



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ARTHUR ANDRADE DE SOUSA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA MISTURA TIPO STONE MATRIX
ASPHALT (SMA) EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Belo Horizonte
2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ARTHUR ANDRADE DE SOUSA

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA MISTURA TIPO STONE MATRIX
ASPHALT (SMA) EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Graduação em Engenharia de Transportes do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Prof. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANEXO IV - ATA DE DEFESA

**“ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA MISTURA TIPO STONE MATRIX ASPHALT
(SMA) EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL”**

Arthur Andrade de Sousa

Trabalho de conclusão de curso submetido à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia de Transportes, APROVADO como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Transportes.

ORIENTADORA
Prof^ª. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio
CEFET-MG

Prof^ª. MSc. Priscila de Souza Maciel
IFPB

Prof^º. Dr. Bruno Guimarães Delgado
VALE S.A



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANEXO V – FOLHA DE NOTAS

“ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA MISTURA TIPO STONE MATRIX ASPHALT (SMA) EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL”

Arthur Andrade de Sousa

Trabalho de conclusão de curso submetido à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia de Transportes, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Transportes.

(☒) Aprovada em 24 de novembro de 2020.

(☐) Aprovada com modificações sugeridas pela banca em ____ de novembro de 2020

(☐) *Aprovada com ressalvas em ____ de novembro de 2020

(☐) Reprovado (a).

NOTA: 100,00

ORIENTADORA
Prof^a. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio
CEFET-MG

NOTA: 100,00

Prof^a. MSc. Priscila de Souza Maciel
IFPB

NOTA: 100,00

Prof^o. Dr. Bruno Guimarães Delgado
VALE S.A

NOTA FINAL: 100,00 (dez vírgula zero)

* Caso o(a) candidato (a) seja aprovado com ressalvas, favor relatar as modificações necessárias e indicar um membro responsável pela verificação das correções.

Dedico este trabalho aos meus pais, José Maria e Marília, por terem motivado e investido em minha formação, e a todos os profissionais que inspiraram minha caminhada até este momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por sua inigualável presença em minha trajetória. Sou grato a Ele por todas as oportunidades e pessoas que colocou em minha vida. Ainda que, muitas vezes, tudo pareça estar errado e confuso, a fé nele surge como um alicerce capaz de sustentar nossos medos, inseguranças e fraquezas, dando força e estrutura para seguir em frente.

Agradeço também, aos meus pais, José Maria e Marília, os quais me proporcionaram o melhor da vida e que lutaram com unhas e garras para garantir a melhor formação para mim e para minhas irmãs. Sou eternamente grato por todo amor, carinho, dedicação e confiança que depositaram sobre mim. Amo muito vocês.

Aos meus familiares: irmãs (Carol e Lorena), avós, tios, primos e primas, que sempre estiveram ao meu lado me inspirando a buscar novos caminhos e desafios. Sem a presença da família em minha vida, nenhuma conquista seria celebrada da mesma forma.

Aos meus eternos amigos da faculdade, em especial ao grupo “Nós 11” (Andressa, Bruna, Camila Teodora, João Victor, Pedro, Ricardo, Rodrigo, Tatiane, Vitor e Warley), com os quais pude compartilhar os melhores e piores momentos da graduação. Também sou grato à minha grande amiga, e primeira parceira de estágio na VIA-040, Carolina Lima (ou Carolliis rs), por todo suporte e parceria ao longo destes anos.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio, que acreditou no meu potencial e abraçou todas as minhas ideias. Sou muito grato pelos ensinamentos, orientações, conselhos e, também, pela amizade que criamos.

Aos meus professores do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG e a todos os professores que passaram por mim em algum momento da minha vida, os quais me ensinaram muito mais que os conteúdos teóricos e me inspiraram a ser um profissional ético, dedicado e responsável.

Por fim, sou grato ao CEFET-MG, instituição pública com ensino de qualidade e referência (nota máxima na avaliação do MEC), onde vi um mundo de oportunidades se abrirem para mim e onde fiz amizades que levarei para a vida toda.

“Decidir comprometer-se com resultados de longo prazo ao invés de reparos a curto prazo é tão importante quanto qualquer decisão que você fará em toda a sua vida.”

Anthony Robbins

RESUMO

SOUSA, Arthur Andrade de. **Estudo sobre a utilização da mistura tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) em obras de pavimentação no Brasil**. 2020. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020.

A infraestrutura de transportes brasileira pode ser considerada um dos principais entraves ao desenvolvimento sustentável do país. O atual cenário de pouca oferta e baixa qualidade de infraestrutura gera ineficiências que acarretam o aumento do custo operacional do transporte de bens e pessoas, o que impacta o preço final dos produtos produzidos e consumidos no país. Em média, o transportador brasileiro tem seu custo operacional aumentado em 28,5% em decorrência, apenas, das inadequações relacionadas ao pavimento rodoviário. A mistura asfáltica do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*) surgiu como um revestimento promissor para pavimentos uma vez que passou a apresentar melhor desempenho estrutural e funcional se comparada às misturas asfálticas convencionais, até então, largamente empregadas no meio rodoviário. Sendo assim, vários países começaram a aplicar o uso do SMA em suas obras de pavimentação. Seguindo essa tendência, o Brasil, a partir dos anos 2000, passou a investir em projetos de aplicação e pesquisa da mistura, especialmente em rodovias. Nesse sentido, este trabalho focou em entender o conceito da mistura SMA e identificar os principais projetos de aplicação no país, verificando a aplicabilidade do SMA como alternativa às misturas asfálticas convencionais, com base nas experiências brasileiras já realizadas. Para isso, elaborou-se uma tabela em ordem cronológica dos casos identificados e selecionou-se quatro experiências com significativa relevância tecnológica para que se avaliasse com mais detalhes os resultados obtidos pela aplicação da mistura. Os resultados da pesquisa bibliográfica permitiram verificar que, apesar do maior custo inicial de implantação, o SMA tem-se mostrado uma mistura promissora na pavimentação brasileira, seja em rodovias, vias urbanas ou aeroportos, conferindo bons resultados quanto à durabilidade, resistência a deformações permanentes, atrito superficial, entre outros. Contudo, observou-se também que a utilização da mistura SMA ainda é relativamente nova e discreta no país, estando concentrada, majoritariamente, em obras de pavimentação da região Sudeste, principalmente no Estado de São Paulo.

Palavras-chave: Pavimentação. Stone Matrix Asphalt. SMA. Rodovias. Infraestrutura de transportes.

ABSTRACT

SOUSA, Arthur Andrade de. **Study on the use of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixture in paving works in Brazil**. 2020. 63 p. Graduation Final Project – Transportation Engineering. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020.

Brazil's transportation infrastructure can be considered one of the main obstacles to the country's sustainable development. The current scenario of reduced supply and low-quality infrastructure generates inefficiencies that increase the operational cost of transporting goods and people, which impacts the final price of products produced and consumed in the country. On average, the Brazilian carrier has its operational cost increased by 28.5% due only to inadequacies related to the road pavement. The asphalt mixture type SMA (Stone Matrix Asphalt) emerged as a promising wearing course for pavements since it started to present a better structural and functional performance when compared to conventional asphalt mixtures, until then, widely used in the road environment. Therefore, several countries started using SMA in their paving works. Following this trend, from the 2000s onwards, Brazil began to invest in projects for application and research of the mixture, especially in highways. In this sense, this work focused on understanding the SMA mixture concept and identifying the main application projects in the country, verifying the applicability of SMA as an alternative to conventional asphalt mixtures, based on the Brazilian experiences already carried out. To do so, a table was prepared in chronological order of identified cases and four experiments with significant technological relevance were selected so that the results obtained by applying the mixture could be evaluated in more detail. The results of the bibliographical research allowed to verify that despite the higher initial cost of implantation, SMA has shown as a promising mixture in Brazilian paving, whether on highways, urban roads or airports, providing good results regarding durability, resistance to permanent deformation, surface friction, among others. However, it was also observed that the use of SMA mixture is still relatively new and discreet in the country, being mostly concentrated in paving works in the Southeast region, mainly in the State of São Paulo.

Keywords: Paving. Stone Matrix Asphalt. SMA. Highways. Transportation infrastructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (em km/1.000 km ²)	12
Figura 2: Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas (em mil km)	13
Figura 3: Frota total de veículos por região	13
Figura 4: Matriz de Transporte de Cargas nos países (% de TKU) - 2019	19
Figura 5: Classificação dos tipos de pavimento	20
Figura 6: Corte transversal de um pavimento flexível	20
Figura 7: Agregados de várias granulometrias comumente utilizados na pavimentação	22
Figura 8: Curvas granulométricas para cada tipo de graduação	23
Figura 9: Comparação entre as curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas	26
Figura 10: Comparativo da composição granulométrica entre um SMA e um CA	33
Figura 11: Comparação entre uma mistura SMA e uma convencional	34
Figura 12: Delineamento do projeto de pesquisa	42
Figura 13: Números absolutos de casos de aplicação de SMA por estado	45
Figura 14: Números absolutos de casos de aplicação de SMA por região	46
Figura 15: Localização dos casos selecionados no Brasil	49
Figura 16: Localização do trecho experimental de SMA na Via Anchieta (SP)	50
Figura 17: Localização do trecho experimental de SMA em Salvador (BA)	51
Figura 18: Localização do trecho experimental de SMA na BR-356 (RJ)	53
Figura 19: Localização do trecho experimental de SMA no Aeroporto de Aracaju (SE)	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Principais infraestruturas que receberam aplicação de SMA no Brasil	47
Gráfico 2: Entidades que apresentaram participação no investimento e aplicação de SMA ...	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas granulométricas da especificação alemã ZTV Asphalt - StB (2001)	24
Tabela 2: Faixas granulométricas da especificação americana AASHTO MP 8-02	25
Tabela 3: Faixas granulométricas da especificação americana NAPA (2002)	25
Tabela 4: Faixas granulométricas da especificação brasileira ET-DE-P00/031 (2007)	26
Tabela 5: Requisitos de dosagem SMA para os procedimentos Marshall e Superpave	31
Tabela 6: Comparação dos custos anuais: SMA x HMA	39
Tabela 7: Comparação do custo unitário: SMA x CA	39
Tabela 8: Principais projetos de aplicação do SMA no Brasil	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
AMP - Asfalto Modificado por Polímero
BRT - *Bus Rapid Transit*
CA - Concreto Asfáltico
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ - Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CGS - Compactador Giratório Superpave
CNT - Confederação Nacional do Transporte
CP - Corpo de Prova
CPA - Camada Porosa de Atrito
DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DMN - Diâmetro Máximo Nominal
DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HMA – *Hot-Mix Asphalt*
INFRAERO - Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
IRI - *International Roughness Index*
NAPA - *National Asphalt Pavement Association*
PPD - Pista de Pouso e Decolagem
RR - Emulsão asfáltica de Ruptura Rápida
SBS – Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP - *Strategic Highway Research Program*
SIURB - Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da Cidade de São Paulo
SMA - *Stone Matrix Asphalt*
SUPERPAVE - *Superior Performance Asphalt Pavements*
TKU - Toneladas por quilômetro útil
VCA_{DRC} - Vazios da fração graúda do agregado compactado
VCA_{MIX} - Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada
VDM - Volume Diário Médio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Considerações iniciais	12
1.2. Justificativa.....	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Geral.....	15
1.3.2. Específicos	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. Breve histórico da pavimentação asfáltica.....	16
2.1.1. Situação atual do Brasil.....	18
2.2. Pavimento: conceituação e estrutura.....	19
2.3. Agregados para pavimentação	21
2.3.1. Características granulométricas de misturas asfálticas.....	24
2.4. Ligantes asfálticos	27
2.4.1. Asfalto modificado por polímero	28
2.5. Dosagem de misturas asfálticas.....	29
2.5.1. Considerações sobre os procedimentos Marshall e Superpave	30
2.6. Misturas asfálticas do tipo SMA	32
2.6.1. Vantagens e desvantagens do SMA	35
2.6.2. Aplicações do SMA	36
2.6.3. Considerações de custos.....	37
3. METODOLOGIA	41
3.1. Delineamento da pesquisa	41
3.2. Recursos utilizados	42
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.1. Identificação dos casos.....	43
4.2. Mapas e gráficos	45
4.3. Casos de interesse	48
4.3.1. SP-150: Via Anchieta (curva da onça).....	49
4.3.2. Avenida General Graça Lessa, Salvador (BA).....	51
4.3.3. BR-356, São João da Barra (RJ)	53
4.3.4. Aeroporto de Aracaju (SE).....	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A infraestrutura de transporte está diretamente ligada ao potencial de desenvolvimento econômico e social de um país, pois o transporte tem a capacidade de conectar pessoas, ligar a nação, movimentar mercadorias e impulsionar a economia. O Brasil, país de extensão continental, possui alta dependência das rodovias para o transporte de bens e pessoas, por isso, deve-se avançar (e muito) quando o assunto é investimento em transportes.

Um dos setores que mais carece de atenção no Brasil é o rodoviário. De acordo com os dados da 23ª Pesquisa de Rodovias da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019) o Brasil possui 1.720.700 km de rodovias, das quais apenas 213.453 km são pavimentadas (12,4%). Ainda, de acordo com a pesquisa, a malha não pavimentada representa 78,5% do total da malha rodoviária nacional, enquanto as rodovias planejadas correspondem a 9,1%.

A baixa disponibilidade de rodovias pavimentadas no Brasil fica evidenciada quando comparada com a de outros países de extensão territorial semelhante ou com a de outros países da América Latina, conforme é apresentado no gráfico da **Figura 1**, elaborado pela CNT.

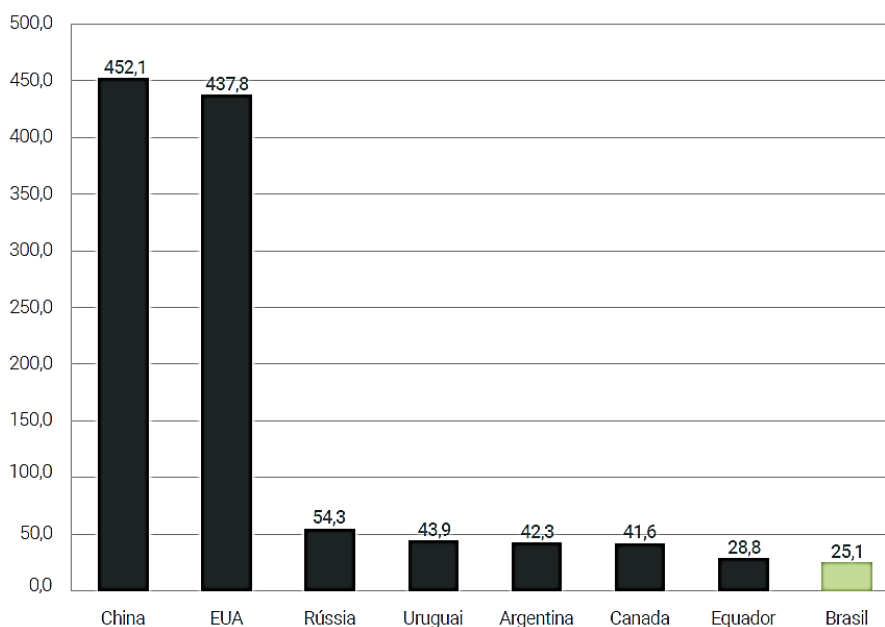


Figura 1: Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (em km/1.000 km²)

Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias, 2019.

Apesar da importância que o modo rodoviário tem na matriz de transporte do Brasil, existem atualmente poucos trechos pavimentados. Isso pode ser considerado um grande e preocupante atraso pois, na falta de rotas mais curtas pavimentadas, há aumento da extensão a ser percorrida pelos veículos, em vias pavimentadas, para que se atinja o destino desejado.

Contudo, quando se observa apenas as rodovias federais, nos últimos dez anos houve um aumento discreto (6,7%) da malha pavimentada, conforme mostrado na **Figura 2**.

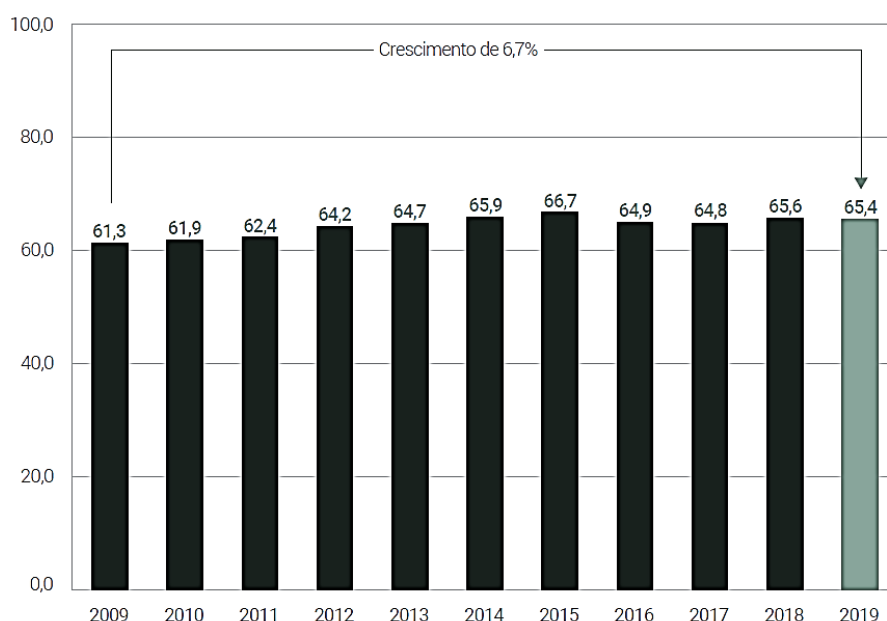


Figura 2: Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas (em mil km)

Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias, 2019.

