Moura, por todo apoio, explicações, incentivo em todo o tempo.

Aos colegas do laboratório de solos Rafael, Deise e Celso por me ajudarem todo o tempo na realização dos ensaios, sem vocês com certeza não seria possível concluir o projeto.

A professora Arisol, por toda paciência e dedicação, corrigindo e ajudando na formatação do trabalho.

A Engenheira e professora da USP Rosangela Mota, por gentilmente me fornecer os principais artigos sobre o tema do meu trabalho.

A todos os meus colegas de curso, que participaram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse concluído.

EPÍGRAFE

“A persistência é o caminho do êxito” Charles Chaplin

RESUMO

A execução de misturas asfálticas mornas (*Warm-mix Asphalt*) surgiu com a crescente necessidade de melhoria nas condições ambientais iniciadas com o tratado de Quioto. Algumas técnicas utilizadas para redução da temperatura de usinagem e compactação são abordadas, variando desde a forma de incorporação do ligante asfáltico na mistura à utilização de aditivos redutores de viscosidade. O trabalho consiste em um estudo simplificado e comparativo com a utilização de cera em forma de fibra em uma mistura de distribuição descontínua e com emprego de cimento asfáltico modificado por polímero. São abordados os aspectos volumétricos da mistura, bem como de resistência mecânica. Os resultados observados indicam que o uso da cera facilitou a compactação para temperaturas convencionais e intermediárias.

Palavras-chave: Misturas mornas. Ceras. Resistência à tração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem.....	9
Figura 2.2: (i) Advera® WMA e (ii) Aspha-min® em pó	10
Figura 2.3: Esquema de um bocal de espumejo do sistema Double Barrel Green®.....	12
Figura 2.4: Revestimento com Double Barrel Green® espumado	12
Figura 2.5: Esquema de produção de mistura semimorna no processo LEA®	13
Figura 2.6: Esquema de produção e aplicação WMA-Foam®.....	14
Figura 2.7: Evothrm® ponto de injeção DAT e bomba volumétrica	16
Figura 2.8: Rediset™ WMX	17
Figura 3.1: Fibra C 25 (para misturas mornas).....	22
Figura 3.2: Fibra Premium (convencional)	22
Figura 3.3: Distribuição granulométrica.....	24
Figura 3.4: Secagem dos agregados (i) pedrisco e (ii) pó de pedra.....	24
Figura 3.5: Mosaico com a pesagem individual para composição dos CP's.....	25
Figura 3.6: Preparação do corpo de prova à esquerda e compactação à direita	26
Figura 3.7: Pesagem hidrostática.....	27
Figura 3.8: CP's levemente enxugados após a pesagem hidrostática.....	27
Figura 3.9: Corpos de prova ensaiados.....	28
Figura 3.10: (i) Corpo de prova na prensa (ii) Momento da ruptura	29
Figura 4.1: Representação gráfica dos resultados de ensaio Massa Específica Aparente	32
Figura 4.2: Representação gráfica dos resultados de ensaio RTCD.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Redução de emissões com o uso de WMA.....	7
Tabela 3.1: Características dos agregados.....	21
Tabela 3.2: Composição granulométrica da mistura SMA D 0/6	23
Tabela 3.3: Matriz de temperaturas e tipo de fibra para compactação:.....	26
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de massa específica aparente	31
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de RTCD.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP - Cimento Asfalto de Petróleo

CP – Corpo de Prova

EAP - Emulsão Asfáltica de Petróleo

EBE - Enrobés à Basse Énergie

GEE - gases de efeito estufa

HPAs- hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

NAPA - National Asphalt Pavement Association

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement

SHRP- Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE- Superior Performing Asphalt

VAM - Vazios do Agregado Mineral

VDM - Volume Diário Médio

VRD - Valor de Resistência à Derrapagem

VV - Volume de Vazios

WMA -Warm-mix Asphalt

LISTA DE SÍMBOLOS E FÓRMULAS

Equação 3.1 : Cálculo de RTCD	28
Equação 4.1: Porcentagem de vazios	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Organização do trabalho	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	O Surgimento na pavimentação	4
2.2	Técnicas Executivas.....	8
2.3	Com espuma	10
2.3.1	Aspha-min® e Advera® WMA.....	10
2.3.2	Double Barrel® Green.....	11
2.3.3	LEA®	13
2.3.4	WMA-Foam®	14
2.4	Com aditivos surfactantes	15
2.4.1	Evotherm™	15
2.4.2	Rediset™ WMX.....	16
2.5	Com aditivos orgânicos.....	17
2.5.1	Sasobit®	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	Apresentação.....	21
3.2	Agregados	21
3.3	Aditivos.....	21
3.4	Método de dosagem marshall	22
3.5	Granulometria	23
3.6	Ensaio de dosagem marshall.....	24
3.7	Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	28
3.8	Tratamento Estatístico	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Cálculos e interpretação dos resultados	30
4.2	Resultados dos ensaios.....	31
5	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS	35
	ANEXO A – TABELA COMPLETA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	37
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DAS FIBRAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A utilização do Cimento Asfalto de Petróleo (CAP) em obras de pavimentação é uma técnica que vem de muitos anos. O asfalto é importante por proporcionar uma forte união dos agregados, atuando como ligante que permite controlar a flexibilidade, proporcionar alta durabilidade, impermeabilidade e resistência à ação da maioria dos álcalis, dos sais e dos ácidos, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, com uma variedade de combinações de esqueleto mineral, com ou sem ativos. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

O asfalto apresenta características termoviscoelastoplástico, ou seja, um material cujo comportamento mecânico é susceptível à velocidade, tempo e magnitude do carregamento e à temperatura de serviço além de ser impermeável à água e pouco reativo.

Para utilização de asfalto em obras de pavimentação, faz-se necessário provocar uma redução da viscosidade do material, possibilitando, desta forma, o envolvimento dos agregados e, por conseguinte, seu emprego como material ligante.

Desta forma, há diversos processos que podem ser aplicados ao asfalto para redução de sua viscosidade, viabilizando sua utilização em obras viárias, sendo os principais meios de obtenção de CAP em viscosidade adequada, apresentados a seguir: (BERNUCCI *et al.*, 2008)

- ✓ Asfaltos naturais;
- ✓ Elevação da temperatura;
- ✓ Emulsificação;
- ✓ Diluição;
- ✓ Espuma, e
- ✓ Aditivos para redução de viscosidade.

A indústria de asfalto quente está constantemente buscando através de avanços tecnológicos melhorar o desempenho dos materiais, aumentar a eficiência da construção, conservar recursos e diminuir os impactos ambientais. Para atingir esses objetivos foi necessário introduzir métodos para reduzir a temperatura de produção dos materiais, assim surgiu o conceito de mistura asfáltica morna *Warm-mix Asphalt* para atingir estes fins. (NEWCOMB, 2007)

O desenvolvimento das tecnologias de diminuição de temperatura do asfalto mais conhecidas como (*Warm-mix Asphalt*) teve início no final da década de 90 na Alemanha com o Fórum Betume em resposta aos termos definidos no protocolo de Quioto. Neste País foi criado o programa *Low Temperature Asphalt* com o principal objetivo de estudar e desenvolver processos onde poderia se produzir misturas asfálticas em temperaturas mais baixas. (NEWCOMB, 2007; MOTTA, 2011)

Assim, seriam obtidos diversos benefícios à sociedade e ao meio ambiente, como, redução do consumo de combustíveis utilizados na usinagem da mistura, redução na emissão de poluentes na atmosfera, tanto dos resultantes da própria queima do combustível, como da evaporação de hidrocarbonetos contidos no cimento asfáltico.

Dentre as principais vantagens associadas, pode-se citar a usinagem em temperatura mais baixa que acarreta em menor oxidação do ligante durante o processo, elevando a expectativa de vida útil em campo.

Os pavimentos são estruturas compostas de múltiplas camadas sendo a camada de revestimento responsável a receber as cargas dos veículos e as ações do clima.

Os revestimentos podem ser identificados pelo seu tipo de ligante que pode ser com o uso do CAP quando executado a quente ou com o uso de Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) quando executado a frio. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

No Brasil, as misturas asfálticas usinadas a quente são mais utilizadas como revestimento asfáltico de pavimentos.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto do presente trabalho está estruturado de acordo com os seguintes tópicos:

Capítulo 1. Introdução: apresentação do tema.

Capítulo 2 Revisão da Literatura: apresenta um breve histórico do surgimento da mistura asfáltica morna, técnicas de execução, diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico e aspectos ambientais.

Capítulo 3. Materiais e Métodos: neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para realização dos experimentos bem como os métodos normativos para realização dos mesmos.

Capítulo 4. Resultados: neste capítulo são indicados os resultados obtidos em laboratório após análise dos experimentos.

Capítulo 5. Conclusões: neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações do autor sobre os estudos e o trabalho realizado, além das recomendações para estudos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O SURGIMENTO NA PAVIMENTAÇÃO

O surgimento da técnica de asfalto morno remonta a uma série de acontecimentos ambientais associados com a diminuição do efeito estufa e manutenção da camada de ozônio.

O efeito estufa é um fenômeno natural que utiliza a energia emitida pelo Sol para aquecer o planeta tornando-o habitável, sem ele a Terra seria muito fria não permitindo o desenvolvimento das espécies.

