

**UNICEP**

**BARBARA ZAVAGLIA KABBACH**

**PAVIMENTAÇÃO COM REVESTIMENTO ASFÁLTICO STONE MATRIX ASPHALT  
(SMA): REVISÃO DA LITERATURA E RELAÇÃO COM ESTUDO DE CASO**

**SÃO CARLOS**

**2021**

**UNICEP  
CENTRO UNIVERSITÁRIO PAULISTA**

**BARBARA ZAVAGLIA KABBACH**

**PAVIMENTAÇÃO COM REVESTIMENTO ASFÁLTICO STONE MATRIX ASPHALT  
(SMA): REVISÃO DA LITERATURA E RELAÇÃO COM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Civil do Centro Universitário Central Paulista, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professora Elaine Ribeiro

**SÃO CARLOS  
2021**

Dedico este trabalho a toda minha família, por tudo que representam para mim, pois em todos os momentos da vida se fizeram presente, sempre com compreensão e carinho.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por minha vida, pela sua força todos os dias para conseguir concluir meu curso. Pelos dias difíceis que se fizeram necessários para o meu fortalecimento e por Deus sempre estar ao meu lado, me guiando e me abençoando.

Aos meus pais, Jafet e Fernanda, que sempre se fizeram presentes em todas minhas decisões. Por terem me dado todo incentivo, muito amor e carinho durante essa etapa da minha vida. Eles não mediram esforços para me apoiar. Eu amo muito vocês;

A minha irmã Erika por sempre me apoiar, pelas longas conversas, por acreditar em mim e me apoiar em todas as decisões da minha vida. Ao meu irmão Jafet que mesmo distante, se fez presente no processo da minha formação. Meus melhores amigos, amo vocês;

Minha família, em geral, que também de alguma forma, entre mensagens, ligações, fizeram parte da minha formação;

Ao meu namorado Rafael, pelo incentivo e apoio constantes e por sempre estar ao meu lado;

A todos os professores do curso de Engenharia Civil, por todo o conhecimento transmitido, por contribuírem tanto para minha formação acadêmica e pessoal;

Aos meus supervisores de estágio que me ensinaram tanto nos campos de estágio, com toda paciência;

A Engenharia Bandeirantes, que me deu todo apoio e suporte para que chegasse a este momento ímpar na minha carreira;

E a todos os demais amigos e colegas de sala que, de uma forma ou outra, tiveram uma parcela de representatividade no decorrer deste curso;

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“A persistência é o caminho do êxito.”*  
(Charles Chaplin)

## RESUMO

O desenvolvimento socioeconômico do Brasil está diretamente ligado à qualidade e viabilidade do transporte rodoviário do país. Atualmente, mais de 60% de todo o transporte de carga e aproximadamente 95% dos passageiros trafegam pelas rodovias do país que, segundo estudos realizados em diversos países do mundo, foram classificadas como uma das piores do mundo. O sistema utiliza predominantemente pavimentos flexíveis na constituição da estrutura, que requer cuidados e estudos para melhorias e durabilidade. Com o aumento do interesse pelo desenvolvimento de materiais mais resistentes para os pavimentos rodoviários, este trabalho teve como objetivo demonstrar a importância do revestimento asfáltico *Stone Matrix Asphalt* (SMA) e identificar os principais problemas encontrados nos pavimentos das rodovias do Brasil. Além de relacionar os achados com um estudo de caso de aplicação desse revestimento. Este estudo foi desenvolvido com a justificativa de mostrar a importância da utilização da tecnologia e um sistema de controle de qualidade que possa abranger todos os processos e projetos, dando viabilidade aos negócios. Assim sendo, este trabalho buscou apresentar falhas nos diversos projetos de pavimento existentes no País com o revestimento SMA, razão esta que tem alto grau de impacto para os usuários, visto o baixo investimento em tecnologia e processos, interferindo diretamente na qualidade do pavimento e suas funções básicas de conforto, ruídos e suporte de cargas. Além de demonstrar a relação com as etapas de aplicação deste revestimento observadas no estudo de caso.

**Palavras-Chave:** Revestimento asfáltico, *Stone Matrix Asphalt* (SMA), Sistema Rodoviário

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Justificativa</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Objetivo</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO DE LEITURA</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Estrutura dos pavimentos</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Concreto asfáltico</b>	<b>12</b>
<b>2.3 SMA</b>	<b>13</b>
<i>2.3.1 Comparação com outras misturas</i>	<b>13</b>
<i>2.3.2 Benefícios</i>	<b>14</b>
<i>2.3.3 Controle</i>	<b>16</b>
<i>2.3.3.1 Componentes</i>	<b>16</b>
<i>2.3.3.2 Dosagem</i>	<b>19</b>
<i>2.3.3.3 Processo produtivo</i>	<b>20</b>
<i>2.3.3.4 Equipamentos e cuidados na produção</i>	<b>20</b>
<i>2.3.3.5 Transporte e aplicação</i>	<b>23</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Equipamento de pavimentação utilizados</b>	<b>27</b>
<i>4.1.1 Fresadora de asfalto</i>	<b>27</b>
<i>4.1.2 Vibroacabadora de Asfalto</i>	<b>28</b>
<i>4.1.3 Rolos Compactadores</i>	<b>29</b>
<b>4.2 Detecção do problema e relação com o estudo de caso</b>	<b>30</b>
<b>5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES</b>	<b>32</b>
<b>6. Limitações do Trabalho</b>	<b>33</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>34</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os pavimentos rodoviários são estruturas de várias camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos (BERNUCCI et al., 2006).

A mistura asfáltica a quente para revestimento de pavimentos é um dos materiais mais tradicionais utilizados na pavimentação, recuperação de vias urbanas e rodovias em todo o mundo. É constituída, principalmente, por ligante asfáltico e partículas minerais, chamadas de agregados. Pode ser definida como uma combinação de agregados minerais aquecidos e secos que são uniformemente misturados e revestidos com um ligante asfáltico quente em usinas específicas (misturas usinadas), fixas ou móveis. O agregado atua como uma estrutura mineral que proporciona resistência e tenacidade para o sistema. O comportamento de tais misturas asfálticas depende das propriedades individuais de cada componente e sua interação uns com os outros na mistura, em função das características viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI et al., 2006).

Os estudos de misturas asfálticas crescem a cada dia no cenário de desenvolvimento atual com o propósito de assegurar uma melhoria na qualidade das rodovias. Ao longo dos anos, várias misturas foram projetadas e muitos métodos foram e ainda são desenvolvidos no esforço de criar uma mistura capaz de proporcionar um desempenho aceitável com base em determinado conjunto predefinido de critérios (BERNUCCI et al., 2006).

Esse trabalho visa fornecer soluções adequadas para pavimentos com um período de vida útil com resistência à deformação permanente, e ao aparecimento de futuras patologias.

