UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LEIDYANNE DE BORTOLI AZEREDO

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

VITÓRIA
2018

LEIDYANNE DE BORTOLI AZEREDO

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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.ª Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.

VITÓRIA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Azeredo, Leidyanne De Bortoli, 1985-

A993f 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 / Leidyanne De Bortoli Azeredo. – 2018.

118 f. : il.

Orientador: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Agregados (Materiais de construção) – Siderurgia. 2. Concreto asfáltico. 3. Escória. 4. Coproduto de aciaria. 5. Misturas asfálticas. 6. Mistura SMA (Stone matrix asphalt). I. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

Elaborada por Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

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

Leidyanne De Bortoli Azeredo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **24 de agosto de 2018** por:

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES
Por meio de vídeo conferência

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES

Profa. Ph.D. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFC

Vitória – ES, agosto de 2018

Dedico aos meus pais, meu esposo e minha irmã, pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por iluminar o meu caminho durante toda a vida.

Aos meus maravilhosos pais, Oromasio e Domingas um agradecimento muito especial. Obrigada pelos ensinamentos e pelo infinito amor. Agradeço por terem me dado à oportunidade de crescer intelectualmente e poder alcançar meus objetivos. A minha irmã, Dhiênifer por me ensinar a encarar a vida com aquilo que temos, conquistando aos poucos aquilo que desejamos.

Ao meu esposo, Jean, por todo amor, motivação e confiança que depositou em mim. Agradeço pelo grande apoio, companheirismo e paciência. Obrigada por aceitar esse desafio junto comigo.

A minha orientadora e mentora Jamilla, por acreditar na pesquisa e na minha capacidade de realizá-la, bem como pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo desta jornada.

Agradeço ao professor Patrício J. M. Pires e a professora Verônica T. F. Castelo Branco, pela disponibilidade em integrar a banca avaliadora.

A toda equipe dos laboratórios de Geotecnia e Materiais de Construção Civil da UFES. Á Natália, Sidineidy, Henrique, Breno, Loriato, Márcio, pelo auxilio na realização dos ensaios. Ao Felipe e ao Adenis pela organização e pelo auxilio em momentos críticos. A todos os integrantes do grupo de estudos em pavimentação (GEP-UFES), que se tornaram grandes amigos ao longo desta trajetória.

A ArcelorMittal Tubarão, que possibilitou a realização deste trabalho com o auxilio financeiro neste último ano. Aos fornecedores dos materiais, Brasitália, Betunel, Único Asfaltos e a ArcelorMittal Tubarão.

Enfim, meu muito obrigado a todos que de alguma forma tenha contribuído para a concretização de mais um sonho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Oliver Wendell Holmes. Jr.

RESUMO

O concreto asfáltico do tipo SMA (S*tone Matrix Asphalt*), bastante utilizado em países desenvolvidos, é uma interessante alternativa de revestimento de pavimentos. No entanto, em razão da alta interação entre os agregados, a mistura do tipo SMA requer uso de agregados com características que nem sempre estão disponíveis nas reservas naturais brasileiras, sendo umas das principais a resistência à abrasão, que deve ser menor do que 30%. Dada sua resistência mecânica comprovada, o uso do agregado siderúrgico pode ser uma alternativa para o projeto de misturas SMA. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de uso de agregados siderúrgicos na composição de misturas asfálticas do tipo SMA. A metodologia da pesquisa promoveu uma avaliação das características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas e mecânicas dos agregados naturais e siderúrgicos utilizados bem como a caracterização mecânica de misturas SMA, por meio de ensaio de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e resistência à abrasão. Foram dosadas SMA variando-se o percentual de agregado siderúrgico na composição (30% e 50%), a faixa granulométrica (TMN 19mm e TMN 16mm) segundo normas americana e alemã, o tipo de material de enchimento (filer natural e filer siderúrgico de KR) e o uso de fibra de celulose. A caracterização individual do agregado siderúrgico mostrou sua viabilidade para ser utilizado em obras de pavimentação atendendo aos requisitos das normas utilizadas. Os resultados da dosagem mostraram que o uso de filer KR ou de fibra promove uma correlação positiva entre o volume vazio e o aumento de VMA, VCA e estabilidade Marshall. Os resultados demonstraram que o uso de 50% agregado siderúrgico possibilita uma considerável melhora no comportamento físico e mecânico das misturas SMA. Além das vantagens técnicas, o uso de agregados siderúrgicos proporciona ganho ambiental, com redução da deposição de resíduos sólidos no ambiente e minimização de extração de recursos naturais não renováveis.

Palavras-chave: SMA; agregado siderúrgico; escória de aciaria; KR e LD; mistura asfáltica.

ABSTRACT

SMA (Stone Matrix Asphalt) concrete, widely used in developed countries, is an interesting alternative of floor covering. However, due to the high interaction between the aggregates, the mixture of the SMA type requires the use of aggregates with characteristics that are not always available in the Brazilian natural reserves, being one of the main resistance to abrasion, which should be less than 30%. Given its proven mechanical strength, the use of the steel aggregate may be an alternative to the SMA blends design. Thus, the objective of this work was to evaluate the potential of using steel aggregates in the composition of asphalt mixtures of the SMA type. The methodology of the research promoted an evaluation of the physical, chemical, mineralogical, morphological and mechanical characteristics of the natural and steel aggregates used as well as the mechanical characterization of SMA mixtures, through a Marshall stability and creep test, diametral compression tensile strength, damage by inhaled moisture, modulus of resilience and abrasion resistance. SMA was determined by varying the percentage of steel aggregates in the composition (30% and 50%), the grain size range (TMN 19mm and TMN 16mm) according to American and German standards, the type of filler material (natural filer and steel filer of KR) and the use of cellulose fiber. From the results of the tests it was concluded that the steel aggregate in SMA mixes meets the requirements of the standards used. The dosage results showed that the use of KR filer or fiber promotes a positive correlation between void volume and increase in VMA, VCA and Marshall Stability. The results showed that the use of 50% steel aggregate allows a considerable improvement in the physical and mechanical behavior of the SMA mixtures. In addition to the technical advantages, the use of steel aggregates provides environmental gain, reducing the deposition of solid waste in the environment and minimizing the extraction of non-renewable natural resources.

Keywords: Stone matrix asphalt; steel slag aggregate; steel slag; KR and LD; hot mix asphalt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (km/1.000 km^2)..... 16
Figura 2 - Representação do SMA..... 25
Figura 3 - Efeito das fibras no G_{mb}, Vv, VMA e Estabilidade Marshall 28
Figura 4 - Limites superior e inferior das faixas granulométricas dessa pesquisa 31
Figura 5 - Pátio de escória siderúrgica..... 35
Figura 6 - Fluxo simplificado de produção..... 35
Figura 7 - Acerita 38
Figura 8 - Diagrama esquemático do processo de tratamento da escória..... 39
Figura 9 - Percentual acumulado de expansão (Escória LD) 39
Figura 10 - Difractograma do resíduo LD 42
Figura 11 - Curva granulométrica SMA -13..... 43
Figura 12 - Superfície porosa da escória (a) e basalto (b). 44
Figura 13 - Curva de compressão versus deformação..... 45
Figura 14 - Comparação quanto à fluência de diferentes misturas a 40°C..... 46
Figura 15 - Valores de fluência. 47
Figura 16 - TSR (%) e espessura do filme 48
Figura 17 - Resistência à deformação SMA 11 S..... 49
Figura 18 - Esquema geral da parte experimental. 50
Figura 19 - Vista da pedreira..... 52
Figura 20 - Destaque para o parque de resíduos da ArcelorMittal Tubarão 52
Figura 21 - Coleta dos agregados siderúrgicos..... 53
Figura 22 - Distribuição Granulométrica dos agregados dessa pesquisa..... 54
Figura 23 - Equipamento utilizado no ensaio de finura e volumes gerados..... 55
Figura 24 - Ensaio da determinação da massa específica real 56
Figura 25 - Ensaio para determinação da massa específica dos agregados miúdos. 57
Figura 26 - Etapas do ensaio de densidade da Escória LD..... 58
Figura 27 - Ensaio de Equivalente de Areia..... 59
Figura 28 - Etapas do ensaio de massa unitária pelo método C 60
Figura 29 - Ensaio de abrasão “Los Angeles” (50%LD). 61
Figura 30 - Procedimento de Análise no AIMS..... 63
Figura 31 - Resultados das propriedades morfológicas pelo AIMS 64

Figura 32 - Ensaio de durabilidade (LD e KR) 66
Figura 33 - Ensaio de Adesividade 67
Figura 34 - Difratograma de raios X – LD 68
Figura 35 - Difratograma de raios X – KR. 68
Figura 36 - Avaliação da Expansibilidade 71
Figura 37 - Curva de viscosidade Brookfield versus Temperatura. 73
Figura 38 - Curvas granulométricas desta pesquisa 74
Figura 39 - Fibra de celulose em pellet 75
Figura 40 - Agr. siderúrgico peneirado e separado para as misturas. 76
Figura 41 - Ensaio Marshall 76
Figura 42 - Detalhe de aberturas no exterior, parafilme e cilindro. 80
Figura 43 - Vv e VMA versus teor de ligante - SMA_30%LD_PP_s/fibra 81
Figura 44 - VCAMIX e VCADRC versus teor de ligante - SMA_30%LD_PP_s/fibra 82
Figura 45 - Vv e VMA versus teor de ligante SMA_30%LD_PP_c/fibra 82
Figura 46 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} versus teor de ligante - SMA_30%LD_PP_c/fibra. 82
Figura 47 - Vv e VMA versus teor de ligante - SMA_30%LD_KR_s/fibra 83
Figura 48 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} versus teor de ligante - SMA_30%LD_KR_s/fibra 83
Figura 49 - Vv e VMA versus teor de ligante - SMA_50%LD_PP_s/fibra 83
Figura 50 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} versus teor de ligante - SMA_50%LD_PP_s/fibra. 84
Figura 51 - Vv e VMA versus teor de ligante - SMA_50%LD_PP_c/fibra 84
Figura 52 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} versus teor de ligante - SMA_50%LD_PP_c/fibra 84
Figura 53 - Vv e VMA versus teor de ligante -SMA_50%LD_KR_s/fibra 85
Figura 54 - VCAMIX e VCADRC versus teor de ligante 85
Figura 55 - Vv e VMA versus teor de ligante 85
Figura 56 - VCAMIX e VCADRC versus teor de ligante 86
Figura 57 - Estabilidade e Fluência Marshall. 89
Figura 58 - Ensaio de tração por compressão diametral (NBR 15087:2012) 90
Figura 59 - Ensaio de Desgaste por abrasão Los Angeles 91
Figura 60 - Volume de vazios das misturas 94
Figura 61 - VCA da mistura de agregados 95
Figura 62 - VMA da mistura de agregados 95
Figura 63 - Resultado gráfico da Estabilidade Marshall 96
Figura 64 - Ensaio de Escorrimento 98
Figura 65 - Resultado gráfico do ensaio de RT 99

Figura 66 - Resultado gráfico do desgaste por Abrasão 100
Figura 67 - Ensaio de Abrasão 101
Figura 68 - Resultado gráfico do Dano por umidade 103
Figura 69 - Ensaio de Dano por umidade induzida 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais projetos SMA no Brasil 23
Tabela 2 - Especificação de granulometria SMA 19 mm NMAS (NAPA QIS 122) 30
Tabela 3 - Especificação de granulometria para a SMA 16 B S (H AL ABI 2015) 30
Tabela 4 - Requisitos de dosagem SMA (NAPA QIS 122) 31
Tabela 5 - Requisitos SMA 16 B S (H AL ABI 2015) 32
Tabela 6 - Composição química das escórias de aciaria LD 41
Tabela 7 - Requisitos de acordo com H AL Abi 2015 51
Tabela 8 - Finura 55
Tabela 9 - Resultados da determinação da massa específica real do filer 56
Tabela 10 - Resultados da determinação da massa específica do agregado miúdo 57
Tabela 11 - Resultados das densidades e absorção dos agregados graúdos 58
Tabela 12 - Equivalente de areia 59
Tabela 13 - Massa unitária nos estados solto e compactado 60
Tabela 14 - Resultados da resistência mecânica (Abrasão “Los Angeles”) 61
Tabela 15 - Classificação morfológica dos agregados usando AIMS 62
Tabela 16 - Resultados de classificação morfológica AIMS 63
Tabela 17 - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio 66
Tabela 18 - Componentes químicos das escórias estudadas 69
Tabela 19 - Resultado do índice de fenóis e limites da escória de dessulfuração (KR) 70
Tabela 20 - Especificações do CAP 50/70 72
Tabela 21 - Granulometria da mistura SMA 16mm (SMA_0%LD) 73
Tabela 22 - Composição granulométrica da mistura SMA 19mm (SMA_30%LD) 74
Tabela 23 - Granulometria da mistura SMA 16mm (SMA_50%LD) 74
Tabela 24 - Especificação técnica da fibra TOPCEL 75
Tabela 25 - Densidade aparente do agr. graúdo, massa específica aparente 78
Tabela 26 - VCA_{MIX} e do VCA_{DRC} no estado compactado 79
Tabela 27 - Incremento no teor mínimo necessário 81
Tabela 28 - Resultados da Dosagem 86
Tabela 29 - Resultados de pesquisas brasileiras com SMA 87
Tabela 30 - Resumo das características dos agregados desta pesquisa 93
Tabela 31 - Estabilidade e Fluência Marshall 96

Tabela 32 - Valores do ensaio de escorrimento a 163°C e 178°C. 97
Tabela 33 - Resistência à tração das misturas estudadas. 98
Tabela 34 - Resultados do desgaste por abrasão 100
Tabela 35 - Resultado do ensaio de dano à umidade SMA 16 BS. 103

LISTA DE SIGLAS

AAUQ - Areia Asfalto Usinada a Quente

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIMS - *Aggregate Image Measuring System*

AN - Agregado Natural

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

dB - Decibel

DER - Departamento de Estrada de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAF - Forno Elétrico a Arco

FGSV - Associação de Pesquisa de Rodovias e Transportes

FIA - Federação Internacional de Automobilismo

KR - Kanbara Reactor

LD - Linz-Donawitz

PDI - Processamento Digital de Imagens

PSV - Coeficiente de Polimento Acelerado

RT - Resistência à Tração

RRT - Resistência à Tração Retida

SMA - Splittmastixasphalt ou Stone Matrix Asphalt

TP - Teor de Projeto

VAM - Vazios no Agregado Mineral

VV - Volume de Vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 16
1.2 JUSTIFICATIVA 18
1.3 OBJETIVOS 18
1.3.1 Objetivo Geral 18
1.3.2 Objetivos Específicos 19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 19

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA *21*
2.1 SMA 21
2.1.1 Breve Histórico 21
2.1.2 Características Gerais 23
2.1.3 Características Funcionais 26
2.1.4 Características Estruturais 27
2.1.5 Projeto de Mistura 29
2.2 AÇO 34
2.3 ESCÓRIAS KR E LD 36
2.3.1 Características Físicas 38
2.3.2 Características Químicas 40
2.3.3 Características Mineralógicas 41
2.4 USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS 42

3 MATERIAIS E MÉTODOS 50
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS 51
3.1.1 Amostragem 51
3.1.2 Distribuição Granulométrica 54
3.1.3 Finura 55
3.1.4 Massa Específica, Densidade e Absorção 56
3.1.5 Equivalente de Areia 59
3.1.6 Massa Unitária 60
3.1.7 Abrasão “Los Angeles” 60
3.1.8 Ensaios no AIMS 62

3.1.9 Ensaio de Durabilidade 65
3.1.10 Ensaio de Adesividade 66
3.1.11 Ensaio de Difração de Raios-X e Fluorescência de Raios-X 68
3.1.12 Características Ambientais 70
3.1.13 Expansão 70
3.2 CIMENTO ASFÁLTICO 71
3.3 PROJETO DE MISTURA SMA 73
3.4 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS 88
3.4.1. Ensaio de Estabilidade e Fluência 88
3.4.2 Ensaio de Escorrimento de Misturas Não Compactadas 89
3.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral 90
3.4.4 Ensaio Cantabro 90
3.4.5 Dano por Umidade Induzida 91

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS 93
4.1 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA 96
4.2 ESCORRIMENTO 97
4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA 98
4.4 DESGASTE POR ABRASÃO 100
4.5 DANO POR UMIDADE INDUZIDA 102

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 105
5.1 CONCLUSÕES 105
5.2 SUGESTÕES 106

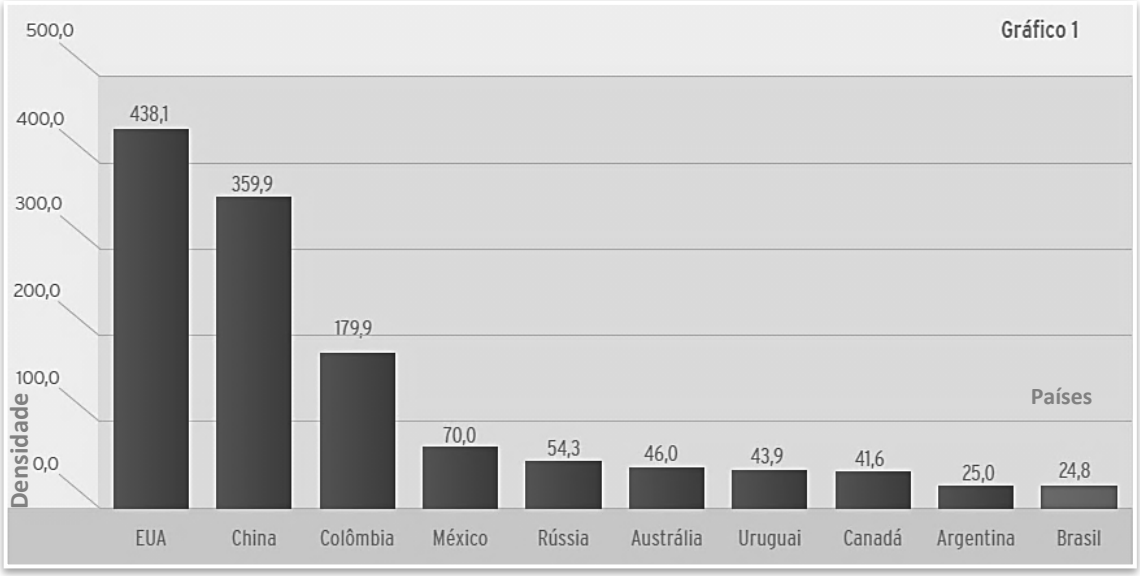
REFERÊNCIAS 107

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil é o quinto maior país do mundo em área territorial, com 8.515.759,090 km^2, segundo o IBGE (DOU nº124 de 30/06/2017). No entanto, possui uma densidade de malha rodoviária pavimentada total ainda muito pequena, principalmente quando comparada com outros países como Estados Unidos, China e Colômbia, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (km/1.000 km^2).