Esparta (2008) relata que,

O efeito estufa é causado pela absorção por *gases de efeito estufa* (GEEs) na atmosfera de parte da radiação de calor (radiação infravermelha) emitida pela Terra (atuando como corpo negro na absorção da radiação do sol) que de outra forma iria para o espaço. [...] De forma inversa, o crescimento da concentração dos GEEs pode aumentar a temperatura média da superfície da Terra e da sua atmosfera. Ocorre que o aumento de pelo menos um dos GEEs, dióxido de carbono, está intrinsecamente ligado a civilização moderna, já que é um dos resultados da queima de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo, carvão). [Grifo itálico do autor]

Paladino (2013) cita, em estudo sobre o uso do hidrogênio no transporte público da cidade de São Paulo que,

A queima de combustíveis fósseis provoca externalidades adversas sendo destacadas a poluição do ar nos grandes centros urbanos e mudanças climáticas. A poluição do ar provoca danos à saúde, além de provocar outros custos ambientais como perda da biodiversidade, perda de sistemas ecológicos, perda do patrimônio cultural e perda estética. [...] Os compostos de emissão dos motores a diesel podem ser divididos em dois tipos, os gases de efeito local, que causam danos à saúde e os gases de efeito global, que não causam danos diretos à saúde, mas causam o efeito estufa e o aquecimento global.

Em 1997, a Organização das Nações Unidas (ONU) convocou uma conferência entre várias nações, visando diminuir as emissões dos (GEEs) e que ficou conhecida como o protocolo de Quioto.

O conceito de *Warm-mix Asphalt* (WMA) surgiu no final da década de 90 na Alemanha como uma parceria entre o Ministério do trabalho alemão, indústrias e trabalhadores, visando a redução da exposição dos trabalhadores aos fumos de asfalto. Assim,

em resposta aos termos definidos no protocolo de Quioto foi criado no fórum Betume o programa *Low Temperature Asphalt* onde foram estudadas alternativas para produzir misturas asfálticas em temperaturas mais baixas, possibilitando a redução da queima de combustíveis e a consequente redução na emissão de agentes poluentes. (NEWCOMB, 2007; MOTTA, 2011)

Os primeiros pavimentos utilizando misturas asfálticas mornas foram construídos na Europa. Em 1995, o Mitteldeutsche Hartsteinindustrie AG (MHI) começou a experimentar o zeolita Aspha-min®. No Ano seguinte na Noruega, a Shell Betume e um empreiteiro, Kolo Veidekke, começaram a fazer experiências com uma emulsão para aplicação em WMA. Em 1997 em Hamburgo na Alemanha, os primeiros pavimentos foram construídos com Sasobit®, uma cera de Fischer-Tropsch. Em 1999 na Noruega e na Alemanha, foram executados os primeiros ensaios com a espuma WMA por Kolo Veidekke e em vias públicas com a zeolita Aspha-min®, respectivamente. Em 2002 a National Asphalt Pavement Association (NAPA) em uma visita de estudo introduziu o WMA nos Estados Unidos. (PROWELL; HURLEY, 2007) No Brasil já foram realizados estudos laboratoriais, alguns com trechos experimentais, contemplando diferentes técnicas para obtenção do WMA.

No Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP EPUSP), existem estudos em andamento visando avaliar o comportamento mecânico em laboratório com diferentes tipos de misturas asfálticas com o acompanhamento do desempenho através de trechos experimentais e avaliação das emissões de gases em laboratório, usina e durante a aplicação da mistura asfáltica morna em pista.

O grupo de concessão rodoviária Concepa em parceria com o Laboratório de Pavimentação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV) desenvolveram um estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas usando um tecnologia francesa conhecida como Enrobés à Basse Énergie (EBE), tendo seus resultados adequados para a produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias. O LAPAV ressalta a importância da execução de um teste de usinagem e compactação com os equipamentos utilizados em obras rodoviárias.

Conforme pode ser observado, o *Warm-mix Asphalt* é uma tecnologia nova, que se encontra ainda em processo de avaliação, pois, deve-se considerar que, de maneira geral, a vida útil de um pavimento asfáltico é de 10 anos. Assim, faz-se necessário que tal prazo seja atingido para possibilitar uma melhor avaliação e comprovação do desempenho satisfatório desta tecnologia.

Entretanto, os estudos já realizados e com os demais que se encontram em andamento vêm indicando que o *Warm-mix Asphalt* é uma tecnologia de sucesso e promissora para o futuro da pavimentação.

Patrocinado pela Federal Highway Administration (FHWA) em cooperação com a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e com o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) publicaram, em fevereiro de 2008, o documento denominado *Warm-mix Asphalt: European Practice*. O documento foi produzido através do International Technology Scanning Program patrocinado pela FHWA que visa avaliar novas e inovadoras tecnologias desenvolvidas fora dos EUA, adaptando-as para as condições vigentes nos EUA e colocando-se em prática com um custo e um período menor de pesquisa, em relação a tecnologias desenvolvidas em solo americano. (D' ANGELO *et al.*, 2008)

Segundo a publicação, embora os EUA não tenham assinado o protocolo de Quioto, estopim para o desenvolvimento de estudos que buscam a redução da emissão de poluentes, em março de 2005 a U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), Agência Americana de Proteção do Meio Ambiente, em uma tradução livre, instituiu o Clear Air Interstate Rule (CAIR) com a responsabilidade de reduzir de forma significativa a emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂) e de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) em 28 estados do leste e no distrito de Columbia. (D' ANGELO *et al.*, 2008)

As metas do CAIR são bastante arrojadas, visando a redução 73% na emissão de SO₂ e de 61% na emissão de NO_x, ambos referentes aos índices de 2003.

Em maio de 2007, foram enviados 13 especialistas em materiais de pavimentação para Bélgica, França, Alemanha e Noruega com a finalidade de avaliar as seguintes questões referentes à tecnologia de WMA:

- (i) Processo de produção;
- (ii) Projeto da mistura e práticas construtivas;
- (iii) Desempenho da mistura aplicada;
- (iv) Limitações; e
- (v) Benefícios.

A publicação traz as seguintes informações com relação à redução das emissões

Tabela 2.1: Redução de emissões com o uso de WMA

Substância	Noruega	Itália	França	Países Baixos
CO ²	31.5	30-40	23	15-30
SO ₂	NA	35	18	NA
VOC	NA	50	19	NA
CO	28.5	10-30	NA	NA
NO _x	61.5	60-70	18*	NA
DUST	54	25-55	NA	NA

*Relatado como NO₂

NA – Não Avaliado

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

Com relação à redução no consumo de combustível, os resultados encontrados indicam valores entre 20 e 35% de economia, em função da temperatura mais baixa de usinagem. Entretanto, esta redução pode ser superior, atingindo valores acima de 50% no caso de processos especiais buscando a redução do consumo de energia. (D' ANGELO *et al.*, 2008)

Os benefícios para execução da camada de WMA em relação ao concreto asfáltico tradicional são listados a seguir (D' ANGELO *et al.*, 2008)

- (i) Possibilidade de realizar a compactação em temperaturas mais baixas e ainda obter a densidade de projeto;
- (ii) Permite que a mistura asfáltica seja transportadas a distâncias superiores e ainda preserve as condições de trabalhabilidade para espalhamento e compactação adequada;
- (iii) Requer menor consumo de energia para a compactação em relação às misturas tradicionais;
- (iv) Permite a incorporação de elevada porcentagem de (Reclaimed Asphalt Pavement) RAP; e
- (v) Permite a rápida liberação ao tráfego.

Motta(2011) em seu estudo explica sobre a concentração dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos HPAs (que são compostos orgânicos que possuem dois ou mais anéis de benzeno fundidos e que constituem um dos primeiros poluentes atmosféricos identificados

como possíveis carcinogênicos), gerados nas misturas asfálticas mornas e sua possível redução da exposição aos trabalhadores:

[...] as misturas mornas e semimornas podem contribuir com a redução da exposição ocupacional, tanto aos odores quanto às emissões, [...] acredita-se que os fumos asfálticos gerados em altas temperaturas sejam mais susceptíveis à formação de HPAs carcinogênicos do que os fumos produzidos em temperaturas mais amenas.

A aplicação do *WMA*, por ser executada em uma temperatura inferior ao concreto asfáltico tradicional, também traz benefícios aos trabalhadores que executam a pavimentação, tanto em função do maior conforto térmico por trabalhar em temperaturas menos severas, como na redução da emissão dos fumos de asfáltico. (D' ANGELO *et al.*, 2008)

2.2 TÉCNICAS EXECUTIVAS

As misturas betuminosas usinadas a quente tradicionais são executadas em temperaturas elevadas, usualmente próximas a 170°C, necessitando emprego de maior volume de combustível para aquecimento dos agregados, ligante e para a execução da mistura, propiciando emissões de poluentes provenientes da queima e de compostos químicos voláteis do asfalto, além de correr-se o risco da queima do ligante, acelerando o processo de oxidação deste. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

WMA consiste em uma variedade de novas tecnologias de usinagem e aplicação de misturas betuminosas resultante da busca de países europeus, principalmente da Alemanha e Noruega, em reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera. Através destas técnicas, a mistura é realizada a uma temperatura próxima de 120°C e a compressão em pista ocorre próximo de 100°C.

Desta forma, a oxidação na usinagem do asfalto é significativamente inferior à que ocorre no processo tradicional, com usinagem próxima a 170°C, a emissão de poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis é expressivamente inferior, além da emissão de hidrocarbonetos voláteis existentes no cimento asfáltico também ser bastante reduzida, favorecendo o meio ambiente e os trabalhadores envolvidos na usinagem e na aplicação de camadas asfálticas usinadas. (D' ANGELO *et al.*, 2008; HURLEY; PROWELL, 2007)

As tecnologias WMA podem ser classificadas de várias maneiras, uma delas é pelo grau de redução da temperatura. A Figura 2.1 ilustra as faixas de temperatura e o consumo médio estimado de combustível para aquecimento e usinagem dos materiais.