Entretanto, no mesmo período, houve um aumento de 80,8% da frota no país, segundo a Pesquisa CNT de Rodovias (2019). Sendo assim, um dos fatores que implicam na degradação da infraestrutura rodoviária brasileira é o aumento do fluxo de veículos nas rodovias não acompanhado de melhorias nessa infraestrutura. A **Figura 3** indica o aumento da frota do país entre os anos de 2009 e 2019, destaca-se as regiões Norte e Nordeste que apresentaram aumentos superiores à 100%.

REGIÃO	2009	2019	CRESCIMENTO 2009-2019 (%)
Brasil	56.769.656	102.666.444	80,8%
Norte	2.341.150	5.386.646	130,1%
Nordeste	7.763.483	17.756.545	128,7%
Sudeste	29.671.431	49.805.810	67,9%
Sul	11.970.805	20.134.091	68,2%
Centro-Oeste	5.022.787	9.583.352	90,8%

Figura 3: Frota total de veículos por região

Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias, 2019.

Segundo Engelke *et al.* (2018) o crescente aumento no volume de tráfego das rodovias exige estudos na área de pavimentação para que seja possível construir estruturas de pavimentos mais resistentes e economicamente viáveis. Neste sentido, as misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) surgem como uma possibilidade frente a esses desafios, uma vez que a sua

estrutura pode ser benéfica quando comparada a outros tipos de misturas asfálticas, especialmente em rodovias de alto volume de tráfego.

Conforme explica Specht (2004) as misturas asfálticas são frequentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimento. A degradação desses, por sua vez, está associada à várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga e de retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes.

1.2. Justificativa

A infraestrutura de transporte brasileira pode ser considerada um dos principais entraves ao desenvolvimento sustentável do país. Isso porque o atual cenário de sua reduzida oferta e baixa qualidade gera ineficiências para o setor de transporte, o que afeta toda a cadeia produtiva.

Uma das consequências diretas da baixa qualidade das rodovias, e provavelmente uma das mais prejudiciais ao funcionamento do sistema econômico nacional, é o aumento do custo operacional do transporte rodoviário de cargas, que impacta o frete e, consequentemente, o preço dos produtos produzidos e consumidos no país. Conforme os dados divulgados pela Pesquisa CNT de Rodovias (2019), problemas no pavimento podem quase dobrar o custo operacional do transporte rodoviário de cargas e, em média, o transportador brasileiro tem seu custo operacional aumentado em 28,5% em decorrência, apenas, das inadequações relacionadas ao pavimento.

Segundo Vander Costa, presidente da CNT, toda a sociedade paga o preço da ineficiência da infraestrutura de transporte. “Se a rodovia tem problemas, há mais consumo de combustível e maior desgaste dos veículos. Isso gera custos, que elevam o valor dos produtos. Além disso, há a questão dos acidentes rodoviários, que tiram vidas e oneram o Estado”, afirma. Neste sentido, ele destaca a importância de investimentos no setor de transportes e maior eficiência na gestão da infraestrutura a fim de reduzir os problemas, aumentar a segurança e evitar desperdícios.

Com o decorrer do tempo, surgiram novas tecnologias na área de pavimentação e os métodos construtivos das rodovias evoluíram. Conforme exposto por Mourão (2003), com o objetivo de se obter uma mistura asfáltica mais resistente e durável que pudesse evitar por mais tempo a ocorrência de trincas por fadiga, bem como as deformações permanentes, vários países desenvolvidos começaram a utilizar a mistura asfáltica denominada “*Stone Matrix Asphalt*”, também conhecida como SMA.

Nesse contexto, justifica-se o propósito deste estudo a fim de quantificar e analisar as experiências existentes de aplicação do SMA no Brasil, aprofundando os conhecimentos técnicos e práticos acerca desse tipo de mistura asfáltica. O desafio de obter estruturas com desempenhos cada vez melhores vai ao encontro com a atual problemática brasileira que consiste em criar rodovias que suportem o crescente aumento do volume de tráfego e, conseqüentemente, o aumento das cargas solicitantes sobre o pavimento.

Dessa forma, a utilização de misturas do tipo SMA em rodovias brasileiras, especialmente nos corredores rodoviários onde há grande volume de tráfego, pode ser uma possibilidade importante para o futuro do meio rodoviário.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

O objetivo principal desta pesquisa é empreender o estudo acerca do projeto e da aplicação de misturas asfálticas do tipo SMA, bem como fazer o levantamento dos principais projetos de aplicação da mistura em obras de pavimentação no Brasil.

1.3.2. Específicos

Tendo em vista o propósito fundamental deste estudo, pretende-se cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais projetos executados (ou em execução) com aplicação da mistura SMA por estado e por região do Brasil;
- Analisar quatro das principais experiências identificadas no país e reconhecer casos de sucesso ou fracasso da aplicação de SMA; e
- Verificar a aplicabilidade do SMA como alternativa às misturas asfálticas convencionais com base nas experiências já realizadas no país.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Breve histórico da pavimentação asfáltica

Analisar a história da pavimentação remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Segundo Saunier *et al.* (1936) uma das primeiras estradas pavimentadas surgiu no Egito e se destinava a trenós para o transporte de cargas. Na época, para a construção das pirâmides (2600-2400 a.C.), foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte e o atrito era amenizado com umedecimento constante por meio de água, azeite ou musgo molhado.

Muitas das estradas da antiguidade transformaram-se, na modernidade, em estradas asfaltadas. Embora seja reconhecida a existência remota de sistemas de estradas em diversas partes do globo, construídas para fins religiosos (peregrinações) e comerciais, foram os romanos os responsáveis pela arte maior do planejamento e da construção viária. Visando, entre outros, objetivos militares de manutenção da ordem no vasto território do império, que se iniciou com Otaviano Augusto no ano 27 a.C., deslocando tropas de centros estratégicos para as localidades mais longínquas, os romanos foram capazes de implantar um sistema robusto construído com elevado nível de critério técnico para a época (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Portanto, há mais de 2.000 anos atrás os romanos já possuíam uma boa malha viária, contando ainda com um sistema de planejamento e manutenção. A mais extensa das estradas contínuas corria da Muralha de Antonino, na Escócia, a Jerusalém, cobrindo aproximadamente 5.000 km (HAGEN, 1955).

Chevallier (1976) aponta que não havia uma construção padrão para as estradas romanas, embora características comuns sejam encontradas. Com as informações que se têm, tudo indica que essas características se assemelham aos dias de hoje, as vias eram compostas por uma fundação e uma camada de superfície, que variavam de acordo com os materiais disponíveis e a qualidade do terreno natural. Essa camada superficial, em sua maioria, possuía pedras nas bordas formando uma espécie de meio-fio (Adam, 1994). Era comum o uso de pedregulhos, sílex e outras pedras quebradas (Margary, 1973). A diversidade dos materiais empregados nas estradas romanas é explicada pela disponibilidade ou não desses materiais nas regiões onde eram construídas.

Conforme exposto por Adam (1994) placas de pedras maiores começaram a ser utilizadas na pavimentação a partir do século II, em especial nas principais cidades da época. Além disso, nas localidades nas quais se trabalhava o ferro, o resíduo da produção era usado na

superfície das estradas servindo de material ligante das pedras e agregados, formando assim uma espécie de placa (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Após a experiência romana, a França foi a primeira a reconhecer o efeito do transporte no comércio, dando importância à velocidade de viagem (Mascarenhas Neto, 1790). O autor ainda aponta que os ingleses, observando a forma como eram calçados os caminhos da França, conseguiram construir vias mais cômodas, duráveis e velozes na Europa, o que foi importante para o progresso da indústria e comércio do país.

A partir das experiências observadas no continente europeu, o português Mascarenhas Neto apresenta em 1790 o “Tratado para construção de estradas”, publicado em “Methodo para construir as estradas em Portugal”, uma obra referência para o meio rodoviário na qual o autor destacava a possibilidade de construir em seu país estradas com menor custo que na França ou Inglaterra, dada a facilidade de encontrar materiais de qualidade na região. Assinalava ainda o estudo de pontos hoje verificados na pavimentação moderna, como a drenagem e abaulamento, erosão, distância de transporte, compactação, sobrecarga e marcação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na América Latina, os primeiros registros de estradas constam das vias construídas pelos incas entre os séculos XV e XVI na região compreendida hoje pelo Equador, Peru, norte do Chile, oeste da Bolívia e noroeste da Argentina. Já no Brasil, as primeiras estradas surgiram no estado de São Paulo por volta do ano de 1560, com o caminho aberto que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga. Do século XVI ao XIX surgiram vários caminhos para carroças que ligavam cidades e vilas brasileiras. Contudo, apenas com a inauguração da estrada União e Indústria, em 1860, que a história do rodoviarismo nacional começava a ser escrita. Inaugurada por D. Pedro II, a importante estrada ligava a cidade de Petrópolis no estado do Rio de Janeiro a Juiz de Fora, Minas Gerais, sendo a primeira rodovia concessionada do país (BERNUCCI *et al.*, 2008). Sobre as características desta estrada, a autora descreve:

“Idealizada pelo comendador Mariano Procópio e inaugurada por D. Pedro II em 1860 é a primeira estrada brasileira a usar macadame como base/revestimento. Até então era usual o calçamento de ruas com pedras importadas de Portugal. Com uma largura de 7m, leito ensaibrado e compactado, cuidadosamente drenada, inclusive com valetas de alvenaria, várias obras de arte, esta estrada tinha um traçado que permitia a então impressionante velocidade de 20km/h das diligências. Muito além do seu percurso de 144km, a União e Indústria representa um marco na modernização da pavimentação e do país. Sua construção envolveu o levantamento de capital em Londres e no Rio de Janeiro. Da antiga estrada ainda restam pontes e construções, incluindo o Museu Rodoviário, onde se pode aprender mais sobre a história da estrada em questão e do rodoviarismo brasileiro. A estrada original está hoje alterada e absorvida em alguns trechos pela BR-040/RJ” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 17).

Do Império (1822 – 1889) até o início do século XX não houve investimento e desenvolvimento significativos do transporte rodoviário no Brasil. A título de informação, no início do século XX, havia no país apenas 500 km de estradas com revestimento de macadame hidráulico ou variações, sendo o tráfego restrito a veículos de tração animal (PREGO, 2001).

Todavia, em 1928 foi inaugurada pelo então presidente Washington Luiz a Rodovia Rio - São Paulo, com 506 km de extensão, representando um marco da nova política rodoviária federal. Em 1937, seguindo a tendência do rodoviarismo, criou-se, pelo presidente Getúlio Vargas, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), subordinado ao Ministério de Viação e Obras Públicas. Entretanto, somente na década de 1940 que foi possível observar um efetivo avanço da pavimentação oriundo da tecnologia desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial, época na qual houve o contato de engenheiros brasileiros com engenheiros norte-americanos que construíram pistas de aeroportos e estradas de acesso durante a guerra utilizando o então recém-desenvolvido ensaio *California Bearing Ratio* (CBR). Neste ano o Brasil possuía apenas 1.300 km de rodovias pavimentadas, uma das menores extensões da América Latina (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946 oriundo do imposto sobre combustíveis líquidos, e com a criação da Petrobras em 1953, a década de 1950 foi destacada por Prego (2001) como o período de maior ascensão da pavimentação em escala industrial e da organização de grandes firmas construtoras no país.

Nas décadas posteriores, de forma geral, a escolha pelo modo rodoviário se instalou de fato no Brasil e refletiu em diversas medidas políticas. Durante o governo militar (1964-1984), surgiram a Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio-Niterói. O país chegou em 1985 com aproximadamente 110.000 km de rodovias pavimentadas, saltando em 1993 para aproximadamente 133.000 km (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.1.1. Situação atual do Brasil

No Brasil, o modo rodoviário é o que possui a maior participação na matriz de transporte, concentrando, aproximadamente, 61% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros, conforme os dados divulgados pela última pesquisa disponível (23ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias, 2019). Ao se comparar a matriz brasileira de transporte de cargas com a de outros países, percebe-se o desequilíbrio na utilização dos modos de transporte para o escoamento de cargas no país, bem como a forte presença do modo rodoviário. O comparativo das matrizes, referentes ao ano de 2019, pode ser visualizado na **Figura 4**.

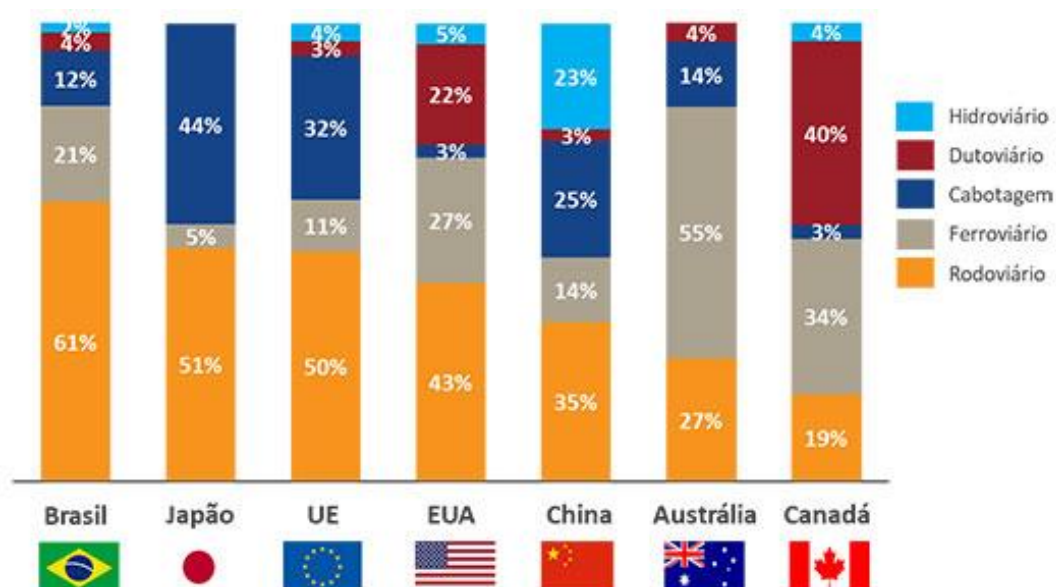


Figura 4: Matriz de Transporte de Cargas nos países (% de TKU) - 2019

Fonte: ILOS (2020)

Ainda, segundo a Pesquisa CNT (2019), a qualidade das rodovias brasileiras piorou no último ano. De toda a malha rodoviária pavimentada do país (213.453 km) foram pesquisados 108.863 km ao longo dos quais foram identificados 797 trechos com pontos críticos. Em 2018 foram identificados 454 trechos, o que representa um aumento de 75,6% na ocorrência de pontos críticos, os quais são: quedas de barreira, pontes caídas, erosões na pista e buracos grandes.

Além disso, o estudo constata que 59% da extensão avaliada apresenta algum tipo de problema no estado geral, seja ele de pavimentação, sinalização ou geometria. Em 2018, o percentual foi 57%. Apenas se tratando do pavimento, mais da metade das rodovias pesquisadas (52,4%) apresentam algum tipo de problema, das quais 35% estão com pavimentos em condições regular; 13,7%, ruim; e 3,7%, péssimo.

2.2. Pavimento: conceituação e estrutura

Bernucci *et al.* (2008) definem pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Pinto (2001) afirma que a conceituação de pavimento pode ser subjetiva e essa varia conforme a visão do usuário ou a do engenheiro. Enquanto usuário, o pavimento é classificado como uma estrutura capaz de suportar o tráfego e proporcionar conforto, segurança e comodidade ao rolamento. Ao passo que para o engenheiro, o pavimento é uma estrutura de

multicamadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.

De acordo com o DNIT (2006), o pavimento rodoviário pode ser classificado em três tipos: flexíveis, rígidos e semirrígidos, conforme ilustrado na **Figura 5**. Os pavimentos flexíveis são aqueles que possuem base de brita ou solo, nos quais o revestimento constitui-se de uma mistura formada por agregados e ligante asfáltico. Já os pavimentos rígidos se caracterizam como aqueles revestidos por placas de concreto de cimento Portland, os quais são menos propensos a deformações devido à elevada rigidez. Por último, os pavimentos semirrígidos se configuram como aqueles com revestimento asfáltico que possuem camada de base em material estabilizado quimicamente com adição de cimento, cal, entre outros.