Fonte: CNT (2017).

De acordo com o CNT (2017), apenas 12,3% das rodovias existentes no país são pavimentadas. Apesar de o modo rodoviário possuir elevada representatividade para o transporte de cargas e passageiros no país, a malha pavimentada brasileira apresenta falhas que comprometem a estrutura e funcionalidade das rodovias. A classificação de condições regular, ruim ou péssimo passou de 58,2% no ano de 2016 para 61,8% no ano de 2017 quando considerado o estado geral das rodovias. Para o Espírito Santo esse percentual é ainda maior, 67,7% e o acréscimo do custo operacional devido às condições do pavimento se encontra acima da média nacional (CNT, 2017).

Ainda segundo a CNT (2017), estudos apontam que os custos operacionais adicionais do transporte rodoviário de cargas no país podem chegar a até 91,5% em decorrência das inadequações do pavimento que resultam na redução da durabilidade dos componentes veiculares, em um maior consumo de combustível, no aumento do tempo de viagem, entre outros. A lei 10.233/2001 alega que uma infraestrutura viária adequada deve tornar mínimo o custo total do transporte, entendido como a soma dos custos de operação, manutenção e investimentos.

Neste contexto, ao relacionar-se o fator custo benefício, o uso de misturas do tipo SMA, sigla decorrente da nomenclatura alemã *Splittmastixasphalt* e do inglês *Stone Matrix Asphalt,* torna-se uma alternativa eficiente para camadas de rolamento, como comprovado em países da Europa e América do Norte. Trata-se de uma alternativa de revestimento para pavimento asfálticos com alta durabilidade, que atende os requisitos de segurança e conforto aos usuários. Tecnicamente, se difere de misturas convencionais especialmente por possuir grande percentual de partículas de dimensões maiores, ou seja, há uma redução de grãos intermediários e estabilidade devido o contato grão-a-grão. O SMA é composto por um forte esqueleto de agregados, uma alta porcentagem de material de enchimento mineral, além de possuir um mastique constituído por um elevado teor de cimento asfáltico e fibra mineral ou de celulose (NORTH DAKOTA ASPHALT CONFERENCE, 2013).

Cabe destacar que a mistura do tipo SMA pode assumir um custo maior em relação à estrutura convencional, devido principalmente às características de alguns componentes, como ligante asfáltico modificado, fibras minerais e/ou granulometrias especiais. Porém, este alto custo inicial é compensado pela maior durabilidade do pavimento, requerendo menores investimentos em manutenção e/ou reabilitação.

Dada à importância das características das partículas na estabilidade das misturas, os valores de resistência à abrasão influenciam muito na qualidade de construção do SMA. Em vista disto, ainda buscam-se alternativas que viabilizem seu emprego no Brasil. As escórias de aciaria, coproduto da produção do aço, são materiais que apresentam resistência à abrasão Los Angeles bastante superiores aos agregados naturais presentes no território brasileiro. Mais ainda, têm sido estabilizadas granulometricamente diretamente nas empresas siderúrgicas para utilização em rodovias, além de passarem por tratamento de redução do potencial de expansão.

Desse modo, a utilização de agregados siderúrgicos nas misturas SMA pode ser uma alternativa, para minimizar os custos na aquisição de materiais e ainda promover uma destinação nobre a esse material. Vale destacar que por causa da grande quantidade de resíduos gerados nos processos de fabricação do aço, diversas indústrias siderúrgicas de grande porte enfrentam sérios impasses quando tratam da destinação adequada para os resíduos sólidos produzidos.

Com base nesses aspectos, o desafio da pesquisa é projetar um revestimento que eleve o desempenho da rede viária encontrada atualmente no país e propicie uma destinação nobre ao resíduo siderúrgico.

1.2 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa almeja trazer uma contribuição para o desenvolvimento da infraestrutura rodoviária nacional, visto que muitos pavimentos apresentam condições estruturais e funcionais inadequadas. Mais ainda, este estudo visa proporcionar uma destinação mais nobre aos rejeitos eliminados durante o processo siderúrgico.

O impacto ambiental e econômico provocado pela disposição inadequada e/ou ocupação desses resíduos em grandes áreas a céu aberto pode ser minimizado caso este material possa vir a ser incorporado a matriz asfáltica. Neste contexto, também propicia a preservação de recursos naturais não renováveis, com a diminuição da extração de agregados naturais para a construção de novos pavimentos. Por conseguinte, aliando a incorporação de um material industrial com a renovação de materiais e técnicas construtivas torna-se possível obter pavimentos mais sustentáveis com melhores desempenhos e com prolongada vida útil.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de incorporação de agregados siderúrgicos na composição de misturas asfálticas do tipo SMA considerando seus efeitos nos parâmetros volumétricos e de desempenho das misturas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Avaliar se os agregados siderúrgicos estudados atendem as normas técnicas vigentes de agregados para composição de misturas SMA através da caracterização de diferentes coprodutos siderúrgicos, escória de dessulfuração KR e escória LD (provenientes de etapas distintas da produção do aço);
- Avaliar o efeito da substituição de diferentes percentuais de agregado natural por agregados siderúrgicos (0%, 30% e 50% de escórias), bem como a substituição de filer natural (pó de pedra moído) por filer siderúrgico nos parâmetros de controle para dosagem das misturas (teor de projeto, volume de vazios, VMA, VCA e escorrimento).
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas estudadas por meio de ensaio de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e ensaio Cantabro.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de pesquisa organiza-se pela seguinte divisão:

O primeiro capítulo estrutura uma introdução ao tema, apresentando a relevância da pesquisa e objetivos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão de literatura nacional e internacional, acerca da mistura asfáltica do tipo SMA, abordando conceitos básicos, características e projeto de mistura. Além disso, possui uma revisão de literatura sobre aço, escórias e o uso de escórias em obras rodoviárias. O objetivo desse capítulo é a abordagem de tópicos importantes para entendimento de conceitos desenvolvidos na pesquisa, além de apresentar importantes trabalhos sobre o assunto.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados, bem como seus métodos de caracterização e respectivos resultados.

O quarto capítulo apresenta os resultados de caracterização dos materiais, a dosagem das misturas, além de resultados dos ensaios físicos, mecânicos e as respectivas discussões dos mesmos. Por fim, é seguido do quinto capítulo, que contempla as considerações finais do trabalho, bem como as sugestões de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SMA

2.1.1 Breve Histórico

A mistura do tipo SMA foi inventada pelo engenheiro alemão Dr. Zichner, em meados da década de 60. Na época, foi uma tentativa de resolver a baixa durabilidade dos pavimentos, o consequente dano provocado nos pneus por conta das más condições viárias e o alto custo com a reabilitação dos pavimentos (BLAZEJOWSKI, 2011). Devido às proporções diferenciadas dos materiais constituintes, com alto percentual de agregados graúdos envoltos por uma matriz de ligantes e partículas finas, acreditava-se que os agregados graúdos garantiriam a resistência ao esmagamento e ao desgaste, enquanto o alto teor de mastique e aglutinante melhorariam a sua vida útil. Desse modo, a ideia seria criar um esqueleto forte de agregados graúdos preenchidos com grande quantidade de mastique.

Todavia, o objetivo principal está relacionado à concepção de uma mistura capaz de evitar a derrapagem e ser mais resistente ao elevado desgaste provocado por pneus com pitons (pinos), em regiões com gelo (EL-HAGE, 2012). Após o desenvolvimento da mistura foi verificado uma melhoria na durabilidade, resistência a deformações permanentes, maior vida de fadiga, diminuição do *spray* de água superficial e redução de ruídos (BLAZEJOWSKI, 2011).

As primeiras tentativas para construir a SMA consistiram em espalhar um mastique quente e os agregados graúdos sobre ele, e em seguida, compactar com rolo. Estima-se que a primeira produção em larga escala foi realizada em *Freiligrath Straße*, na Alemanha, em 1968, onde foi pavimentada a primeira estrada em SMA, a qual apresentou uma vida útil de quase 40 anos. Esta mistura era composta por aproximadamente 70% de agregados graúdos de tamanho nominal máximo de 16mm, 12% de areia de tamanho nominal máximo de 2mm, 10,5% de material de enchimento e 7,5% de ligante betuminoso B80 ou B65 (classificados por penetração à 25°C como B65 com 50-70 dmm, B80 70-100 dmm, de acordo com a norma alemã). Após testes em laboratório, foi percebido que para que essa mistura fosse produzida, transportada e aplicada era necessário o uso de aditivo estabilizador, que

na época foram utilizadas fibras de amianto (RETTENMAIER 2009 apud BLAZEJOWSKI, 2011).

A composição final da mistura foi patenteada pelo Dr. Zichner na Alemanha, Suécia, Estados Unidos, França e Luxemburgo. Merece destaque o fato de que até o início da década de 1980, o SMA era essencialmente conhecido apenas na Alemanha. A mistura passou a ser mais popular na Europa, sendo utilizada em praticamente todos os países europeus, depois que a FGSV (*forschungsgesellschaft für straßen- und verkehrswesen* que traduzido para o português significa Associação de Pesquisa de Rodovias e Transportes) publicou o primeiro padrão técnico alemão para a SMA, ZTV bit-StB 84 (BLAZEJOWSKI, 2011).

Internacionalmente, houve um crescimento significativo da aplicação do SMA no início da década de 90, quando os Estados Unidos passou a pesquisar sobre o desenvolvimento de um método americano de criação deste tipo de mistura. A popularidade da SMA na América do Norte possibilitou o lançamento de diretrizes da SMA em outros países, como Austrália, China e Nova Zelândia.

Dentre os revestimentos SMA projetados entre 1991 e 1996 nos Estados Unidos, de acordo com a *North Dakota Asphalt Conference* (2013), 65% usaram fibra, 80% usaram agregados com dimensão máxima característica (DMC) de 19mm, 2/3 utilizaram um teor de ligante igual ou superior a 6% e espessuras de revestimento entre 3,8cm e 5,1cm.

No Brasil, existe registro de aplicação da primeira pavimentação com o SMA no ano 2000, no circuito Interlagos de Fórmula I (BELIGNI *et al.,* 2000). Foi utilizado um cimento asfáltico modificado AMP (6% SBS), 0,5% de fibra de celulose, com teor de projeto igual a 6,7% e filer calcário (VINHA, 2000 apud MOURÃO, 2003). A Bahia foi o primeiro estado do nordeste brasileiro a construir um trecho urbano SMA, com ligante de asfalto-borracha, sem fibras e que, apesar de não cumprir as recomendações técnicas, o pavimento não apresenta defeitos (ODA *et al.,* 2012).

O Brasil passou a aplicar a mistura em trechos que exigiam maiores solicitações, em rodovias que necessitavam de elevadas resistências. A Tabela 1 apresenta alguns locais do país que empregaram o SMA.

Tabela 1 - Principais projetos SMA no Brasil

Ano	Localização	Trechos
2000	São Paulo	Autódromo de Interlagos
2001	São Paulo a Santos	Via Anchieta
2002	São Paulo a Rio de Janeiro	BR 116: Presidente Dutra
2003	Itú a Piracicaba (SP)	SP 308: Rodovia do açúcar
2004	São Paulo	Corredores de ônibus
2004	Salvador (BA)	Trecho experimental
2006	Estado do Paraná	BR 277
2006	Belo Horizonte (MG)	Anel rodoviário BH com BR 262, BR 381 e BR 040.
2006	Estado de São Paulo	SP 330: Anhanguera
2006	Belo Horizonte (MG)	BR 381
2007	São Paulo	SP 330: Anhanguera
2007	Fortaleza (CE)	BR 116
2007	São Paulo	SP 326: Brigadeiro Faria Lima
2007	Paraná	BR 277
2007	São Paulo	SP 310: Washington Luiz
2010	Paraná	BR 277
2015	SC e RS	Rodovia BR 386, BR 158 - BR 116
2017	Goiás	BRs 060 e 153
2018	Espírito Santo	Aeroporto Eurico Sales

Fonte: DER (2008), adaptado pela autora.

2.1.2 Características Gerais

Stone Matrix Asphalt (SMA) é um concreto asfáltico usinado a quente projetado para uso em camada de revestimento de pavimentos. De acordo com Blazejowski (2011), além de ser comumente empregada como camada de revestimento, em alguns países também é aplicada em camadas intermediárias de pavimento. Na Alemanha, a SMA é aplicada com frequência na reabilitação de pavimentos de concreto de cimento Portland.

O uso de misturas SMA na Europa, EUA e Japão proporciona uma redução nos custos relacionados à reabilitação e manutenção dos pavimentos, devido à melhoria no desempenho e na durabilidade dos pavimentos de alto volume de tráfego (NEVES FILHO, 2004). O SMA vem sendo tanto utilizado como uma alternativa de

reestruturação de superfícies deterioradas, quanto nos casos que visam apenas à melhoria no desempenho funcional. Em ambos os casos, a granulometria diferenciada da mistura SMA, constituída por uma estrutura compacta e entrelaçada, é um dos motivos para a elevada resistência ao desgaste, dissipação do carregamento do tráfego, conforto e segurança.

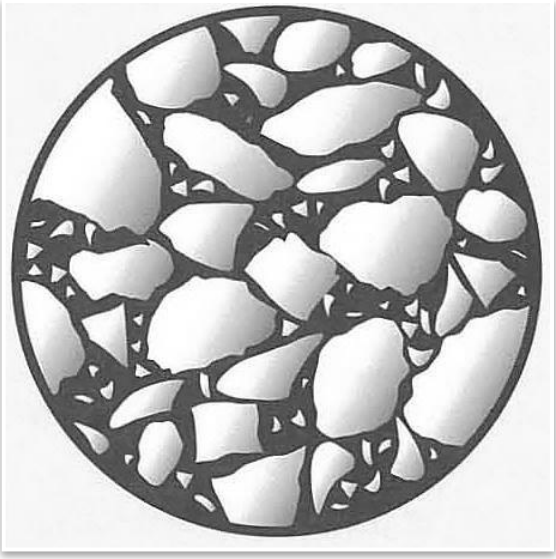
O SMA é uma excelente opção para rodovias e locais solicitados por tráfego pesado, como vias para transporte de cargas, postos, pistas de aeroportos, estacionamentos, interseções, rampas, pontes, paradas e faixa de ônibus. É considerada uma mistura ideal para pavimentos com tráfego pesado, pois proporciona uma maior resistência à deformação permanente e, consequentemente, uma maior vida útil. Desse modo, muitos países optam por essa mistura, pois é considerada mais resistente e durável do que a mistura convencional.

É aplicado em espessuras que variam entre 1,5 a 7 cm, conforme a faixa granulométrica (BERNUCCI *et al.,* 2010). É importante que a espessura da camada seja pelo menos três vezes o tamanho nominal máximo do agregado para assegurar a dissipação de energia nas camadas, sem que haja deformação plástica excessiva (MARTINHO *et al.,* 2013). O SMA possui comportamento elástico em uma vasta gama de temperaturas, o que evidencia a influência predominante das características dos agregados em sua capacidade estrutural (ONOFRE *et al.,* 2008).

Os agregados devem ter alta resistência ao polimento, ou seja, um Coeficiente de Polimento Acelerado (PSV) de pelo menos 50 (DRÜSCHNER, 2005). A mistura também deve possuir elevada porcentagem de agregados graúdos, entre 70 a 80% retido na peneira nº 4 (ONOFRE *et al.,* 2008). Em geral, o volume de vazios da mistura é de 4% e o teor de projeto entre 6 a 7,5% (FERNANDES J. *et al.,* 2004).

O SMA possui uma composição descontínua de agregados, com uma alta concentração de agregados graúdos, com predominância dos grãos de maiores dimensões em relação aos de dimensões intermediárias, envolvidos por um mastique betuminoso com elevado teor de ligante asfáltico. Além disso, são incorporados fibras para evitar o escorrimento do ligante na mistura. A Figura 2 ilustra a distribuição do esqueleto de agregados envolvidos pelo mastique.

Figura 2 - Representação do SMA



Fonte: NAPA (1996).

O mastique preenche os vazios formados pelos agregados graúdos, proporcionando maior durabilidade à mistura asfáltica (EAPA, 1998). É um revestimento concebido para maximizar a interação grão a grão entre os agregados graúdos. Por conseguinte, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos, no qual são preenchidos por uma argamassa constituída por agregado miúdo, filer, ligante asfáltico e fibras.

Devido ao alto percentual de ligante asfáltico empregado, estas misturas podem apresentar escorrimento do ligante em temperaturas mais altas. Para minimizar este efeito, são utilizadas fibras ou outros materiais estabilizadores. Os estabilizadores podem ser compostos por fibras de celulose, fibras minerais ou polímeros que são adicionados ao SMA, sendo capaz de manter o ligante na mistura em alta temperatura e evitar o escorrimento durante a produção, transporte e aplicação (SUCHISMITA *et al.,* 2011). Além disso, os aditivos afetam de forma positiva a resistência à fadiga e o envelhecimento do revestimento (DRÜSCHNER, 2005).

O esqueleto de agregados graúdos em conjunto com sua argamassa betuminosa proporciona uma melhor resistência à deformação permanente, resistência ao desgaste, textura de superfície grosseira, boa rugosidade, bom comportamento ao

longo prazo e menores fissuras devido a baixas temperaturas ou tráfego repetitivo (DRÜSCHNER, 2005; BLAZEJOWSKI, 2011).