### **1.1. Justificativa**

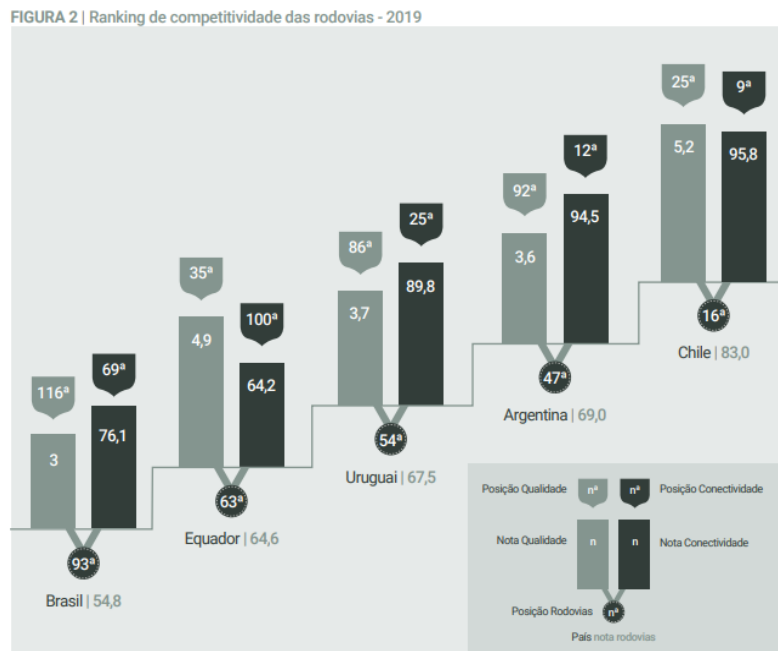
O cenário da malha rodoviária do país foi considerado como um dos piores do mundo, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019).

Segundo levantamentos realizados pela CNT (2019), o Brasil possui uma malha rodoviária de pequena dimensão para a sua extensão territorial. São

213.453km de estradas pavimentadas, o que corresponde a 12,4% da extensão total. Isso quer dizer que a cada 25km de rodovias são pavimentadas para cada 1.000km<sup>2</sup>, enquanto nos Estados Unidos são 438,1km de rodovias por 1.000km<sup>2</sup>. Nas rodovias brasileiras trafegam 61% de todo transporte de carga e 95% dos passageiros, o que demonstra que o sistema rodoviário predomina no país.

Ainda segundo a CNT (2019), além da reduzida extensão da malha rodoviária, como já citado, o Brasil não se encontra em uma posição satisfatória no ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial. Segundo relatório divulgado em de 2019, a qualidade das rodovias brasileiras encontra-se na 116ª posição, atrás de diversos países da América do Sul como Chile (25º), Uruguai (86º), Argentina (92º) e Equador (35º). A avaliação da infraestrutura das rodovias utiliza notas que variam de 1 (extremamente subdesenvolvida – entre as piores do mundo) a 7 (extensa e eficiente – entre as melhores do mundo).

**Figura 1.** Ranking de qualidade das rodovias da América do Sul



Fonte: CNT (2019)

Dentro deste contexto, o desenvolvimento deste estudo tem por objetivo trazer a necessidade premente de melhoria na qualidade das rodovias brasileiras.

A finalidade é mostrar a importância de execução dos projetos estabelecidos,

bem como a responsabilidade sob o controle rigoroso da produção do material asfáltico, desde sua coleta à aplicação do material.

## 1.2 Objetivo

Demonstrar a importância do revestimento asfáltico *Stone Matrix Asphalt* (SMA) e identificar os principais problemas encontrados nos pavimentos que utilizam este tipo de revestimento asfáltico nas rodovias brasileiras, visando mostrar a necessidade da utilização correta da tecnologia, para a viabilização de um projeto. Além de relacionar os achados com um estudo de caso de aplicação desse revestimento.

## 2. REVISÃO DE LEITURA

### 2.1. Estrutura dos pavimentos

Segundo Santana<sup>1</sup> (1993 *apud* MARQUES, 2004, p. 1),

pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto: em um extremo as estruturas rígidas e, no outro, as flexíveis.

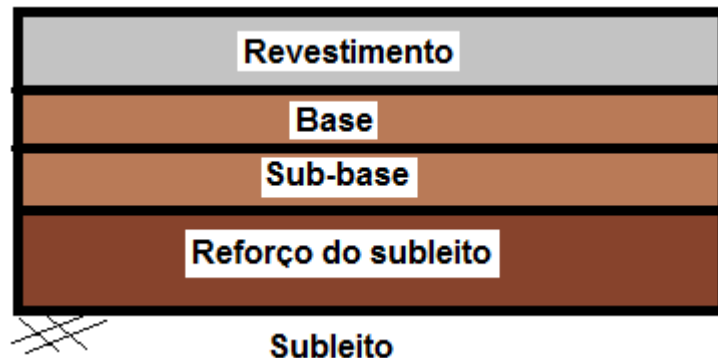
Os pavimentos flexíveis, em geral associados a pavimentos asfálticos, são constituídos essencialmente por quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. Neste tipo de pavimento, as camadas possuem função estrutural, com exceção do revestimento, designado a conter danos causados pelas intempéries e suportar diretamente as cargas solicitantes oriundas do tráfego de veículos automotores, gerando conforto e segurança aos usuários que nela trafegam.

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. A Figura 2 mostra um exemplo esquemático da composição da estrutura do pavimento.

---

<sup>1</sup>SANTANA, H. Manual de pré-misturados a frio. Rio de Janeiro: IBP/Comissão de Asfalto, 1993

**Figura 2.** Esquema camadas de pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al.(2006)

Para materiais de base, sub-base e reforço de subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. Segundo Santana (1993 apud MARQUES, 2004, pág.48),

as características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura.

Por isso, na dosagem, existem três aspectos de misturas asfálticas de maior relevância que não podem deixar de ser considerados: a escolha do tipo de agregado, análise granulométrica do material e a definição do teor de projeto ou teor ótimo de ligante de um dado pavimento.

Os agregados são os responsáveis por absorver a maior parte dos impactos gerados pelos veículos automotivos. Ao ligante asfáltico cabe a tarefa de unir as partículas e providenciar para que as mesmas trabalhem de maneira estática.

Assim, notamos a importância dos agregados e o estudo prévio de seu comportamento, juntamente com critérios de avaliação. No processo de produção da mistura, as verificações da porção volumétrica de projeto, bem como ensaios mecânicos, são estipuladas por especificações (tais como as do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, DNIT), a fim de satisfazer requisitos padronizados.