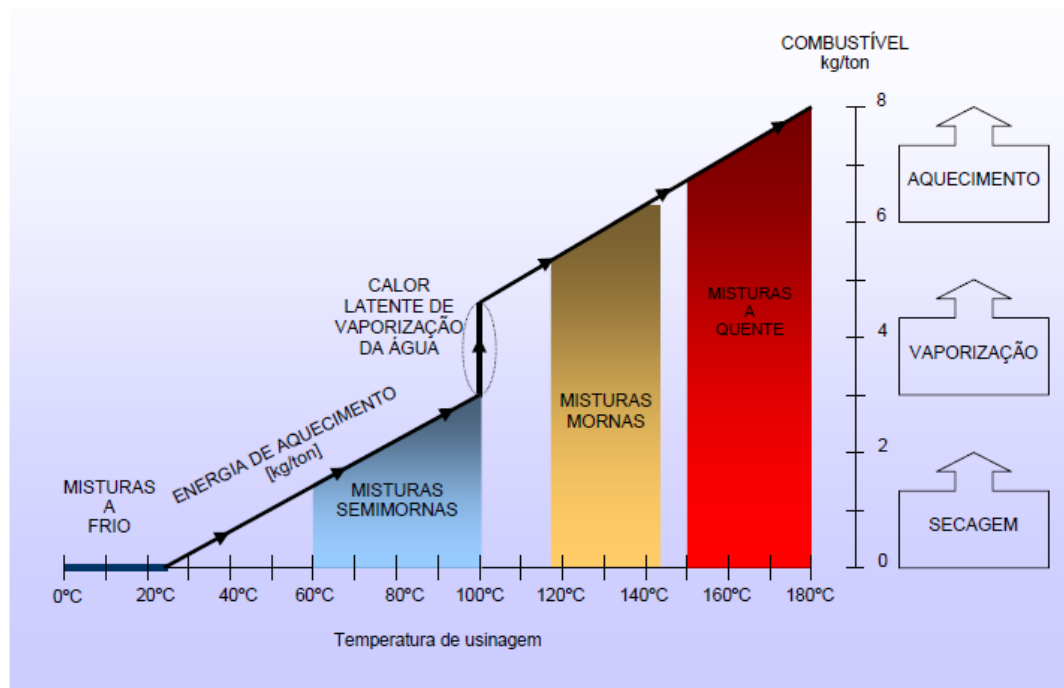


Figura 2.1: Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem
Fonte: MOTTA (2011)

Outra forma de classificação das tecnologias de WMA é realizada pelo tipo de processo, sendo dois os principais: (i) os que utilizam água e, (ii) aqueles que utilizam algum tipo de aditivo orgânico, tais como ceras, aditivos químicos ou surfactantes para reduzir a temperatura. Atualmente, para cada processo de produção da mistura asfáltica morna existem uma série de técnicas e produtos. (D'ANGELO *et al.*, 2008; HURLEY; PROWELL, 2007)

O processo de espuma de asfalto pode ser realizado com pequenas quantidades de água por injeção direta no processo de usinagem, através de um material hidrofílico como a zeólita ou agregado úmido. A água em contato com o ligante aquecido se transforma em vapor, expandindo o volume do ligante, reduzindo, assim sua viscosidade. (PROWELL; HURLEY, 2007)

O emprego de algumas técnicas de espuma de asfalto pode necessitar de alterações na planta da usina, como da instalação de equipamentos para a injeção de água, alimentadores ou câmaras de expansão. Para tais procedimentos se faz necessário um investimento inicial. Algumas técnicas podem ser feitas manualmente, como por exemplo, a

introdução da zeólita diretamente no *pugmill* de usinas gravimétricas, como feito na técnica Aspha-min®. (MOTTA, 2011)

2.3 COM ESPUMA

Dentre as várias técnicas de espuma de asfalto, seguem como exemplos: Aspha-min®, Advera® WMA, Double Barrel® Green, LEA® e WAM-Foam®. A seguir serão apresentadas descrições e figuras que ilustram cada uma das tecnologias citadas:

2.3.1 ASPHA-MIN® E ADVERA® WMA

Aspha-min® e Advera® WMA são zeólitas sintéticas composta por silicatos de alumínio e metais alcalinos. Eles contêm aproximadamente 20 por cento de água em sua estrutura, que é liberada através do aumento da temperatura acima do ponto de vaporização da água. As zeólitas liberam uma pequena quantidade de água gerando um efeito de formação de espuma controlada, causando o aumento no volume do ligante e reduzindo a sua viscosidade. O Aspha-min® é fabricado por uma empresa alemã chamada Eurovia Services GmnH e a Advera® WMA é produzida nos Estados Unidos por uma empresa chamada PQ Corporation. Os fabricantes relatam que a liberação gradual de água fornece um período de seis a sete horas de melhor trabalhabilidade permanecendo até a temperatura cair a aproximadamente 100°C. (PROWELL;HURLEY,2007)



(i)



(ii)

Figura 2.2: (i) Advera® WMA e (ii) Aspha-min® em pó

Fonte: MOTTA (2011)

As zeólitas sintéticas normalmente são adicionadas a uma taxa de 0,3 % do peso total da mistura podendo ser utilizadas para produzir misturas mornas com ligantes convencionais ou modificados. A temperatura final da mistura é de aproximadamente 30°C menor do que a mistura convencional. (PROWELL; HURLEY, 2007) As zeólitas não devem ser aquecidas num forno antes de serem adicionadas as misturas asfálticas, os projetos das misturas asfálticas com zeólitas sintéticas são realizados da mesma maneira das misturas convencionais, o que difere as duas são a adição dos produtos e a redução da temperatura. Acrescentam-se os produtos à mistura ao mesmo tempo em que é inserido o ligante, embora no caso do Advera® WMA estudo preliminares verificaram que os resultados são mais favoráveis quando existe uma prévia mistura deste produto com o asfalto sob grande agitação fazendo com que as zeólitas se dispersem de forma mais consistente. (PROWELL; HURLEY, 2007)

Motta (2011) relata que:

Dependendo do tipo de usina, a incorporação do Advera® WMA e do AsphaMin® pode ser feita de diferentes formas. No caso de usinas gravimétricas, estas zeólitas podem ser adicionadas manualmente dentro do pugmill, por meio de “melt bags”, ou automaticamente no depósito de pesagem. Já em usinas contínuas, a adição pode ser feita pela entrada de fresados, embora esta solução não seja recomendada para o Advera® WMA (que apresenta maior dificuldade de dispersão no ligante). Neste caso, é preferível inserir este produto através de um alimentador de fibras modificado, com a sua entrada no misturador próxima à do asfalto, de forma que o ligante o encapsule quando começar o efeito de liberação da água, evitando que o sistema de exaustão o carregue.

2.3.2 DOUBLE BARREL® GREEN

O Double Barrel® Green não é um aditivo e sim um processo que usa um dispositivo de espuma multibocal para espumar microscopicamente o asfalto, é indicada para usinas *drum-mixer*. Esse sistema inclui um coletor com válvulas de espumejo, câmaras de mistura, jato ajustável e bocal como mostra a figura 2.3 a seguir: (PROWELL; HURLEY, 2007)

Motta (2011) explica que:

[...] esta técnica requer a instalação de um dispositivo acoplado ao tambor secador/misturador com um sistema de válvulas, câmaras de mistura e

multibocais capazes de injetar uma pequena quantidade de água e, assim, espumar microscopicamente o asfalto, expandindo-o em cerca de 18 vezes. [...] para que seja possível implementar o processo Double Barrel® Green em uma usina *drum-mixer* é necessário instalar o dispositivo na parte externa do tambor (sobre o sistema de injeção de asfalto existente), além de conectá-lo com linhas de alimentação de asfalto e água. [...] as misturas mornas do sistema Double Barrel® Green são usinadas entre 120 a 135°C e compactadas em até 110 a 115°C.