2.1.3 Características Funcionais

Devido à deficiência de grãos médios e a alta concentração de agregados graúdos é possível aumentar a resistência ao deslizamento, reduzir a reflexão de luz, ruído e aquaplanagem. A sua superfície mais grossa, com textura mais rugosa é capaz de formar pequenos canais entre os agregados graúdos, de forma a proporcionar uma excelente drenagem superficial.

A textura da superfície e o tipo do agregado são fatores pautados tanto no escoamento da água superficial como na resistência à derrapagem. Atualmente a aderência pneu-pavimento é verificada tanto por meio do coeficiente de atrito, como pela textura superficial, que vem sendo considerado um fator determinante para a segurança da via.

Cabe destacar que no ano de 2000, por exigência da Federação Internacional de Automobilismo (FIA) para o grande prêmio do Brasil de Formula I, o autódromo de Interlagos foi obrigado a aplicar o revestimento do tipo SMA para melhorar a resistência à aderência, para condições de pista molhada (APS, 2006).

As faces não paralelas à superfície do SMA contribuem para o melhora de visibilidade, por causa da redução do reflexo de luz e do *spray* de água. A macrotextura mais rugosa corrobora também com a redução da poluição sonora, pelo fato de possuir uma maior superfície para a absorção do som. O ruído de tráfego é um fator que recebe cada vez mais atenção em grandes centros urbanos, pois influencia negativamente a sociedade, podendo causar problemas relativos à saúde física e mental nos indivíduos. Segundo estudo realizado pela NAPA (2002) na Alemanha, a mistura SMA 0/11 proporciona uma redução do nível de ruído de até 2,5dB quando comparado a mistura densa convencional. Em estudo feito na Itália, onde se analisou mistura SMA com tamanho máximo nominal do agregado de 15mm, essa redução chegou a 7dB, considerando o veículo com velocidade de 110km/h. Apenas para se ter uma ideia, segundo a Organização Mundial de Saúde (2016), 30% da população da União Europeia está exposto a níveis de ruído de

tráfego rodoviário superiores a 55 dB(A), de fato, uma redução desse porte traria benefícios fundamentais para a sociedade.

2.1.4 Características Estruturais

A deformação permanente é provocada pelo acúmulo de deformações plásticas decorrentes das solicitações do tráfego ao longo da vida útil do pavimento. A sua ocorrência pode ser causada pelo mau dimensionamento das camadas do pavimento ou devido à baixa resistência ao cisalhamento do revestimento.

A deformação permanente trata-se de uma das principais formas de degradação estrutural dos pavimentos flexíveis. Em função disso, requer uma atenção especial durante o dimensionamento estrutural e dosagem das misturas asfálticas (NEVES FILHO, 2004). O concreto asfáltico de graduação continua apresenta desempenho inferior em termos de resistência à deformação permanente do que as misturas tipo SMA (NEVES FILHO, 2004; FERNANDES J. *et al.,* 2004).

O cimento asfáltico modificado por polímero, geralmente adotado em misturas SMA, concede às misturas uma maior viscosidade sob elevadas temperaturas, colaborando na redução das deformações viscoplásticas da mistura asfáltica. Para Neves Filho (2004), a utilização de borracha de pneus em ligantes modificados aumenta a flexibilidade, a impermeabilização e a rigidez a elevadas temperaturas.

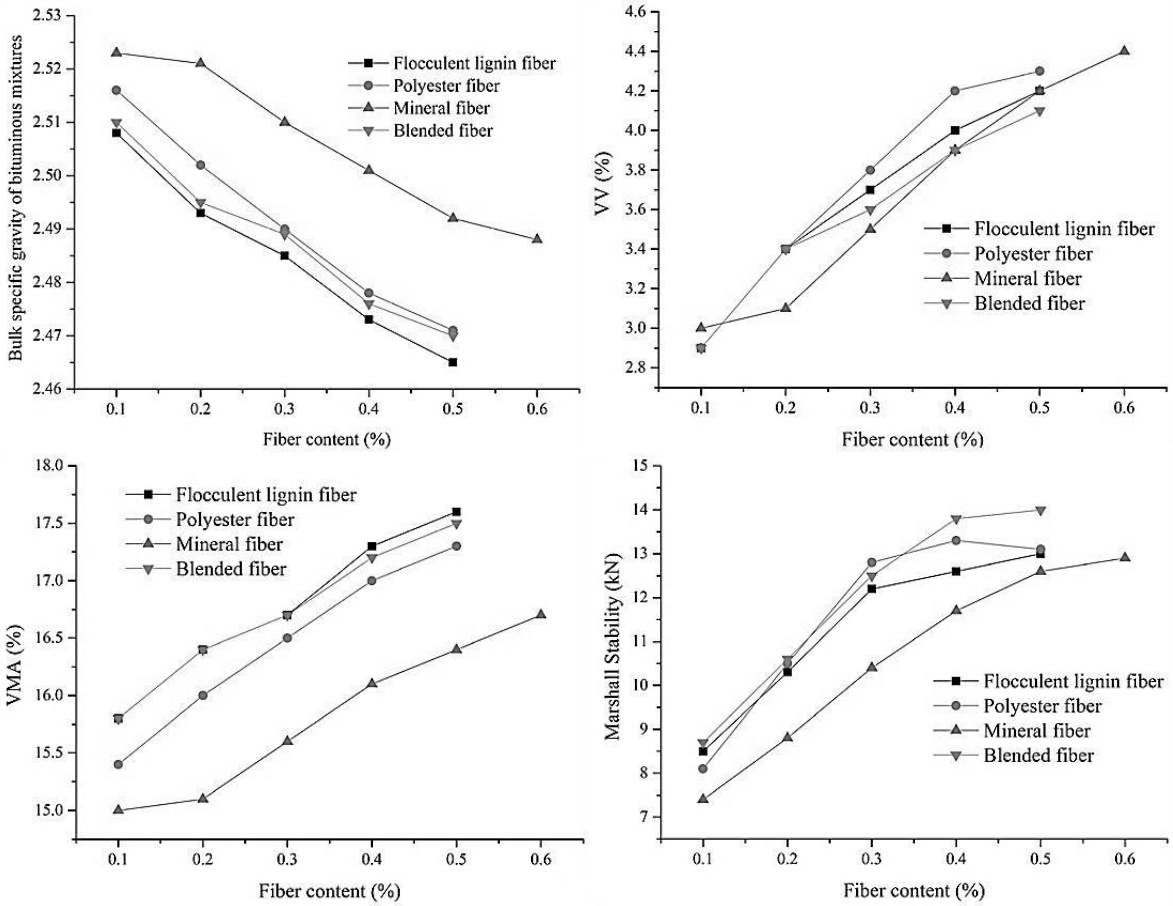
Algumas pesquisas recentes têm analisado a influência das fibras (CHEN *et al.* 2010; ODA *et al.,* 2012; SHENG *et al.,* 2017), quanto a força, estabilidade, durabilidade, resistência à erosão, nível de ruído, vida de fadiga e sensibilidade à água. Especula-se que as fibras de celulose, fabricadas com papel reciclado, atuam como um aditivo estabilizante a fim de evitar a segregação dos agregados e escorrimento do ligante asfáltico por meio de uma estrutura molecular tridimensional que estabiliza toda a mistura.

Cabe destacar que existe a possibilidade de emprego de fibras de coco, de bagaço de cana de açúcar e de vidro, por exemplo. Do Vale (2007) avaliou a viabilidade de substituição das fibras de celulose por fibras de coco em misturas SMA, através das metodologias Marshall e Superpave, obteve boa eficiência com relação ao escorrimento e valores de RRT superiores a 70%. As misturas SMA dosadas pela

metodologia Superpave apresentaram valores superiores às misturas dosadas pela metodologia Marshall nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de Resiliência.

Algumas fibras, como a fibra de poliéster e a fibra mineral quando comparadas a fibra de lignina floculante, são melhores para o tráfego pesado e locais mais quentes, possuem maior estabilidade em alta temperatura. O aumento do teor de fibra de poliéster e fibra mineral beneficia o desempenho mecânico das misturas de SMA. Essas fibras promovem uma boa correlação entre o volume de vazios e conteúdo de fibra, aumenta o VMA e a estabilidade Marshall. Além disso, o maior teor de fibras resulta em melhor absorção e adsorção de asfalto na mistura SMA (SHENG *et al.,* 2017).

Figura 3 - Efeito das fibras no G_{mb}, Vv, VMA e Estabilidade Marshall



Fonte: Sheng *et al.* (2017).

Moghaddam *et al.* (2012) investigaram o efeito da adição de partículas de PET em misturas SMA. Verificou melhora nas propriedades elásticas, à medida que tornou a

mistura mais flexível, foi evitada a iniciação e propagação de fissuras após aplicação de carga cíclica. As propriedades de fadiga da mistura melhoraram significativamente para misturas reforçadas com PET quando comparadas com a mistura de controle.

A película asfáltica, mais espessa, que recobre os agregados em mistura do tipo SMA proporciona bons resultados de resistência à propagação de trincas (NEVES FILHO, 2004). As trincas por fadiga, na camada de revestimento, são provenientes das solicitações repetidas do tráfego ao longo da vida em serviço e podem ocorrer por problemas de enfraquecimento estrutural durante os períodos de chuvas.

Onofre *et al.* (2008) realizaram um estudo de comparação entre o SMA, o concreto asfáltico convencional e a areia asfalto usinada a quente (AAUQ), e verificaram a superioridade das misturas SMA em relação ao desempenho da vida de fadiga. Além de maior valor na resistência à tração (RT) e relação MR/RT.

Suchismita et al. (2011) estudaram as propriedades resilientes de misturas SMA com o equipamento Marshall. Utilizaram agregados com tamanho máximo nominal de 4,75mm, cimento Portland como material de enchimento, dois tipos de ligantes (CAP 80/100 e o CAP 60/70), com 0,3% de fibra de coco. Observaram que as fibras promoveram um efeito sobre as propriedades resilientes das misturas. A adição da fibra resultou em maior resistência a tração, com melhora na vida de fadiga. Com destaque para as misturas com CAP 60/70 com maior valor de vida de fadiga e resistência à tração.

Por conseguinte, as fibras ou os aditivos de polímeros são agentes estabilizadores do ligante, capaz de impedir o desprendimento dos minerais durante as fases de mistura, transporte, pavimentação e compactação. Além de possibilitar uma melhora da vida de fadiga e no desempenho das misturas que são itens fundamentais quando se projeta uma mistura SMA. Em vista disso, optou-se por verificar o efeito da fibra também nesta pesquisa.

2.1.5 Projeto de Mistura

O SMA forma um esqueleto constituído por elevada quantidade de agregado graúdo, e grande parte de seus vazios é preenchida por argamassa betuminosa

(DRÜSCHNER, 2005). Para a produção das misturas em laboratório é preciso verificar a distribuição granulométrica e encontrar o teor de ligante ideal. Nesta pesquisa para a dosagem e confecção das misturas procurou obter uma composição granulométrica que incorporasse o maior percentual de escória possível. Fez uso das curvas granulométricas de tamanho máximo nominal 19mm, especificada pelo NAPA QIS 122 e 16mm (SMA 16 B S) descrita por FGSV H AL ABI (2015), cujos limites são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente e graficamente comparados na Figura 4.

Tabela 2 - Especificação de granulometria SMA 19 mm NMAS (NAPA QIS 122)

Abertura das peneiras		Limite inferior	Limite superior
polegadas	mm		
1"	25	100%	100%
3/4"	19	90%	100%
1/2"	12,5	50%	74%
3/8"	9,5	25%	60%
nº 4	4,75	20%	28%
Nº 8	2,36	16%	24%
nº 16	1,18	13%	21%
nº 30	0,6	12%	18%
nº 50	0,3	12%	15%
nº 200	0,075	8%	10%

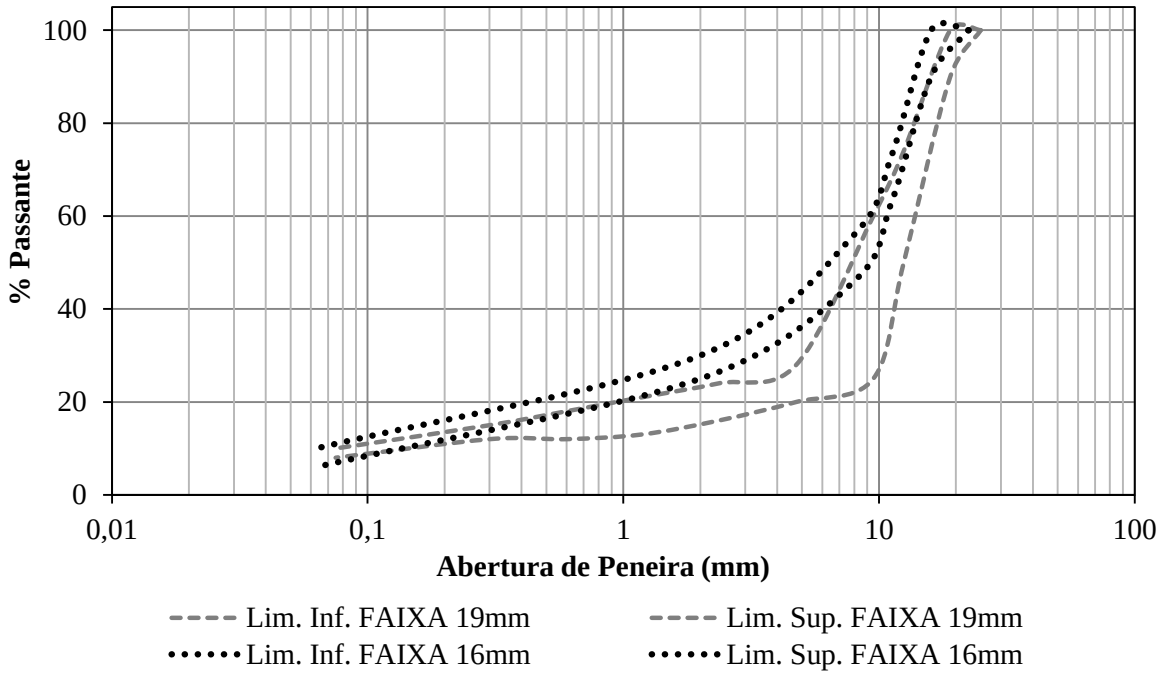
Fonte: NAPA (2002).

Tabela 3 - Especificação de granulometria para a SMA 16 B S (H AL ABI 2015)

Abertura das peneiras		Limite inferior	Limite superior
polegadas	mm		
7/8"	22,4	100%	100%
5/8"	16	90%	100%
7/16"	11,2	63%	73%
5/16"	8	46%	56%
10	2	25%	30%
230	0,063	6%	10%

Fonte: Gogolin (2015).

Figura 4 - Limites superior e inferior das faixas granulométricas dessa pesquisa



Fonte: Própria autora.

O projeto de misturas precisa seguir as normas de procedimentos e especificações das misturas do tipo SMA. As Tabelas 4 e 5 mostram os principais requisitos de dosagem utilizados para produção de SMA com base em relatórios da NAPA nos Estados Unidos e mais recentemente o relatório da FGSV AK 7.3.3. “Inovações” de H Al ABI (2015) na Alemanha.

Tabela 4 - Requisitos de dosagem SMA (NAPA QIS 122)

Propriedades	Requisitos
Volume de vazios, %.	4,0
VMA (vazios no agregado mineral), % mín.	17
VCAmix.	< VCAdrc
Estabilidade Marshall, N, mín.	6.200
RRT – Resistência à tração retida, % mín.	70
Teste de escorrimento (draindown), % em peso máx.	0,30
Teor de asfalto na mistura, % mín.	6,0

Fonte: NAPA (2002).

Tabela 5 - Requisitos SMA 16 B S (H AL ABI 2015)

Propriedades	Requisitos
Índice de vazios, %.	1,5 – 5,5
Aditivo, % min.	0,2
Teor de asfalto na mistura, % mín.	5,2
Espessura da camada (cm), % min	6,0-9,5

Fonte: Gogolin (2015).

O SMA 16 B S, possui elevado tamanho de grão e ao mesmo tempo permite que à mistura fique um pouco mais densa devido a sua composição granulométrica diferenciada que exige um menor volume de vazios. A maior densidade do agregado graúdo siderúrgico promove uma pequena alteração no VCA da mistura compactada. O projeto de mistura deve adequar os vazios do esqueleto de agregados de forma que os vazios da mistura compactada (VCA_{MIX}) seja menor ou igual aos vazios da fração graúda do agregado compactado (VCA_{DRC}). Conforme parâmetros obtidos através das expressões 01 e 02:

$$\mathrm{VCA_{DRC}} = \left(\frac{\mathrm{G_{CA}} \times \gamma_{\mathrm{w}} - \gamma_{\mathrm{s}}}{\mathrm{G_{CA}} \times \gamma_{\mathrm{w}}}\right) \times 100 \qquad (01)$$

$$\mathrm{VCA_{MIX}} = 100 - \left(\frac{\mathrm{G_{MB}}}{\mathrm{G_{CA}}} \times \mathrm{P_{CA}}\right) \qquad (02)$$

Onde:

VCA_{DRC} são os vazios da fração graúda do agregado compactado, %.

γ_s - massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado, g/cm^3.

γ_w - massa específica da água – 0,998 g/cm^3.

G_{CA} - densidade aparente da fração graúda do agregado.

VCA_{MIX} - vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %.

G_{MB} - densidade aparente da mistura compactada.

P_{CA} - % de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura.

O projeto de mistura é um processo complexo, requer proporções adequadas de materiais para satisfazer as propriedades volumétricas e mecânicas da mistura. Para Anderson *et al.* (1997), grande parte do tempo utilizado para definição do projeto de misturas SMA é usado para avaliar e selecionar graduações de agregados para atender aos requisitos do projeto.

A granulometria da mistura SMA gera uma elevada rugosidade superficial, quando compactadas. Devido a essa textura, a maior parte dos vazios fica concentrada na superfície, apresentando um interior mais fechado. Desse modo, as misturas possuem uma baixa absorção de água e o procedimento utilizado para obtenção do volume de vazios promove um impacto muito significativo na formulação da mistura (GARDETE *et al.,* 2016). Encontrar, um volume de vazios correto é fundamental para a estabilidade das misturas ao tráfego, a fim de evitar deformação por fluência (BERNUCCI *et al.,* 2010).