## 2.2. Concreto asfáltico

O concreto asfáltico, amplamente utilizado como revestimento, é uma mistura executada a quente, em usina apropriada e com características específicas. Composta por agregado mineral devidamente graduado, material de enchimento (filler) e cimento asfáltico, a mistura deve ser espalhada e compactada a quente para que atinja o grau de compactação ideal de modo a resistir tanto às deformações permanentes quanto às deformações elásticas geradas pelo tráfego de veículos (ARTERIS, 2020).

Por questões econômicas, o revestimento pode ser subdividido em duas camadas, sendo a superficial chamada de “capa” e a inferior de “binder” ou camada de ligação. Dessa forma, diminui-se o ligante asfáltico, tornando a massa asfáltica mais econômica (ARTERIS, 2020).

As misturas executadas a quente podem ser caracterizadas com relação à granulometria, sendo três as mais usuais:

- Graduação densa – agregados minerais graduais levando a um baixo volume de vazios. Exemplo: concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).
- Graduação aberta – agregados com dimensões iguais gerando muitos vazios. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA).
- Graduação descontínua – agregados com graduação descontínua onde predominam os agregados graúdos que formam um esqueleto pétreo preenchido por agregados de menores dimensões e finos. Exemplo: Stone Matrix Asphalt (SMA).

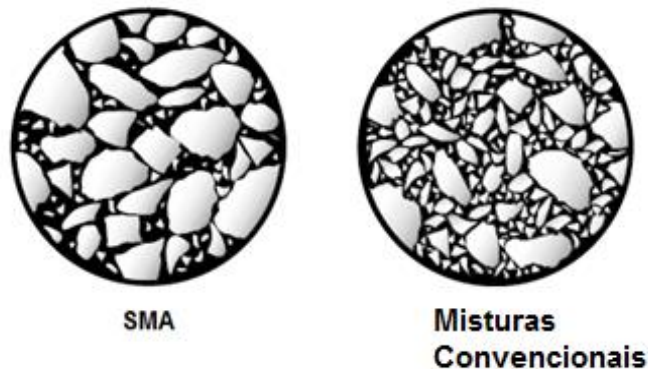
No Brasil, a primeira aplicação do SMA foi a pista do autódromo de Interlagos, em São Paulo, em fevereiro de 2000. Em agosto de 2001, foi construído um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, rodovia que interliga São Paulo a Santos, mostrando grande sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas (REIS et al., 2002).

## 2.3. SMA

### 2.3.1. Comparação com outras misturas

O SMA é um revestimento asfáltico de granulometria descontínua, usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão-grão. Isso se dá devido ao alto conteúdo de agregados graúdos presentes na mistura, principal diferença entre o SMA e o CBUQ. A estrutura formada pelo contato dos agregados graúdos forma um “esqueleto pétreo” que proporciona resistência e durabilidade à mistura, exemplificada na Figura 3.

**Figura 3.** Diferença entre SMA e misturas convencionais



Fonte: NAPA (2002)

A segunda importante diferença pode ser notada na Tabela 1: a quantidade de ligante utilizada nas misturas. No CBUQ, a quantidade ótima de ligante está em torno de 5%. Abaixo disso, a mistura fica instável. Acima, existe um ponto no qual a estabilidade é perdida de forma abrupta, pois o ligante preenche todos os vazios dos agregados e seu excesso faz com que ocorra exsudação. No SMA, a quantidade de ligante utilizado para preencher os vazios é maior (em torno de 6%) devido à graduação dos agregados. A porcentagem maior de ligante na mistura do SMA garante melhor estabilidade e durabilidade do revestimento asfáltico.

A terceira diferença notável, também exemplificada na Tabela 1, é a presença das fibras como agente estabilizador na mistura do SMA. Essas são utilizadas para absorver o ligante, uma vez que devido ao alto teor desse componente pode ocorrer escorrimento do ligante da mistura. Atualmente, existem diversos

estudos que buscam utilizar diferentes tipos de fibras orgânicas para estabilizar a mistura do SMA, porém, as fibras mais utilizadas ainda são as fibras de celulose.

**Tabela 1.** Comparação misturas contínuas e descontínuas a quente

<b>TIPOS DE MISTURA</b> (%)	<b>CBUQ</b>	<b>CPA</b>	<b>SMA</b>
<b>Agregado Graúdo</b>	40-60	70-80	75-80
<b>Agregado Miúdo</b>	40-60	10-20	20-25
<b>Filler</b>	05-10	2-5	9-13
<b>Ligante</b>	5	4,5	6,1-6,7
<b>Fibras</b>	-	-	0,3-0,5
<b>TIPO DE LIGANTE</b>	<b>CAP 20</b>	<b>AMP</b>	<b>AMP</b>
<b>Vazios</b>	03-05	18-25	3-5
<b>Macro textura</b>	0,3 - 0,5	> 1,0	0,8-1,5

Fonte: Bernucci et al.(2006)

### 2.3.2 Benefícios

O SMA (Matriz Pétreas Asfáltica/*Stone Mastic Asphalt*) é uma mistura asfáltica constituída por agregado britado graúdo de alta qualidade, elevado teor de betume e fibras de celulose. Trata-se de um tipo de pavimento que oferece grandes vantagens técnicas, econômicas e funcionais se comparada com pavimentos convencionais. É direcionado para locais onde é necessário diminuir a terraplanagem, ter maior estabilidade e longa durabilidade.

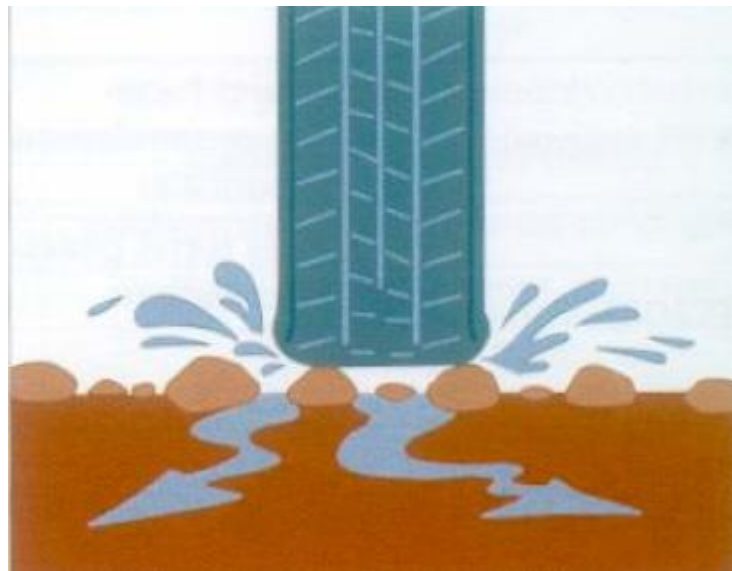
Como possui uma durabilidade de aproximadamente 50% a mais que os pavimentos comuns, o SMA tem ótimo desempenho quando aplicado em autoestradas, autódromos e aeroportos, estacionamentos e áreas com grande tráfego em geral, pois o aumento da segurança e conforto para os usuários é garantido por longo período.