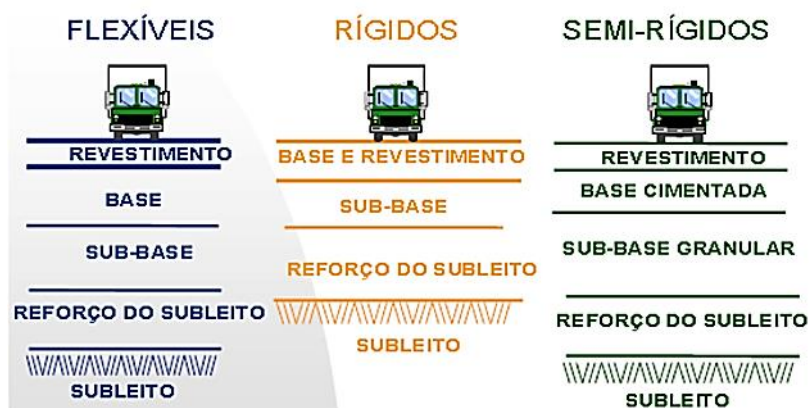


Figura 5: Classificação dos tipos de pavimento

Fonte: ADADA, (2008, p. 26)

A estrutura dos pavimentos asfálticos é basicamente composta por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito, conforme a **Figura 6**.

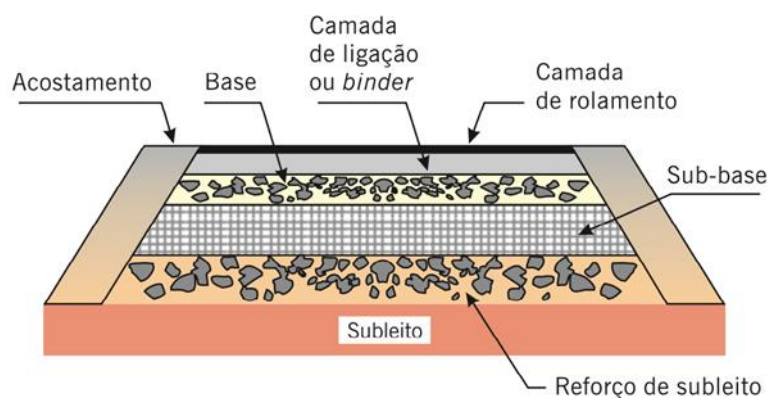


Figura 6: Corte transversal de um pavimento flexível

Fonte: Bernucci *et al.*, (2008, p.10)

O subleito é o terreno de fundação do pavimento, enquanto o reforço de subleito é uma camada executada acima da regularização, caso exista a necessidade de aumentar a capacidade de suporte da fundação do pavimento. A sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, e a base, considerada a de maior importância do ponto de vista estrutural, é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pelo tráfego. A camada final do pavimento e também a mais superficial é o revestimento ou camada de rolamento, a qual recebe diretamente a ação do tráfego, devendo ser o mais impermeável possível e com a função de melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e a resistir aos esforços horizontais (SENÇO, 1997).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) as tensões e deformações induzidas na camada de revestimento pelas cargas do tráfego estão associadas às patologias do pavimento como o trincamento por fadiga dessa camada. Além disso, o envelhecimento do ligante asfáltico ou a ação climática podem ocasionar, também, trincamentos no revestimento. Em suma, parte dos problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos do pavimento pode ser atribuída ao revestimento asfáltico.

2.3. Agregados para pavimentação

Segundo a definição de Woods (1960) o agregado para misturas asfálticas é caracterizado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais, a qual é usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa etc. Ter conhecimentos acerca do uso de agregados, bem como as características particulares de cada tipo, é de relevante importância pois ele é responsável por prover resistência mecânica às misturas asfálticas.

A areia, o pedregulho e as rochas minerais são os materiais naturais comumente usados na mistura asfáltica, esses são, portanto, classificados como agregados convencionais. Os materiais podem ser classificados em três grandes grupos, sendo esses quanto à sua natureza, quanto ao seu tamanho e à distribuição dos grãos (SERRA, 2017).

Quanto à natureza, os agregados são classificados em: natural, artificial e reciclado. Em relação ao tamanho dos grãos, são classificados em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler. E quanto a distribuição dos grãos, determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento, identifica-se a graduação da mistura como sendo aberta, densa (ou bem-graduada), uniforme ou descontínua (BERNUCCI *et al.*, 2008). Os diversos agregados comumente utilizados em obras de pavimentação podem ser conferidos na **Figura 7**.



Figura 7: Agregados de várias granulometrias comumente utilizados na pavimentação

Fonte: Bartelli (2018)

Cunha *et al.* (2004) afirmam que o desempenho de uma mistura asfáltica está diretamente relacionado com sua distribuição granulométrica. Ela influencia grande parte das principais propriedades de uma mistura asfáltica, como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, a resistência à deformação permanente e a resistência aos danos causados pela umidade. Portanto, uma adequada distribuição granulométrica dos agregados deve ser o primeiro passo para a elaboração de uma mistura asfáltica que apresente um bom desempenho quando submetida aos níveis de carregamento e condições climáticas de campo. Além disso, a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção dos tipos de misturas asfálticas.

Dentre as principais graduações características de misturas asfálticas destacam-se (BERNUCCI *et al.*, 2008):

- Graduação densa ou bem-graduada é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;
- Graduação aberta é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios;

- Graduação uniforme é aquela que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita; e
- Graduação com degrau ou descontínua é aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários.

A **Figura 8** ilustra as curvas granulométricas características das graduações dos agregados.

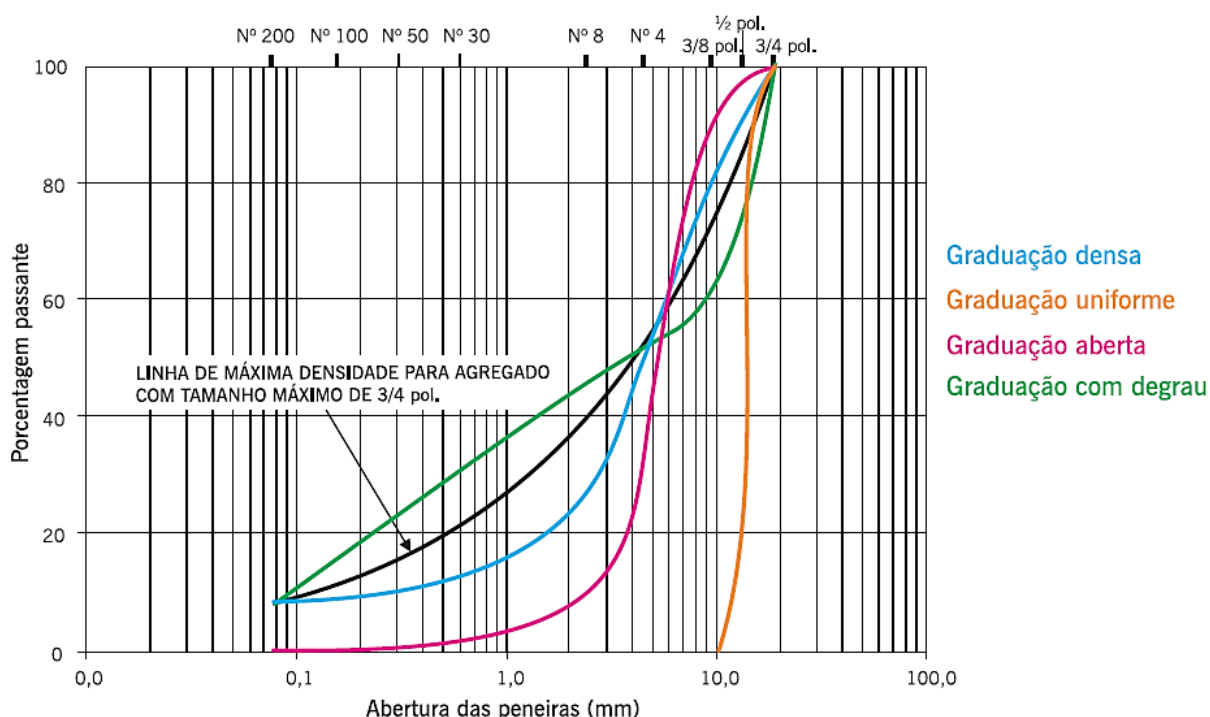


Figura 8: Curvas granulométricas para cada tipo de graduação

Fonte: Bernucci *et al.*, (2008, p. 123)

Cabe destacar que, uma vez que os recursos naturais são limitados e podem ser escassos em algumas regiões, surge a necessidade do uso de materiais alternativos que substituam parcialmente ou totalmente os agregados convencionais. Misturas com agregados alternativos podem modificar características do pavimento, melhorando a qualidade do mesmo e diminuindo os custos de construção e manutenção. Um exemplo disso é a incorporação de borracha reciclada de pneus, através do processo seco, na mistura asfáltica (borracha-agregado), a qual é capaz de conferir à mistura melhoria nas características de resistência a fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura (SPECHELT, 2004).

2.3.1. Características granulométricas de misturas asfálticas

As misturas asfálticas do tipo SMA são caracterizadas por ter um elevado conteúdo de agregado graúdo, acima de 70%, e sua granulometria descontínua é uma das principais diferenças em relação às misturas densas convencionais. Ademais, é fundamental que os agregados para a produção de misturas SMA sejam de boa qualidade, duráveis, de forma aproximadamente cúbica, resistentes à degradação nos pontos de contato sob as cargas e possuam textura áspera. Os agregados arredondados não são recomendados para essas misturas (PROWELL *et al.*, 2010 *apud* EL-HAGE, 2012).

Especificações de faixas granulométricas para misturas SMA são apresentadas por diversos órgãos europeus e norte-americanos. Contudo, a primeira especificação a ser publicada como norma foi a alemã ZTV bit-StB em 1984, englobando quatro tipos de SMA, denominados de 0/11S; 0/8S; 0/8 e 0/5, sendo o último algarismo referente ao diâmetro nominal máximo do agregado (BERNUCCI *et al.*, 2008). A **Tabela 1** apresenta as faixas granulométricas de cada tipo de SMA da especificação alemã, sendo as faixas 0/11S e 0/8S indicadas para tráfego pesado ou solicitações especiais.

Tabela 1: Faixas granulométricas da especificação alemã ZTV Asphalt - StB (2001)

Peneira	Faixas			
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	SMA 0/8	SMA 0/5
Abertura (mm)	% em massa, passando			
< 0,09	9 - 13	10 - 13	8 - 13	8 - 13
> 2	73 - 80	73 - 80	70 - 80	60 - 70
> 5	60 - 70	55 - 70	45 - 70	< 10
> 8	> 40	< 10	< 10	-
> 11,2	< 10	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2008 (p. 170)

Nos Estados Unidos, as faixas granulométricas de SMA têm Diâmetro Máximo Nominal (DMN) do agregado variando entre: 25,0 mm, 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm (NEVES FILHO, 2004). As faixas granulométricas norte-americanas estabelecidas pela AASHTO (*American Association of State Highway Transportation Officials*) e pela NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) são comumente empregadas em projetos de misturas SMA.

A norma AASHTO MP 8-02 recomenda apenas três faixas granulométricas, como pode ser visto na **Tabela 2**.

Tabela 2: Faixas granulométricas da especificação americana AASHTO MP 8-02

Peneira	Faixas					
	19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm	
Abertura (mm)	% em massa, passando					
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
25,0	–	100	–	–	–	–
19,0	90	100	–	100	–	–
12,5	50	88	90	99	–	–
9,5	25	60	50	85	100	100
4,75	20	28	20	40	70	95
2,36	16	24	16	28	30	50
1,18	–	–	–	–	20	30
0,6	–	–	–	–	–	21
0,3	–	–	–	–	–	18
0.075	8	11	8	11	12	15

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2008 (p. 171)

Já a especificação da NAPA (2002) apresenta cinco graduações distintas, que foram testadas intensivamente de forma a assegurar o contato grão a grão do agregado graúdo. Contudo a própria especificação afirma que as faixas de DMN de 25 mm e 4,75 mm não refletem a prática típica para aplicações de misturas asfálticas do tipo SMA. As cinco faixas granulométricas são apresentadas na **Tabela 3**.

Tabela 3: Faixas granulométricas da especificação americana NAPA (2002)

Peneira	Faixas									
	25,0 mm		19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm		4,75 mm	
Abertura (mm)	% em massa, passando									
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
37,5	100	100	—	—	—	—	—	—	—	—
25,0	90	100	100	100	—	—	—	—	—	—
19,0	30	86	90	100	100	100	—	—	—	—
12,5	26	63	50	74	90	100	100	100	—	—
9,5	24	52	25	60	26	78	90	100	100	100
4,75	20	28	20	28	20	28	26	60	90	100
2,36	16	24	16	24	16	24	20	28	28	65
1,18	13	21	13	21	13	21	13	21	22	36
0,6	12	18	12	18	12	18	12	18	18	28
0,3	12	15	12	15	12	15	12	15	15	22
0,075	8	10	8	10	8	10	8	10	12	15

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de NAPA, 2002 (p. 09)

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) propôs em 2007 uma especificação técnica que regulamentasse a utilização de concreto asfáltico tipo SMA em obras rodoviárias, visto que não há uma norma federal para esse tipo de mistura no Brasil. Sendo assim, a especificação técnica, cujo código é o ET-DE-P00/031 (2007), determina a

composição granulométrica dos agregados da mistura, conforme a norma alemã ZTV Asphalt – StB, 2001. A **Tabela 4** apresenta as faixas granulométricas adotadas para a mistura SMA, sendo as faixas I e II indicadas para tráfego pesado ou solicitações especiais.

Tabela 4: Faixas granulométricas da especificação brasileira ET-DE-P00/031 (2007)

Peneira de malha quadrada		Faixas				Tolerâncias
Série ASTM	Abertura (mm)	I	II	III	IV	
		% em massa, passando				
¾"	19,0	100	-	-	-	-
½"	12,5	90 - 100	-	-	-	± 7%
3/8"	9,5	-	100	100	-	± 7%
5/16"	7,93	45 - 60	90 - 100	90 - 100	100	± 5%
Nº 4	4,75	30 - 40	30 - 45	30 - 52	90 - 100	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 27	20 - 27	20 - 30	30 - 40	± 5%
Nº 200	0,075	9 - 13	9 - 13	7 - 12	7 - 12	± 2%
Espessura (cm)		3,5 - 5,0	3,0 - 4,0	2,5 - 3,5	1,5 - 2,5	

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007).

A descontinuidade da curva granulométrica é a principal diferença entre a mistura asfáltica SMA e o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), que proporciona ao SMA maior volume de vazios no agregado mineral (MOURÃO, 2003). A **Figura 9** apresenta exemplos de curvas granulométricas que ilustram três tipos de composição do esqueleto mineral de misturas asfálticas, sendo elas: Concreto Asfáltico (CA), graduação densa; SMA, graduação descontinua; e Camada Porosa de Atrito (CPA), graduação aberta ou porosa (BERNUCCI *et al.*, 2008).

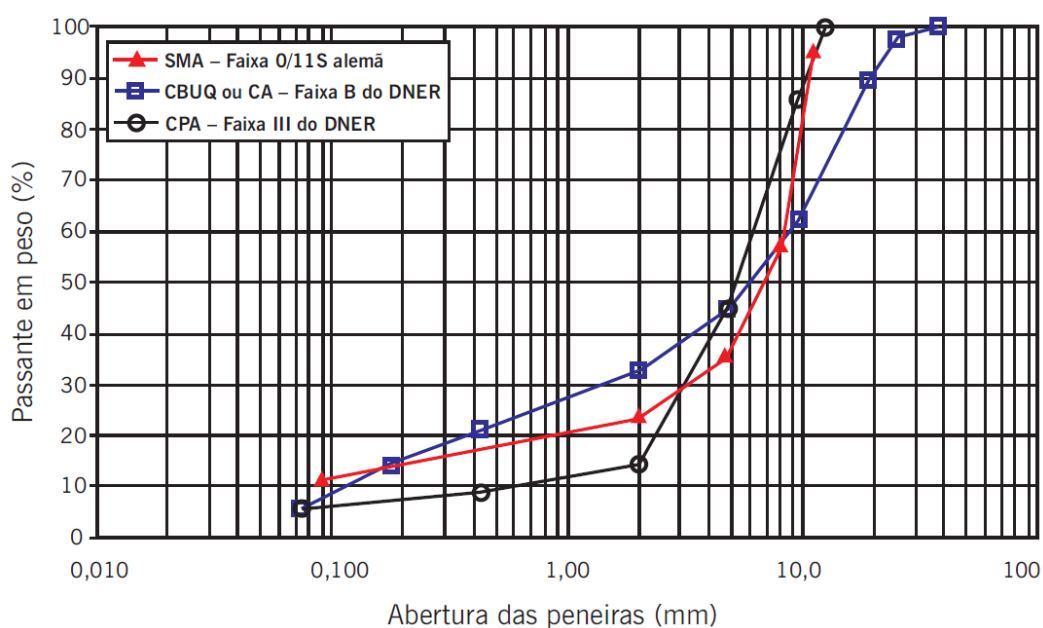


Figura 9: Comparação entre as curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas

Fonte: Bernucci *et al.*, (2008, p. 160)

Percebe-se que misturas de graduação densa, como o CA, possuem curva granulométrica contínua e bem graduada, já as misturas de graduação aberta, como a CPA, se caracterizam por uma curva granulométrica mais uniforme, a qual é abatida e próxima de zero nas frações de menor tamanho. Enquanto as misturas de graduação descontínua, como o SMA, apresentam curva granulométrica com elevada proporção dos grãos de maiores dimensões, completados por certa quantidade de finos, o que forma um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O concreto asfáltico (também denominado em alguns órgãos por CAUQ – concreto asfáltico usinado a quente ou CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente) é a mistura asfáltica densa mais utilizada. O contato entre os grãos de maiores dimensões pode não acontecer pela quantidade proporcionalmente equivalente das frações menores (BERNUCCI *et al.*, 2015).