Ressalta-se que os métodos de ensaio típicos para determinar a densidade aparente da mistura compactada (G_{mb}), AASHTO T166 e ASTM D2726, calculam esta com base na equação de densidade fundamental, e seu volume é obtido por meio do principio de Arquimedes, onde a força de um objeto submerso em água equivale ao volume de água deslocado pelo objeto (BUKOWSKI, 2010).

No entanto, para amostras com grandes vazios permeáveis, como misturas com graduação aberta e com graduação descontínua, o uso destes métodos não é recomendado, pois uma parte da água que entra nos vazios permeáveis é perdida quando a amostra é removida da água e a superfície seca com uma toalha úmida. O problema é amplificado quando os vazios internos estão interligados ou conectados à superfície, pois resulta em valores de massa específica nas misturas maiores do que estas realmente possuem (BUKOWSKI, 2010).

Cooley *et al.* (2003) realizaram um estudo Inter laboratorial com 16 laboratórios participantes a fim de comparar a precisão do método AASHTO T166 com o método ASTM D6752 (à vácuo). Os resultados demonstraram que os dois métodos eram semelhantes para amostras com graduação fina, no entanto produziu resultados significativamente maiores de G_{mb} para as amostras de SMA. O relatório também discute resultados obtidos por meio da AASHTO T166 e da ASTM D2726 e sugere

que o método de vedação a vácuo seja usado para misturas graduadas quando a amostra possui mais de 0,4% de absorção de água.

Brown *et al.* (2003) recomendam que os limites de absorção para AASHTO T166 sejam reduzidos de 2% para 1%. Para os métodos descritos na ASTM D1188 e D6752, não se sabe como se determinou esse limite de 2%, mas existe uma especulação de que esse limite foi determinado para as misturas Marshall com graduação fina (BUKOWSKI, 2010).

O método ASTM D1188 deve ser usado, conforme própria norma, para a obtenção da densidade das misturas compactadas que absorvem mais de 2% de água por volume e possuam cavidades abertas ou comunicantes, ou ambos. É importante relatar também que algumas pesquisas demonstraram a dificuldade de cumprir o requisito mínimo de VMA (HINRICHSEN *et al.,* 1996; ANDERSON *et al.,* 1997), pois à medida que a graduação se torna mais graúda, o VMA diminui (HINRICHSEN *et al*.,1996).

2.2 AÇO

Segundo o Instituto Aço Brasil (2016), o país possui um parque produtor de aço composto por 30 usinas, administradas por 11 grupos empresariais, com capacidade instalada de 50,4 milhões de t/ano de aço bruto. A produção de aço bruto, no ano de 2017, foi de 34,4 milhões de toneladas, com crescimento de 9,9% quando comparada a 2016.

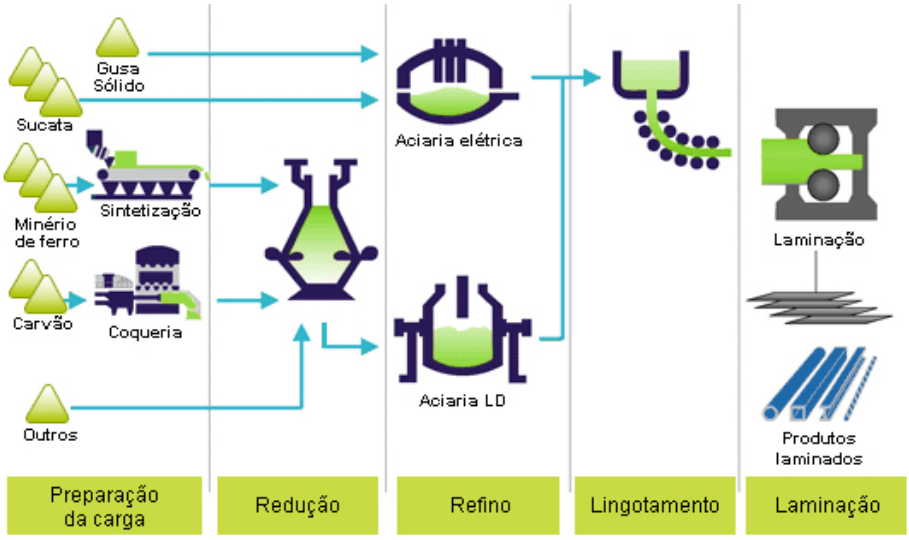
O Estado do Espírito Santo é o terceiro maior produtor de aço bruto do país e produziu em 2017, 7.446 milhões de toneladas de aço (AÇO BRASIL, 2017). O processo de obtenção do aço gera cerca de 12% a 15% de escória de aciaria (HARSCO, 2008), o que corresponde a uma produção de mais de 1 milhão de toneladas no Estado e mais de 5 milhões de toneladas de escória de aciaria no Brasil em 2017.

Figura 5 - Pátio de escória siderúrgica

Fonte: Própria autora.

Basicamente, o aço é uma liga de ferro e carbono. O ferro é obtido do minério de ferro, constituído por óxido de ferro e areia fina. O carbono é encontrado no carvão mineral e vegetal. O alto forno é responsável pelo processo de remoção do oxigênio do ferro e da ligação ferro - carbono. Este processo é denominado de redução, formação do ferro gusa, tendo como coproduto esta etapa à escória de alto forno. Segundo o Instituto Aço Brasil (2015), grande parte da escória de alto forno é absorvida pela indústria de produção do cimento.

Figura 6 - Fluxo simplificado de produção



Fonte: Aço Brasil (2015b).

Em algumas indústrias, o ferro gusa passa por um processo de dessulfuração no Kambara Reactor (KR), antes do refino. De acordo com Sheng *et al.* (2014), estima-se que sejam produzidos de 7 a 9 kg do coproduto KR por tonelada de ferro-gusa tratado.

O ferro gusa líquido é levado à aciaria para ser transformado em aço, mediante a queima de impurezas e após algumas adições. Esta etapa é realizada em fornos elétricos (EAF) ou de oxigênio (LD ou BOF).

Por fim, para produção de aço tem-se a etapa de laminação. Durante o processo de solidificação ocorrem à deformação e transformação do aço em chapas grossas, finas, bobinas, arames, vergalhões, barras, perfilados, etc.

Durante a produção de aço (Figura 6), diferentes escórias são produzidas (Figura 5). No processo de redução do ferro gusa (no alto forno) acontece a produção de escória de alto forno, no processo intermediário de pré-tratamento para dessulfuração denominado KR (Kambara Reactor) ocorre à formação de escória KR e ao longo do processo de refino de aço na aciaria, a escória LD.

2.3 ESCÓRIAS KR e LD

Grande parte das escórias de alto forno é absorvida pela indústria de cimento. No entanto, ainda buscam-se alternativas com relação ao destino dos coprodutos KR e LD. Na literatura, há poucas publicações sobre o coproduto KR, sobretudo em relação a sua utilização na pavimentação. Kuo (2015) utilizou como agregados em pavimentos rígidos e obteve resultados que atenderam às especificações básicas, no entanto o tempo de cura devia ser estendido para 14 dias. Oliveira (2018) demonstrou a viabilidade de uso da KR em base de pavimento, que apresentou desempenho comparável, senão superior, ao do cimento Portland. Gonçalves (2016a) utilizou na estabilização de solos para aterros e demonstrou que a KR proporciona melhoria na resistência mecânica do solo. Tong *et al.* (2016) demonstraram as características químicas da KR e o processo de aproveitamento do ferro incorporado. Cho *et al.* (2016) estudaram as propriedades físicas e químicas da KR no Concreto Portland. Sheng *et al.* (2014) realizaram ensaio de

caracterização para sua aplicação como agente neutralizador básico em águas ácidas resultantes de mineração.

O coproduto KR é um resíduo sólido derivado de um alto-forno, obtida por meio do beneficiamento em planta de britagem, peneiramento e retirada da fração metálica da escória gerada no processo de dessulfuração do ferro gusa. É transportada para o resfriamento no pátio, em seguida pulveriza-se água para o resfriamento rápido e transformação do óxido de cálcio em hidróxido de cálcio. Parte do ferro contido no resíduo é recuperado por meio do processo de esmagamento e separação magnética. A escória não magnética restante é composta por grãos com diâmetro igual ou menor do que 2 mm (CHO *et al.,* 2016).

O ferro gusa passa por um processo de agitação mecânica para eliminar o enxofre e o óxido de cálcio (CaO) se transforma em sulfeto de cálcio (CaS). Onde o composto químico resultante e o CaO que não reagiu, afloram a superfície pois possuem baixo peso específico (CHO *et al.,* 2016). A escória KR contém entre 40-60% de CaO e grandes quantidades de ferro (TONG *et al.,* 2016). Os principais constituintes químicos da escória são CaO, TFe, SiO2, MgO, Al2O3, S, P, e C. Devido ao seu alto teor de CaO, possui grande potencial para ser usada como filer em substituição a cal (SHENG *et al.,* 2014).

Como mencionado anteriormente, a outra escória da pesquisa é resultante da etapa de refino do aço. O gusa líquido passa por processo de sopragem com introdução de oxigênio há uma distância pré-determinada (SOUZA, 2007). Neste processo de aeração, a porcentagem de carbono é controlada e o excesso de impurezas que podem afetar a qualidade do aço é eliminado. São adicionados materiais chamados fundentes, como fluorita (CaF_2) e cal (CaO), que serão responsáveis pela fixação dos óxidos formados durante as reações (ARCELORMITTAL, 2015).

A escória LD é gerada pelo processo de fabricação do aço na Aciaria, e retirada no momento em que o aço líquido e a escória resultante ficam separados dentro do conversor devido à diferença de densidade. Passa pelo processo de resfriamento, britagem, peneiramento e de redução de expansão, onde os óxidos livres são em parte inertizados. Após atingir a taxa de expansão de 3% é disponibilizado para o mercado com o nome de Acerita (ARCELORMITTAL, 2015).

2.3.1 Características Físicas

O coproduto LD, denominada de Acerita (Figura 7), gerada pelo processo de refino do aço, passa por um processo de beneficiamento, composto pela redução da expansão, britagem e separação em faixas granulométricas adequadas para o uso em camadas de base e sub-base dos pavimentos rodoviários.

Figura 7 - Acerita

Fonte: Própria autora.

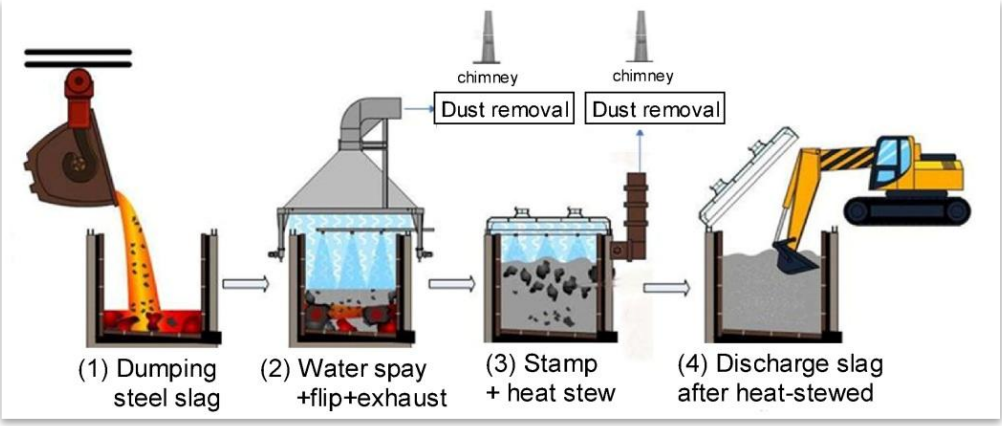
A Acerita possui características capazes de reduzir as espessuras das camadas dos pavimentos, por causa do seu elevado módulo de elasticidade. Em algumas empresas, é estabilizada granulometricamente de forma que sua distribuição granulométrica se enquadre na faixa C do DNIT, facilitando seu uso como agregado para pavimentação. Além disso, possui densidade do material solto de cerca de 1,75t/m³ e 20-30% de abrasão Los Angeles (ARCELORMITTAL, 2015).

Devido à sua alta resistência e durabilidade, a escória de aciaria pode ser usada como um agregado em camadas superficiais do pavimento, camadas de ligação e bases (AHMEDZADE *et al.,* 2009). E dispõe de inúmeras vantagens em relação aos agregados naturais (HARSCO, 2017). Cabe ressaltar que para o correto aproveitamento da escória de aciaria como agregado siderúrgico é necessário que haja um período de cura controlada para reduzir o potencial de expansão da escória de níveis prejudiciais à qualidade do agregado.

Wu *et al.* (2007) empregaram em misturas SMA, o agregado siderúrgico que atingiu no máximo 1% de expansão com cura de três anos. Para Chesner *et al.* (2001), o

período de cura necessário varia até dezoito meses. Em seu estudo, Rohde (2002), constatou que um período de quatro meses de estocagem a céu aberto é suficiente para obter níveis de expansão não prejudicais a qualidade do agregado. No entanto, entende-se que esse tempo é dependente de outros fatores como as condições ambientais e a composição química da escória. Zhao *et al.* (2017) apresentaram um processo de tratamento de escórias. A Figura 8 ilustra o pré-tratamento para a estabilidade volumétrica.

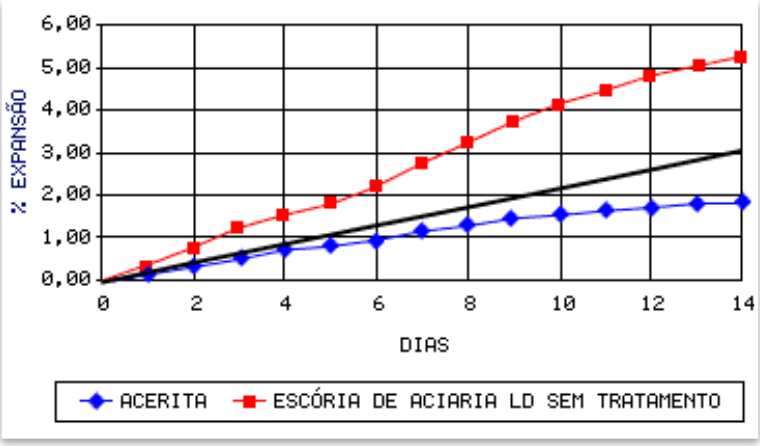
Figura 8 - Diagrama esquemático do processo de tratamento da escória



Fonte: Zhao *et al.* (2017).

O agregado siderúrgico utilizado nesta pesquisa é comercialmente conhecido como Acerita, e apresenta valor de expansão máxima de 3%, obtida por meio do método PTM 130 (Pensilvânia Testing Method). A análise de expansão pelo método citado pode ser visto na Figura 9, onde a reta em preto representa o limite permitido por norma.

Figura 9 - Percentual acumulado de expansão (Escória LD)



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2015).

2.3.2 Características Químicas

A escória da aciaria possui característica alcalina (PEREIRA *et al.,* 2008), com o pH variando entre 8 e 12 quando medido em solução aquosa (SOUZA, 2007). O maior valor alcalino da escória de aço melhora o desempenho de aderência entre o agregado e o ligante (WU *et al.,* 2007). Em contrapartida, possui compostos livres como o óxido de cálcio e o óxido de magnésio que quando em contato com a água, sofrem reações de hidratação e podem vir a provocar expansão volumétrica (ZHAO *et al.,* 2017):

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca\,(OH)_2 \text{ (aumento de 98\% no volume)} \quad (3)$$

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg\,(OH)_2 \text{ (aumento de 148\% no volume)} \quad (4)$$

Segundo Souza (2007), os óxidos de cálcio (CaO), quando expostos a umidade podem se transformar em hidróxido de cálcio e posteriormente em carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Na forma de periclásio (fase cristalina), o óxido de magnésio hidrata de forma lenta porque a água leva muito mais tempo para atuar sobre o cristal (depende do grau de cristalização) (COUTINHO, 1973 apud RODRIGUES, 2007).

O controle do teor de CaO e MgO é o ponto chave para melhorar a estabilidade da escória (ZHAO *et al.,* 2017). O óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO) são instáveis e expandem facilmente em contato com a água (WU *et al.,* 2003). Além disso, o fenômeno de expansão pode estar associado ao polimorfismo do silicato dicálcico, à oxidação e a corrosão do ferro (TAVARES, 2012).

Vale ressaltar que a presença de óxidos livres reativos sempre foi um estorvo para o uso da escória na pavimentação. Por meio da Tabela 6 é possível ter uma ideia dos principais componentes químicos das escórias LD em várias siderúrgicas brasileiras.

As escórias de aciarias LD, das siderúrgicas do país, são compostas principalmente por óxido de cálcio e óxido de ferro. Para a incorporação da escória LD em misturas SMA, é necessário submetê-la ao processo de umectação e aeração (reações dos óxidos com o ar e a água) para torná-la inerte.