A composição do SMA garante ao pavimento alto suporte, baixo índice de vazios e maior durabilidade, sendo maior a resistência à deformação permanente, proporcionando baixo teor de ruído, melhor resistência à derrapagem e considerável ganho de velocidade na faixa de segurança, garantindo, portanto, maior conforto ao usuário.

Dentre os diversos benefícios gerados pela aplicação da mistura asfáltica SMA em contraste com o CBUQ (revestimento mais utilizado no Brasil), se destacam o aumento da segurança e conforto ao dirigir. A disposição dos agregados na superfície da camada de revestimento gera uma superfície rugosa, gerando canais que drenam a superfície da pista de rolamento, diminuindo o “spray” de água e a aquaplanagem ocasionados pelo contato dos pneus com a superfície molhada do

pavimento. Essa disposição dos agregados gera ainda o aumento do coeficiente de atrito em função de ser uma camada rugosa, além da redução do ruído provocado pelo contato do pneu com a camada de rolamento. Devido ao contato ser realizado somente superficialmente entre o agregado (matriz pétreia) e o pneu, a superfície de contato é menor (Figura 4) e, conseqüentemente, o som gerado por esse contato é reduzido em até 7 decibéis, segundo estudos realizados pela Asphalt Pavement Alliance (2001).

**Figura 4.** Contato do pneu com o revestimento SMA



Fonte: Bernucci et al.(2006)

Além dos benefícios gerados diretamente aos usuários, existem outros fatores nos quais o SMA se sobressai positivamente (Figura 5). Por ser uma mistura de alta resistência, o SMA pode ser executado em camadas delgadas de até 2,0cm quando executada como reforço de camada de rolamento (reforço estrutural), aumentando a vida útil do revestimento e tornando a manutenção um processo extremamente rápido.

**Figura 5.** Revestimento SMA



Fonte: Bernucci et.al.(2006)

### 2.3.3. Controle

É importante ressaltar que para que o SMA seja efetivo, ou seja, para que estejam asseguradas as suas características, deve existir um padrão minucioso de controle de qualidade dos componentes da mistura, do método de dosagem e dos processos de produção, transporte e implantação do revestimento.

#### 2.3.3.1 Componentes

##### a) Ligante asfáltico

O ligante utilizado é o cimento asfáltico de petróleo (CAP). Segundo a Petrobrás (BERNUCCI et al., 2006), o CAP é um material termossensível utilizado principalmente para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois, além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis.

O ligante asfáltico pode trazer na sua composição a presença de polímeros que aumentam a resistência à deformação permanente, a vida útil e reduzem os riscos de aplicação e danos a camadas de espessura reduzida. O polímero mais utilizado para este fim é o Stireno-Butadieno-Stireno (SBS) que agrega características de polímero elastomérico a diversos tipos de asfaltos modificados por polímeros (AMP), inclusive o SMA.

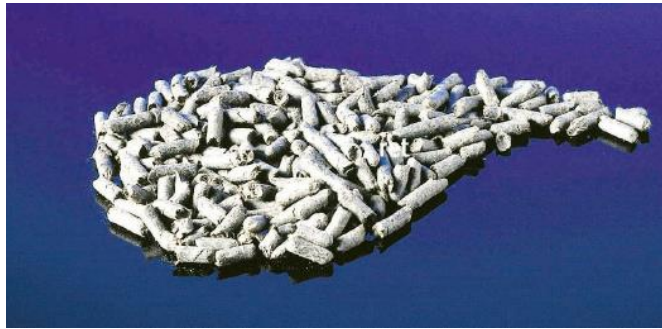
##### b) Fibra de celulose

O processo de dosagem das fibras de celulose pode ser feito através do ensaio de escorrimento. Neste processo, é possível determinar se a porcentagem de

fibras utilizada na mistura de SMA a ser testada está correta. O método consiste em inserir uma amostra de SMA, a ser testada, usinada de no mínimo 1.200 gramas, em uma estufa na temperatura de compactação (entre 140°C e 180°C) por 1 hora ( $\pm 1$  minuto) e pesar a quantidade de ligante que escorreu da amostra, que não deve exceder 0,3% da massa da amostra.

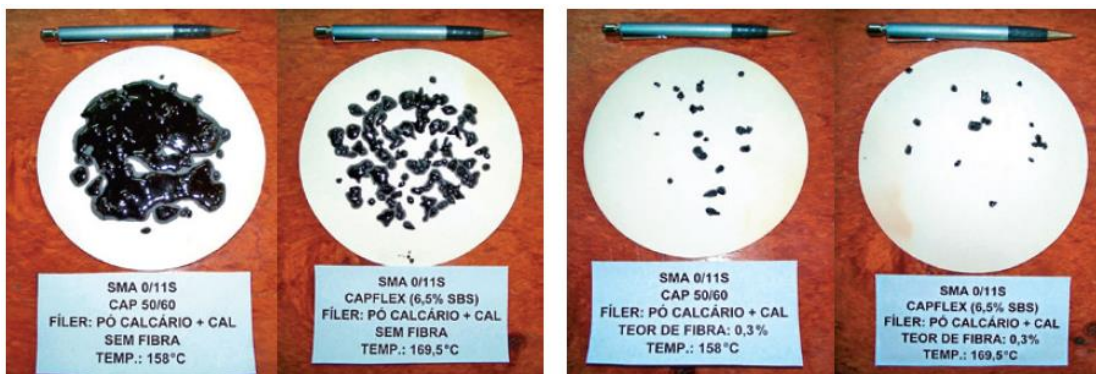
A Figura 6 mostra as fibras de celulose. Já a Figura 7 mostra o resultado do ensaio de escorrimento realizado com diferentes tipos de mistura do SMA, indicados na própria figura.

**Figura 6.** Fibras de celulose



Fonte: Bernucci et al.(2006)

**Figura 7.** Resultado ensaio escorrimento



(d) Resultado de ensaio sem fibras com dois tipos de ligantes diferentes

(e) Resultado de ensaio com fibras com dois tipos de ligantes diferentes

Fonte: Bernucci et al.(2006)

### c) Agregados

Por definição da NBR 7225/1993 (ABNT, 1993), agregado é um material natural de propriedades adequadas ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal inferior 100mm e de dimensão nominal igual ou superior a

0,075mm.