A ausência de grãos médios e a alta concentração de agregados graúdos nas misturas SMA se traduzem em uma superfície mais rugosa, com uma textura mais grossa, que formam pequenos “canais” entre os agregados graúdos, aumentando a resistência ao deslizamento e a absorção de ruído, e reduzindo a reflexão de luz e a aquaplanagem (MOURÃO, 2003).

2.4. Ligantes asfálticos

O asfalto é um ligante betuminoso composto por hidrocarbonetos provenientes da destilação fracionada do petróleo. Possui propriedades de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. Entretanto, não está livre de sofrer envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água. Sua massiva utilização na pavimentação se dá pelo fato de proporcionar forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No mercado atual, existem diversos tipos de ligantes asfálticos. A fim de se escolher o ligante ideal para uma obra de pavimentação em uma determinada região, além do custo-benefício associado, deve-se atentar para os seguintes fatores: clima, orçamento previsto da obra, fluxo de tráfego, tipos de agregados disponíveis na região e a finalidade de aplicação do ligante. Dentre os principais tipos de ligantes destacam-se o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), a Emulsão Asfáltica (EA), o Asfalto diluído de Petróleo (ADP) e os Ligantes Modificados por Polímeros (AMP).

Conforme explicado por Bernucci *et al.* (2015) para obter melhores propriedades do CAP usualmente adiciona-se certos agentes modificadores que possam conferir melhor desempenho. Quando a um CAP é adicionado um aditivo diz-se que o mesmo é um asfalto

modificado. Esses levam adição de algum polímero natural ou artificial em sua composição, melhorando assim o desempenho do ligante quanto a variações térmicas, cargas mecânicas ou deformação, por exemplo.

Modificar o CAP pode atribuir a ele melhor adesão, coesão e elasticidade, menor suscetibilidade térmica, elevação do ponto de amolecimento e maior resistência ao envelhecimento (BALBO, 2007).

2.4.1. Asfalto modificado por polímero

Polímeros são macromoléculas formadas a partir da ligação de moléculas menores (monômeros). Podem ser encontrados em todas as partes, por exemplo, em organismos vegetais e naturais, como na borracha, proveniente da seringueira, e nas proteínas. Além desses encontrados na natureza, existem aqueles produzidos artificialmente, chamados de polímeros sintéticos (LIMA, 2019).

Segundo Bernucci *et al.* (2015) asfalto modificado por polímero é um material composto por CAP e um ou mais polímeros, geralmente em teores de 3 a 8% (massa/massa, ou seja, em relação à massa do CAP). O asfalto modificado tem sido uma opção para minimizar os tipos mais frequentes de falha dos pavimentos, quais sejam, deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) e trincamento por fadiga ou por efeito de baixa temperatura ambiente. O uso de modificadores para melhorar as propriedades dos ligantes tem aumentado em todo o mundo e está hoje consagrado no Brasil. Os principais tipos de modificadores são os polímeros: copolímeros de estireno – butadieno – estireno (SBS), estireno – (etileno-co-butileno) – estireno (SEBS), etilenovinilacetato (EVA) e etilenoglicidilacrilato (Elvaloy®).

Nos asfaltos polímeros, normalmente, utilizam-se polímeros termoplásticos, uma vez que esses permitem ser incorporados sem que haja alteração em suas propriedades. Uma das vantagens desses asfaltos é que eles são capazes de diminuir a frequência da necessidade de manutenção e aumentar a vida útil dos pavimentos (SERRA, 2017).

O polímero SBS é um dos principais modificadores do CAP e a sua estrutura química favorece a adesividade ao agregado e a elasticidade do CAP modificado. A melhoria das propriedades do CAP também inclui aumento da resistência ao envelhecimento e à oxidação para este material (BERNUCCI *et al.*, 2015).

O ligante asfáltico para produção de misturas asfálticas tipo SMA pode ser um asfalto convencional ou um asfalto modificado por polímeros (AMP). No caso da utilização dos asfaltos convencionais, pela suscetibilidade ao escorrimento, recomenda-se a utilização de fibras de celulose como aditivo estabilizador (QIU & LUM, 2006 *apud* EL-HAGE, 2012).

Contudo, a norma brasileira do DER-SP (2007), recomenda a utilização de ligante asfáltico modificado por polímero do tipo SBS para a produção de misturas SMA.

2.5. Dosagem de misturas asfálticas

Os métodos de dosagem de misturas asfálticas são essenciais na determinação da proporção de ligante para uma distribuição granulométrica pré-estabelecida de agregado que resulte em desempenho satisfatório quando em serviço. Sendo assim, métodos de dosagem diferentes, com processos de compactação e tamanho de amostras também diferentes, podem conduzir a teores de projeto distintos (LEANDRO, 2016).

No Brasil utiliza-se principalmente o método Marshall para a moldagem de corpos de prova (CPs). Esse método de dosagem, definido pela norma DNER-ME 43/95, é o mais usado mundialmente e faz o uso da compactação por impacto, além disso, recebeu esse nome em referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940 no decorrer da Segunda Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Durante a década de 1980, os Estados Unidos presenciaram o surgimento de diversos problemas prematuros de deformações no pavimento em várias de suas rodovias de tráfego pesado. Tais problemas foram atribuídos ao excesso de ligante nas misturas. Engenheiros da época acreditavam que a compactação por impacto, durante o procedimento de dosagem, produzia corpos de prova com densidades distintas daquelas apresentadas pelas misturas em campo. Esses questionamentos somados ao aumento do número de solicitações e da magnitude do carregamento nas rodovias norte-americanas motivaram os estudos do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), entre 1987 e 1992, resultando na proposição de um novo método de dosagem por amassamento, denominado *Superpave* (LEANDRO, 2016).

De maneira geral, a principal diferença entre os dois procedimentos de dosagem em questão é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros) por meio de um equipamento denominado Compactador Giratório Superpave (CGS). Outra diferença marcante entre os métodos é o envelhecimento de curto prazo das misturas, adotado apenas pela metodologia Superpave (VASCONCELOS E SOARES, 2004).

Ademais, a principal contribuição do Superpave foi a adoção de um método de compactação que fornecesse corpos de prova com volumetria e distribuição de agregados similares aos de campo resolvendo, assim, um dos principais problemas do método Marshall e

seu caráter empírico, o qual, além disso, ainda apresenta limitações quanto à abordagem de aspectos relativos ao carregamento e ao clima. Soma-se a esse cenário o tipo de compactação por impacto não se assemelhar àquela praticada no campo (ARTERIS, 2014).

Por fim, segundo Leandro (2016), os principais métodos citados ainda possuem deficiências uma vez que nem o método Marshall e nem o Superpave consideram, em suas formulações, ensaios a partir de solicitações que reproduzam os esforços de campo. E, apesar do grau de desenvolvimento tecnológico alcançado com relação aos materiais e ao projeto de pavimentos, esses métodos de dosagem ainda têm o volume de vazios como principal critério de avaliação de misturas asfálticas.

2.5.1. Considerações sobre os procedimentos Marshall e Superpave

O método Marshall, tradicionalmente utilizado no Brasil desde a década de 1960, e o método Superpave, introduzido no país no final da década de 1990, são os procedimentos mais usuais para análise das proporções relativas dos materiais empregados em misturas asfálticas densas (BERNUCCI *et al.*, 2015).

No Brasil, assim como em muitos outros países, o compactador Marshall é majoritariamente utilizado em estudos e dosagens de misturas asfálticas do tipo SMA, aplicando-se uma energia de compactação equivalente a 50 golpes por face nos corpos de prova independentemente do tipo de tráfego. Contudo, existem alguns poucos organismos rodoviários que recomendam a utilização de 75 golpes por face para tráfego pesado (EL-HAGE, 2012).

Ainda, conforme exposto por El-Hage (2012) em muitos países já existem especificações de misturas asfálticas tipo SMA baseadas no uso dos compactadores giratórios Superpave (CGS) que, por sua concepção, reproduzem melhor as características de misturas asfálticas compactadas no campo. Entretanto, até hoje existem divergências entre essas especificações quanto ao número de giros do compactador giratório, com variações que vão de 40 até 120 giros, assunto que pode servir de base para pesquisas futuras.

Para Bernucci *et al.* (2015) quando a dosagem é realizada por meio do método Marshall, a moldagem dos corpos de prova deve ser realizada utilizando-se 75 golpes para misturas asfálticas bem graduadas e densas ou 50 golpes por face para misturas asfálticas do tipo SMA ou CPA. Se a dosagem for desenvolvida utilizando-se o CGS (procedimento Superpave), normalmente os corpos de prova são moldados com 100 giros, mas em alguns casos podem ser utilizados 75 giros.

O conceito de SMA está baseado na obtenção de um esqueleto pétreo onde seja garantido o contato entre os grãos de agregados graúdos, o que ocorre quando o VCA_{MIX} (vazios

da fração graúda do agregado na mistura compactada) é menor ou igual ao VCA_{DRC} (vazios da fração graúda do agregado compactado). Desta maneira os grãos ativos (agregado graúdo) formam uma forte matriz que fornece à mistura SMA uma boa resistência a deformação permanente. Ou seja, quando os agregados graúdos, em sua grande maioria com dimensões similares, tocam-se, formam-se vazios que devem ser ocupados, em parte, por um mástique, composto por agregados na fração areia, filer, asfalto e fibras (BERNUCCI *et al.*, 2008; RAMOS, 2012).

Segundo Leal (2013) a fim de controlar a exsudação ou escorrimento do ligante nas misturas SMA são usadas fibras curtas, que podem ser minerais, de celulose ou de vidro. Elas não produzem nenhuma alteração química no CAP, mas as propriedades físicas são alteradas.

O teor de fibras a serem utilizadas nas misturas asfálticas do tipo SMA é definido por meio de ensaio de escorrimento. Uma vez que o teor de ligante asfáltico dessas misturas é bastante elevado (em geral, acima de 6,0%), esse ensaio se faz necessário para verificação do escorrimento de ligante asfáltico aquecido de forma a evitar perda de ligante no transporte, na aplicação e na compactação do SMA (BERNUCCI *et al.*, 2008; BERNUCCI *et al.*, 2015). A especificação técnica brasileira do DER-SP (ET-DE-P00/031) e, também, a alemã (ZTV Asphalt - StB 01) recomendam uma porcentagem, em peso, de fibras na mistura SMA de 0,3% a 1,5%.

O projeto de misturas asfálticas precisa seguir normas de procedimentos e especificações, seja qual for o tipo de mistura a ser adotada. A **Tabela 5** resume os principais requisitos de dosagem utilizados para produção de SMA, com base em relatórios da NAPA (2002) nos Estados Unidos, e também especificados na norma da AASHTO MP 8-02.

Tabela 5: Requisitos de dosagem SMA para os procedimentos Marshall e Superpave

Propriedades	Procedimento Marshall	Procedimento Superpave
Teor de ligante, % mín.	6,0	6,0
Volume de vazios, %	4,0	4,0
Vazios no Agregado Mineral (VAM), % mín.	17,0	17,0
VCA_{MIX} , %	$< VCA_{DRC}$	$< VCA_{DRC}$
Estabilidade Marshall (kgf), mín.	632	-
Resistência à tração retida (RRT), % mín.	70	70
Teste de Escorrimento, % em peso máx.	0,30	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de NAPA, 2002.

Portanto, a mistura SMA a ser selecionada deve ter propriedades que atendam aos critérios mostrados na **Tabela 5**, dependendo do método de compactação usado. Se esses critérios não forem atendidos, a mistura deve ser modificada para que eles sejam cumpridos (NAPA, 2002).

2.6. Misturas asfálticas do tipo SMA

Segundo Blazejowski (2011) a mistura asfáltica SMA, do inglês *Stone Matrix Asphalt*, é um revestimento que teve origem na Alemanha em meados da década de 1960. Desenvolvida pelo engenheiro alemão Dr. Zichner, surgiu como uma tentativa de criar uma mistura asfáltica capaz de resolver os danos causados pelos pneus com pregos no pavimento asfáltico, muito usados em países com invernos rigorosos devido à precipitação de neve sobre o revestimento.

Segundo Ramos (2012), na época, era comum na Alemanha o uso da mistura chamada de *Gussasphalt*, que pode ser traduzido como asfalto mástique, um concreto asfáltico com baixo teor de agregado graúdo. No entanto, estas misturas tinham um desgaste muito rápido aos pneus com pregos devido, principalmente, aos seus componentes: mástique e agregados finos, os quais não eram suficientemente fortes para prover a vida útil desejada para o revestimento asfáltico. Dessa forma, o elevado custo de manutenção e restauração das rodovias alemãs incentivou uma forte demanda por uma nova mistura asfáltica, mais forte, que suportaria o tráfego de pneus com pregos.

Sendo assim, a ideia inicial para a concepção do SMA consistiu em criar um esqueleto muito forte de agregados graúdos cujos espaços vazios seriam preenchidos por mástique (composto pela mistura de ligante, fíler e areia). Dr. Zichner acreditava que agregados graúdos seriam mais resistentes ao esmagamento e que um elevado teor de mástique e ligante poderiam resultar em uma mistura mais durável (BLAZEJOWSKI, 2011).

A grande inovação à época foi o fato de a mistura SMA apresentar uma descontinuidade no tamanho dos agregados, diferenciando-se das misturas densas comuns daquele período. Sendo assim, ela foi caracterizada como uma mistura descontínua ou mais comumente conhecida como *gap grading*. Entretanto, o alto teor de ligante asfáltico utilizado na mistura levou ao problema de escorrimento do ligante durante o transporte e lançamento. Como solução para esse problema, fez-se necessário a adição de um estabilizador na mistura, na época, fibras de amianto, úteis para inibir o escoamento. Solucionado o problema do escorrimento com o uso do estabilizador, a mistura pôde então ser facilmente transportada, lançada e compactada com os equipamentos tradicionais. Com isso, em 1968, as primeiras rodovias públicas alemãs foram pavimentadas utilizando misturas do tipo SMA (RAMOS, 2012).

Em 1984, houve a primeira publicação de uma norma técnica para o SMA (a ZTV bit-StB 84) e, assim, a mistura começou a se tornar mais popular no continente europeu à medida que vários países começaram a testar a mistura em suas rodovias. Mas foi nos anos 90 que ocorreu o crescimento significativo do uso de SMA no mundo, o qual foi impulsionado pela

pesquisa e desenvolvimento de normas americanas de mistura SMA (como a AASHTO MP82 e a AASHTO PP41). A popularização da mistura nos Estados Unidos incentivou seu uso em outros países, como Austrália, Nova Zelândia e China. Desde então, o SMA se tornou uma mistura global podendo ser visto em quase todos os lugares onde camadas de asfalto mineral são aplicadas (BLAZEJOWSKI, 2011).

Segundo NAPA (2002) as misturas SMA apresentam menor afundamento de trilha de roda e maior resistência ao trincamento por fadiga quando comparadas a misturas densas convencionais, que, em geral, resistem pouco à reflexão de trincas e à deformação permanente. Quanto ao melhor desempenho do SMA em relação à deformação permanente, Reis (2002) afirma que tal característica se deve à maximização do contato entre os agregados graúdos, o que aumenta a interação grão/grão.

A maior espessura da película de asfalto é responsável pelo melhor desempenho do SMA quanto às trincas por fadiga e ao desgaste (NEVES FILHO, 2004). Além disso, por apresentar uma macrotextura superficial entre média e grosseira, o SMA melhora a aderência entre pneu e pavimento, diminui o spray ou cortina de água durante a chuva e contribui para uma melhor drenabilidade da água que incide sobre a superfície do revestimento asfáltico (SILVA, 2005).