Tabela 6 - Composição química das escórias de aciaria LD

Componentes	CSN (SILVA, 2015)	CSN (2016)	CST (FREITAS, 2008)	ArcelorMittal Tubarão (2015)	Usiminas (1997, apud De Araujo, 2015).	Magnesita (2006, apud DE OLIVEIRA, 2007).	LD do Brasil (GUMIERE, 2000 *apud* GEYER, 2001)
CaO	44,34	43,47	44,40	23-46	42,0	41,68	6-45
FeO	25,74	17,27	8,00				8-30
Fetotal		23,09		14-22	23,0	-	
Fe2O3		13,87			-	26,61	
SiO2	12,55		8,40	11-15	8,71	10,82	7-16
MgO	11,5	1,938	8,20	5-13	9,56	8,90	1-9
MnO	4,29	2,159	4,40	-	3,42	4,74	3-7
P2O5	3,16	-	0,21	-	1,68	1,43	1,6
Al2O3	1,08	2,12	2,30	0,8-4	1,33	4,98	1-4
CaO livre							0-8
Cr		0,272					
TiO2				-	0,36	0,53	
Cr2O3				-	-	0,15	0,35
Ctotal				-	0,31	0,56	
S	0,05	0,067	0,00				0,13
Zn		0,040					
Pb		0,030					
SO3				-	-	0,16	

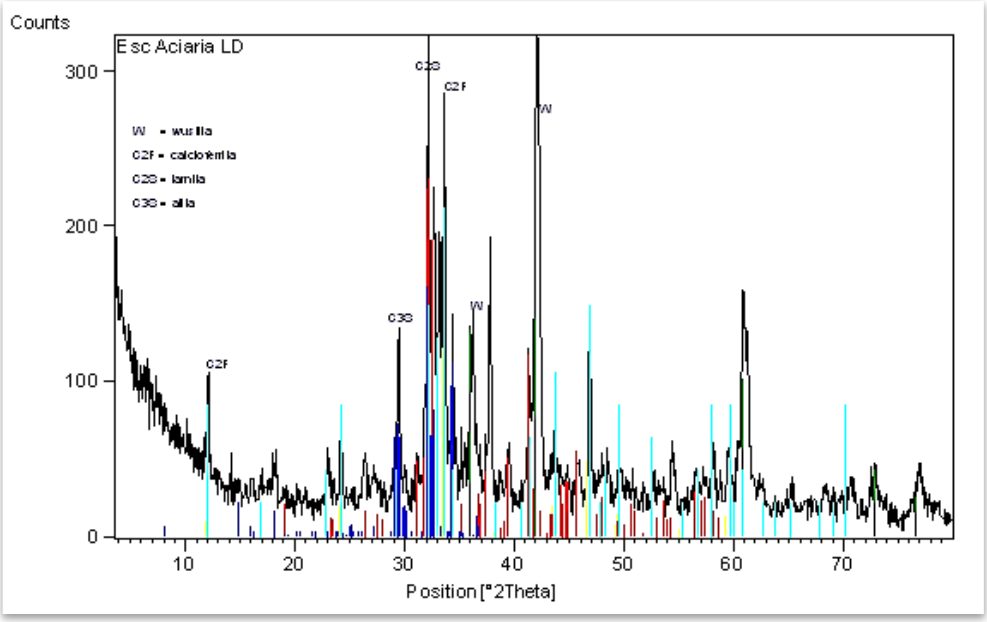
Fonte: Própria autora.

2.3.3 Características Mineralógicas

É notório que a composição química e mineral da escória altera conforme a produção de aço. De acordo com Malynowskyj (2016, *apud* Pacheco, 2017, p.32), podem surgir às fases merwinite (Ca3MgSi2O8), olivina, C3S (alita), C2S (belita), C4AF, C2F(cálcioferrita), fase RO (CaOFeO-MnO-MgO solução sólida) e CaO livre.

A forma mineralógica da escória depende da produção e da taxa de resfriamento (SOUZA, 2007), possuem uma estrutura predominantemente cristalina. Sua identificação e composição mineralógica são identificadas por meio da difratometria de raios-X. Por meio do difractograma, De Oliveira (2007), analisou o resíduo LD e encontrou W - wustita (FeO), belita (C_2S), cálcio ferrita (C_2F) e alita (C_3S), conforme Figura 10.

Figura 10 - Difractograma do resíduo LD



Fonte: De Oliveira (2007).

2.4 USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA EM OBRAS RODOVIÁRIAS

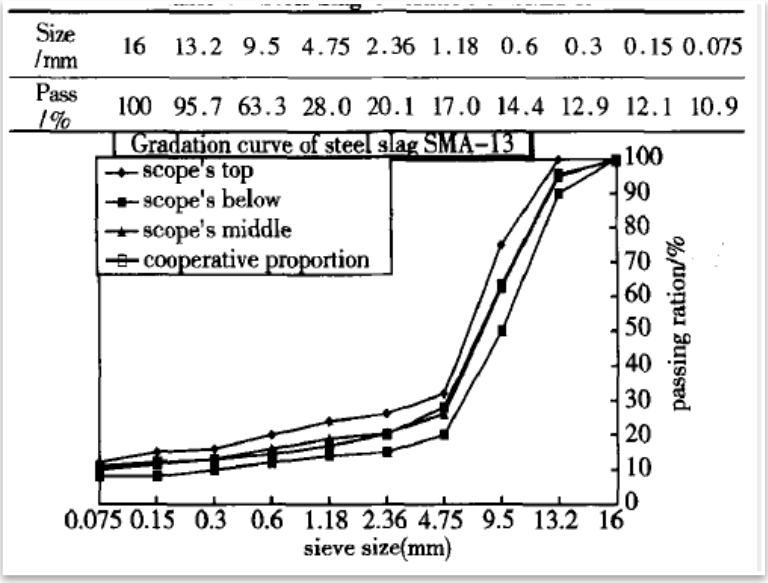
As escórias podem ser utilizadas, em geral, na pavimentação rodoviária como constituinte do revestimento, base e sub-base, em ferrovias nos lastros, em encostas, gabiões, blocos de concreto, drenagens e etc. De acordo com Gonçalves *et al.* (2016b), o uso da escória siderúrgica na construção civil é uma solução econômica e ambientalmente viável, atende ao princípio do desenvolvimento sustentável e da logística reversa. Segundo o Instituto Aço Brasil (2015a), 46% das escórias de aciaria e outras escórias, em 2015 foram aplicados em bases e sub-base de estrada, 41% em nivelamento de terrenos/aterros, 2% na produção de cimento e 1% no uso agronômico (fertilizantes, corretivos de solo, etc.).

O uso das escórias na pavimentação não é recente e vêm sendo chamado de agregado siderúrgico. Este material tem sido regularmente empregado em camadas de base, sub-base e também em misturas asfálticas. A norma ABNT NBR 16364/2015 regulamenta o uso do agregado siderúrgico em base e sub-base estabilizadas granulometricamente. Ainda as normas DNER-EM 262/94, DNER-PRO 263/94 e DNIT ME 113/2009 fixam os procedimentos e condições exigíveis para aplicação da escória de aciaria na pavimentação.

Encontram-se pesquisas internacionais com a escória de aciaria como agregados em pavimentos de concreto asfáltico a partir da década 70 (NORTON, 1979; KANDAHL *et al.,* 1982; ROSSINI-LAKE *et al.,* 1995). Xue *et al.* (2006), Wu *et al.* (2007) e Wen *et al.* (2014) avaliaram a possibilidade de utilização de escória de aço como agregado em misturas SMA. A seguir serão apresentadas algumas pesquisas que empregaram o agregado siderúrgico em misturas de concreto asfáltico.

Os pesquisadores Wu *et al.* (2003) mostraram que o SMA com agregado siderúrgico de aciaria, promove resultados superiores ao SMA com agregado natural. Possui características de alta rigidez e excelente resistência ao atrito, características volumétricas (VMA, VCA) melhores e estabilidade dinâmica em campo, duas vezes maior do que com agregado natural. O estudo utilizou a curva enquadrada na faixa SMA-13 (Figura 11), ligante modificado PG 76-22 e obteve o teor de projeto de 6,2% para um volume de vazios de 3,8% e VMA de 17,8%. Encontrou valor do PSV da escória de aço de 67, capaz de fornecer ao pavimento uma excelente resistência ao deslizamento. Com relação à resistência mecânica, as misturas com escória apresentaram estabilidade Marshall de 7,8 kN (≥ 6 kN requerido).

Figura 11 - Curva granulométrica SMA -13



Fonte: Wu *et al.* (2003).

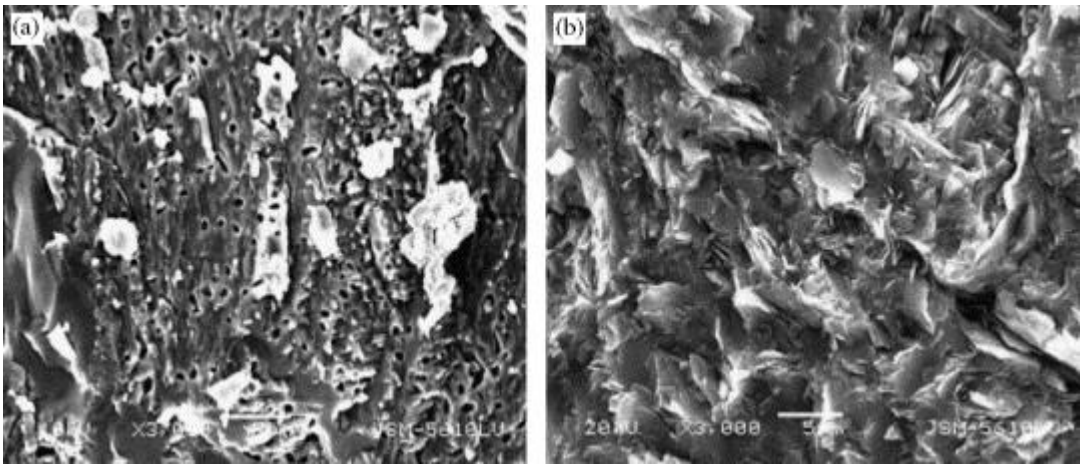
Segundo Wu *et al.* (2007), a estrutura de agregados graúdos do SMA formada por escória de aciaria é capaz de diminuir a deformação permanente. Além disso, por se

tratar de uma estrutura porosa, a escória é capaz de absorver o óleo desprendido em alta temperatura. Após a compactação na mistura de SMA, o agregado siderúrgico pode aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento sob carga em comparação ao agregado de basalto.

Wu *et al.* (2007) utilizaram o ligante modificado classificado como PG76-22 (penetração de 62, 0,1mm a 25°C, 100g e 5s), 3% de fibra de poliéster, 72% de escórias com tamanho entre 16mm e 4,75mm, 17% de basalto com tamanho entre 4,75mm e 0,075mm e 11% de filer calcário.

Wu *et al.* (2007) exploraram a viabilidade da utilização de escória de aciaria a oxigênio como agregados em misturas SMA, analisando os aspectos de composição, estrutura e morfologia dos agregados, por meio dos ensaios de difração de raio X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e porosimetria por mercúrio (PIM). Além de ensaios para verificação de propriedades volumétricas e de desempenho, mediante ensaio de estabilidade Marshall, ensaio de expansão, estabilidade dinâmica e resistência a fissuras à baixa temperatura. Encontrou com o DRX a formação da estrutura cristalina composta por 3CaO·SiO2(C3S), 2CaO·SiO2(C2S), FeO, MgO e MnO. A escória demostrou ser 24 vezes mais porosa do que o basalto (5,76% e 0,24%, respectivamente).

Figura 12 - Superfície porosa da escória (a) e basalto (b).

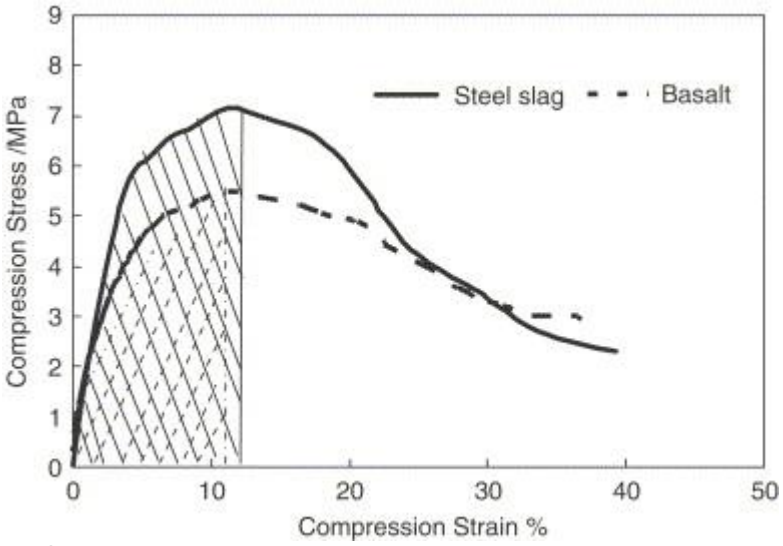


Fonte: Wu *et al.* (2007).

Wu *et al.* (2007) apresentaram resultados de expansão inferior a 1% após 7 dias sem aumento significativo com o tempo, o que garante a estabilidade da escória de aciaria após pré-processamento adequado e um tempo de envelhecimento. Verificou

por meio da estabilidade Marshall que os requisitos da especificação técnica em termos de projeto de mistura SMA foram atendidos. Demonstrou uma maior capacidade de resistência à deformação permanente sob alta temperatura. Além da melhora na resistência a fissuração em baixa temperatura, o valor da mistura de SMA contendo escória de aço é de 13,5%, superior a 11,0% do basalto. Realizou análise de poros por meio do porosímetro Carloerna-200, observou a morfologia utilizou o equipamento japonês SEM-model Hitachi S-2500 e a mineralogia utilizando o difratômetro de raios-X D / MAX-III CuKα1. Empregou o compactador Marshall na preparação das amostras e banho-maria a 60°C por 7 dias para o estudo de desempenho da expansão. As amostras foram submetidas ao teste de tensão indireta a 0°C, e de tensão e deformação. Além disso, verificou a estabilidade dinâmica aplicando 0,7 MPa em uma velocidade de 42 ciclos/min.

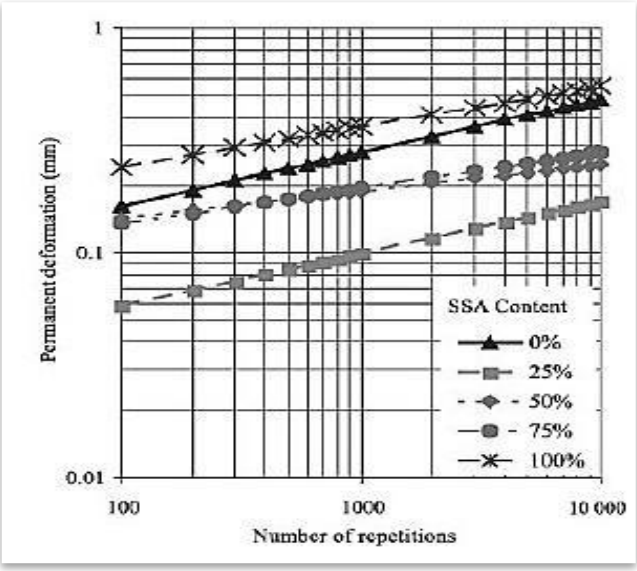
Figura 13 - Curva de compressão *versus* deformação



Fonte: Wu *et al.* (2007).

ASI *et al.* (2007) avaliaram a resistência mecânica de misturas usinadas a quente com agregado siderúrgico através de ensaios de resistência à tração indireta, módulo de resiliência, vida de fadiga e fluência. Os autores relataram que a substituição de até 75% do agregado graúdo de calcário por escória de aciaria melhorou todas as propriedades mecânicas avaliadas. A substituição de 100% de agregado natural por escória melhorou as propriedades mecânicas, porém não melhorou o desempenho quanto à fluência.

Figura 14 - Comparação quanto à fluência de diferentes misturas a 40°C.

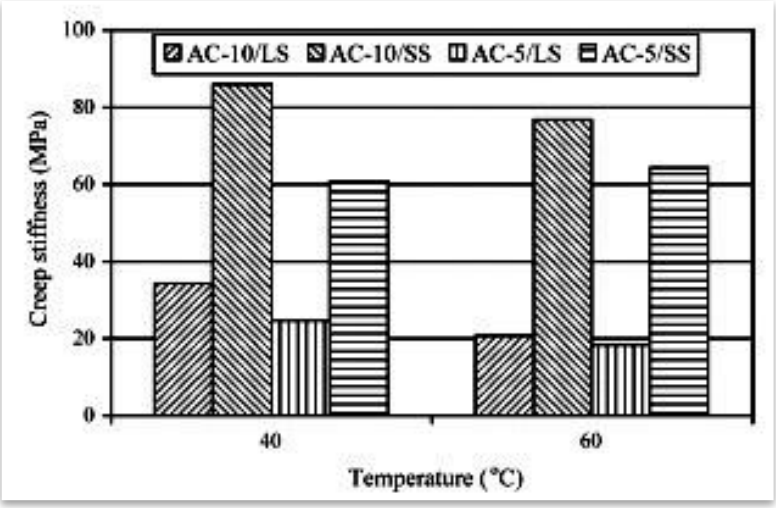


Fonte: ASI *et al.* (2007).

Freitas *et al.* (2008) analisaram o uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado e obtiveram resultados físicos e mecânicos equivalentes as misturas com agregado convencional e em alguns casos superiores a elas. Os valores de deformação permanente foram considerados pequenos, houve redução em relação à espessura final da estrutura e em geral, as misturas com escórias apresentaram melhores desempenhos quando analisadas com o software de dimensionamento FEPAVE2.

Ahmedzade *et al.* (2009) estudaram a influência da utilização da fração graúda do agregado de aciaria nas propriedades das misturas usinadas a quente TMN 19mm. Estudaram misturas contendo dois tipos de cimento asfáltico (AC-5 e AC-10) e dois tipos de agregado (escória de aciaria/SS e calcário/LS) e percentual passante na peneira 4,75mm de 65%. As misturas com agregado graúdo de escória de aciaria indicaram alta rigidez e valores de estabilidade Marshall obtidos de 19,54KN e 20,19KN, para AC-5 e AC-10, respectivamente. As misturas com agregado natural apresentaram valores de estabilidade Marshall de 16,50KN e 17,46KN, respectivamente. Com base nos resultados indicados nos ensaios, às misturas com escórias exibiram resultados substancialmente mais elevados do que as misturas de controle. Verificaram uma melhoria substancial na resistência à deformação permanente das misturas de escória de aço, na temperatura de ensaio padrão de 40 e 60°C.

Figura 15 - Valores de fluência.