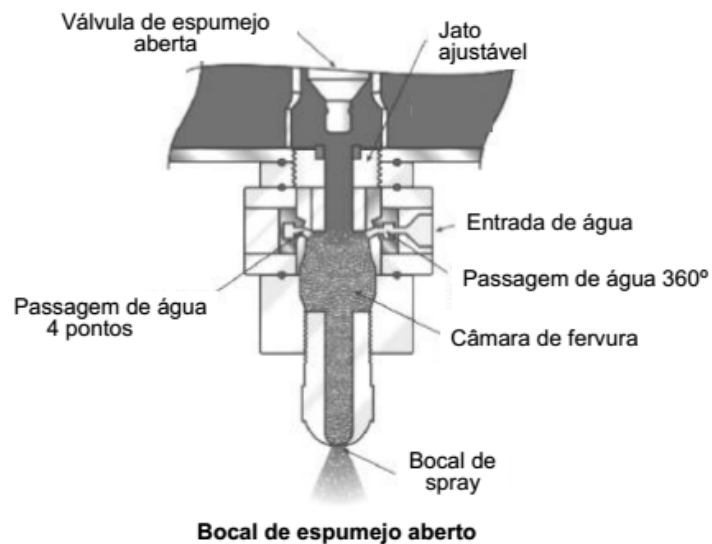


Figura 2.3: Esquema de um bocal de espumejo do sistema Double Barrel Green®
Fonte: MOTTA (2011)

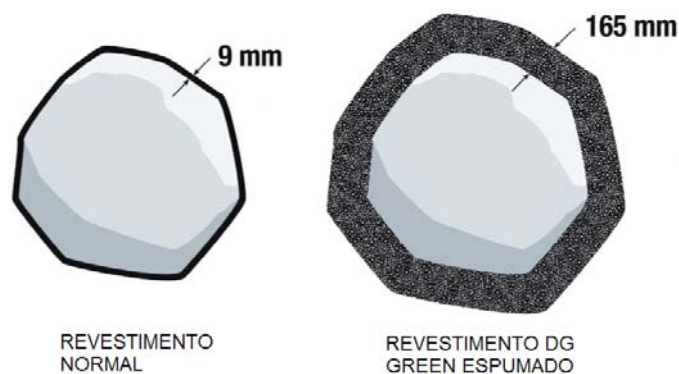


Figura 2.4: Revestimento com Double Barrel Green® espumado
Fonte: ASTEC INDUSTRIES (20--)

2.3.3 LEA®

A tecnologia Low Energy Asphalt (LEA®) utiliza a produção de mistura asfálticas semimornas por espuma de asfalto quente em contato com pequenas quantidades de água encontrada nos agregados. (PROWELL; HURLEY, 2007)

Motta (2011) Cita que:

[...] 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 3.5 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.

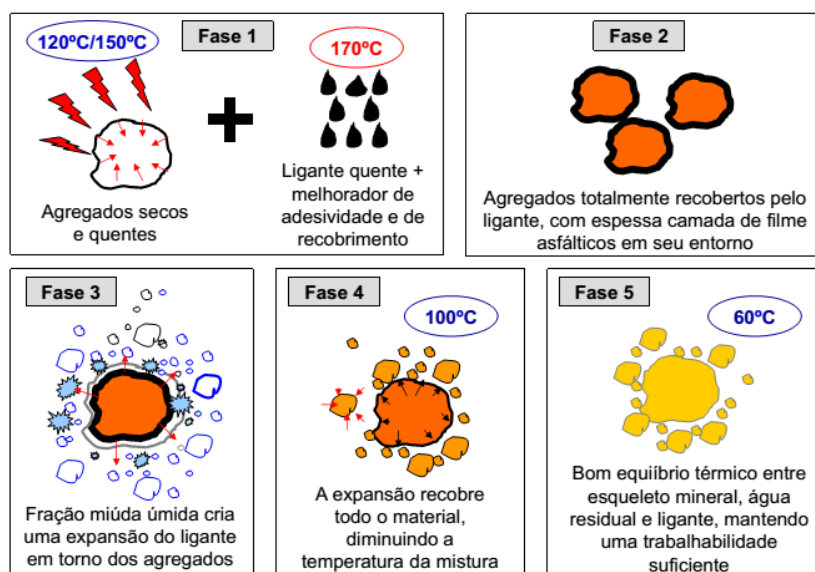


Figura 2.5: Esquema de produção de mistura semimorna no processo LEA®

Fonte: MOTTA (2011)

2.3.4 WMA-FOAM®

Também conhecido como *Warm Mix Asphalt Foam Emulsion* esse produto é produzido em conjunto pelas empresas Shell International Petroleum Company Ltda e Kolo-Weidekke. Esta técnica consiste em adicionar dois tipos diferentes de ligantes asfálticos, um com baixa e outro com alta viscosidade (o de alta viscosidade é introduzido no processo como espuma) e produzem um ligante cujo produto final tem uma consistência determinada.

Motta (2011) relata que:

O processo WMA-Foam® consiste em secar inicialmente os agregados pétreos graúdos em temperaturas de cerca de 125 a 130° C, e depois recobri-los com o asfalto menos viscoso (mais mole). Em seguida, o ligante de maior consistência é separadamente espumado com água, e entra na mistura junto com a parcela de fíler, fazendo com que a viscosidade desta caia e a usinagem ocorra em temperaturas de cerca de 100 a 120°C. Por fim, a mistura com WMA-Foam® poderá ser compactada em temperaturas da ordem de 70 a 110°C.

[...] usualmente, o ligante com viscosidade baixa representa 20 a 30% do total de asfalto da mistura na tecnologia WMA-Foam®. Entretanto pode-se alterar o montante deste ligante para alcançar a consistência final desejada, uma vez que a quantidade necessária para se recobrir a fração graúda é mínima, além de ser suficiente para satisfazer a absorção do asfalto.

[...] a água adicionada para espumar o ligante mais duro corresponde a cerca de 2 a 5 % da massa deste asfalto (aproximadamente 0,7kg de água por tonelada de mistura, assumindo-se que esta tenha 5% de ligante, no qual 80% é constituído de asfalto mais duro). Para a formação da espuma, a água entra em temperatura ambiente e o ligante deve estar aquecido a cerca de 175 a 180° C, o que faz com que a combinação água-asfalto expanda próximo de 15 vezes em relação a seu volume original.

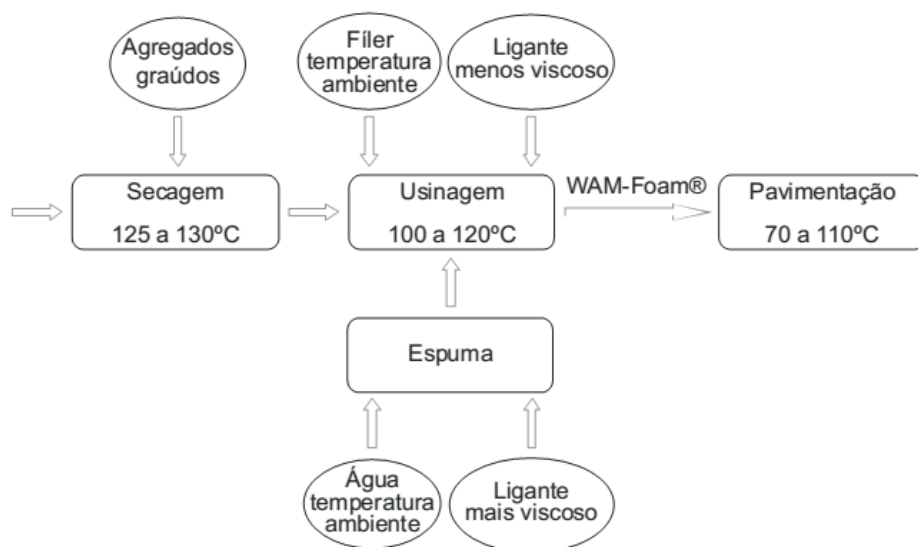


Figura 2.6: Esquema de produção e aplicação WMA-Foam®

Fonte: MOTTA (2011)

2.4 COM ADITIVOS SURFACTANTES

Outro grupo de tecnologias são os que introduzem aditivos surfactantes no asfalto, ou em uma emulsão com elevado teor resíduos asfálticos, esses produtos agem na superfície do ligante/agregado e auxiliam no processo de recobrimento e como melhoradores de adesividade do material;

Exemplo dessa técnica são Evotherm™, Rediset™ WMX.

2.4.1 EVOTHERM™

Essa tecnologia utiliza aditivos químicos misturados ao asfalto, produzido pela empresa MeadWestvaco, permite a redução da temperatura de usinagem e compactação de 50 a 75°C. (D' ANGELO *et al.*, 2008)

Motta (2011) relata que:

[...] este pacote químico tem a finalidade de melhorar o recobrimento (por meio de surfactantes, que atuam como agentes emulsificantes), a adesividade e a trabalhabilidade das misturas asfálticas em temperaturas reduzidas, sendo que cerca de 50% deste material é derivado em fontes retornáveis.

[...] No processo originalmente criado, o pacote químico é misturado a uma emulsão com alto resíduo de asfalto 70 % e, posteriormente, a estocagem deve ser feita a 80°C. Na usinagem esta emulsão deve ser misturada com os agregados aquecidos, a fim de fabricar misturas asfálticas com temperaturas entre 85 a 115°C, sendo que esta etapa a maior parte da água contida na emulsão vira vapor quando há o contato com os agregados quentes. No fim, estes ficam bem recobertos e a misturas morna resultante aparenta uma cor negra, bem característica de misturas a quente.

[...] mais tarde, o Evotherm™ ET passou a ser substituído por um novo processo denominado Evotherm™ Dispersed Asphalt Technology (DAT), no qual o mesmo pacote químico passou a ser diluído com uma pequena quantidade de água e injetado em um ligante, e não mais em uma emulsão, sendo esta injeção realizada diretamente na linha de asfalto, imediatamente antes do misturador de usinas drum-mixer ou diretamente no pugmill de usinas gravimétricas.

[...] No caso da tecnologia ET, o pacote químico é vendido já misturado à emulsão, enquanto na DAT o cliente recebe somente tal produto para incorporá-lo ao ligante, reduzindo os custos de transporte, devido ao volume de material, e permitindo que a usina transite rapidamente entre os processos de fabricação da mistura morna e da mistura convencional.