Ainda segundo a ABNT (1993), segue Tabela 2 com dados das dimensões dos agregados:

**Tabela 2.** Tipos de agregado

Agregado	Materiais	Dimensões	
		Mínimo	Máximo
Graúdo	Pedra britada ou brita ou pedregulho muito grosso, grosso e médio	4,8mm	100mm
Miúdo	Pedregulho fino, pedrisco grosso, médio e fino, areia grossa, média e fina	0,075mm	4,8mm
Filler	Pó-de-pedra ou outros materiais minerais inertes	-	0,075mm

Fonte: ABNT (1993)

Segundo norma específica para o SMA utilizada para as obras concessionadas pela ARTERIS (2020), todo tipo de agregado utilizado na mistura deve ser resultado de britagem e seguir as especificações a seguir.

#### *c.1 Agregado Graúdo*

O agregado graúdo deve apresentar as seguintes propriedades:

- Suas partículas individuais, retidas na peneira de 2,00mm deverão ser constituídas de fragmentos duros, são, duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas.
- Apresentar porcentagem de Desgaste, no Ensaio de Abrasão Los Angeles, igual ou inferior a 30%.
- Apresentar no ensaio de Durabilidade, no Sulfato de Sódio (5 ciclos), perda inferior a 12%.
- Apresentar, no mínimo, 95% dos agregados com 2 faces fraturadas e 100% com uma face.
- Índice de forma inferior a 3.
- Apresentar, no máximo, 20% de partículas lamelares (Relação de tamanhos 1:3).

- Apresentar absorção de água menor que 1,5%.

### c.2 - Agregado Fino

Ainda segundo a ARTERIS (2020), o Agregado Fino deve apresentar as seguintes propriedades:

- Apresentar, no mínimo, 45% de vazios no ensaio de porcentagem de vazios de agregados finos não compactados AASHTO T-304 (Método "A").
- Apresentar no ensaio de Durabilidade, no Sulfato de Sódio (5 ciclos), perda inferior a 12%.
- A matriz da rocha deve ter as mesmas características do agregado graúdo ou atender aos mesmos parâmetros, caso a origem seja diferente.
- A mistura seca deve apresentar Equivalente de Areia igual ou superior a 60%.
- Todo agregado fino deve estar livre de matéria vegetal e torrões de argila.

### 2.3.3.2 Dosagem

No Brasil, o método utilizado para a dosagem que determina a estabilidade e fluidez das misturas betuminosas é o método Marshall. O método que faz referência ao engenheiro Bruce Marshall, que o criou na década de 1940, durante a segunda guerra mundial, para determinar a proporção de agregado e quantidade ótima de ligante que devem compor a mistura. O processo consiste na elaboração de um corpo-de-prova (CP) cilíndrico (Figura 8), com dimensões e peso conhecidos, que deve ser mergulhado na água por 30min ( $\pm 5$ min) a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ).

**Figura 8.** Corpo de prova cilíndrico



Fonte: Testecon Engenharia Ltda (2017)<sup>2</sup>

O tempo entre a retirada do CP da água e o início do teste não deve exceder 30 segundos. A carga deve ser aplicada verticalmente a uma velocidade de 50 milímetros por minuto. Desta forma, podem ser determinados o índice de vazios da mistura e a fluidez através da deformação do CP.

### *2.3.3.3 Processo produtivo*

A mistura SMA, a exemplo de outras misturas asfálticas usinadas a quente, é produzida em usinas asfálticas, podendo ser móveis ou fixas, gravimétricas ou volumétricas (mais utilizadas no Brasil). As usinas têm o objetivo de proporcionar à mistura os seus componentes na dosagem correta, dentro da faixa de temperatura permitida e na ordem correta.

A mistura SMA, a exemplo de qualquer receita, deve seguir à risca as especificações de produção. As usinas funcionam como linhas de produção nas quais as matérias-primas são inseridas para que se possa obter a massa asfáltica.

Basicamente, as operações envolvidas na produção do SMA são:

- Estocagem e manuseio dos materiais componentes das misturas asfálticas na área da usina;
- Dosagem e alimentação do agregado frio no secador;
- Secagem e aquecimento eficiente do agregado à temperatura apropriada;
- Controle e coleta de pó no secador;
- Dosagem, alimentação e mistura do ligante asfáltico com o agregado aquecido; e
- Estocagem, distribuição, pesagem e manuseio das misturas asfálticas produzidas.

### *2.3.3.4 Equipamentos e cuidados na produção*

Durante o processo produtivo, além do cuidado com a qualidade do

---

<sup>2</sup>Disponível em <http://www.testecon.com.br/>. Acesso em 21/08/2021.

agregado graúdo e das fibras de celulose, é necessário que sejam seguidas diversas especificações na estocagem, produção, transporte e aplicação de forma que a mistura não perca suas características.

a) Depósito para ligante betuminoso

Os depósitos para o ligante betuminoso devem possuir dispositivos capazes de aquecer o ligante de forma a mantê-lo fluido, porém, sob temperatura controlada (entre 140°C e 180°C) para que não sejam perdidas as características aglutinantes do ligante. O aquecimento dos tanques deve ser feito com óleo térmico ou elétrico.

b) Usina de asfalto

A usina de asfalto deve ser capaz de preparar uma massa uniforme, sem segregação e na temperatura determinada pelas especificações. Deve estar equipada com os seguintes equipamentos:

*b.1 Silos de entrada de materiais (frio)*

O silo frio é essencial no processo de mistura do SMA, pois é nele que são proporcionadas e dosadas as diferentes frações granulométricas dos agregados que seguirão para o secador.

*b.2 Silo da fibra de celulose*

A Fibra de celulose deve ser adicionada no misturador (unidade posterior ao secador), pois em contato com o calor do secador, as fibras podem queimar e virar pó, perdendo sua função. No misturador, os agregados mais fibra devem ser misturados a seco antes da adição do ligante, para proporcionar a homogeneidade da mistura seca. Este sistema deve garantir um fluxo constante e uniforme à mistura seca.

*b.3 Secador*

O secador da usina deve estar equipado com dispositivos para aquecer a mistura seca de agregados até a temperatura recomendada. Deve possuir um dispositivo de medição de temperatura (pirômetro), um queimador de óleo ou gás em uma extremidade e um ventilador na outra.