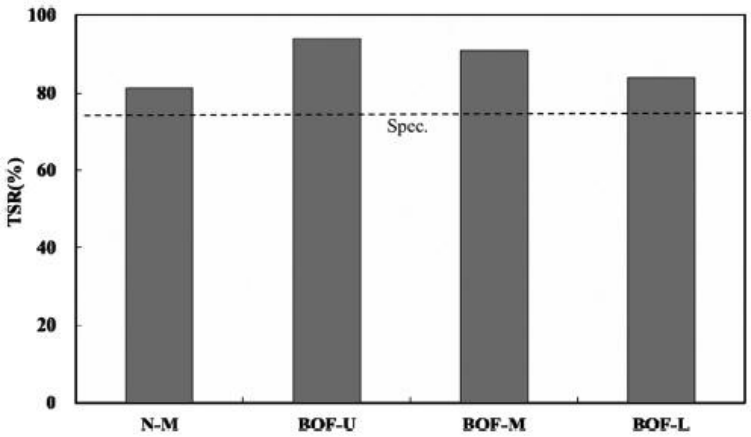
Fonte: Ahmedzade et al. (2009)

Tavares (2012) estudou a influência da utilização do agregado de aciaria nas propriedades de misturas SMA. Utilizou a escória do tipo LD com resultados de expansão abaixo de 0,5% após 14 dias de ensaio PTM 30. A composição granulométrica da SMA estudada era de 77,3% de agregado siderúrgico e 22,7% de pó de brita natural, enquadrada na Faixa 19mm da AASHTO. Foram avaliados dois tipos de ligante asfáltico (CAP 30-45 convencional e CAPFLEX-B modificado com borracha de pneu). O autor encontrou resultados satisfatórios de abrasão Los Angeles para escória estudada, obtendo um valor de 22,4%. Os resultados de resistência à tração (2,0MPa e 0,98MPa para CAP30/45 e CAPFLEX-B, respectivamente) e módulo de resiliência (9031,3MPa e 3140,0MPa para CAP30/45 e CAPFLEX-B respectivamente) foram similares aos das misturas SMA produzidas somente com agregados naturais, mostrando que não houve efeito negativo da substituição de agregado natural por escória de aciaria. Também obteve resultados no ensaio de dano por umidade induzida com resistência à tração retida (RRT) de 79,8%, próximo ao mínimo exigido na norma AASHTO M 325-08 de 80%. Segundo o autor, a AASHTO M325-08 preconiza apenas o uso de fibras no caso em que o escorrimento ultrapasse 0,3%, desse modo, em sua pesquisa optou por não utilizá-las.

Chen *et al.* (2015) afirmaram que o principal fator de sucesso na qualidade do concreto asfáltico é determinado pelas boas propriedades dos agregados. Segundo

os pesquisadores, para diminuir a deformação permanente em pavimentos, os agregados devem possuir características para resistir à carga repetida de veículos e o concreto asfáltico possuir uma estrutura esquelética de qualidade. Demonstraram que resultados do teste de desempenho do concreto asfáltico não tem influência com a espessura do filme do ligante que envolve os agregados (Figura 16).

Figura 16 - TSR (%) e espessura do filme



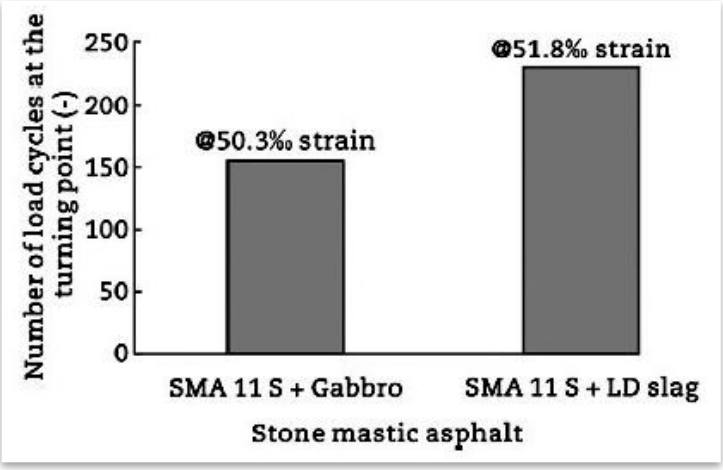
Calculated Items	N-M	BOF-U	BOF-M	BOF-L
Average film thickness (μm)	8.98	3.79	6.66	8.67

Fonte: Chen *et al.* (2015).

A escória básica da aciaria possui boas propriedades de tenacidade superficial, capacidade hidrofóbica, maior densidade e durabilidade, são ideais para substituir agregados na engenharia de pavimentos. Além disso, é mais barata do que o agregado natural e reduz o custo total da engenharia de pavimentos (CHEN *et al.,* 2015).

Groenniger *et al.* (2017) verificaram o desempenho de diferentes tipos de misturas preparadas com 100% de escória LD. O estudo indicou que as misturas asfálticas preparadas com escória LD são adequadas para a construção dos pavimentos asfálticos e que na maioria dos casos são tão boas ou melhores do que as misturas asfálticas convencionais preparadas com agregado natural.

Figura 17 - Resistência à deformação SMA 11 S.



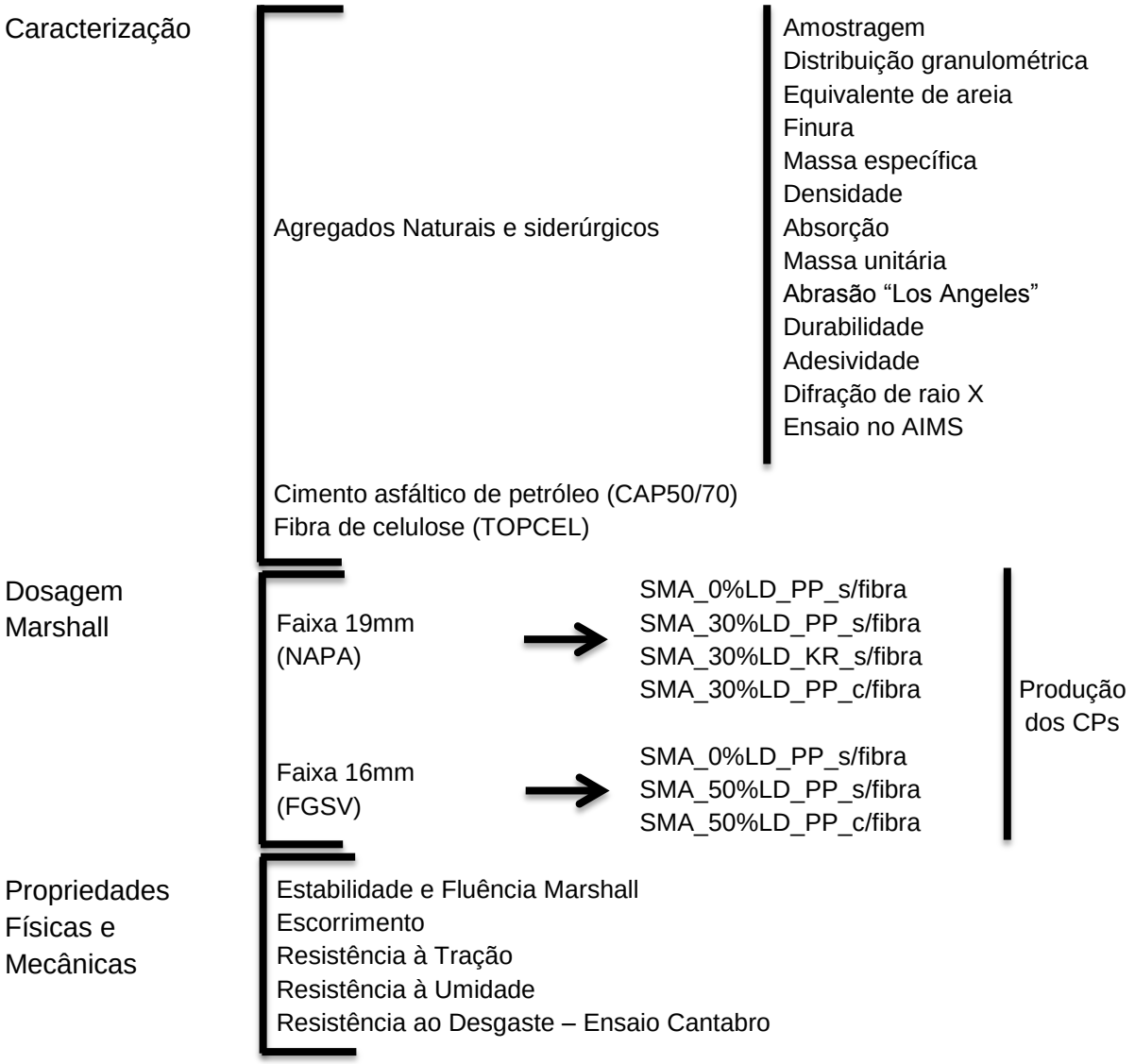
Fonte: Groenniger *et al.* (2017).

Face comprovação da viabilidade técnica comprovada por diversos estudos, e considerando a importância econômica da siderurgia e alta geração de escória no Estado do Espírito Santo, este estudo busca um melhor entendimento do material gerado localmente, avaliando suas propriedades individuais bem como seu desempenho quando incorporado em misturas SMA de 19 mm e 16 mm. Espera-se contribuir no desenvolvimento tecnológico local, oferecendo uma alternativa para pavimentação, além da possibilidade de ganho ambiental com disposição nobre dos resíduos na matriz betuminosa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados as técnicas, processos e respectivos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, baseados nas normas vigentes. De igual forma, como parte subsequente a caracterização, é apresentada o processo de dosagem das misturas SMA a fim de determinar o teor de projeto de ligante para as misturas estudadas. A Figura 18 esboça as misturas, os materiais e os ensaios realizados na pesquisa.

Figura 18 - Esquema geral da parte experimental.



Fonte: Própria autora.

Inicialmente foi feita a dosagem Marshall para a faixa 19mm (NAPA QIS 122) e diante da impossibilidade de se projetar misturas SMA capazes de atender aos

valores limites de aceitação requeridos pela norma americana, foi verificada a viabilidade de alteração da faixa granulométrica para a Faixa 16mm da Alemanha (FGSV - H Al Abi, 2015). Cabe ressaltar que historicamente, as primeiras construções SMA abrangiam a faixa granulométrica com Tamanho Máximo Nominal de 16mm.

Proposta em 2015, definida por SMA 16 B S, a nova faixa granulométrica, possui elevado tamanho de grão e ao mesmo tempo deixa à mistura um pouco mais densa, com uma composição granulométrica diferente e limite de teor de ligante também distinto da norma americana. Á vista disso, é importante propor a elaboração de uma norma técnica brasileira para camadas de rolamento de SMA capaz de atender com eficiência certas particularidades do país.

Tabela 7 - Requisitos de acordo com H AL Abi 2015

Propriedades	SMA 16 B S (H Al Abi 2015)	SMA 19 (NAPA QIS 122)
Ligante (mín) (%)	5,2	6,0%
Aditivo (mín) (%)	0,2	0,3
Espessura da Camada (cm)	6,0 – 9,5	-
Grau de Compactação (mín) (%)	98,0	-
Índice de Vazios (%)	1,5 – 5,5	4,0

Fonte: Gogolin (2015).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

3.1.1 Amostragem

Nesta pesquisa foram utilizados agregados de origem granítica, coletados na pedreira Brasitália (Figura 19), localizada na região da Grande Vitória. De modo a compor a distribuição granulométrica, foram convenientemente fracionados os agregados naturais (brita 1, brita 0, granilha e pó de pedra) bem como os agregados siderúrgicos (escória LD e KR). Como material de enchimento utilizou-se filer natural de pó de pedra e escória KR moídos, ambos passantes na peneira 200.

Figura 19 - Vista da pedreira

Fonte: Própria autora.

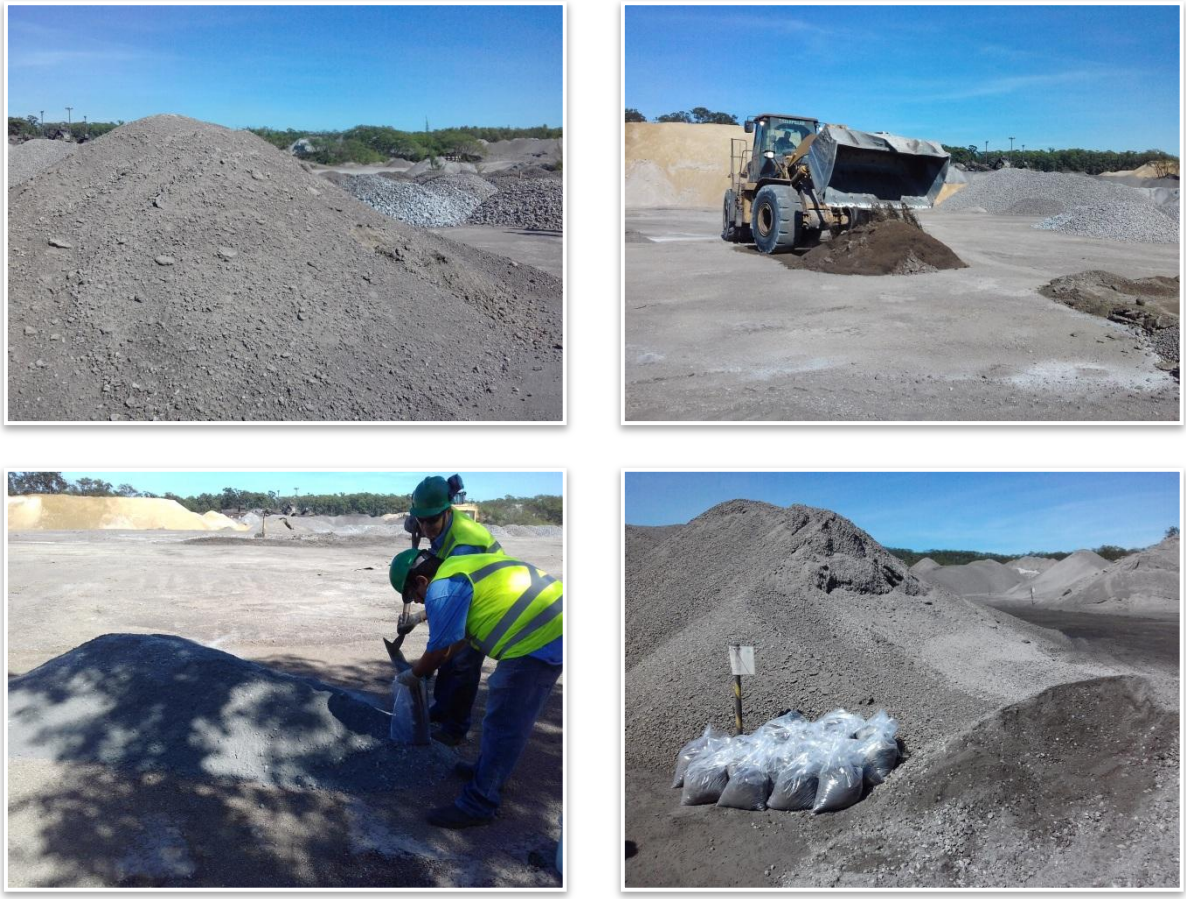
Os agregados siderúrgicos, compostos pelas escórias de aciaria LD e KR, foram cedidos pela empresa ArcelorMittal Tubarão. Cuidadosamente coletados, a fim de obter uma correta amostragem de todo o material presente no pátio. Alguns pontos de estoques de resíduos podem ser vistos pela localização espacial da Figura 20.

Figura 20 - Destaque para o parque de resíduos da ArcelorMittal Tubarão

Fonte: Google Earth (2018).

Com o propósito de selecionar uma amostragem representativa, foi realizada uma extração parcial de amostra em quatro pontos distintos com o auxílio de trator com pá carregadeira. Separou-se em sacolas plásticas lacradas, cerca de 200 kg de escória LD e 200 kg de escória KR. O procedimento de coleta descrito pode ser visto no conjunto de imagens a seguir.

Figura 21 - Coleta dos agregados siderúrgicos



Fonte: Própria autora.

Em laboratório, os materiais foram secos em estufa a 110°C, quarteados, peneirados e acondicionados novamente em sacolas plásticas. A caracterização dos agregados seguiu os procedimentos preconizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Departamento de Estrada de Rodagem (DER) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). No entanto, devido ao fato do país não possuir normalização técnica para a mistura SMA, foi necessário fazer uso de algumas normas internacionais.

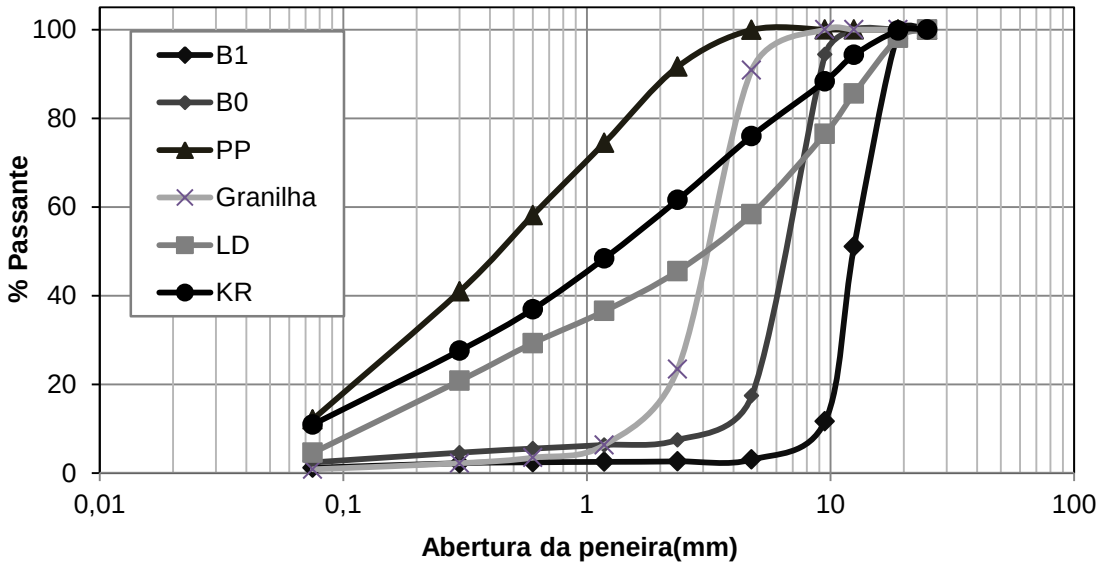
3.1.2 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados caracteriza a ocorrência percentual das dimensões das partículas, por meio de peneiras com aberturas fixadas em norma. Na pesquisa, a distribuição granulométrica dos agregados foi realizada por meio do peneiramento do material nas séries de peneiras da especificação descrita pelo NAPA QIS 122 (faixa 19 mm) e FGSV (faixa 16 mm).