A **Figura 10** ilustra a comparação da composição granulométrica entre uma mistura SMA e um Concreto Asfáltico convencional (CA). Observa-se maior quantidade de consumo de agregado graúdo na mistura SMA e, devido à essa graduação, tem-se uma macrotextura superficialmente rugosa que é responsável pela formação de pequenos “canais” entre os agregados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

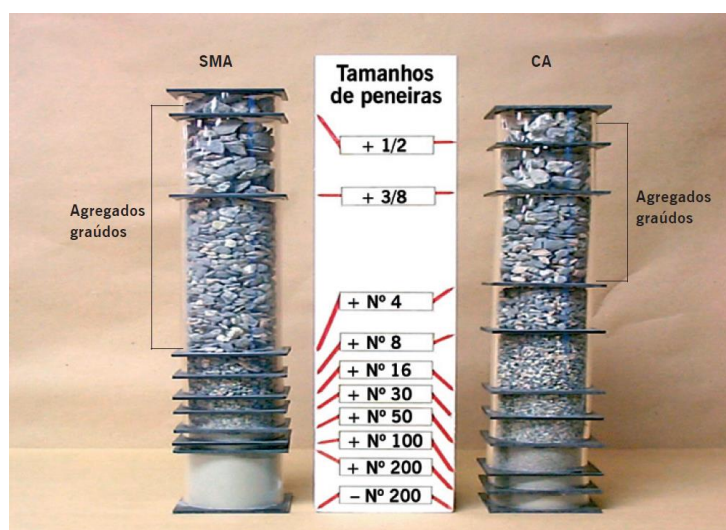


Figura 10: Comparativo da composição granulométrica entre um SMA e um CA

Fonte: Bernucci *et al.*, (2008, p. 169)

Devido à sua graduação descontínua, o SMA apresenta um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos pelo mástique asfáltico constituído pela mistura da fração de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. Por isso, é caracterizado como uma mistura rica em ligante asfáltico, com um consumo de ligante em geral entre 6,0 e 7,5% e com espessuras de aplicação variando entre 1,5 a 7cm, dependendo da faixa granulométrica (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O maior consumo de ligante asfáltico, se comparado às misturas convencionais, produz uma maior espessura do filme que recobre o agregado, fornecendo assim maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento, além de maior durabilidade e maior resistência à fadiga (EL-HAGE, 2012).

A **Figura 11** apresenta a comparação (real e gráfica) entre uma mistura do tipo SMA e uma densa convencional (CA).

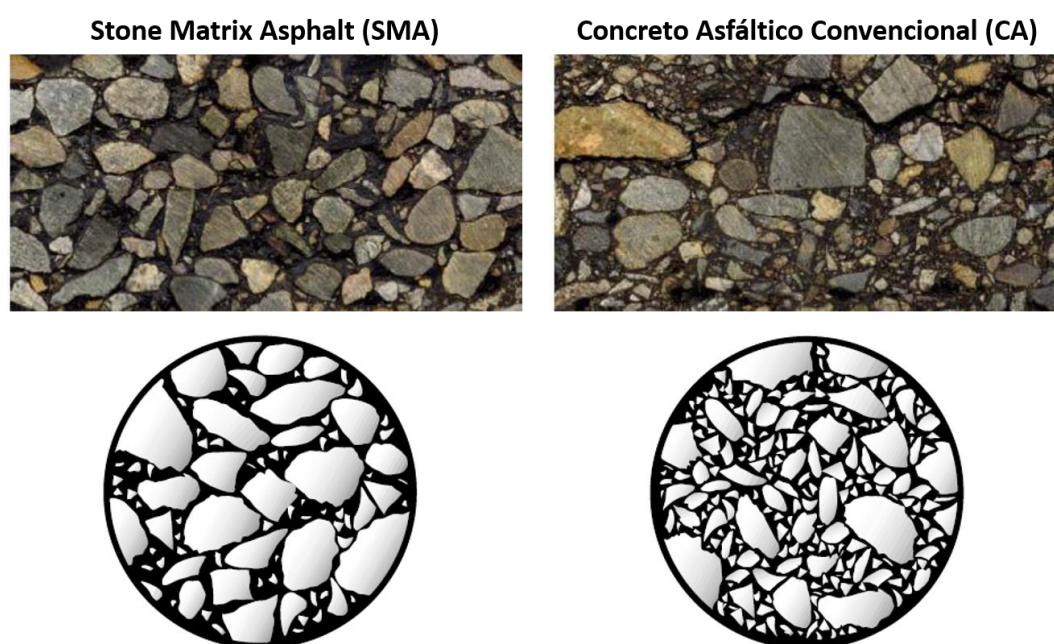


Figura 11: Comparação entre uma mistura SMA e uma convencional

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Pierce (2000) e NAPA (2002).

Fica evidente pela figura a maior preocupação com a seleção dos agregados graúdos presentes em maior quantidade na mistura SMA, nota-se, portanto, um proporcionamento granulométrico que favorece um maior número de contatos entre os grãos de maior dimensão. A coesão da mistura SMA é assegurada pelo mástique asfáltico que, em elevada porcentagem, faz com que a mistura apresente baixo índice de vazios, retardando o processo de oxidação (EL-HAGE, 2012).

Segundo Celaya e Haddock (2006) para misturas do tipo SMA espera-se uma vida útil de serviço entre 20% a 30% maior do que as misturas densas convencionais, devido, sobretudo, à maior durabilidade e resistência à deformação permanente da mistura.

Contudo o aumento no desempenho fornecido pelo SMA acarreta um custo extra na produção da mistura que varia de 20% a 40%. No entanto, acredita-se que tal gasto adicional valha a pena em aplicações apropriadas, principalmente em rodovias de alto volume de tráfego (CELAYA E HADDOCK, 2006)

2.6.1. Vantagens e desvantagens do SMA

A mistura SMA reúne as seguintes características positivas de desempenho (MOURÃO, 2003; BERNUCCI *et al.*, 2008; BLAZEJOWSKI, 2011; COSTA, 2017):

- Boa estabilidade a elevadas temperaturas – devido ao melhor atrito interno gerado pelo esqueleto mineral entre os agregados;
- Boa flexibilidade a baixas temperaturas – devido ao mástique rico em ligante, proporcionando melhores propriedades em relação as misturas tradicionais com relação a trincas térmicas;
- Elevada resistência ao desgaste – a mistura possui baixo índice de vazios o que a faz ser pouco permeável, fornecendo também satisfatória resistência ao envelhecimento, baixa sensibilidade à umidade e alta durabilidade;
- Elevada adesividade entre os agregados minerais e o ligante – devido a elevada quantidade de fíler e as fibras estabilizantes, que tem a função de estabilizar a mistura, engrossando o filme de ligante e melhorando a adesividade agregado/ligante;
- Boa resistência a derrapagem e redução do efeito “spray” gerado pelo tráfego em pistas molhadas – devido a boa macrotextura formada pelo agregado graúdo e o mástique na superfície do pavimento;
- Melhor visibilidade no pavimento – o SMA impede a formação de uma lâmina d’água sobre o pavimento molhado, o que reduz o reflexo dos faróis dos veículos que trafegam no sentido contrário, aumentando a visibilidade das sinalizações horizontais da pista;
- Redução do nível de ruído ao rolamento – devido às propriedades da textura superficial da mistura em relação às misturas asfálticas densas convencionais;

- Maior vida de serviço – devido ao aumento da resistência à deterioração da superfície e melhoria da resistência à deformação permanente.

Entretanto, apesar das características positivas mencionadas, a mistura SMA possui algumas características negativas, dentre as quais se destacam (BLAZEJOWSKI, 2011; SILVA E GOMES, 2015):

- Baixa resistência inicial à derrapagem – devido ao fino filme de asfalto sobre os agregados na superfície, ao menos que se realize aplicação de “*gritting*”, que consiste na aplicação de uma taxa de areia graduada sobre o pavimento durante a segunda passagem do rolo na compactação;
- Maior custo inicial de implantação, se comparado às misturas densas tradicionais – devido ao elevado teor de ligante ($>6\%$), filer ($\sim 10\%$) e fibra estabilizante, mas devido a maior vida de serviço, o custo benefício o torna viável;
- Risco de aparecimento de diferentes tipos de exsudação – devido a erros ou variações do projeto, produção e lançamento da mistura;
- Risco de segregação, quando ocorre falta ou ineficiência de estabilizante.

De forma geral, o SMA vem se mostrando uma excelente opção de revestimento para pavimentos submetidos a tráfegos pesados, apresentando alto desempenho estrutural e funcional. Os riscos relatados e as falhas que possam vir a ocorrer são resultados de erros de projeto e execução, uma vez que esta é uma mistura que exige um balanço delicado entre as frações de mástique e agregado, demandando agregados de boa qualidade, bom controle das graduações e dosagem cuidadosa do teor de ligante e fibras estabilizantes (SILVA E GOMES, 2015).

2.6.2. Aplicações do SMA

Devido ao alto desempenho estrutural e funcional apresentados pelo SMA, algumas de suas principais aplicações na atualidade são (BERNUCCI *et al.*, 2008):

- Vias com alta frequência de caminhões (tráfego pesado);
- Interseções;
- Áreas de carregamento e descarregamento de cargas;
- Rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus;
- Pistas de aeroportos;
- Estacionamentos;
- Pátios de portos.

No Brasil, a primeira aplicação do SMA ocorreu em fevereiro de 2000 quando se realizou a reabilitação da pista do autódromo de Interlagos em São Paulo (BELIGNI *et al.*, 2000 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008). Em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na Via Anchieta (km 044+400 ao km 045+000), que liga São Paulo a Santos, em uma curva fechada, perigosa e com tráfego pesado de caminhões. Os resultados da aplicação do SMA neste trecho obtiveram grande sucesso e superioridade de comportamento funcional e estrutural em relação a outras soluções asfálticas até então empregadas (COSTA, 2017; REIS, 2002).

Ainda que pouco utilizado em relação às misturas convencionais, o SMA vem sendo usado no Brasil em pequenos trechos de rodovias concedidas, em corredores de ônibus e autódromos (RAMOS, 2015). Segundo Bernucci *et al* (2008), foram desenvolvidas obras em rodovias dos estados de São Paulo e Minas Gerais, além de uso urbano do SMA em São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador. Recentemente, a mistura também vem sendo estudada e aplicada em pistas de aeroportos do país.

2.6.3. Considerações de custos

De acordo com Blazejowski (2011) os custos iniciais de uma mistura SMA podem ser cerca de 10-20% maiores se comparados às misturas densas convencionais. Dentre os principais fatores que resultam no acréscimo do orçamento se destacam (RAMOS, 2012):

- Teores elevados de ligante;
- Utilização de ligantes modificados (asfaltos modificados por polímeros);
- Maiores quantidades de fíler;
- Maior quantidade de agregados graúdos;
- Uso de estabilizador (em geral, fibras);
- Produção em altas temperaturas; e
- Menor produção em usina.

Segundo NAPA (2002), o custo da mistura SMA pode ser entre 20-25% mais alto que os custos das misturas densas convencionais, e as possíveis razões para isso são os custos com as fibras, ligantes modificados e maiores teores de conteúdo (agregado e ligante) na mistura em questão.

Mesmo considerando o potencial aumento de custos, os Departamentos de Transportes dos Estados de Geórgia e Maryland nos Estados Unidos constataram que o uso de SMA pode ser bem econômico com base nas melhorias de desempenho e no potencial aumento da vida útil de serviço do pavimento (NAPA, 2002).

De acordo com Ramos (2012) o custo varia para cada país e, muitas vezes, a diferença de preços é aceita por administradoras rodoviárias devido à vida útil apresentada pela mistura, que pode variar de 15 a 20 anos. Sendo assim, assume-se que o elevado custo inicial do SMA é compensado pela sua durabilidade e baixo custo de manutenção.

A mistura SMA é considerada complexa em comparação à mistura convencional de Concreto Asfáltico pela seleção dos materiais de excelente qualidade e, segundo os autores, o maior custo dos materiais é proporcional aos custos associados às misturas SMA (MCGHEE *et al.*, 2005 *apud* EL-HAGE, 2012). Neste sentido, as maiores exigências dos materiais em relação às misturas densas convencionais acarretarão despesas iniciais maiores, porém esse custo inicial elevado deverá ser compensado pelas poucas intervenções ao longo da vida útil do pavimento (EL-HAGE, 2012).

Ramos (2015) realizou análises econômicas para avaliação dos custos comparativos entre o SMA e o convencional HMA (*hot-mix asphalt*, ou Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ) por meio de dois métodos: Custo Anual Equivalente (EAC) e Índice de Custo de Longevidade (LCI).

O primeiro, EAC, permite obter o custo unitário do pavimento para uma dada vida de serviço. Contudo, não inclui custos de intervenções ao longo da vida útil do pavimento e sabe-se, hoje, que o custo de um pavimento não pode ser analisado apenas pelo seu custo inicial (ESA/ENPRO/INFRAERO, 2011 *apud* RAMOS, 2015). Para esse método o autor chegou aos seguintes custos anuais equivalentes para o SMA e para o HMA (RAMOS, 2015):

- SMA = R\$ 5,54 a 5,89/m²/ano, considerando o início das intervenções a cada 10 anos após a construção do pavimento.
- HMA = R\$ 7,22 - R\$ 10,83/m²/ano, considerando o início das intervenções de 5 a 7,5 anos após a construção do pavimento;

O segundo método, LCI, apresenta como resultado o Valor Presente do pavimento, considerando a vida útil e as cargas, permitindo obter o Índice de Custo de Longevidade do pavimento para uma dada vida de serviço. Contudo, também não tem como elemento de entrada os custos de intervenções ao longo da vida útil de um pavimento. Para esse outro método o autor chegou nos seguintes valores (RAMOS, 2015):

- SMA = 0,60 US\$/m²/ano
- HMA = 1,06 US\$/m²/ano

Portanto, baseado nos resultados dos dois métodos de análise econômica e nas conclusões do autor, o SMA se mostrou mais vantajoso que o HMA.

Para os autores Celaya e Haddock (2006) o SMA pode apresentar um custo extra entre 20-40% por ser considerada uma mistura *Premium* na pavimentação e, para avaliar adequadamente o custo-benefício desta mistura, ela precisa ser avaliada com uma análise de Custo do Ciclo de Vida, *Life Cycle Cost* (LCC), mais longo do que outros pavimentos convencionais.

Segundo NAPA (2002) o Departamento de Transportes do Estado de Geórgia conduziu uma análise de Custo do Ciclo de Vida que comparou misturas SMA com HMA. A análise utilizou intervalos de reabilitação de 7,5 anos para o HMA e 10 anos para o SMA, e um período de ciclo de vida de 30 anos foi adotado como base comum para comparar as duas misturas. Os resultados da comparação dos custos anuais das misturas são mostrados na **Tabela 6**.

Tabela 6: Comparação dos custos anuais: SMA x HMA

Tipo de pavimento	Intervalo de reabilitação	Custo anual
HMA (ou CBUQ)	7,5 anos	US\$ 79.532
SMA	10 anos	US\$ 50.095

Fonte: NAPA (2002, p. 05).

Percebe-se que, dentro do período analisado, o SMA apresentou um custo significativamente eficaz em comparação ao HMA. Como mencionado anteriormente, o aumento da vida útil e a melhoria de desempenho pode compensar o custo inicial maior ao usar SMA em vez de HMA (NAPA, 2002).

A título de comparação e com o intuito de mostrar valores atuais praticados no mercado brasileiro, a **Tabela 7** explicita os custos unitários para obras de pavimentação com o Concreto Asfáltico convencional (CA) e o SMA. Os valores foram retirados da planilha dos serviços de infraestrutura urbana da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da cidade de São Paulo (SIURB).

Tabela 7: Comparação do custo unitário: SMA x CA

Descrição do serviço	Unidade	Custo unitário*
Revestimento de concreto asfáltico - CA (sem transporte)	m ³	R\$ 913,84
Revestimento de mistura asfáltica tipo SMA com polímero e fibra (sem transporte)	m ³	R\$ 1.166,76

*Valores com desoneração e data-base de janeiro/2020

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SIURB-SP, 2020.

Conforme observado na **Tabela 7**, o custo unitário da mistura SMA, para essa cotação, chega a ser 21,68% maior do que o custo unitário do Concreto Asfáltico convencional (CA), o que vai ao encontro aos valores expostos por NAPA (2002) e Celaya e Haddock (2006).

Neste sentido, Ramos (2015) afirma que apesar do custo inicial de implantação do SMA ser mais elevado que as misturas asfálticas convencionais, o tempo de início das intervenções é maior e os custos dessas intervenções são menores.

Por fim, os pesquisadores Quintus e Ryan (2007) recomendam que decisões sobre qual tipo de revestimento a ser aplicado em pavimentos flexíveis sejam analisadas caso a caso, avaliando questões que incluem custos iniciais, frequência de manutenção e reabilitação e fontes de financiamento para a construção e manutenção de estradas.

3. METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido qualifica-se como um estudo exploratório com metodologia de pesquisa bibliográfica qualitativa o qual possui finalidade de investigação em material teórico sobre o assunto de interesse, que no presente estudo se refere a utilização de mistura asfáltica do tipo SMA em obras de pavimentação no Brasil.

Segundo Gil (2008) a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. A principal vantagem desse tipo de pesquisa reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma ampla gama de fenômenos. Essa vantagem é particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço.

3.1. Delineamento da pesquisa

O primeiro passo se deu através da realização de uma revisão bibliográfica com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o tema da pesquisa e identificar as contribuições existentes dos diversos autores sobre o SMA. Destaca-se nesta etapa a seleção de quatro livros que foram fundamentais para o entendimento teórico e prático quanto às misturas asfálticas do tipo SMA e suas aplicações, sendo eles:

- NAPA (2002) - Designing and Constructing SMA Mixtures - State-of-the-Practice;
- Bernucci *et al.* (2008) - Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros;
- Blazejowski (2011) - Stone Matrix Asphalt Theory and Practice;
- Bernucci *et al.* (2015) - Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação.

O passo seguinte, então, se resumiu na leitura de todo o material selecionado, o que incluiu livros, dissertações, teses, monografias e artigos. Com todas as informações necessárias reunidas, realizou-se o agrupamento dos principais casos identificados de aplicação do SMA no Brasil em uma tabela. Em seguida, elaborou-se mapas de frequência no software QGIS com o propósito de identificar as regiões do Brasil com a maior incidência de aplicação da mistura em questão, seja em rodovias, vias urbanas, trechos experimentais ou aeroportos.

Posteriormente, selecionou-se quatro casos de aplicação do SMA para análise e discussão, que são abordados no capítulo 4 deste estudo. E, por fim, realizou-se as considerações finais embasadas nos materiais bibliográficos, nas experiências selecionadas de aplicação da mistura e na interpretação dos mapas e gráficos elaborados.

As etapas do projeto de pesquisa deste estudo estão resumidamente ilustradas no esquema da **Figura 12**.

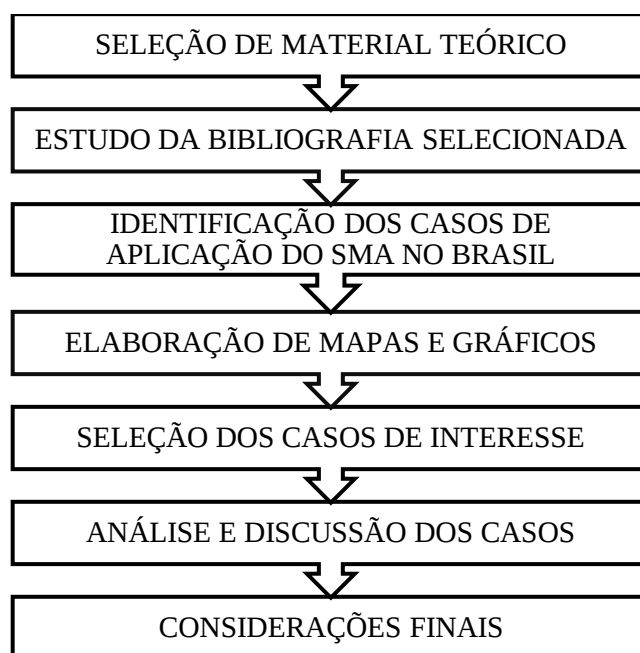


Figura 12: Delineamento do projeto de pesquisa

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2. Recursos utilizados

O presente estudo constou com a utilização de três softwares essenciais para a análise e interpretação dos resultados pretendidos, sendo eles:

- Google Earth Pro;
- Microsoft Excel;
- QGIS 3.14.

No Google Earth Pro pôde-se realizar a identificação espacial dos trechos onde foram aplicadas as misturas asfálticas do tipo SMA dos casos de interesse selecionados. Já no Microsoft Excel, foi possível elaborar as tabelas e gráficos que corroboraram para a interpretação dos dados levantados no estudo. E, por último, no QGIS 3.14 elaborou-se os mapas temáticos de frequência acerca do assunto desenvolvido.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Seguindo a metodologia descrita e à luz do exposto na revisão bibliográfica, foram identificados e mapeados os casos de execução da mistura SMA no Brasil, os quais serviram de base para análise e escolha de quatro das experiências identificadas no país. Dessa forma, neste capítulo, são apresentados todos os projetos de aplicação do SMA já executados ou em execução, os quatro casos selecionados para serem analisados e um breve resumo da experiência e dos resultados obtidos em cada um deles.

4.1. Identificação dos casos

Com o intuito de selecionar os casos de interesse e compreender a frequência de utilização de misturas asfálticas do tipo SMA no Brasil, elaborou-se uma tabela resumo com todos os casos já executados ou em execução no país. Na **Tabela 8** é mostrado um histórico com o resumo dos principais projetos de aplicação das misturas asfálticas do tipo SMA em obras de pavimentação no Brasil. Os dados foram inicialmente apresentados por Tuchumantel (2008), no 6º Encontro Técnico do DER-PR, e atualizados por El-Hage (2012) e Azeredo (2018).

Tabela 8: Principais projetos de aplicação do SMA no Brasil

Ano	Local da aplicação	Localização (UF)	Observações
2000	Autódromo Interlagos	São Paulo (SP)	Manutenções em 2001, 2002, 2003, 2004 e 2007
2001	SP-150: Via Anchieta - "Curva da Onça"	Região da Baixada Santista (SP)	Concessionária Ecovias
2002	BR-116: Presidente Dutra	Arujá (SP)	Concessionária CCR NovaDutra
2003	Trechos da Rodovia do Açúcar (SP-308)	Ligação entre a cidade de Itu e Piracicaba (SP)	Concessionária AB Colinas
2004	Corredores de ônibus e vias urbanas	São Paulo (SP)	-
2004	Vias urbanas	Rio de Janeiro (RJ)	-
2004	Avenida General Graça Lessa (via urbana)	Salvador (BA)	Trecho experimental de SMA sem utilização de fibras
2006	BR-277	Curitiba-Paranaguá (PR)	Concessionária Ecovia
2006	SP-330: Anhanguera	Estado de São Paulo	Concessionária Autovias
2006	Anel Rodoviário BH - BR-381/ BR-262/ BR-040	Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG)	15 km de Pista Dupla (Obra DNIT)

Ano	Local da aplicação	Localização (UF)	Observações
2006	BR-381	Belo Horizonte – Betim (MG)	17 km de Pista Dupla (Obra DNIT)
2007	BR-116	Fortaleza - Pacajus (CE)	27 km de Pista Dupla (Obra DNIT)
2007	SP-330: Anhanguera	Estado de São Paulo	Concessionária Intervias e Autovias
2007	SP-326: Brigadeiro Faria Lima	Estado de São Paulo	Concessionária TEBE
2007	SP-310: Washington Luiz	Estado de São Paulo	Concessionária Centrovias
2007	BR-277	Curitiba-Paranaguá (PR)	Concessionária Ecovia
2009	Avenida Marechal Floriano Peixoto (via urbana)	Curitiba (PR)	Aplicação de SMA com Asfalto Borracha na canaleta do BRT
2010	BR-277	Curitiba-Paranaguá (PR)	Concessionária Ecovia
2010	BR-356	Próximo ao município de São João da Barra (RJ)	50 m de trecho experimental de SMA com bagaço de cana de açúcar
2010	Autoestrada Grajaú - Jacarepaguá	Rio de Janeiro (RJ)	SMA com asfalto modificado por borracha
2011	Vias urbanas	Rio de Janeiro (RJ)	Programa Asfalto Liso; Avenida Brasil; Transcarioca e Transoeste
2014	Pista do Aeroporto Internacional de Aracaju	Aracaju (SE)	Execução de um trecho experimental em pista
2015	BR-386, BR-158 e BR-116	Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul	-
2017	BR-060 e BR-153	Estado de Goiás	Concessionária Triunfo Concebra
2017	Pista do Aeroporto Internacional de Belo Horizonte	Confins (MG)	Fresagem e recapeamento com SMA para correção do IRI da pista
2018	Pista do Aeroporto Eurico de Aguiar Salles	Vitória (ES)	Construção da nova pista de pouso e decolagem 02/20
2018	SP-021: Rodoanel Mario Covas - Trecho Norte	Região Metropolitana de São Paulo (SP)	Utilização de SMA na construção do Trecho Norte do Rodoanel (conclusão prevista para 2022)
2020	Pista do Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu/Cataratas	Foz do Iguaçu (PR)	Obras de ampliação da pista de pouso e decolagem (conclusão prevista para 2021)

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de El-Hage (2012) e Azeredo (2018).

Percebe-se que, na maioria dos casos, o SMA foi aplicado na região Sudeste do Brasil em rodovias que apresentam alto volume de tráfego e consequentemente maiores solicitações no pavimento, o que evidencia a vocação desse tipo de mistura para rodovias com essas características. Esta concepção é apresentada também por Blazejowski (2011) que afirma que

o SMA atualmente é considerado como a mistura ideal para pavimentos asfálticos de tráfego elevado e intenso, que requerem alta resistência a danos e uma vida útil de serviço mais longa.

4.2. Mapas e gráficos

À luz da **Tabela 8**, elaborou-se o mapa de frequência (**Figura 13**) que ilustra, em números absolutos, a quantidade total dos casos identificados neste trabalho em cada estado do Brasil onde houve algum projeto de aplicação da mistura asfáltica SMA.

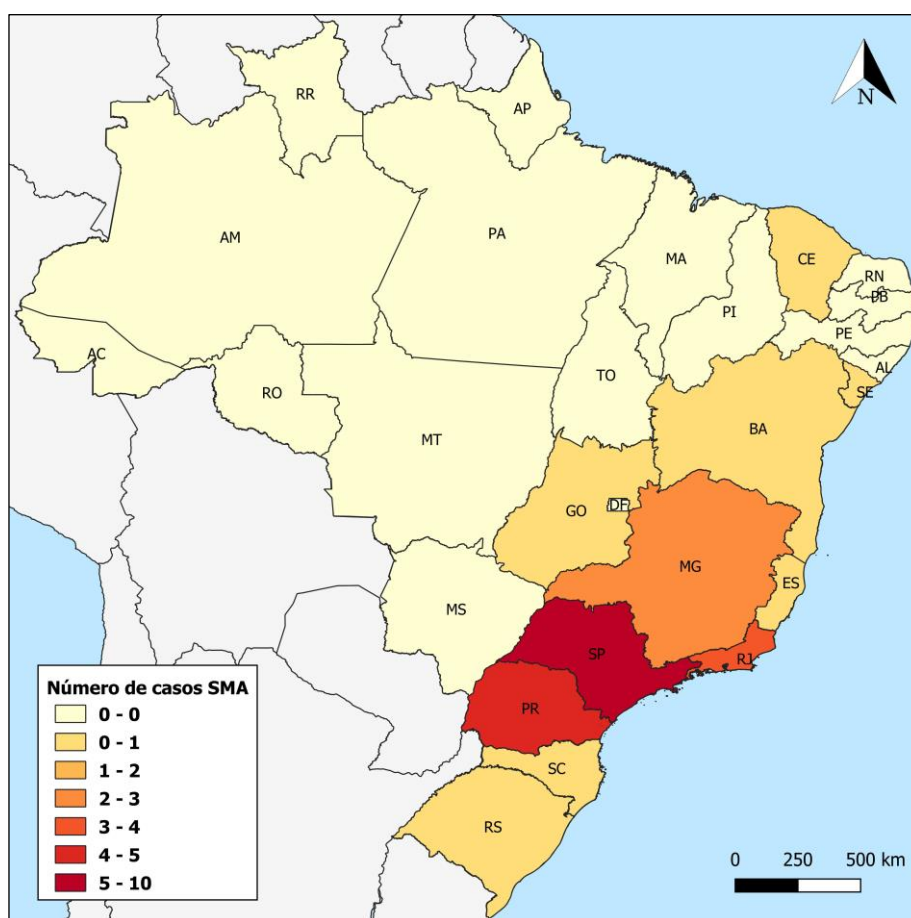


Figura 13: Números absolutos de casos de aplicação de SMA por estado

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados da **Tabela 8** (2020).

Percebe-se que o Estado de São Paulo é o que mais concentra os casos identificados de execução da mistura tipo SMA, constando 10 projetos de aplicação, seguido pelo Paraná, que possui apenas a metade das ocorrências verificadas em São Paulo, e pelo Rio de Janeiro com 4 casos identificados.

Para uma análise mais abrangente da ocorrência de SMA no território nacional e considerando a divisão regional do Brasil, a **Figura 14** apresenta o percentual de casos para

cada região do país, em relação ao total de casos identificados neste estudo, e o mapa da figura ilustra a frequência de casos observados em cada uma das regiões, em números absolutos.

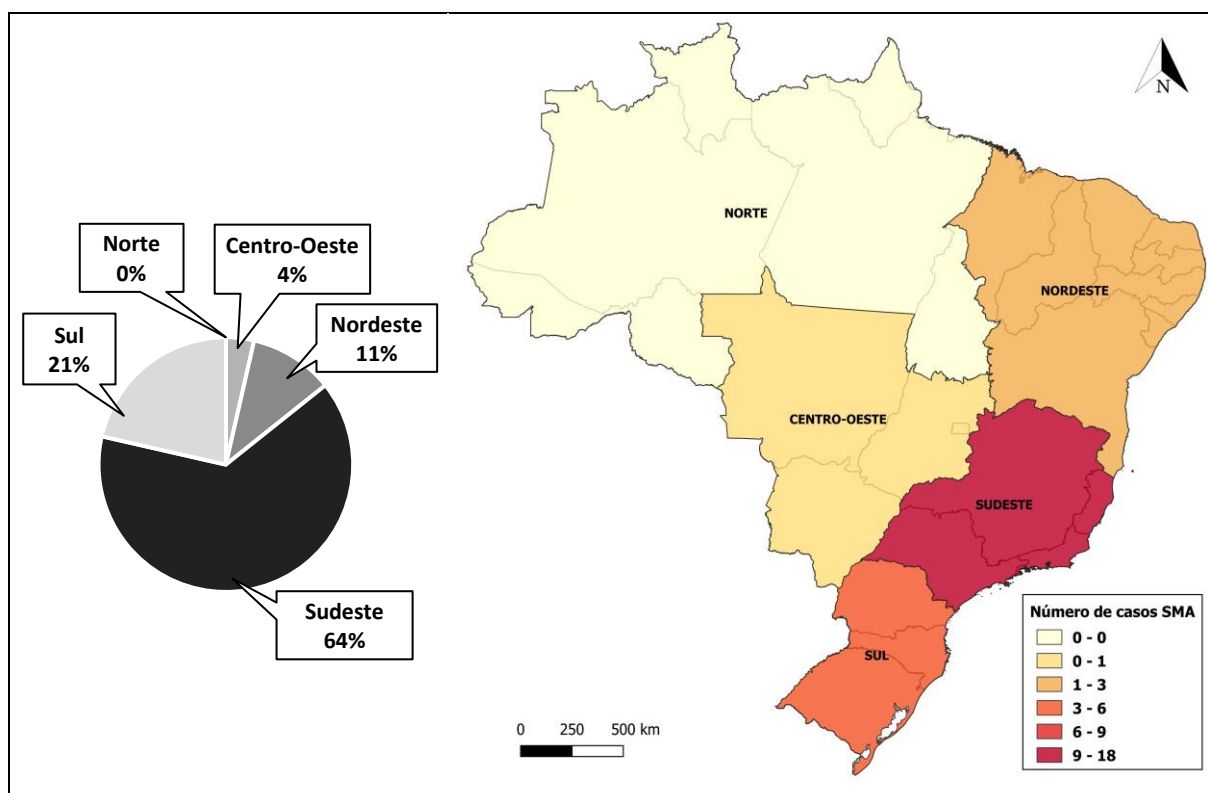
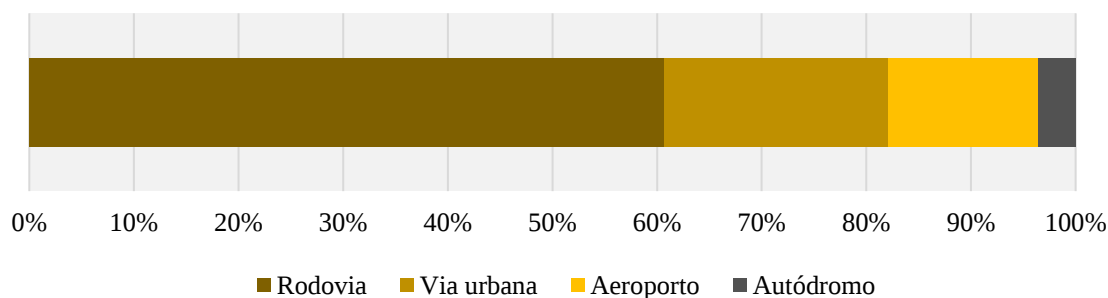


Figura 14: Números absolutos de casos de aplicação de SMA por região

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados da **Tabela 8** (2020).