*b.4 Sistema de recuperação de finos*

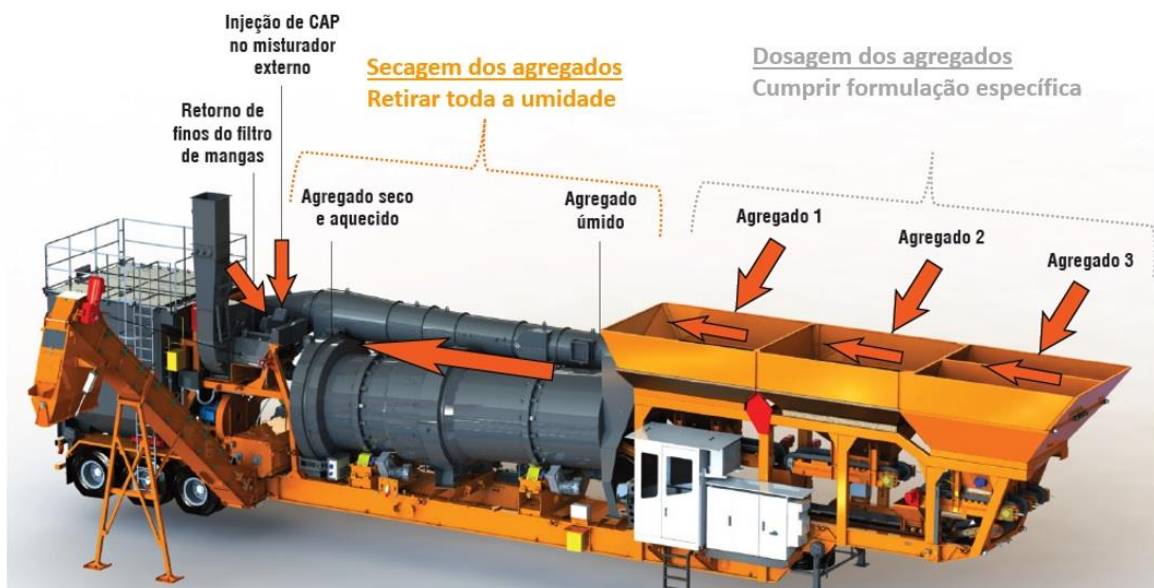
Dispositivos para a recuperação de finos devem ser instalados nas

extremidades do secador para que as mesmas agreguem suas devidas características à mistura.

### *b.5 Misturador*

A unidade responsável pela realização da mistura segue um padrão de misturador tipo Pugmill. Nela, inicialmente, entram os agregados que saíram do secador e as fibras de celulose para uma mistura a seco. É importante que a mistura a seco fique homogênea antes da injeção do ligante asfáltico, como pode ser visto na Figura 9, que traz o esquema de funcionamento de uma usina, e também na Figura 10, que traz a mistura já seca no misturador, pronta para ser aplicada. Caso contrário, pode ocorrer a formação de grumos na massa asfáltica. O ligante, por sua vez, deve ter suas temperatura e injeção rigorosamente controladas, uma vez que o teor de ligante no SMA é maior do que em misturas convencionais.

**Figura 9.** Esquema de funcionamento Usina de Asfalto



Fonte: Gewehr (2016)

**Figura 10.** Mistura SMA seca no misturador



Fonte: Autora (2021)

#### *2.3.3.5 Transporte e aplicação*

O carregamento dos caminhões com a massa asfáltica é um processo cuidadoso, realizado também pela Engenharia e Comércio Bandeirantes em 3 etapas, de forma que o caminhão se movimenta para acomodar o produto a fim de não haver segregação.

O número de caminhões para o transporte da massa asfáltica deve ser calculado para que a aplicação seja contínua, mas também deve se tomar cuidado para que a temperatura da massa não seja inferior a 140°C. Caso contrário, a compactação pode ser impossibilitada por não atender seu grau exigido. Portanto, para distâncias acima de 50km, é comum o uso de caçambas e lonas térmicas no transporte.

A aplicação e pré-compactação são feitas por meio de vibroacabadora de pavimento. A massa de SMA é descarregada no silo do equipamento, que tem a capacidade de operar a uma velocidade de 20m/min e de empurrar o caminhão enquanto o mesmo carrega o silo, conforme apresentado na Figura 11:

**Figura 11.** Vibroacabadora de pavimento



Fonte: Gewehr (2016)

A compactação deve ser realizada por rolo liso vibratório de forma cuidadosa para evitar o cisalhamento do agregado graúdo, conforme mostrado na Figura 12:

**Figura 12.** Compactação do revestimento



Fonte: Engenharia Bandeirantes (2021)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, o método de pesquisa utilizado foi um estudo bibliográfico, exploratório, qualitativo, constituído de pesquisas bibliográficas, referente a controles tecnológicos, recursos e viabilidades de projetos utilizados em pavimentos flexíveis no Brasil. Além disso, foi realizado uma pesquisa de campo através do acompanhamento de uma obra constituída de etapas de uma pavimentação com o revestimento específico, SMA, desde a sua produção, aplicação e finalização do revestimento. Com isso, os levantamentos bibliográficos foram relacionados à pesquisa de campo, realizando uma análise destes parâmetros e a apresentação do tema estudado.

Esta pesquisa, segundo Gil (2008), é aquela que se familiariza com um assunto que ainda não é muito conhecido, ou seja, pouco explorado e que, no final da mesma, o pesquisador obterá mais conhecimentos sobre tal assunto, estando pronto para construir hipóteses. Da mesma forma que outros tipos de exploração, esta pesquisa depende da intuição do pesquisador e, por se tratar de tipo muito específico de pesquisa, na maioria das vezes assume a forma de um estudo de caso.

Neste trabalho, primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica a respeito dos tipos de pavimentos, os ensaios previstos a formação dos agregados e suas misturas. Este levantamento bibliográfico foi realizado em pesquisas de livros da área, artigos científicos e plataformas específicas. Em seguida, realizou-se um estudo de caso, em uma construtora da cidade de São Carlos, cujo dados foram coletados em campo, através de fotos, com o objetivo de conhecer a importância do projeto, sua viabilidade, e a tecnologia utilizada para o estudo do material (SMA) a ser aplicado, bem como a forma como o serviço é executado. Estes dados foram coletados no período de maio de 2021 à junho de 2021.

Para Gil (2008), o estudo de caso consiste em uma estratégia metodológica de utilização bem ampla e que busca respostas para questões como, “como e por que” determinadas situações ocorrem, especialmente quando as possibilidades de interferência ou de controle sobre os eventos estudados são mínimas.

Os resultados obtidos foram comparados à teoria estudada.

#### **4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS**

Os resultados obtidos do estudo de caso do acompanhamento da obra de pavimentação foram apresentados pelas etapas de realização e sua maquinaria utilizada.

A obra de pavimentação acompanhada é localizada no trecho da Rodovia Engº Thales de Lorena Peixoto Junior SP-318(KM 243), no município de São Carlos. Foi realizada durante o período de 2 meses, de maio de 2021 até junho de 2021.

## 4.1 Equipamentos de pavimentação utilizados no estudo de caso

### 4.1.1 Fresadora de asfalto

Com alta precisão, o equipamento utilizado para remoção de pavimentos asfálticos é chamado fresadora de asfalto. Através de corte e desbaste de uma ou mais camadas, o material foi extraído de tamanho uniforme, e sua espessura de trabalho foi pré-determinada. Foi instalado um sistema de nivelamento para correção de greide e, assim, realizou-se a intervenção, para que as novas camadas fossem realizadas. As Figuras 13 e 14 trazem exemplos da máquina de fresa e do cilindro de corte utilizados na obra acompanhada.