A seguir são apresentadas a granulometria de todos os agregados do estudo (escória LD (3% de expansão), escória KR, brita 1, brita 0, granilha e pó de pedra) na forma como são comercializados, com exceção do agregado siderúrgico enquadrado na norma alemã, onde foi preciso desconsiderar 1,6% de material retido na peneira 22,4mm para o seu enquadramento na curva SMA 16 B S.

Vale dizer que o objetivo inicial desta pesquisa era projetar misturas SMA produzidas com escória LD tratada com 3% de expansão, conhecida comercialmente como Acerita, e a escória KR (expansão quase nula). No entanto, após os ensaios de caracterização dos agregados, verificou-se que a escória KR não atendia alguns parâmetros. Assim, optou-se por continuar apenas com a escória LD (3%). A escória KR e o pó de pedra, no entanto, foram testados como filer, após o processo de moagem no moinho de bolas com 27 mil rotações.

Figura 22 - Distribuição Granulométrica dos agregados dessa pesquisa



Fonte: Própria autora.

Conhecer a representação dos agregados através da curva granulométrica possibilita a determinação de suas características físicas e enquadramento na faixa de composição das misturas. Segundo Ahmedzade *et al. (*2009), as propriedades dos agregados têm efeito direto e significativo no desempenho de pavimentos asfálticos. O agregado, incluindo partículas grossas e finas em misturas de pavimentação asfáltica, engloba aproximadamente 90% do volume.

3.1.3 Finura

Para classificar os fileres utilizados na pesquisa, agregado natural e KR moídos passante na peneira nº 200, determinou-se à finura como superfície específica do material. Seguiu-se o método de permeabilidade ao ar, o método Blaine da norma ABNT NBR 16372/2015.

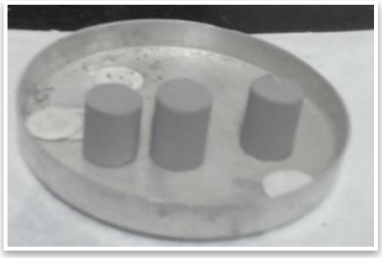
De acordo com a norma, a superfície específica é proporcional ao tempo que uma determinada quantidade de ar atravessa a camada compactada do material. Trata-se de um método comparativo, onde o número e a faixa de tamanho dos poros individuais são determinados pela distribuição dos tamanhos das partículas. A seguir são apresentados os resultados do ensaio dos fileres utilizados nesta pesquisa.

Tabela 8 - Finura

Amostras	Superfície específica (cm^2/g)
Natural	3.536
KR	10.225

Fonte: Própria autora.

Figura 23 - Equipamento utilizado no ensaio de finura e volumes gerados



Fonte: Própria autora.

3.1.4 Massa Específica, Densidade e Absorção

Os resultados da determinação da massa específica do material finamente pulverizado são apresentados na Tabela 9 e ilustrados pela Figura 24. O ensaio consistiu nas leituras final e inicial no frasco de *Le Chatelier*, após inserção de 60g de material. Foram efetuadas duas determinações, cada uma não diferiu em mais de 0,009g/cm³. A massa específica real de cada material foi calculada com aplicação da seguinte fórmula, conforme a norma DNER 085/94.

$$\mu = \frac{\text{massa do material}}{\text{Volume do líquido deslocado}} \tag{05}$$

Tabela 9 - Resultados da determinação da massa específica real do filer

Material	Massa específica real (g/cm^3)
Escória KR	2,37
Escória LD (3%)	2,91
Agregado Natural	2,76
Escória KR moída	2,70

Fonte: Própria autora.

Figura 24 - Ensaio da determinação da massa específica real

Fonte: Própria autora.

O procedimento adotado para a determinação da massa específica dos agregados miúdos por meio do frasco *Chapman* está fixado na norma DNER-ME 194/98. Cada

amostra de 500g de material fino (passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira nº 200) foi inserida no frasco com 200cm^3 de água. Realizaram-se duas determinações consecutivas para cada material que não diferiram entre si em mais de 0,05g/cm^3.

Tabela 10 - Resultados da determinação da massa específica do agregado miúdo

Material	Massa específica (g/cm^3)
Escória KR	3,43
Escória LD (3%)	3,07
Agregado Natural	2,86

Fonte: Própria autora.

Figura 25 - Ensaio para determinação da massa específica dos agregados miúdos.

Fonte: Própria autora.

O ensaio de densidade aparente de agregado graúdo e absorção foi realizado seguindo a norma do DNER - ME 081/98. A Figura 26 ilustra o procedimento de obtenção da densidade aparente do agregado graúdo.

Anteriormente a imersão, o material foi peneirado e o passante na peneira 4,8mm foi desprezado, depois o material foi lavado, seco e pesado. Imerso em água por 24 horas, imediatamente após removeu-se a película visível de água com um pano umedecido, para a determinação da massa na condição saturada com superfície seca (M_h). Depois, foi efetuada a leitura imersa (L) e seca em estufa até a constância de massa (M_s). Por último, realizou-se a substituição dos valores obtidos, nas

fórmulas a seguir, para a obtenção da densidade aparente (D_{ap}) e absorção do agregado (a).

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (06)$$

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (07)$$

A densidade real do agregado graúdo foi calculada com a expressão a seguir.

$$D_{real} = \frac{M_s}{M_s - L} \quad (08)$$

Figura 26 - Etapas do ensaio de densidade da Escória LD.

Fonte: Própria autora.

Tabela 11 - Resultados das densidades e absorção dos agregados graúdos

Material	Densidade aparente	Densidade Real	Absorção (%)	Massa específica efetiva
KR	2,73	3,73	9,90	3,23
LD (3%)	2,95	3,43	4,68	3,19
Agregado Natural	2,81	2,85	0,58	2,83
50% LD e 50% Agregado Natural	2,85	2,99	1,71	2,92

Fonte: Própria autora.

Segundo NAPA (2002), o valor da densidade dos agregados graúdos interfere no percentual mínimo necessário de cimento asfáltico de petróleo. Além disso, a

absorção não deve ultrapassar 2% (AASHTO M-325). É importante destacar que o ensaio realizado com 50%LD e 50%AN demonstrou resultados de absorção abaixo dos 2% exigidos.

3.1.5 Equivalente de Areia

O método de ensaio para determinação de equivalente de areia (dimensões menores do que 4,75mm) está descrito na norma ABNT NBR 12052/1992. O equivalente de areia traduz uma relação volumétrica entre elementos arenosos e o total de elementos da amostra. Desse modo, é possível se avaliar a quantidade e a qualidade de elementos finos plásticos presentes na amostra. Os resultados variam de zero a 100, onde zero trata-se de materiais argilosos e 100 materiais arenosos.

A escória LD (exp. 3%) possui um resultado de equivalente de areia de 82,5%, obtido por meio de média aritmética das três determinações.

Tabela 12 - Equivalente de areia

Amostras	Leitura no topo da areia (mm)	Leitura no topo da argila (mm)	EA (%)	ARTERIS (2015)
1	12,8	10,3	80,47	
2	13,1	10,8	82,44	Min 65%
3	13,6	11,5	84,56	

Fonte: Própria autora.

Figura 27 - Ensaio de Equivalente de Areia

Fonte: Própria autora.

3.1.6 Massa Unitária

Para obtenção da massa unitária seguiu-se o procedimento descrito na norma ABNT NM 45/2006: “método C”, no estado solto e “método A”, no estado compactado.

Tabela 13 - Massa unitária nos estados solto e compactado

Material	Método C (kg/dm³)	Método A (kg/dm³)	Índice de vazios (%)
Escória KR	1,53	-	55,2
Escória LD (3%)	1,77	1,81	42,2
Brita 1	1,48	1,57	47,0
Brita 0	1,51	1,56	47,1
Pó de Pedra	1,57	1,57	45,1
Granilha	1,44	1,53	49,5

Fonte: Própria autora.

Figura 28 - Etapas do ensaio de massa unitária pelo método C

Fonte: Própria autora.

3.1.7 Abrasão “Los Angeles”

A resistência à abrasão foi obtida de acordo com ensaio “Los Angeles”, estabelecida pela norma do Mercosul (NBR NM 51/2001). Neste ensaio uma amostra de 5kg de agregados foi inserida no equipamento “Los Angeles” com carga abrasiva composta por 8 esferas, indicadas na graduação C.

Em resumo, o material foi seco em estufa a 110°C e peneirado nas malhas 9,5mm, 6,3mm e 4,75mm. Depois de inserido no tambor com 8 esferas e submetido a 500 rotações, foi retirado e peneirado. O material retido na peneira 1,7mm foi lavado, seco em estufa por 24 horas e pesado. A relação entre a massa seca final (m_1) e a

massa seca inicial (m) expressa o desgaste por abrasão “Los Angeles” (P). Quanto maior for o valor de P, pior é a resistência mecânica do agregado em questão.

$$P = \left(\frac{m - m_1}{m}\right) 100 \qquad (09)$$

Tabela 14 - Resultados da resistência mecânica (Abrasão “Los Angeles”)

Material	Perda (%)	Ref. SMA (%)
LD (3%)	21,5	Máx. 30
KR	32,2	
Agregado Natural	41,6	
50% LD (3%) e 50% Agregado Natural	28,3	

Fonte: Própria autora.

Figura 29 - Ensaio de abrasão “Los Angeles” (50%LD).

Fonte: Própria autora.

O desgaste “Los Angeles” é um dos requisitos fundamentais para um satisfatório projeto de mistura SMA. e acordo com NAPA (2002), os agregados devem apresentar um desgaste inferior a 30%. A abrasão da escória KR ficou um pouco acima do limite imposto pela norma, assim como o agregado natural empregado. Segundo NAPA (2007, apud EL-HAGE, 2012, p.70), não se deve fazer uso de agregados para capa de rolamento que apresente desgaste “Los Angeles” maior do que 45%.

3.1.8 Ensaios no AIMS

Para avaliar a morfologia dos agregados siderúrgicos foi utilizado um sistema baseado em análises por imagem, utilizando o equipamento AIMS (*Aggregate Image Measuring System*) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

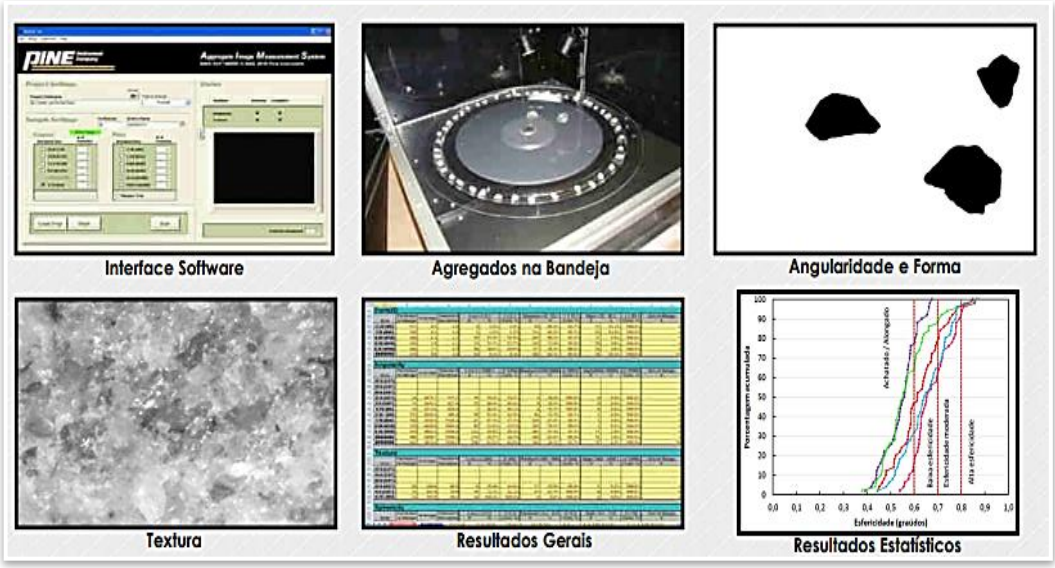
Tabela 15 - Classificação morfológica dos agregados usando AIMS

Propriedade	Valores Limites				
Forma 2D (miúdo)	< 6,5	6,5 - 8,0	8,0 - 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade (graúdo e miúdo)	< 2100	2100 - 4000	4000 - 5400	> 5400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade (graúdo)	< 0,6	0,6 - 0,7	0,7 - 0,8	> 0,8	-
	Achatado/Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Textura superficial (graúdo)	< 165	165 - 275	275 - 350	350 - 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta Rugosidade

Fonte: Al-Rousan (2004)

Para completar a caracterização dos agregados utilizados, a análise morfológica foi avaliada com base nos resultados do sistema de imagem agregada (AIMS). A Tabela 16 e a Figura 30 mostram os principais resultados após a realização da análise AIMS, que são propriedades morfológicas como angularidade (frações grossa e fina), esfericidade (fração grossa), forma 2D (fração fina) e textura (fração grossa).

Figura 30 - Procedimento de Análise no AIMS.



Fonte: Castelo Branco (2017).

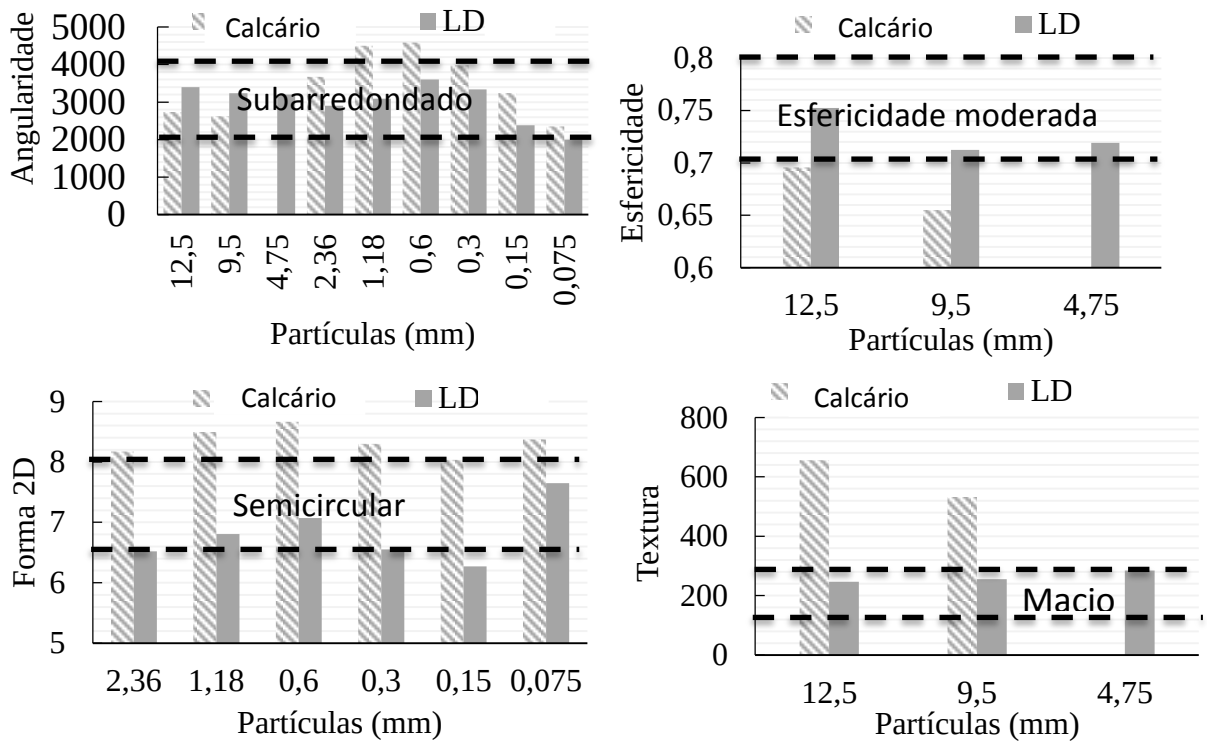
Tabela 16 - Resultados de classificação morfológica AIMS

Propriedade	Agregado	Número de Partículas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Classificação (Al-Rousan, 2004)
Forma 2D (miúdo)	Agregado Natural (Calcário)	1030	8,34	2,17	26	Semialongado
	Escória LD (Exp=3%)	1032	6,79	1,95	29	Semicircular
Angularidade (miúdo e graúdo)	Agregado Natural (Calcário)	1172	3622,3	1305,4	36	Subarredondado
	Escória LD (Exp=3%)	1242	2970,4	1299,2	44	Subarredondado
Textura (graúdo)	Agregado Natural (Calcário)	140	595,0	150,6	25	Alta Rugosidade
	Escória LD (Exp=3%)	210	262,4	81,8	31	Macio
Esfericidade (graúdo)	Agregado Natural (Calcário)	138	0,675	0,087	13	Baixa esfericidade
	Escória LD (Exp=3%)	210	0,728	0,096	13	Moderada esfericidade

Fonte: Castelo Branco (2017).

Figura 31 - Resultados das propriedades morfológicas pelo AIMS

(a) angularidade, (b) esfericidade, (c) forma 2D, e (d) textura.



Fonte: Adaptado pela autora.

Observam-se algumas diferenças ao comparar a morfologia do agregado siderúrgico e agregado natural (Figura 31). A partir dos resultados de angularidade (Figura 31a), valores mais altos de angulosidade foram obtidos para a LD em comparação com agregados calcários considerando a fração graúda (tamanho de 12,5 a 4,75mm). Para a fração fina (passando de 4,75 a 0,075 mm), esta tendência é invertida, dados os valores de angularidade mais altos para os agregados de calcário do que a LD.