É possível verificar que, de fato, a região Sudeste é responsável por mais da metade dos casos de aplicação da mistura SMA no país, o que se explica pela grande quantidade de casos e pioneirismo do Estado de São Paulo quanto à aplicação e pesquisa desse tipo de mistura. O Sul também vem se destacando pela utilização da mistura em algumas de suas rodovias federais, principalmente no eixo da BR-277, e na aplicação de SMA em vias urbanas, como na canaleta do biarticulado (BRT) da cidade de Curitiba/PR (TEIXEIRA, 2010). Salienta-se que, neste estudo, nenhum projeto de aplicação de SMA foi identificado, durante a revisão bibliográfica, na região Norte do Brasil.

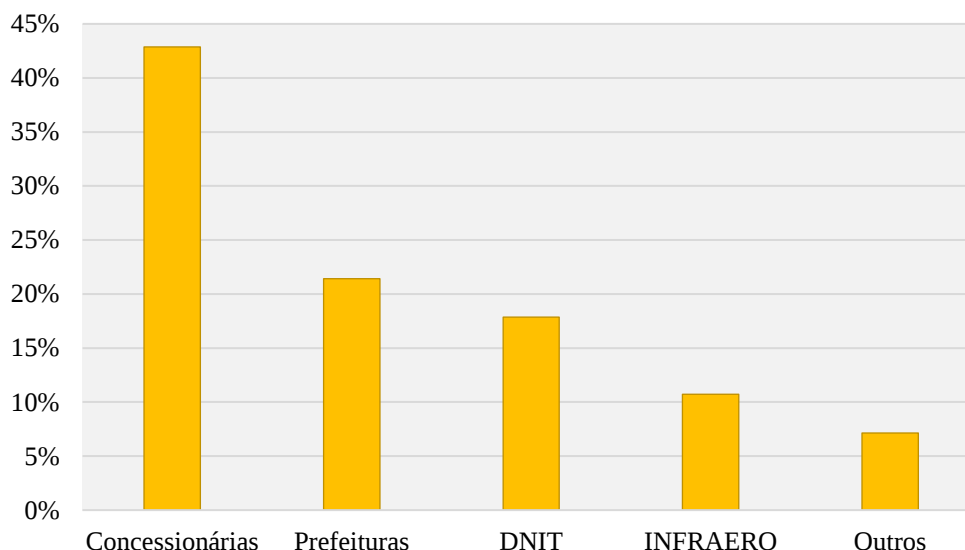
Ademais, observou-se, por meio do conjunto de dados obtidos, quais seriam as mais frequentes infraestruturas de transporte que já receberam ou vêm recebendo aplicação da mistura SMA no país, conforme é apresentado no **Gráfico 1**.

Gráfico 1: Principais infraestruturas que receberam aplicação de SMA no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados da **Tabela 8** (2020).

Percebe-se que 61% das aplicações de SMA foram realizadas em rodovias, 21% em vias urbanas, 14% em aeroportos e 4% em autódromo. Como esperado, o meio rodoviário é o principal propulsor da utilização da mistura no Brasil. No entanto, desde 2014, alguns aeroportos do país vêm demonstrando interesse na aplicação de SMA em suas pistas de pouso e decolagem, como é o caso dos aeroportos de Aracaju (2014), Belo Horizonte/Confins (2017), Vitória (2018) e Foz do Iguaçu/Cataratas (2020).

Outra questão importante identificada foi o fato de as concessionárias apresentarem relevante participação no estudo e aplicação da mistura SMA no país, sendo responsáveis por cerca de 43% dos casos identificados neste estudo, conforme mostrado no **Gráfico 2**. Essa informação é pertinente pois destaca a significativa atuação da iniciativa privada no desenvolvimento e inovação do setor rodoviário brasileiro.

Gráfico 2: Entidades que apresentaram participação no investimento e aplicação de SMA

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados da **Tabela 8** (2020).

Por outro lado, órgãos públicos como o DNIT, a Infraero e até mesmo algumas prefeituras também vêm investindo em obras de pavimentação com a utilização de SMA,

inclusive em casos mais recentes como a construção do Rodoanel Norte da cidade de São Paulo, que consta com a participação do DNIT e do Governo do Estado de São Paulo e possui previsão de conclusão para 2022 (DERSA, 2018). Já a Infraero coordenou a construção da nova pista do Aeroporto de Vitória (Eurico de Aguiar Salles) em 2018, antes de ser concedido à iniciativa privada, sendo o primeiro do país a utilizar a tecnologia SMA na construção da pista de pouso e decolagem, o que o torna referência nesta prática (FISENGE, 2019).

4.3. Casos de interesse

Os quatro casos para análise foram selecionados de acordo com a disponibilidade de material bibliográfico e a importância deles para o país quanto as inovações aplicadas em cada um. A seguir são citados os casos escolhidos, o local, o ano de execução do trecho com SMA e a justificativa relevante para a escolha de cada um:

- SP-150: Via Anchieta, pista sul (curva da onça) – 2001: Primeiro caso de execução no país de um trecho experimental de SMA em uma rodovia de alto tráfego. O estudo em questão faz parte da dissertação de mestrado do autor Rafael Marçal Martins de Reis apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (REIS, 2002);
- Avenida General Graça Lessa, Salvador (BA) – 2004: Primeiro trecho experimental urbano com asfalto-borracha utilizando SMA sem adição de fibras. O estudo em questão faz parte do artigo científico publicado na “Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia” pelos autores Sandra Oda, Guilherme Edel e José Leomar Fernandes Júnior (ODA *et al.*, 2005a);
- BR-356/RJ – 2010: Construção de um trecho experimental para avaliação do desempenho da mistura SMA com bagaço de cana de açúcar como aditivo estabilizante. O estudo em questão faz parte da tese de doutorado do autor Cláudio Luiz Dias Leal apresentada à Universidade Federal Fluminense (LEAL, 2013);
- Aeroporto de Aracaju, Sergipe – 2014: Execução pioneira de um trecho experimental de SMA em pista de pouso e decolagem. O estudo em questão faz parte da dissertação de mestrado do autor Fábio Rangel Queiroz Ramos apresentada à Universidade Federal de Ouro Preto (RAMOS, 2015).

O mapa da **Figura 15** apresenta a localização dos casos supracitados. Em seguida, os tópicos 4.3.1 à 4.3.4 descrevem um breve resumo, análise e resultados dos mesmos.



Figura 15: Localização dos casos selecionados no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

4.3.1. SP-150: Via Anchieta (curva da onça)

Em agosto de 2001 foi executado um trecho experimental de SMA na Via Anchieta, pista sul, entre as cidades de São Paulo e Santos. O objetivo do estudo era avaliar o desempenho da aplicação de mistura SMA em uma rodovia de alto tráfego, o que serviu de base para a dissertação de Reis (REIS, 2002).

A mistura asfáltica foi empregada na curva mais fechada e perigosa da via, conhecida por “curva da onça” (**Figura 16**), localizada entre o km 44+400 e km 45+000 (REIS, 2002; REIS, 2012). Vale ressaltar que este trecho é submetido a condições severas tais como: declividade acentuada, curva fechada e tráfego pesado de caminhões que seguem para o porto marítimo de Santos (RAMOS, 2015).



Figura 16: Localização do trecho experimental de SMA na Via Anchieta (SP)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Via Anchieta faz parte do sistema rodoviário Anchieta-Imigrantes que é administrado pela Concessionária Ecovias. A rodovia em questão (SP-150) possui trechos com elevado volume de cargas, com VMD (Volume Médio Diário) acima de 40.000, sendo 30% em média de veículos pesados (REIS, 2002). Segundo Reis (2002; 2012) era de interesse da Concessionária uma solução de melhor custo-benefício para a administração e para os usuários, uma vez que os sucessivos recapeamentos executados em concreto asfáltico convencional (CA) no trecho em questão apresentavam durabilidade de apenas 1 ano. Além disso e dos problemas de infraestrutura, a Via Anchieta apresentava diversos “pontos negros”, ou seja, locais onde os acidentes rodoviários ocorriam em maior frequência, sendo a curva da onça um desses locais.

Dessa forma, em função do tráfego intenso, pesado, e da geometria do trecho experimental adotou-se a faixa 0/11S da especificação alemã, indicada para tráfego pesado ou solicitações especiais, com o uso de asfalto modificado por polímero (AMP-2), contendo 5 a 6% de SBS, a um teor de ligante de 6,1%, fibra de celulose a um teor de 0,5%, uso de fíler composto 70/30 (70% pó calcário + 30% cal hidratada CHI) a um teor de 7,5%, volume de vazios de 4,0% e a espessura final do revestimento em pista foi de 4,0 cm (REIS, 2002).

Para a aplicação da massa asfáltica de SMA no trecho, o autor afirma que houve uma preparação prévia da superfície por meio de reparos como selagem de trincas e remendos. Em seguida, o substrato a ser revestido foi limpo e seco para que se pudesse executar a pintura de

Vale destacar que o trecho está localizado em um ponto de comércio de acessórios de veículos e oficinas mecânicas, sendo que a Pista 1 (sentido Bonocô - Vasco da Gama) é usada como acesso (entrada/saída) de veículos (cerca de 150 m). Por esse motivo é uma zona de carregamento excessivo a baixa velocidade, além de ponto de frenagem de veículos devido à existência de uma curva e de um semáforo no fim do trecho. Já a Pista 2 (sentido contrário) está no fim de uma curva, também com entrada e saída de veículos devido à existência de concessionárias, o que implica em um trecho de desaceleração e aceleração de veículos (ODA *et al.*, 2005a; 2005b).

O material asfáltico utilizado foi o CAPFLEX B, fornecido pela Petrobras Distribuidora S.A., que tem como base o CAP 50/60 e borracha moída de pneus inservíveis (ODA *et al.*, 2005b). Inicialmente, conforme recomendações da especificação americana AASHTO MP8-01 – 9,5 mm, a dosagem do SMA foi realizada empregando-se fibra. No projeto, foi utilizada uma fibra de poliéster proveniente de pneus de automóveis e caminhões de uma empresa localizada no Rio Grande do Sul (distante 3.200 km de Salvador, BA). Entretanto, tornou-se inviável o uso da fibra, pois o custo de transporte iria ficar cerca de 20 vezes o valor do produto. Por esse motivo, e considerando-se, também, que o asfalto-borracha é mais viscoso que o CAP sem borracha, os autores optaram por reduzir o teor de ligante asfáltico (de 6,8% para 6,4%) e aplicar o SMA sem fibra (ODA *et al.*, 2005a).

A granulometria adotada para a mistura SMA foi a de especificação americana (AASHTO MP8-01), os agregados utilizados (brita 5/8”, brita 3/8” e pó de pedra) foram obtidos em pedreiras da região de Salvador (BA), o filer (material de enchimento que passa na peneira #200) utilizado foi o pó calcário, o volume de vazios da mistura foi de 3,9% e a espessura da camada acabada nas duas pistas foi de 4,0 cm (ODA *et al.*, 2005a; 2005b).

Antes do espalhamento da mistura SMA em pista foi realizada uma pintura de ligação com emulsão asfáltica (RR-1C) e, apesar de altamente recomendável, não foi realizada a fresagem de material subjacente antes da aplicação do novo revestimento. Isso aconteceu, pois, a Prefeitura de Salvador (PMS), responsável pela fresadora, não conseguiu dispor uma a tempo, o que impossibilitou a execução do serviço de fresagem (ODA *et al.*, 2005a).

Os autores concluíram que após a avaliação técnica do pavimento, realizada quatro meses após a sua execução, por meio dos ensaios de mancha de areia, pêndulo britânico e permeabilidade, o revestimento SMA com asfalto-borracha conferiu ganhos de atrito e drenabilidade superficial, garantindo, além disso, boa visibilidade e redução da aquaplanagem em dias de chuva, tornando o pavimento mais seguro e confortável. Observou-se também uma redução do nível de ruído gerado pelo conforto pneu-pavimento (ODA *et al.*, 2005b).

Com relação à durabilidade, à época o pavimento encontrava-se perfeito, sem nenhuma deformação permanente, exceto em alguns locais (três pequenos trechos) onde os defeitos identificados pelos autores foram causados exclusivamente pelo mau estado da camada subjacente que deveria ter sido removida (fresada) previamente à aplicação da camada de reforço de SMA. Sendo assim, os defeitos em excesso do revestimento antigo acabaram refletindo em alguns locais do novo (ODA *et al.*, 2005b).

4.3.3. BR-356, São João da Barra (RJ)

Em 2010 realizou-se a construção de um trecho experimental de SMA com bagaço de cana de açúcar como aditivo estabilizante na BR-356, na pista sentido Campos – Atafona (próximo ao município de São João da Barra - RJ), com cerca de 50 m de extensão e largura de 3,5 m (**Figura 18**). O objetivo principal do trabalho foi estudar o aproveitamento do bagaço de cana de açúcar como aditivo estabilizante nas misturas asfálticas do tipo SMA, produzida com asfalto modificado por borracha moída de pneus, em substituição à fibra de celulose. Esse tema serviu de base para a tese de Leal (LEAL, 2013).

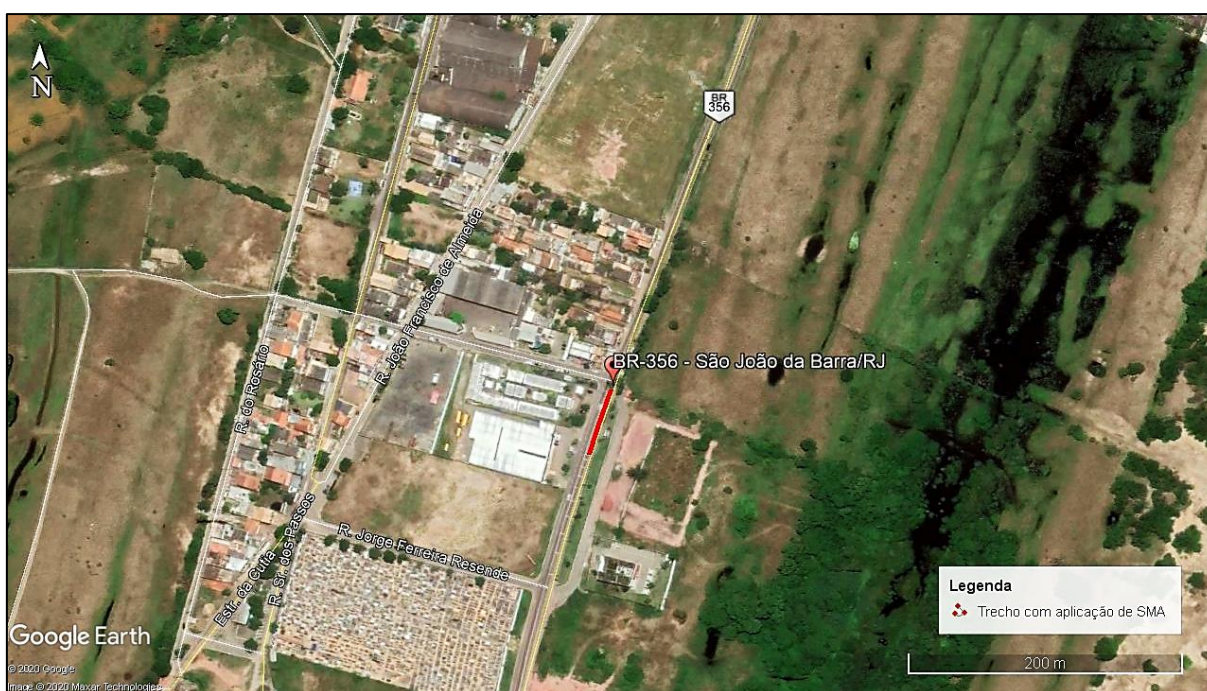


Figura 18: Localização do trecho experimental de SMA na BR-356 (RJ)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para a seleção do trecho experimental, o autor realizou um inventário da BR-356 entre o km 146,5 na cidade de Campos dos Goytacazes (RJ) até o quilômetro 187,7 em São João da Barra (RJ), numa extensão total de 41,2 km. Nesse trecho, a rodovia apresentava pista simples,

com revestimento em concreto asfáltico apresentando alto grau de degradação, além de possuir grandes segmentos sem acostamento (LEAL, 2013).

Além disso, o autor destaca que a construção do Complexo Portuário do Açu (RJ), a partir de 2007, gerou elevado volume de tráfego que comprometeu ainda mais o pavimento da rodovia BR-356. Contudo, o trecho selecionado para a aplicação da mistura (**Figura 18**) apresentava qualidade estrutural regular, dessa maneira a aplicação do SMA funcionou como reforço do pavimento.