**Figura 13.** Fresadora de pavimento



Fonte: Gewehr (2016)

**Figura 14.** Cilindro Fresador



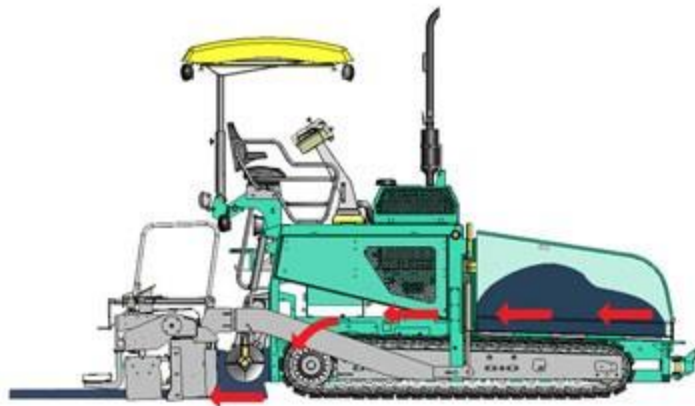
Fonte: Gewehr (2016)

#### 4.1.2 Vibroacabadora de Asfalto

A vibroacabadora é o equipamento que executou a aplicação, nivelamento e pré-compactação do concreto asfáltico na obra de pavimentação, podendo ser de esteiras ou pneus, com tração suficiente para empurrar caminhões e operar em aclives. É de fundamental importância o seu correto uso e um eficiente desempenho para a qualidade final do pavimento.

O processo iniciou quando, produzido em usina, o concreto asfáltico foi transportado por caminhões até a obra, onde foi descarregado no silo de recebimento da vibroacabadora. Após o recebimento do material asfáltico, este, através de esteiras rodantes, foi levado até um transportador helicoidal transversal, conhecido como caracol, que fez o espalhamento do material uniformemente em toda a largura de pavimentação, determinada pelos sistemas da mesa compactadora, que é operada por um colaborador, responsável por inserir informações de nivelamento (Figura 15).

**Figura 15.** Vibroacabadora de pavimento



Fonte: Ciber (2017)

O princípio de funcionamento é um sensor, que através de um referencial externo transmite as informações para que a mesa execute a pavimentação de acordo com os parâmetros inseridos. Os sistemas de nivelamento podem ser divididos em mecânicos, ultrassônicos ou a laser. Os mecânicos podem ainda ser subdivididos em sistema de apalpador mecânico (que faz a leitura de um referencial instalado pela equipe de topografia) ou esquis (que deslizam sobre a superfície já existente). São mecanismos de fácil instalação e simples operação.

### 4.1.3 Rolos Compactadores

#### a) Rolos duplo liso vibratórios

Chamados também de rolo tandem ou “chapa-chapa” (Figura 16), podem ser utilizados em todos os tipos de misturas asfálticas. Forças dinâmicas geradas pela vibração somadas ao seu peso próprio aumentam a capacidade de compactação. Dependendo da condição da mistura, ou se a camada tem baixíssima espessura, devem ser passados em modo estático.

As forças geradas pela vibração otimizam a compactação, pois as ondas de choque geram vibrações que ajudam a reduzir os atritos internos entre as partículas, de modo a facilitar o rearranjo e encaixe dos materiais. Com a drástica redução dos atritos entre as partículas que “emperram” o preenchimento dos vazios internos, a compactação é otimizada.

**Figura 16.** Rolo Tandem



Fonte: Gewehr (2016)

As forças geradas pela vibração otimizam a compactação, pois as ondas de choque geram vibrações que ajudam a reduzir os atritos internos entre as partículas, de modo a facilitar o rearranjo e encaixe dos materiais. Com a drástica redução dos atritos entre as partículas que “emperram” o preenchimento dos vazios internos, a compactação é otimizada.

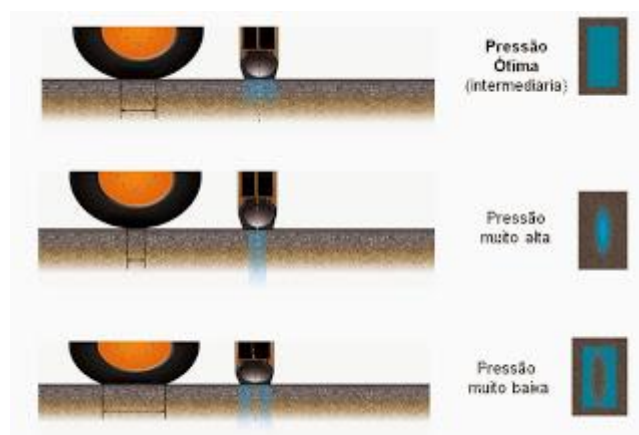
#### b) Rolos de Pneu

A compactação é obtida pela ação do próprio peso. A função dos pneus de

borracha é selar, desempenar e dar o acabamento final a superfícies de misturas asfálticas contínuas. Seu uso não é obrigatório para outros tipos de misturas, tais como as descontínuas ou as que necessitam de maior rugosidade superficial.

A compactação é alcançada pela ação do peso do equipamento juntamente com a pressão dos pneus. Primeiramente, o ideal é que o rolo seja de número par de pneus. Isto para que ocorra a distribuição igual de peso em cada eixo, com os pneus na pressão intermediária para que haja 100% de contato com o asfalto (Figura 17).

**Figura 17. Compactação Rolo Pneu**



Fonte: Gewehr (2016)

#### **4.2. Detecção do problema e relação com o estudo de caso**

A obtenção do melhor desempenho de um revestimento asfáltico passa, obrigatoriamente, pela realização de dois projetos: um que defina a estrutura do pavimento (base, sub-base etc.) e outro para especificar a composição e dosagem da mistura asfáltica compatível com as outras camadas escolhidas.

Na etapa de execução foi observado dois momentos que merecem atenção especial: o espalhamento, que deve ser feito com equipamentos apropriados e com mão de obra qualificada; e a compactação, que precisa ser bem controlada e executada com equipamentos apropriados, de forma a garantir maior longevidade ao pavimento. Quando a obra é de grande porte ou a distância até a usina torna o transporte oneroso, recomenda-se a montagem de usinas móveis no próprio canteiro. Isso para não perder a temperatura de aplicação da massa asfáltica.