[...] Dependendo do tipo de processo, as alterações necessárias em usina são variáveis. No caso do método ET, a emulsão pode ser bombeada diretamente da carreta ou estocada em um tanque, mas deve-se atentar para a quantidade de asfalto residual na emulsão, podendo haver a necessidade de

aumento do seu teor para que a quantidade de água fique em 30%. Já na técnica DAT, requer-se a instalação de uma bomba volumétrica para o pacote químico e de um ponto de injeção na linha existente de asfalto



Figura 2.7: Evotherm® ponto de injeção DAT e bomba volumétrica

Fonte: PROWELL; HURLEY (2007)

2.4.2 REDISET™ WMX

Essa tecnologia é composta de uma combinação de aditivos orgânicos e agentes surfactantes em forma de pastilhas, é produzido pela Akzo Nobel. Os resultados dessa combinação é uma melhoria no recobrimento do ligante na superfície dos agregados, promovendo o efeito *antistripping* sobre a mistura asfáltica por melhorar a adesividade e conferir uma redução da viscosidade do ligante, podendo assim, diminuir em até 30°C a temperatura da mistura asfáltica. (PROWELL; HURLEY, 2007)

Motta (2011) descreve que:

[...] este produto é empregado em uma taxa de 1,5 a 2,5% em massa de ligante, o que não é suficiente para alterar significativamente as propriedades de consistência do asfalto em que é adicionado. Ademais, a incorporação do Rediset™ WMX na produção de misturas mornas é simples e não necessariamente requer alterações na planta de usina, podendo ser feita diretamente no tanque de asfalto aquecido ou na mistura (preferivelmente logo depois da entrada do asfalto) em usinas gravimétricas ou *drum-mixer*. No caso particular de usinas contínuas, a inserção do Rediset™ WMX no misturador pode ser feita por meio de um alimentador pneumático ou mesmo por um sistema

[...]devido ao seu efeito *antistripping*, não há a necessidade de se adicionar outros elementos que possuam esta ação, como cal hidratada, por exemplo.



Figura 2.8: Rediset™ WMX
Fonte: MOTTA (2011)

2.5 COM ADITIVOS ORGÂNICOS

Aditivo orgânico ou ceras são outro grupo de tecnologias de misturas asfálticas mornas que agem reduzindo a viscosidade do asfalto. Quando submetidos a temperaturas acima do ponto de amolecimento, faz com que haja diminuição da viscosidade do ligante por interferir na propriedade do mesmo. Um exemplo dessa tecnologia é o Sasobit® que pode ser comercializado em flocos ou em pastilhas, conforme a figura 2.9. A adição em flocos é recomendada para incorporação no ligante e as pastilhas na mistura asfáltica. (PROWELL; HURLEY, 2007)

2.5.1 SASOBIT®

Motta (2011) explica que

[...]O Sasobit® é uma cera parafínica, tipo Fischer-Tropsch (F-T), produzida pela empresa alemã Sasol Wax GmbH, que permite a produção de misturas mornas por redução da viscosidade do ligante. As ceras F-T são obtidas a partir da gaseificação do carvão na presença de um catalisador e caracterizam-se por uma longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno.

[...]O Sasobit® pode ser utilizado para produzir misturas mornas com ligantes convencionais ou modificados, bem como com diferentes tipos de granulometria, sendo usualmente empregado em taxas que variam de 0,8 a 4% em massa de ligante, não sendo recomendado acima disto porque pode

causar enrijecimento significativo do asfalto em baixas temperaturas. Este aditivo tem ponto de amolecimento de cerca de 100 °C e pode ser adicionado ao ligante previamente à usinagem ou juntamente com este no momento da mistura. Após ser incorporado ao asfalto, o Sasobit® se solidifica em temperaturas entre 65 e 115 °C, ficando com a aparência de microscópicas partículas alongadas regularmente distribuídas em meio ao ligante, o que inclusive leva a acreditar que é essa estrutura que faz com que haja um aumento da viscosidade do asfalto nas maiores temperaturas de serviço do pavimento, tornando-o mais resistente à deformação permanente.

[...] Os projetos de mistura com Sasobit® têm sido realizado do mesmo modo que os de misturas convencionais, havendo somente a incorporação do produto da mistura e a redução da temperatura de usinagem. Sua adição pode ser feita tanto ao asfalto antes da usinagem, quanto à mistura imediatamente antes da entrada do ligante ou em conjunto com este. As misturas mornas com Sasobit® incorporado no momento da usinagem podem ser preparadas tanto em usinas *drum-mixer* quanto em gravimétricas. No caso particular das usinas contínuas, o produto pode ser introduzido através da entrada de fresados, embora seja preferível usar um alimentador (similar ao utilizado para fibras) que controle a quantidade e o insira no tambor. Neste tipo de usina é interessante que a entrada deste aditivo seja feita no mesmo ponto em que há a adição do asfalto no misturador. A temperatura final da mistura morna com Sasobit® é até 30°C menor do que a temperatura de uma mistura convencional. A propósito, o *merkblatt* alemão especifica que as temperaturas de usinagem de misturas mornas com Sasobit® devem se situar entre 130 a 170°C, dependendo da consistência do asfalto empregado. Em pista o lançamento e a compactação das misturas mornas com este aditivo são feitos do mesmo modo que seriam com uma mistura convencional.

[...] a execução de dois trechos experimentais de mistura morna com 1,5% de Sasobit®, acompanhados de dois segmentos convencionais comparativos, construídos no ano de 2006 no Estado norte-americano da Virgínia. No primeiro caso, em que inclusive houve a adição de 10% de fresados, a mistura morna foi usinada a 120 °C, enquanto sua mistura de referência foi executada a 150 °C. No segundo caso, com 20% de fresados, a mistura morna foi usinada a 150 °C, ao passo que a mistura a quente foi preparada a 165 °C. Os resultados mostraram ligeiramente menores do que aqueles das misturas de controle, mas com diferença estatisticamente insignificante.



(i)



(ii)

Figura 2.9: (i) Sasobit® em flocos e (ii) Sasobit® em pastilhas

Fonte: HURLEY e PROWELL (2005)

Nos Estados Unidos, o Sasobit tem sido misturado com o ligante em um terminal e bombeado diretamente a câmara de mistura ao mesmo tempo em que a fibra é adicionada ao SMA.

O Centro Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT) desenvolveu nos Estados Unidos um estudo para avaliar a aplicabilidade do produto Sasobit. Serviram como referência dois tipos de agregados, o granito e o calcário, bem como duas classes de ligantes, o PG-64-22 e PG58-28.

O programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP) foi estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos em 1987, com o objetivo de melhorar o desempenho, a durabilidade, e a segurança das estradas, para isso contou com uma verba de US\$150 milhões. Um dos principais resultados da pesquisa foi a apresentação de novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos para pavimentação. Essas novas especificações apresentam mudanças significativas nos procedimentos de ensaios de ligantes e misturas asfálticas, pois beneficia a avaliação das propriedades reológicas por ensaios mais representativos, com base nos ensaios tradicionais de penetração, ponto de amolecimento, e viscosidade e passaram a ser conhecidas como *Superior Performing Asphalt* (Superpave). O programa propõe que os ligantes passem a ser avaliados em uma ampla faixa de temperaturas, que cubra todas as etapas do processo da mistura, espalhamento e compactação, e que sejam associadas às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde aquele material será utilizado. Para compor essa nova classificação dos ligantes asfálticos foram estabelecidos novos ensaios realizados em temperaturas baixas, médias e altas de uso do CAP no campo. Os ligantes são classificados em graus de temperatura máxima e mínima em que apresentam determinadas propriedades, estabelecidas como “grau de desempenho” ou Performance Grade (PG). PG64-22 por exemplo onde o primeiro número $T_{max20mm}$ é a temperatura de campo, a 20mm de profundidade no revestimento, mais alta durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano e o segundo número T_{min} , incluindo o sinal negativo, corresponde à mínima temperatura que atua no mesmo ponto do pavimento no dia mais frio do ano. Os intervalos entre classes de 6°C nas temperaturas. BERNUCCI *et al.* (2008)

O resultado encontrado tem como base os testes realizados em laboratório, onde as seguintes conclusões foram encontradas sobre o uso de Sasobit (HURLEY E PROWELL, 2005):

- (i) Diminui os vazios com a prensa de compactação giratória;
- (ii) Melhora a compacidade das misturas tanto para o compactador giratório superpave quanto para o compactador vibratório .Os resultados estatísticos indicaram uma redução média da porcentagem de, vazio em 0,87% VV. A melhor compactação foi percebida a temperaturas baixas, como 88° C;
- (iii) Os resultados dos ensaios de tração indireta para as misturas com Sasobit foram menores, em alguns casos, quando comparados com as misturas de controle. Acredita-se que essa redução está relacionada à propriedade antienvelhecimento da cera Sasobit;

Como fatos negativos, podem ser apontados:

- (vi) A baixa temperatura de compactação usada para produzir misturas asfálticas pode ter aumentado o dano por umidade.
- (vii) A baixa temperatura utilizada para a mistura e compactação pode resultar em uma secagem incompleta do agregado. Como consequência, a água presa no agregado (encoberto por ligante) causará danos na interface entre agregado e ligante, diminuindo sua resistência.