A faixa granulométrica escolhida pelo autor para a dosagem do SMA foi a 9,5 mm da NAPA (2002), especificação americana. Para a composição da mistura asfáltica, utilizou-se o asfalto borracha CAPFLEX B a um teor de 6,7%, o fíler usado foi a cal hidratada comercial a um teor de 6,7% e, em substituição a fibra de celulose, foi utilizado o bagaço de cana de açúcar a um teor de 0,3%. Além disso, o volume de vazios da mistura foi de 4,0% e a espessura final da camada de SMA espalhada em pista foi de 4,0 cm (LEAL, 2013).

Sobre o processo de execução e aplicação da mistura, destaca-se que a fibra do bagaço de cana de açúcar foi incorporada à mistura diretamente no silo de fíler de forma manual, sem formação de grumos, segregação ou escorrimto. Para a aplicação da mistura em campo, foi realizado apenas a limpeza do local e executado, em seguida, uma pintura de ligação com emulsão asfáltica sobre o revestimento antigo (LEAL, 2013).

Depois da construção do trecho experimental, foram realizados ensaios para avaliação do revestimento SMA, como os ensaios de mancha de areia, drenabilidade e pêndulo britânico. Sendo assim, Leal (2013) pôde concluir que a utilização do bagaço de cana de açúcar, um resíduo da indústria, pode ser uma alternativa viável para substituição da fibra de celulose, muitas vezes importada, nas misturas asfálticas SMA. Além de reduzir o custo de produção do revestimento asfáltico, o autor constatou que o SMA com bagaço de cana de açúcar apresentou características mecânicas semelhantes às misturas feitas com fibra de celulose.

Ademais, os ensaios de afundamento na trilha de roda e deflexões com Viga Benkelman, realizados dezoito meses após a construção do trecho experimental, demonstraram integridade do pavimento e redução das deflexões, não sendo identificado nenhum tipo de deformação permanente (LEAL, 2013).

4.3.4. Aeroporto de Aracaju (SE)

Em abril de 2014 foi executado o primeiro trecho experimental de SMA na pista de pouso e decolagem (PPD 11-29) do Aeroporto de Aracaju (SE) com as dimensões de 250,00 m de extensão por 5,00 m de largura, na cabeceira 29 (**Figura 19**), interditada em 450,00 m para

que não houvesse interferência nas operações do aeroporto. O estudo desenvolvido tinha como objetivo avaliar a implantação de SMA em áreas de movimento das aeronaves, como na pista de pouso e decolagem, pista de táxi e pátio de estacionamento de aeronaves, para o projeto de reforma e ampliação do Aeroporto, o que serviu de base para a dissertação de Ramos (RAMOS, 2015).



Figura 19: Localização do trecho experimental de SMA no Aeroporto de Aracaju (SE)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Na época do projeto, o Aeroporto ainda era de responsabilidade da Infraero, sendo concedido à iniciativa privada por meio do leilão realizado em março de 2018 junto com outros cinco aeroportos regionais (Recife, Maceió, Campina Grande, João Pessoa e Juazeiro do Norte) que compunham o “Bloco Nordeste” do Governo Federal (INFRAERO, 2020).

Para o projeto da mistura asfáltica SMA aplicada, o autor afirma que se baseou na norma brasileira rodoviária ET-DEP00/031 - DER-SP para os controles de materiais, produção e aplicação do SMA, pelo fato de não existir uma norma brasileira específica para aplicação de SMA em pavimentos aeroportuários (RAMOS, 2015).

Dessa forma, a faixa granulométrica adotada foi a faixa I da referida norma, sendo essa recomendada para tráfego pesado ou solicitações especiais. Ademais, o autor optou por utilizar o ligante asfáltico modificado por polímero CAPFLEX 60-85-E, fornecido pela Petrobras, a um teor de 5,3% na mistura, o fíler utilizado foi a cal hidratada a um teor de 2,0%, a fibra de celulose foi adotada a um teor de 0,5%, o volume de vazios da mistura usinada foi de 4,8% e a espessura final da capa de SMA aplicada em pista foi de 4 cm (RAMOS, 2015).

Para a produção da mistura asfáltica SMA, foi instalada, dentro do sítio aeroportuário, uma usina móvel do tipo tambor-secador-misturador. Antes da aplicação da mistura, a superfície da pista foi preparada por meio da fresagem, prevista para o trecho de restauração, a qual tinha o objetivo de remover a camada mais superficial do revestimento existente e obter as cotas de projeto para possibilitar a correção do greide (geometria) da pista com a aplicação da nova camada de SMA. Em seguida, a superfície foi limpa para que fosse executada a pintura de ligação com emulsão asfáltica modificada por polímero, com vista a dar aderência entre o revestimento existente e a nova camada sobrejacente de SMA (RAMOS, 2015).

Após a execução do trecho experimental, foram extraídos quatro corpos de prova para a determinação do grau de compactação do trecho. Também foram realizados os ensaios de mancha de areia, coeficiente de atrito com o equipamento *Grip Tester* e avaliação deflectométrica com Viga Benkelman (RAMOS, 2015).

Por fim, segundo o autor, o trecho experimental do Aeroporto de Aracaju, atendeu a todos os requisitos exigidos nas especificações técnicas do DER-SP (ET-DEP00/031) e foi aprovado já que todos os parâmetros esperados para a mistura foram atingidos. Sendo assim, após aprovação do trecho, o SMA produzido na obra com o traço estudado foi liberado pela fiscalização para ser executado nos pavimentos do aeroporto, tanto nos trechos de restauração quanto nos trechos de ampliação.

Entretanto, Ramos (2015) afirma que, durante o controle de qualidade realizado diariamente na obra, foi identificado a ocorrência de alguns pontos localizados de desagregação do pavimento, onde os pilotos fizeram manobras de “back track” (giro das aeronaves) fora das áreas apropriadas para esse tipo de manobra (área de giro). Dessa forma, o SMA aplicado mostrou uma certa deficiência quanto à resistência aos esforços de torção aplicados pelas aeronaves nesses pontos.

O autor conclui que, de maneira geral, o SMA atendeu às expectativas e se mostrou viável e aplicável aos pavimentos aeroportuários indo ao encontro com os resultados esperados, como melhoria das condições de aderência (coeficiente de atrito e macrot textura), melhoria na drenagem superficial e no conforto ao rolamento. Afirma, ainda, que são esperados resultados a médio e longo prazo, como ganhos estruturais, ganhos no desempenho funcional, aumento da vida útil dos pavimentos e redução dos níveis de manutenção. Juntos, esses ganhos são responsáveis pela melhoria das condições de segurança operacional do Aeroporto (RAMOS, 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da frota de veículos no Brasil e o crescente aumento do volume de tráfego nas rodovias do país nos últimos anos vêm exigindo estudos na área de pavimentação a fim de desenvolver estruturas mais resistentes, duráveis e economicamente viáveis. A degradação do pavimento está associada à diversas patologias, dentre as quais destacam-se as deformações permanentes, fissuras, trincas, retração térmica e desagregação.

A mistura asfáltica do tipo SMA surgiu como uma solução de revestimento que garantisse maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento, maior durabilidade e maior resistência à fadiga provocada pelo tráfego atuante. Desde então, a mistura tem-se popularizado em vários países, sendo empregada, majoritariamente, em rodovias de tráfego elevado e intenso.

De maneira coincidente, os países que apresentam os melhores indicadores em relação ao desenvolvimento sustentável e a redução dos acidentes no trânsito são, também, os que priorizam ações de manutenção e ostentam as melhores condições de infraestrutura de transporte (REIS, 2010 *apud* TAVARES, 2012).

Nesse contexto, o presente trabalho levantou os principais projetos de aplicação de SMA no Brasil sendo possível verificar que, de fato, a utilização desse tipo de mistura asfáltica é relativamente nova no país. Enquanto a primeira pavimentação com SMA no Brasil foi realizada no ano de 2000 nos serviços de recapeamento do autódromo de Interlagos (São Paulo) para o circuito de Fórmula 1 (EL-HAGE, 2012), somente em 2001 foi executado o primeiro trecho experimental de SMA em uma rodovia de alto tráfego e complexidade no Estado de São Paulo (REIS, 2002).

Em comparação, diversos países Europeus, os Estados Unidos e a China começaram a empregar o SMA em suas obras de pavimentação desde a década de 80 e 90, respectivamente (BLAZEJOWSKI, 2011). Contudo, segundo El-Hage (2012), observou-se que no Brasil, após o início do programa de concessões rodoviárias da Associação Brasileira de Concessões Rodoviárias (ABCR), a utilização das misturas SMA viu-se impulsionada graças à demanda por tecnologias que, além de apresentarem um bom desempenho, pudessem oferecer maior durabilidade e menos intervenções durante sua vida útil, otimizando assim os investimentos realizados nas rodovias concedidas à iniciativa privada.

Portanto, diante dos casos de aplicação de SMA identificados neste estudo e da análise mais específica dos resultados obtidos nos quatro casos selecionados no item 4.3, conclui-se que o SMA tem-se mostrado como uma mistura promissora na pavimentação brasileira, seja em rodovias, vias urbanas ou aeroportos, haja vista a performance satisfatória de

comportamento funcional e estrutural que vem apresentando nos trechos já executados. Dos casos selecionados, cabe destacar os ganhos de segurança e conforto ao rolamento gerados pelo emprego da mistura SMA, a qual conferiu aumento do atrito pneu/pavimento, maior drenabilidade superficial reduzindo a aquaplanagem e melhorando a visibilidade do pavimento, redução do nível de ruído ao rolamento e maior vida útil de serviço devido à diminuição dos defeitos superficiais.

Em suma, entende-se neste trabalho que, apesar do maior custo inicial de implantação, a mistura asfáltica SMA pode ser uma alternativa de revestimento com melhor custo-benefício se comparada às misturas asfálticas convencionais, como o CBUQ, visto que o elevado custo inicial despendido em agregados maiores e de melhor qualidade, fibras estabilizantes e na maior quantidade de ligante (CAP ou AMP) utilizados na mistura, é compensado a médio e longo prazo pelo aumento da durabilidade e redução dos níveis de manutenção do pavimento.

Para trabalhos futuros associados aos temas abordados, sugere-se maior aprofundamento das pesquisas quanto às características de usinagem da mistura SMA, a adição de fibras e natureza delas, e a comparação, por meio de ensaios mecânicos, dos corpos de prova da mistura moldados pelos métodos Marshall e Superpave.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO MP 8-02** : Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA). Washington, 2008.

ADAM, J-P. **Roman building: materials and techniques**. London: B.T. Batsford, 1994.

ARTERIS - AUTOPISTA LITORAL SUL. **Avaliação de Métodos de Dosagem de Misturas Asfálticas e sua Relação com as Propriedades Mecânicas**. Relatório Final, Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, 2014.

AZEREDO, L. B. **Verificação do potencial de uso de resíduos siderúrgicos provenientes de diferentes etapas do processo de refino do aço como agregados em misturas asfálticas do tipo SMA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. 118 f. 2018.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BARTELLI, G. **Estudo de Impacto de Vizinhança – EIV (Minassul Comércio de Areia, Brita e Pré Moldados)**. Sustentare Soluções Ambientais Ltda. Farroupilha-RS, 2018.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, 1ª Edição PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

BERNUCCI, L. B.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. 1ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice**. Taylor & Francis Group. Boca Ratón – FL, USA, CRC Press, 2011.

CELAYA, B.J.; HADDOCK, J.E. **Investigation of Coarse Aggregate Strenght for Use in Stone Matrix Asphalt**. Final Report. FHWA/IN/JTRP. Purdue University. West Lafayette-IN, 2006. 73 p.

CHEVALLIER, R. **Roman roads**. Berkeley, California: UP, 1976.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerencial**. Confederação Nacional do Transporte; Serviço Social do Transporte; Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

COSTA, L. F. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. 161 f. 2017.

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; JÚNIOR, J. L. F; MOTTA, L. M. G. **Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do Método Bailey**. XVIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, SC, 2004.

DER-SP - DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/031 - Especificação Técnica - Concreto asfáltico tipo SMA**. São Paulo, Fev/2007.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro (RJ), 1995.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

DERSA - DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S/A. **Rodoanel Norte de São Paulo**. 2018. Disponível em: <http://www.dersa.sp.gov.br/empreendimentos/rodoanel-norte/sobre/>. Acesso em: 19/07/2020.

EL-HAGE, R. B. **Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. 174p. 2012.

INFRAERO - EMPRESA BRASILEIRA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA. **Aeroporto Internacional Santa Maria – Aracaju**. 2020. Disponível em: <https://www4.infraero.gov.br/aeroportos/aeroporto-internacional-santa-maria-aracaju/>. Acesso em: 08/07/2020.

ENGELKE, D. C.; KERN, C.; COLPO, G. B.; JOHNSTON, M. G.; CERATTI, J. A. P.; ZOCAL, R. **Estudo de Aplicação de Aditivo Surfactante em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. XXXII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Gramado, RS, 2018.

FISENGE - FEDERAÇÃO INTERESTADUAL DE SINDICATOS DE ENGENHEIROS. **Senge-ES: Palestra aborda inovações na Engenharia Rodoviária**. 2019. Disponível em: <https://fisenge.org.br/index.php/noticias/item/6602-senge-es-palestra-aborda-inovacoes-na-engenharia-rodoviaria-participe>. Acesso em: 19/07/2020.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HAGEN, V.W. **A estrada do sol**. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1955.

ILOS - ESPECIALISTAS EM LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. **Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos (por Henrique Alvarenga)**. 21/08/2020. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/matriz-de-transportes-do-brasil-a-espera-dos-investimentos/#>. Acesso em: 21/10/2020.

LEAL, C. L. D. **Aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense. 219 f. 2013.

LEANDRO, R. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Corpos de Prova de Misturas Asfálticas a Quente Resultantes de Diferentes Métodos de Compactação**. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

LIMA, C. **Polímeros**. 14/03/2019. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/quimica/polimeros> . Acesso em: 29/07/2020.

MARGARY, I. **Roman roads in Britain**. London: John Baker, 1973.

MASCARENHAS NETO, J.D. **Methodo para construir as estradas em Portugal**. 1790. Edição fac-similada, impressa em 1985 a partir do original do Arquivo-Biblioteca do ex-Ministério das Obras Públicas.

MOURÃO, F.A.L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, COPPE/UFRJ, 2003.

NAPA - NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice**. Quality Improvement Series 122. Lanham, Maryland, 57p. 2002.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação Laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

ODA, S.; EDEL, G.; FERNANDES JR, J. L. . **Primeiro trecho experimental urbano de SMA com asfalto-borracha sem fibras: projeto, construção e avaliação**. Revista Minerva, São Carlos, SP, v. 2, n.2, p. 203-216, 2005a.

ODA, S.; EDEL, G.; NASCIMENTO, L. A. H. do . **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia**. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005b.

PIERCE L.M. **Stone Matrix Asphalt – SR-524, 64th Avenue West to I-5**. Report Washington State Transportation Commission. Washington, 2000.

PINTO, S. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais**. Rio de Janeiro, 2001, 259 p.

PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

QUINTUS, H. V.; RYAN, J. **Assessing the Cost-Effectiveness of Stone Matrix Asphalt Overlays**. Brief prepared by CTC & Associates LLC. Wisconsin Highway Research Program. February 2007.

RAMOS, K.O. **Estudo sobre Mistura Asfáltica tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para Pavimento Aeroportuário**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 198p, 2012.

RAMOS, F. R. Q. **Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em pavimentos aeroportuários - estudo de caso: Aeroporto de Aracaju-SE**. Ouro Preto, MG. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), 196p, 2015.

REIS, R. M. M. **Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2002.

REIS, R. M. M. **Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2012.

SAUNIER, B.; DOLFUS, C.; GEFFROY, G. **Histoire de la locomotion terrestre**. v. II. Paris: L'illustration, 1936.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. v.1., il.

SERRA, G. **Estudo das Características Mecânicas do Asfalto com Adição de Resíduos de Polietileno Tereftalato (PET)**. Monografia apresentada no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, 2017.

SILVA, C.C.; GOMES, J.F. **Análise de Desempenho Funcional e Mecânico do Concreto Asfáltico tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para Pavimentos Aeroportuários**. Trabalho de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p. 2015.

SILVA, P. B. **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2005.

SIURB-SP - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Tabelas de Custos Data-Base Janeiro de 2020 – Infraestrutura Urbana – Custos Unitários (arquivo em Excel)**. 2020. Disponível em : https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/?p=297812#Tabela_de_custos. Acesso em: 01/06/2020.

SPECHT, L.P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TAVARES, D. S. **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico**. Dissertação de mestrado - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2012.

TEIXEIRA, L. H. **Apresentação CBB Asfaltos – 13º Encontro Técnico DER-PR**. Paraná, julho/2010.

TUCHUMANTEL, O. **Revestimentos asfálticos SMA – 6º Encontro Técnico DER-PR**. Paraná, maio/2008.

VASCONCELOS, K.L.; SOARES, J.B. **Efeito do Procedimento de Dosagem no Teor de Projeto e Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Universidade Federal do Ceará – UFC, 2004.

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

ZTV Asphalt - StB 01. **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt**. Ausgabe 2001. FGSV Verlag Köln, 2001.