De acordo com a revisão da literatura, os pavimentos realizados com SMA

geralmente apresentam algumas patologias, as quais inicialmente são detectadas com manchas isoladas no pavimento, o que significa que em alguns pontos o ligante asfáltico exsuda da mistura, e em pouco tempo se espalha por toda a faixa de rolamento, caracterizando o espelhamento do pavimento. (BANDEIRANTES, 2021)

Segundo técnicos da Engenharia Bandeirantes (2021), o problema pode ser ocasionado por:

- Taxa excessiva de betume na execução da imprimadura ou do revestimento.
- Imprimadura aplicada sobre a base úmida, isto é, que não secou suficientemente.
- Solicitações de carga não previstas em projeto.
- Mistura asfáltica fora dos limites de controle (granulometria e teor de ligante).
- Excesso de compactação ocasionado por temperatura elevada da massa.
- Falta de controle da taxa de imprimação.
- Falta de tempo de mistura a seco no misturador tipo Pugmill

Com relação ao exposto, a Profa. Dra. Liedi Bariani Bernucci, no 11º encontro técnico do DER/PR, além de ressaltar a importância do índice de forma do agregado na composição estrutural do SMA, salientou também a importância do tipo e do teor ligante na mistura asfáltica. Segundo ela, a falta de ligante pode ser bom, pois torna o pavimento mais resistente quanto à deformação permanente, porém, causa desagregação e fadiga. Já o excesso de ligante torna o pavimento resistente à fadiga, porém, causa trilhos de roda e exsudação (BERNUCCI et al., 2006).

## 5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A produção da massa asfáltica do SMA exige um controle rigoroso em todos os processos, desde a extração do agregado, passando pela produção, transporte e aplicação do produto. Assim, podem ser salientadas algumas dificuldades enfrentadas para a utilização em larga escala do SMA no Brasil:

a) O SMA exige um índice de forma do agregado que seja o mais cúbico possível, o que foge dos padrões nacionais, gerando uma dificuldade na obtenção deste material em algumas regiões.

b) Dificuldade na obtenção de uma mistura totalmente homogênea em função das condições das usinas de asfalto predominantes no país. Para a produção do SMA em usinas volumétricas, o controle deve ser redobrado, pois existe um grande número de exigências, adequações e cuidados durante a produção, como por exemplo: o SMA exige um tempo de mistura acima do padrão das misturas asfálticas convencionais, gerando determinadas adaptações até em usinas gravimétricas.

c) Obtenção da fibra celulósica. As mais adequadas precisam ser importadas da Alemanha ou EUA.

d) Controle granulométrico totalmente restrito, ou seja, a faixa de trabalho torna-se totalmente vulnerável, principalmente nas menores peneiras (consideradas peneiras de corte, como a #10).

e) Controle de temperatura na usinagem e na aplicação, o que torna a mistura suscetível a condições climáticas, pois a queda da temperatura de usinagem no momento da aplicação impossibilita a obtenção do grau necessário de compactação com os equipamentos utilizados no Brasil.

f) A utilização do asfalto modificado com polímero com o retorno elástico adequado e a utilização da base polimérica necessária para o CAP utilizado no SMA restringem algumas distribuidoras de asfalto e torna a concorrência menor para negociação e aquisição do material.

g) O custo: Em função de todas as variáveis apresentadas como particularidades do SMA, além dos custos dos materiais especiais (fibra, agregado especial e

asfalto com polímero), as exigências fazem com que as produtividades, tanto na usinagem quanto na aplicação na pista, sejam muito inferiores às misturas convencionais, o que gera um custo até 100% superior em comparação às demais misturas.

Com o propósito de ampliar o conhecimento sobre SMA, suas características, dificuldades e processos de aplicação, este trabalho mostrou a necessidade clara que o Brasil tem em estudar, regularizar e fiscalizar os projetos desses tipos de pavimento, visto que sua trabalhabilidade é de uma dificuldade extrema.

Na forma de medição de todos esses problemas, foram utilizados instrumentos teóricos já existentes. Assim sendo, este trabalho buscou apresentar falhas nos diversos projetos de pavimento existentes no País com o revestimento SMA, razão esta que tem alto grau de impacto para os usuários, visto o baixo investimento em tecnologia e processos, interferindo diretamente na qualidade do pavimento e suas funções básicas de conforto, ruídos e suporte de cargas. Além de demonstrar a relação das etapas de aplicação deste revestimento observadas no estudo de caso com as encontradas na literatura.

## **6. Limitações do Trabalho**

Como principal limitação do trabalho, podemos ressaltar que a intenção inicial para a realização deste, era realizar um acompanhamento a longo prazo na obra em que foi realizado o estudo de caso. Dessa forma, poderíamos acompanhar todo o processo e ver se futuramente iriam surgir patologias, e conseguir relacionar com a revisão da literatura, além de apontar as possíveis causas daquela patologia (caso ocorresse). Porém não foi possível o acompanhamento longitudinal desse projeto apresentado no estudo de caso. Portanto, não conseguimos apresentar os possíveis problemas que podem surgir no futuro em relação ao revestimento aplicado naquela obra especificamente. Podemos apenas afirmar sobre as relações encontradas entre a literatura e o estudo de caso com as etapas de aplicação deste revestimento.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7225 – *Materiais de pedra e agregados naturais*. NBR 7225/1993
- ARTERIS, Centro de Desenvolvimento Tecnológico – *Especificação Particular para a execução de Concreto Asfáltico Usinado a Quente – SMA*. Arteris ES-031.Rev00 – São Paulo, 05/2020.
- BALBO, J. T. *Pavimentos Asfálticos: Patologias e Manutenção*. 1 ed. São Paulo, Plêiade, 1997.
- BANDEIRANTES, Engenharia e Comercio – Intervenção especial na rodovia Engº Thales de Lorena Peixoto Junior SP- 318(km 243)- 2021
- BARIANI, L., et al. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATTI, J. A. P; SOARES, J.B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, Petrobras-Asfaltos, Rio de Janeiro, 2006.
- CIBER - Wirtgen Group. Disponível em:  
<https://www.ciber.com.br/pt/produtos/vibroacabadoras/>. Acesso em 21/09/2017
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. *Pesquisa Rodoviária CNT 2015 - Relatório Gerencial*. 2015. Disponível em <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em 13/04/2021.
- EAPA - European Asphalt Pavement Association, 2001, *Asphalt in Figures – 2001*. Disponível em: <http://www.eapa.org> Acesso em 17/06/2021.
- GEWEHR. *Asfalto de Qualidade*. Disponível em:  
<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/>. Acesso em: 13/08/2017
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- MARQUES, G. L. O. *Utilização do modulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória*. 2004. 480 f. Rio de Janeiro 2004.
- NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Design and construction SMA mixtures*. 2002
- REIS, R.M.M., SANTO, N.R.E., ZANON, Anelise L. *SMA – Stone Matrix Asphalt Revestimento de Alta Performance para Vias de Tráfego Pesado*. 2002.