O estudo faz algumas recomendações para o uso do Sasobit. (HURLEY; PROWELL, 2005):

Os ligantes modificados com Sasobit, necessitam de mais estudos para se ajustar à classe com desempenho desejado (PG). Como exemplo deste estudo, um ligante classe PG 58-28 serviu como base asfáltica, que, por fim, recebeu a adição de 2,5% de Sasobit. Como resultado produziu-se um ligante classe PG 64-22;

O teor ótimo de ligante pode ser determinado com um ligante puro, da mesma classe de ligante modificado por Sasobit. Neste caso, amostras adicionais deverão ser produzidas com ligante modificado com Sasobit para que a densidade de campo seja ajustada;

Com base nos resultados de compactação e deformação permanente, recomenda-se uma temperatura de mistura tem que estar no máximo a 129°C e uma temperatura mínima de compactação de 110°C. Se a temperatura de mistura for superior a 129°C, então um ligante com características para altas temperaturas deve ser adicionada, no intuito de neutralizar a tendência de aumento da suscetibilidade térmica e de apresentar deformação permanente;

Como recomendações do estudo de Hurley e Prowell, 2005, fazem-se necessárias novas pesquisas para avaliações de desempenho em campo, seleção do teor ótimo de betume e da seleção da classe do ligante para produção de misturas com temperatura intermediária.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 APRESENTAÇÃO

O presente capítulo apresenta os materiais empregados e os métodos para avaliar os aspectos volumétricos da mistura e sua resistência mecânica.

A pesquisa segue a metodologia prevista nos ensaios de dosagem Marshall, com foco nos ensaios para determinação volumétrica e de resistência à tração por compressão diametral (RTCD).

3.2 AGREGADOS

Nesse estudo foram empregados agregados de origem basáltica da região de Ribeirão Preto de fração miúdos até finos, cordialmente fornecidos pelo LTP EPUSP, provenientes da pedreira Leão Engenharia. As características físicas seguem conforme Tabela 3.1

Tabela 3.1: Características dos agregados

Material	Densidade aparente (g/cm ³ à 25°C)	Densidade Real (g/cm ³ à 25°C)	Absorção (%)
Pedrisco - Barmac	2,864	2,936	0,86
Pó de Pedra – H4000	2,752	2,940	2,31
Calcáreo	-	2,410	-
Cal CH-1	-	2,337	-

Fonte: LTP EPUSP , 2014

3.3 ADITIVOS

Como aditivos, foram empregados dois tipos de fibra para retenção do mástique da mistura do SMA:

- (i) Fibra Premium – fabricado e distribuído pela empresa Rettenmayer é uma das soluções convencionais para misturas do tipo SMA;

- (ii) Fibra C25 – do mesmo fabricante e distribuidor, é indicada para baixar a temperatura de usinagem para produção de WMA.



Figura 3.1: Fibra C 25 (para misturas mornas)
Fonte: PRÓPRIA (2014)



Figura 3.2: Fibra Premium (convencional)
Fonte: PRÓPRIA (2014)

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL

O método de dosagem mais utilizado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Devido a sua simplicidade, experiência comprovada e equipamentos relativamente econômicos, o método Marshall é o mais utilizado no Brasil. Adotado pelo DNIT (DNER-ME 04395 e DNER-ME 13894), 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 a estabilidade juntamente com a fluência das misturas betuminosas.

O método tem como objetivo determinar o teor ótimo do asfalto (também denominado de teor de projeto) que deverá ser adicionado à mistura de agregados respeitando a faixa granulométrica pré-fixada para ser obtido um determinado volume de vazios na mistura que atenda aos parâmetros de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral.

3.5 GRANULOMETRIA

A curva granulométrica de uma mistura asfáltica é tão importante quanto a natureza do ligante. Ela define a resistência das misturas asfálticas contra os esforços de compressão devido à passagem dos carregamentos. O objetivo desse trabalho não contempla encontrar a curva ideal para a mistura betuminosa utilizada, embora a adoção e escolha de uma curva tornam-se fundamental ao sucesso da pesquisa. A distribuição adotada foi baseada em um traço previamente definido, fornecido cordialmente pelo LTP EPUSP.

A tabela a seguir apresenta a curva granulométrica adotada, como a abertura das peneiras e porcentagem passante.

Tabela 3.2: Composição granulométrica da mistura SMA D 0/6

Abertura Peneiras	Pedrisco	Pó-de- pedra H4000	Calcáreo	Cal CH-I	Composição
mm	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass	% Pass
7,93	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6,35	91,81	100,00	100,00	100,00	94,30
2	5,95	83,87	99,95	100,00	30,50
0,074	0,61	9,34	84,08	96,36	8,60
%	70,00	23,00	5,50	1,50	100,00

Fonte: LTP EPUSP, 2014

A figura 3.2 demonstra graficamente o traçado da curva

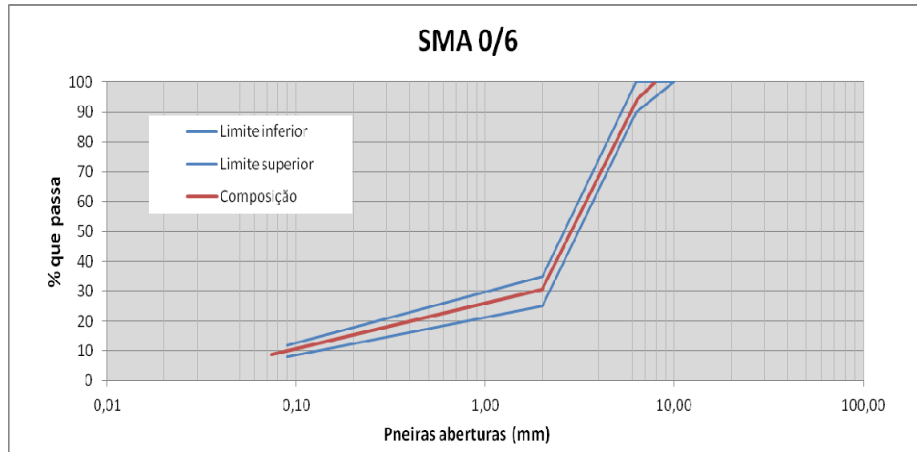


Figura 3.3: Distribuição granulométrica
Fonte: LTP EPUSP, 2014

3.6 ENSAIO DE DOSAGEM MARSHALL

Os corpos de prova foram organizados conforme a adição das fibras e a temperatura de compactação. As amostras identificadas com a letra “A” são as misturas com fibra C-25 que tem em sua composição cera tipo Fischer Tropsch wax para (mistura morna), enquanto os corpos de prova com sequência “B” são as misturas com fibra premium (mistura convencional).

O presente ensaio obedece ao seguinte roteiro:

- (i) Secagem dos agregados em estufa conforme figura 3.3.



(i)



(ii)

Figura 3.4: Secagem dos agregados (i) pedrisco e (ii) pó de pedra
Fonte: PRÓPRIA (2014)

- (ii) Pesagem individual de cada agregado para composição de cada CP, conforme figura 3.5.

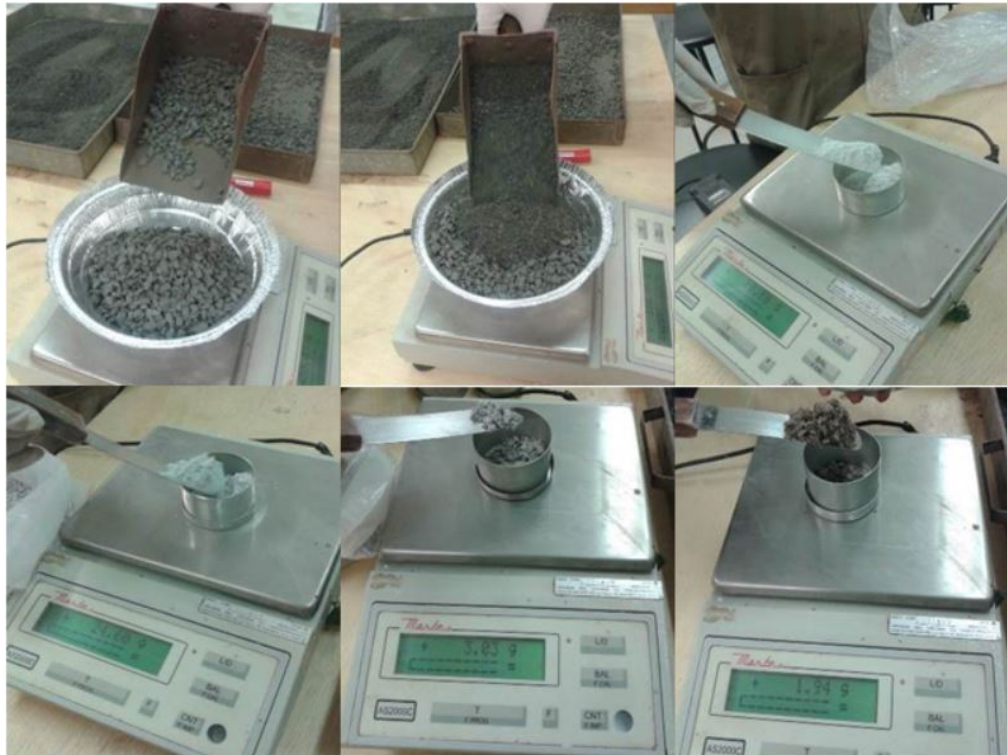


Figura 3.5: Mosaico com a pesagem individual para composição dos CP's
Fonte: PRÓPRIA (2014)

- (iii) Pesagem das porções de fibra para cada CP
- (iv) Depois de pesadas as "porções" de agregado e fibra - seguem para estufa em temperatura de usinagem
- (v) Aquecimento do Ligante em temperatura de usinagem (controle da temperatura com o termômetro)
- (vi) Mistura manual dos agregados graúdos e dos finos (calcário e cal) ate obter a homogeneização
- (vii) Adição das fibras e logo após o ligante até ser obtida homogeneização da amostra
- (viii) Após a homogeneização, as misturas permaneceram 2 horas na estufa na temperatura de compactação+5°C. A tabela 3.3 mostra a matriz compactação empregada. Para cada grupo foram confeccionadas 03 corpos de prova.

Tabela 3.3: Matriz de temperaturas e tipo de fibra para compactação:

Tipo de Fibra	Temperatura de Compactação (°C)
PADRÃO	110
COM CERA	110
PADRÃO	180
COM CERA	180

Fonte: PRÓPRIA (2014)

Este intervalo de repouso tem como objetivo simular o procedimento que acontece em campo quando a mistura asfáltica é transportada até o local de compactação, representando o envelhecimento de curto prazo.

- (ix) Compactação com 50 golpes cada face, preconizado para misturas do tipo Gapgraded. As temperaturas adotadas para mistura quente foi de 180 °C e para a mistura morna 110 °C. Conforme figura 3.6:



Figura 3.6: Preparação do corpo de prova à esquerda e compactação à direita
Fonte: PRÓPRIA (2014)

- (x) Após a compactação, as amostras repousaram por um período de 24h.
- (xi) Desmoldagem

- (xii) Após a desmoldagem, é realizada a medição das dimensões de cada corpo de prova. Cada amostra é medida com o auxílio de paquímetro em três diferentes posições (altura e diâmetro).
- (xiii) Após medição, os corpos são pesados em balança com precisão de 0,1 grama (ao ar livre)
- (xiv) Pesagem hidrostática ou seja imerso em água. Conforme ilustra figura 3.6.



Figura 3.7: Pesagem hidrostática
Fonte: PRÓPRIA (2014)

Após pesagem hidrostática, os CP's foram levemente enxugados para retirada da água em excesso e pesados novamente a fim de medir a superfície seca saturada (sss). Conforme mostra figura 3.8.



Figura 3.8: CP's levemente enxugados após a pesagem hidrostática
Fonte: PRÓPRIA (2014)

- (xv) Depois foram deixados ao ar para secagem.
- (xvi) Para o Ensaio de ruptura à tração por compressão diametral com a prensa Marshall (RTCD) os corpos de prova foram condicionados a 25°C por 4 horas, logo após montamos as amostras no suporte, rompemos e anotamos a carga máxima de ruptura.

A figura 3.9 apresenta dois grupos de corpos de prova (CP's) previamente moldados à espera do ensaio.



Figura 3.9: Corpos de prova ensaiados
Fonte: PRÓPRIA (2014)

3.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Os ensaios de RTCD conforme figura 3.10, foram realizados com deslocamento controlado, a uma taxa de 1 mm/min, até a amostra atingir 5% da força máxima registrada no instante da ruptura, utilizando uma prensa convencional. Foram registrados os valores de carga máxima e calculado o valor de RTCD através da equação.(3.1).

$$RTCD = \frac{2.F_{max}}{\pi.D.h}$$

Equação 3.1 : Cálculo de RTCD

Onde: RTCD = Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)
 Fmax = força máxima aplicada (N)
 D = diâmetro da amostra (mm)
 h = espessura da amostra (mm)



(i)



(ii)

Figura 3.10: (i) Corpo de prova na prensa (ii) Momento da ruptura
Fonte: PRÓPRIA (2014)

3.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os resultados abordados no capítulo 4 são resultantes de tratamento estatístico através da utilização da Distribuição normal, onde foram preservados os valores com grau de confiabilidade acima de 75%. Os valores convencionais para pesquisas laboratoriais situam-se na ordem de 95% mas devido à variação ocorrida, esta faixa não pode ser adotada.

4 RESULTADOS

4.1 CÁLCULOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Quando utilizamos o método Marshall temos que analisar os seguintes parâmetros:

A porcentagem de vazios da mistura betuminosa é calculada a partir da equação 4.1: conforme norma NBR 12891/1993

$$\%V = (D_t - D_a) \times 100 / (D_t)$$

Equação 4.1: Porcentagem de vazios

Onde: d_a = densidade aparente da mistura

D_t = densidade teórica

$\%V$ = porcentagem de vazios

A densidade da mistura é calculada pela relação entre o peso ao ar e o volume do corpo de prova. O volume do corpo de prova é obtido pela diferença em peso do corpo de prova imerso em água e do corpo de prova ao ar).

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.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

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

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos com o ensaio de massa específica aparente, mostrando os dois tipos de misturas as utilizando fibra Premium (convencional) e fibra C-25 (com cera tipo Fischer-Tropsch Wax). São apresentados os valores médios obtidos, bem como o desvio padrão, representado pela barra de erros.

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de massa específica aparente

Tipo de Fibra	Temperatura de Compactação (°C)	VV (%)	
		Média	CV (%)
PADRÃO	110	8,08	2,75
COM CERA	110	7,24	6,69
PADRÃO	180	7,65	12,62
COM CERA	180	6,52	1,53

Fonte: PRÓPRIA (2014)

A figura 4.1 demonstra graficamente os valores obtidos no ensaio

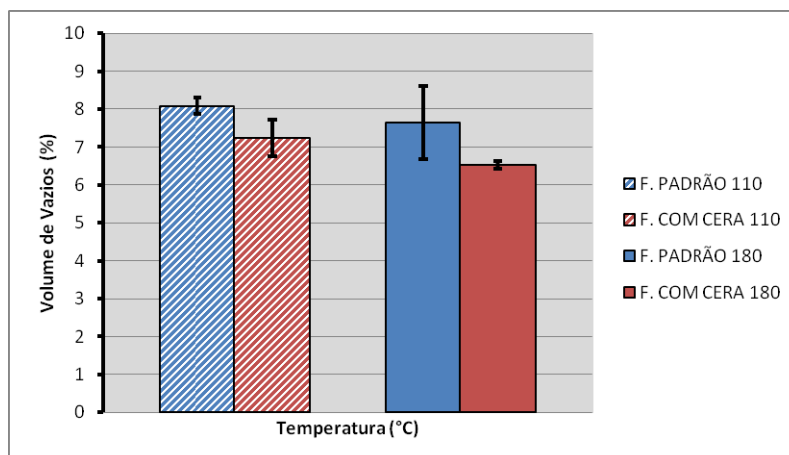


Figura 4.1: Representação gráfica dos resultados de ensaio Massa Específica Aparente
Fonte: PRÓPRIA (2014)

As amostras compactadas em temperatura convencional (180°C) obtiveram menor volume de vazios. Contudo, a dispersão verificada na amostra com cera padrão à 180° (conforme barra de erro) tenha sido elevada.

As amostras com adição da cera C-25 (Fischer-Tropsch Wax) obtiveram maior redução do VV, para ambas temperaturas estudadas.

A tabela 4.2 mostra os resultados obtidos com o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, mostrando os dois tipos de misturas as utilizando fibra Premium (convencional) e as utilizando fibra C-25 (com cera tipo Fischer-Tropsch Wax), visualizando ainda os valores médios em cada tipo de mistura.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de RTCD

Tipo de Fibra	Temperatura de Compactação (°C)	RT	
		Média	CV (%)
PADRÃO	110	0,68	7,04
COM CERA	110	0,75	7,95
PADRÃO	180	0,80	17,02
COM CERA	180	0,88	4,06

Fonte: PRÓPRIA (2014)

A figura 4.2 demonstra graficamente os valores médios da RTCD das amostras

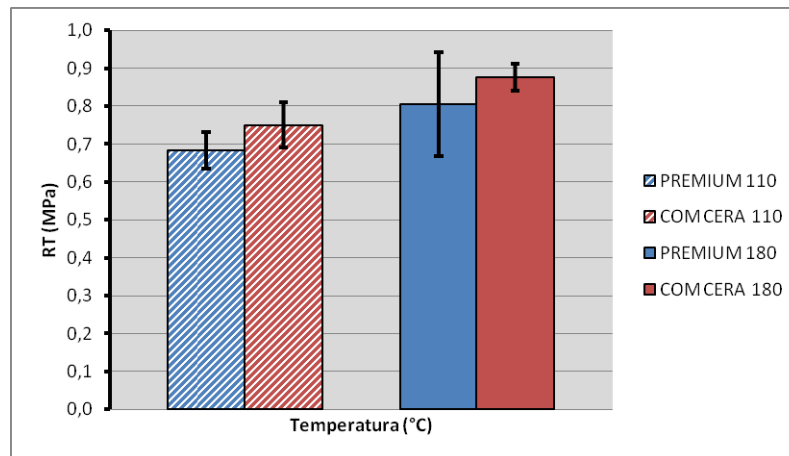


Figura 4.2: Representação gráfica dos resultados de ensaio RTCD
Fonte: PRÓPRIA (2014)

As amostras compactadas em temperatura convencional (180°C) obtiveram maiores valores de resistência à tração (RTCD). A redução do volume de vazios, conforme verificado em curvas convencionais de dosagem (VV x RT) tendem a aumentar o valor da RTCD com a diminuição do volume de vazios. Este fato se deve principalmente devido aos vazios aumentarem a concentração das tensões, diminuindo a resistência da mistura. Como verificado na avaliação do volume de vazios, Figura 4.1, a dispersão verificada na avaliação da RTCD da amostra com cera padrão à 180° (conforme barra de erro) também foi elevada.

5 CONCLUSÃO

Através das determinações volumétricas e ensaio mecânico (RTCD) foi possível verificar uma tendência de aumento na densificação das misturas com o emprego da cera C-25. Consequentemente a esta densificação, houve um decréscimo no volume de vazios, resultando em uma mistura mais rígida, verificada nos ensaios de RTCD.

A temperatura convencional de usinagem produziu os menores volumes de vazios, associados com a baixa viscosidade do ligante quando comparado com a temperatura morna. O aumento dos valores de resistência à tração devem-se a dois fatos: (i) associados com o menor volume de vazios para as misturas compactadas em temperatura convencional e (ii) associados com o aumento da rigidez resultante da oxidação.

Para mensurar os efeitos específicos do envelhecimento nos ligantes asfálticos devem ser realizadas pesquisas com a avaliação do comportamento reológico.

Os estudos são limitados aos agregados, distribuição e composição granulométrica, bem como ao tipo de ligante e fibras empregados no presente estudo. Mais pesquisas se fazem necessárias para avaliar os benefícios da usinagem de misturas mornas a partir da incorporação de ceras.

REFERÊNCIAS

ASTEC INDUSTRIES. **Double Barrel Green WMA Process**. United States of America: Warm Mix Asphalt, [20--]. Disponível em:

<http://www.warmmixasphalt.com/submissions/55_20080101_Norm%20Smith%20-%20Astec%20Double%20Barrel%20Green.pdf>. Acesso em: 10 Ago. 2014.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS - ABEDA, 2008.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira (Coord.). **Estudo laboratorial de comportamento à fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas mornas**. Porto Alegre: CONCEPA e LAPAV – Laboratório de Pavimentação da Escola de Engenharia da UFRGS, 2008.

Disponível em: <www.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=3239>. Acesso em: 15 set. 2013.

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

ESPARTA, Adelino Ricardo Jacinto. Redução de emissões de gases efeito estufa no setor elétrico brasileiro: a experiência do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto e uma visão futura. 2008. 111 p. Tese (Doutorado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação Em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2008/Teses/PIPGE_ARJEsparta_tese.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2013.

MOTTA, Rosângela. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético. 2013. 229 p. Tese (Doutorado) - Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072011-170629/pt-br.php>>. Acesso em: 28 ago. 2013

NEWCOMB, David. **An Introduction to Warm-mix Asphalt**. United States of America: NAPA, [20--]. Disponível em: http://www.warmmixasphalt.com/submissions/4_20071125_introduction_to_warm-mix_asphalt.pdf>. Acesso em: 20 set. 2013.

PALADINO, Patrícia Andrea. **Uso do Hidrogênio no transporte público da cidade de São Paulo**. 2013. 195 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo - São Paulo, 2013.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. **Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt.** port 05-06. Auburn: NCAT, 2005.

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

ANEXO A – TABELA COMPLETA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Compactação			Volumetria										Tratamento Estatístico				
CP	Tipo de Fibra	Tempe. de Compac. (°C)	M. Seca (g)	M.Imersa (g)	M.SSS (g)	Densidade água	Volume (cm³)	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	VV (%)	VV' (%)	Dist. Normal	Média	DP	CV (%)		
A1	F. PADRÃO	110	1170	679,33	1194,32	0,9983	515,87	2,264	2,506	9,65		0,00	8,08	0,22	2,75		
A2	F. PADRÃO	110	1170	679,1	1184,45	0,9983	506,21	2,307	2,506	7,93	7,93	0,24					
A3	F. PADRÃO	110	1170	680,55	1187,63	0,9983	507,94	2,299	2,506	8,24	8,24	0,76					
A4	F. COM CERA	110	1170	684,1	1183,85	0,9983	500,60	2,333	2,506	6,89	6,89	0,24	7,24	0,48	6,69		
A5	F. COM CERA	110	1170	685,4	1198,47	0,9983	513,94	2,273	2,506	9,31		0,00					
A6	F. COM CERA	110	1170	684,27	1187,72	0,9983	504,31	2,316	2,506	7,58	7,58	0,76					
B1	F. PADRÃO	180	1140	650,23	1165,52	0,9983	516,17	2,205	2,506	12,02		0,00	7,65	0,97	12,62		
B2	F. PADRÃO	180	1130	662,4	1145,44	0,9983	483,86	2,331	2,506	6,97	6,97	0,24					
B3	F. PADRÃO	180	1140	651,96	1146,53	0,9983	495,41	2,297	2,506	8,33	8,33	0,76					
B4	F. COM CERA	180	1140	658,88	1153,29	0,9983	495,25	2,298	2,506	8,30		0,00	6,52	0,10	1,53		
B5	F. COM CERA	180	1140	665,23	1150,58	0,9983	486,18	2,341	2,506	6,59	6,59	0,76					
B6	F. COM CERA	180	1140	662,27	1146,89	0,9983	485,45	2,344	2,506	6,45	6,45	0,24					

RESULTADOS DOS ENSAIOS RTCD

Compactação			Altura (mm)					Diâmetro (mm)	RT		Tratamento Estatístico				
CP	Tipo de Fibra	Tempe. de Compac. (°C)	A	B	C	D	MEDIA		Carga (kgf)	RT (MPa)	RT' (MPa)	Dist. Normal	Média	DP	CV (%)
A1	PREMIUM	110	67,10	66,70	67,80	67,60	67,30	101,50	674,48	0,63	0,63	0,13	0,68	0,05	7,04
A2	PREMIUM	110	67,35	66,50	64,30	64,30	65,61	101,50	752,32	0,72	0,72	0,77	0,68	0,05	7,04
A3	PREMIUM	110	64,50	65,60	67,00	67,10	66,05	101,50	739,39	0,70	0,70	0,65	0,68	0,05	7,04
A4	COM CERA	110	66,00	63,80	65,50	67,00	65,58	101,60	769,82	0,74	0,74	0,41	0,75	0,06	7,95
A5	COM CERA	110	67,75	67,55	67,50	67,85	67,66	101,50	752,30	0,70	0,70	0,19	0,75	0,06	7,95
A6	COM CERA	110	65,10	64,35	64,70	65,05	64,80	101,25	839,04	0,81	0,81	0,86	0,75	0,06	7,95
B1	PREMIUM	180	69,60	68,45	68,75	69,00	68,95	101,30	579,39	0,53		0,00	0,80	0,14	17,02
B2	PREMIUM	180	63,55	62,70	60,90	62,30	62,36	101,50	895,08	0,90	0,90	0,76	0,80	0,14	17,02
B3	PREMIUM	180	64,05	65,50	66,20	64,90	65,16	101,60	735,08	0,71	0,71	0,24	0,80	0,14	17,02
B4	COM CERA	180	64,70	65,25	63,20	62,70	63,96	101,50	869,22	0,85	0,85	0,26	0,88	0,04	4,06
B5	COM CERA	180	62,30	60,60	60,70	63,10	61,68	101,35	899,39	0,92	0,92	0,88	0,88	0,04	4,06
B6	COM CERA	180	61,60	63,20	63,20	62,60	62,65	101,55	856,29	0,86	0,86	0,30	0,88	0,04	4,06

ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DAS FIBRAS

Data sheet**Grade
premium**

VIATOP®

VIATOP® premium is a pelletized blend of 90 % by weight ARBOCEL® ZZ 8 - 1 and 10 % by weight bitumen.

Characteristics of the pellets

grey, cylindrical pellets

Content ARBOCEL® ZZ 8 - 1	87 - 93 %
Average pellet length	2 - 8 mm
Average pellet thickness	5 +/- 1 mm
Bulk density	440 - 530 g/l
Sieve analysis: finer than 4.5 mm	max. 10 %

Non-toxic and physiologically safe.

Characteristics of ARBOCEL® ZZ 8 - 1

grey, fine fibrilled and long-fibred cellulose.

Basic raw material	technical raw cellulose
Cellulose content	80 +/- 5 %
pH-value (5 g/100 ml)	7.5 +/- 1
Average fibre length	1100 µm
Average fibre thickness	45 µm

Characteristics of the bitumen used

Road construction bitumen according to DIN 1995.

Needle penetration (according to DIN 52 010) at 25 °C in 1/10 mm	70 - 100
Softening point (ring and ball, according to DIN 52 011) in °C	44 - 49



J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO
Fibers designed by Nature
Holzmühle 1
D-73494 Rosenberg

Telephone: 0 79 67 / 152 - 0
Telefax: 0 79 67 / 152 - 222

0402

Data sheet**Grade
C 25****VIATOP[®] plus**

VIATOP[®] plus C 25 is a pelletized blend of 75 % by weight ARBOCEL[®] ZZ 8-1 and 25 % by weight Fischer-Tropsch wax

Characteristics of the pellets

grey, cylindrical pellets

content ARBOCEL[®] ZZ 8-1
content of Fischer-Tropsch wax
average pellet length
average pellet thickness
bulk density
sieve analysis: finer than 2.0 mm

approx. 75 %
approx. 25 %
3 mm -12 mm
3.5 mm +/- 1 mm
500 g/l - 600 g/l
max. 7 %

Characteristics of the ARBOCEL[®] ZZ 8-1

grey, fine fibrilled and long-fibered cellulose

basic raw material
cellulose content
pH value (5 g/100 ml)
average fiber length
average fiber thickness

technical raw cellulose
80 % +/- 5 %
7.5 +/- 1
1100 µm
45 µm

Characteristics of the Fischer-Tropsch wax

white solid
melting point
viscosity at 120° (DIN 51562)

approx. 100 °C
> 11 mm² / s

1105



J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG
Fibers designed by Nature
Holzmühle 1
D-73494 Rosenberg

Telephone: +49 7967 152-0
Telefax: +49 7967 152-222