Com relação à esfericidade, o agregado calcário apresenta baixa esfericidade (0,6-0,7), enquanto a LD apresenta esfericidade moderada (0,7 e 0,8), de acordo com os limites propostos (Al-Rousan, 2004). Os valores mais altos da escória LD indica que esta possui uma forma mais regular, menos suscetível a quebra do que o agregado natural. Além disso, a LD apresenta uma maior regularidade dos valores de esfericidade nas frações, enquanto é observada uma tendência de diminuição no valor de esfericidade do agregado natural para frações menores, no qual demonstra uma tendência a se tornar mais lamelar.

As características de forma 2D referem-se à partículas longas e achatadas. Quanto maior o valor de forma 2D, mais alongado é o agregado. O agregado natural apresentou valores mais elevados de forma 2D, portanto, é mais alongado. Esse resultado corrobora os valores de esfericidade, em que o agregado natural se mostrou mais lamelar. Essa diferença foi reduzida apenas para uma fração menor (0,075 mm), sugerindo que a forma dessas partículas menores sofre pouca ou nenhuma influência mineralógica. Quanto à textura, o agregado natural apresentou valores significativamente maiores, mostrando uma maior rugosidade que o agregado siderúrgico.

Geralmente, é preferível ter agregados mais ásperos e mais angulares do que agregados planos e alongados. Pesquisas anteriores afirmam que as características morfológicas dos agregados graúdos na SMA, são os principais fatores que afetam o desempenho mecânico da mistura SMA (NAIDU *et al.,* 2011; WANG *et al.,* 2016). Agregados com superfícies mais rugosas promovem uma melhor ligação das partículas ao ligante (BESSA *et al.,* 2014). As partículas esféricas são preferíveis por fornecer melhor atrito interno (CHEN *et al.,* 2013). Com uma maior angularidade, o agregado mostra uma maior resistência ao cisalhamento (SOUZA *et al.,* 2009). Partículas ásperas e angulares de agregados graúdos intertravam e proporcionam uma melhor superfície (KOGBARA, 2016).

Analisando os resultados obtidos pelo AIMS, verifica-se que a morfologia do agregado siderúrgico é distinta do agregado natural. Os agregados siderúrgicos são mais esféricos, menos alongados e possuem agregados graúdos com maior angularidade. O uso de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) é considerado uma ferramenta importante para caracterizar as propriedades de forma dos agregados e textura da superfície asfáltica.

3.1.9 Ensaio de Durabilidade

Para avaliação da durabilidade do agregado foi utilizado à solução de sulfato de sódio, conforme a norma DNER-ME 089/94. As amostras foram imersas na solução por um período de 17,5 horas, retiradas e colocadas em estufa a 110°C por 6,5 horas. O resultado do ensaio obtido após repetição do processo de imersão e secagem durante cinco ciclos pode ser visto a seguir.

Tabela 17 - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio

Material	Perda (%)	Requisitos
Escória LD (3%)	5,34	Máx. 15 (NAPA QIS 122) ou
Escória KR	24,20	Máx. 12 (DNIT 031/2006 - ES)
Agregado Natural	1,97	

Fonte: Própria autora.

Figura 32 - Ensaio de durabilidade (LD e KR)

Fonte: Própria autora.

Por causa do resultado, a ideia inicial de utilização de escória KR como agregado siderúrgico em misturas SMA foi descartada.

3.1.10 Ensaio de Adesividade

Para determinar a propriedade que o agregado tem de ser aderido pelo cimento asfáltico, foi aplicado o procedimento da norma técnica - DNER-ME 078/94. O ligante é aquecido a 120°C e o agregado a 100°C, prepara-se a amostra e põe em frasco de vidro totalmente coberto com água destilada em estufa a 40°C por 72 horas.

Após as 72 horas em estufa, o resultado das amostras ensaiadas foi satisfatório, pois não houve nenhum deslocamento de película betuminosa. No entanto, é importante destacar que o agregado siderúrgico apresentou uma melhor capacidade de aderência. É possível visualizar (Figura 33) uma melhor “cobertura e brilho” nos agregados siderúrgicos (KR e Acerita).

O agregado siderúrgico possui uma maior capacidade de formar ligação forte e coesa com o ligante, e seu elevado pH promove grande afinidade ao ligante, melhorando seus resultados de adesividade (WU *et al.,* 2007; HARSCO, 2008).

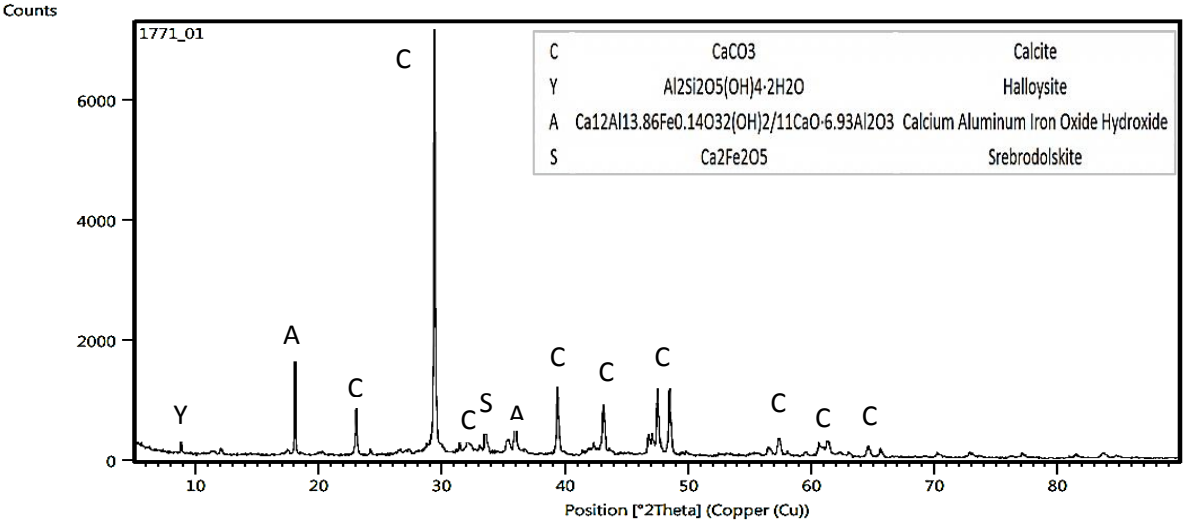
Figura 33 - Ensaio de Adesividade

Fonte: Própria autora.

3.1.11 Ensaio de Difração de Raios-X e Fluorescência de Raios-X

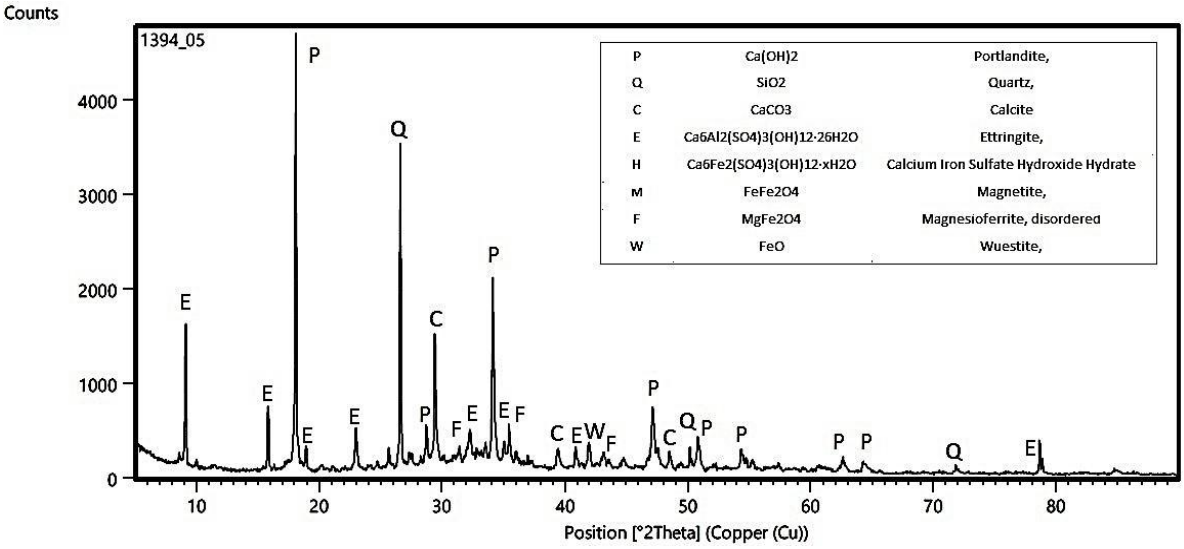
O ensaio de difração de raios-X (DRX) tem por objetivo detectar as fases minerais a partir da análise baseada na comparação do difratograma como os padrões disponíveis em banco de dados. Basicamente, efetua-se a determinação qualitativa para caracterização estrutural de substâncias cristalinas por difração de raios-X. As principais fases cristalinas das amostras LD e KR foram identificadas nos difratogramas a seguir.

Figura 34 - Difratograma de raios X – LD.



Fonte: Adaptado de NanoBusiness (2017).

Figura 35 - Difratograma de raios X – KR.



Fonte: Adaptado de NanoBusiness (2017).

Tanto a LD quanto a KR apresentaram picos de cristalinidade bem definidos. Foram encontrados carbonato de cálcio (cerca de 33,3% na KR e 87,5% na LD), a proporção de fase Portlandite ($Ca(OH)^2$) na amostra de KR é de cerca de 46%, possivelmente derivado da transformação do óxido de cálcio após exposição a umidade. Não foram encontradas as formas de periclásio e silicato dicálcico no difratograma de raios X, no qual de acordo com a literatura poderia provocar expansão. Foram detectados 31% de Etringita na KR, de acordo com Yan *et al*. (2018), a etringita em forma de agulha e outros produtos de hidratação podem formar uma estrutura espacial entrelaçada na pasta de cimento asfáltico.

A caracterização química de fases minerais das escórias foi determinada por análise semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) (Tabela 18).

Tabela 18 - Componentes químicos das escórias estudadas

Óxidos	LD	KR
Na_2O	0,042	0,12
MgO	2,38	2,7
Al_2O_3	2,20	5,1
SiO_2	9,18	14,6
CaO	45,39	44,8
MnO	2,03	1,7
Fe_2O_3	17,4	26
P_2O_5	0,84	0,51
SO_3	0,20	3,8
K_2O	0,03	< 0,1
TiO_2	0,21	0,33
SrO	-	0,11
CO_2	13,39	-
Cr_2O_3	0,13	-
Sb_2O_3	0,05	-
Cl	0,03	-
ZnO	0,03	-
BaO	0,01	-
CuO	0,005	-
Nb_2O_5	0,004	-

Fonte: Adaptado de NanoBusiness (2017).

3.1.12 Características Ambientais

O resíduo de escória de aciaria LD foi considerado um resíduo classe II B, não perigoso, inerte. O teste de toxidade realizado em 2017 indicou que o resíduo não é tóxico, apesar da presença de alguns metais.

O resíduo KR não apresenta características corrosivas, no entanto, foi classificado como não perigoso, não inerte, na classe II A. Devido ao fato do índice de fenóis do material solubilizado encontrar-se acima do limite do anexo G da norma ABNT NBR 10004.

Cabe dizer que a classificação II A, no qual indica um potencial de alteração dos padrões de potabilidade da água, combustibilidade e biodegradabilidade não deve ser um fator determinante para impedir a aplicação da escória KR em misturas asfálticas envolvidas com ligante. O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) possui padrões com valores máximos para lançamento de efluentes e orientadores para águas subterrâneas que apresentam limites muito superiores ao parâmetro de fenóis encontrado.

Tabela 19 - Resultado do índice de fenóis e limites da escória de dessulfuração (KR)

Índice de fenóis	Solubilizado (mg/L)	0,02
	NBR 10004 (mg/L)	0,01
	CONAMA nº 430 (mg/L)	< 0,5
	CONAMA nº 420 (mg/L)	< 0,14

Fonte: Própria autora.

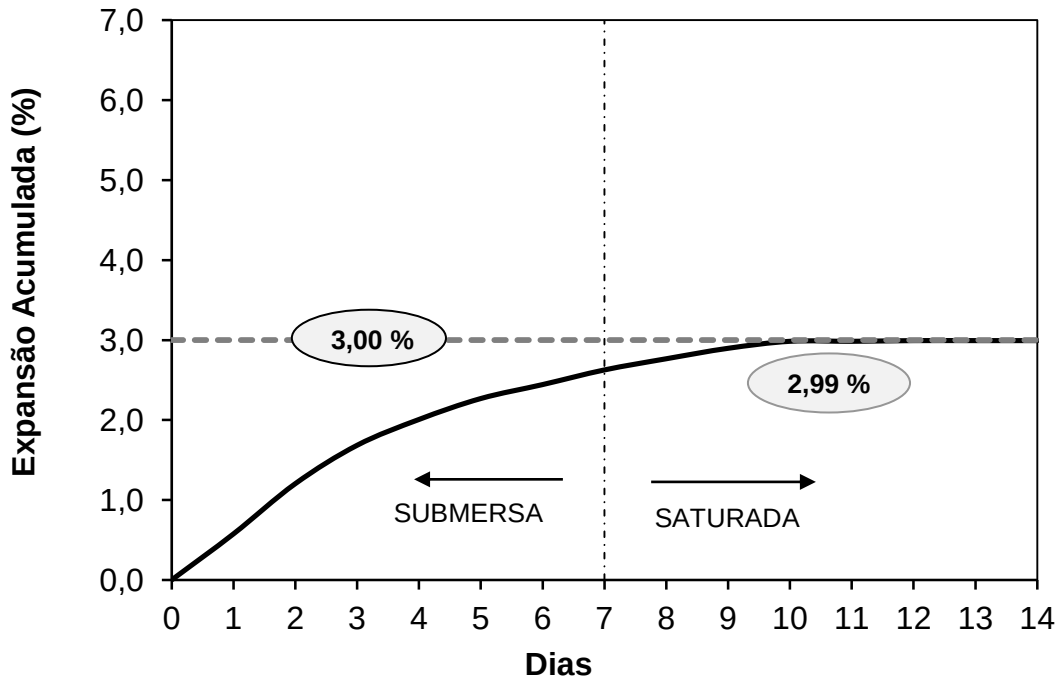
De acordo com Oliveira (2018), a presença de fenóis vai de encontro às condições do processo de produção do aço, onde os materiais são submetidos a elevadas temperaturas. Possivelmente sua presença pode estar ligada a contaminação durante a amostragem ou transporte. Logo, sugere-se que sejam repetidos os ensaios de caracterização ambiental da KR, a fim de confirmar a presença de fenóis.

3.1.13 Expansão

A avaliação do potencial de expansão de escória LD foi realizada de acordo com a NORMA DNIT 113/2009 – ME. Moldou-se na umidade ótima 5 corpos de prova em 3

camadas iguais de 56 golpes. Após 14 dias da condição de submersão foi calculada a porcentagem de expansão volumétrica total da leitura do extensômetro menos a leitura de base do extensômetro, dividida pela leitura inicial da amostra. A curva do tempo em dias *versus* a porcentagem de expansão acumulada pode ser visualizada a seguir:

Figura 36 - Avaliação da Expansibilidade



Fonte: Própria autora.

3.2 CIMENTO ASFÁLTICO

Nesta pesquisa foi utilizado o CAP 50/70, convencionalmente aplicado no estado do Espírito Santo. O ligante e os ensaios de caracterização foram fornecidos por empresa localizada na Grande Vitória (ES). A Tabela 20 apresenta as especificações do ligante utilizado para a confecção das misturas asfálticas SMA.

Para ligantes asfálticos puros, ou seja, sem polímeros modificadores a norma AASHTO R-46 (2008) recomenda que a faixa de temperatura para a mistura e compactação esteja entre 170±20cST e 280±30cST, respectivamente. Ou seja, a temperatura do cimento asfáltico na hora de ser misturado deve ser tal que a

viscosidade atinja 170 ± 20 centistokes. Tipicamente entre 155º e 163ºC, não devendo exceder 177ºC.

Tabela 20 - Especificações do CAP 50/70

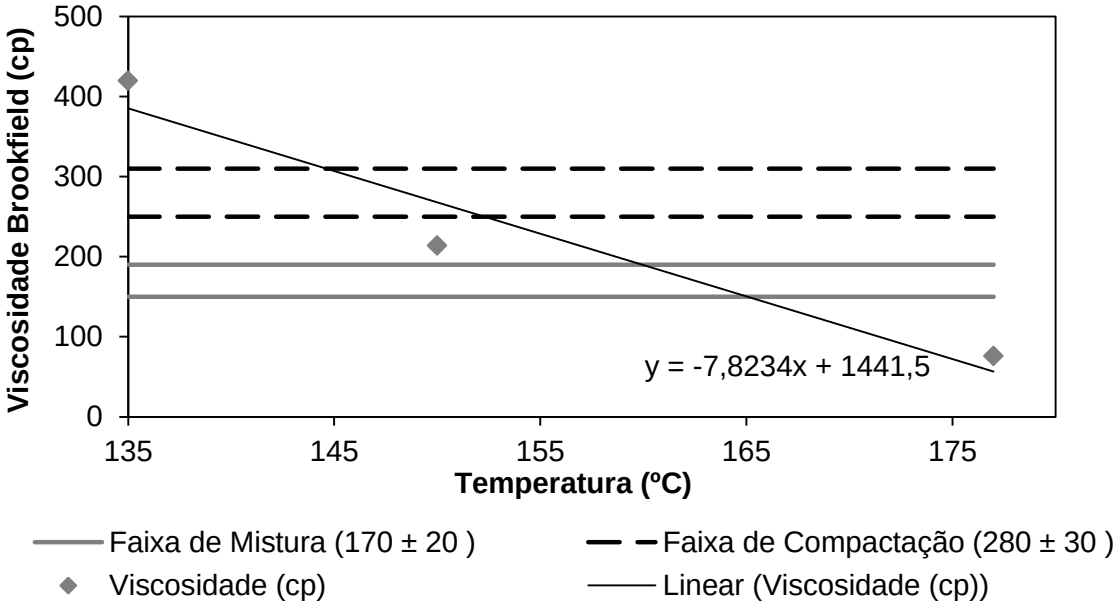
CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento asfáltico 50/70)				
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	57	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	46 min	49,9	grau C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20RPM	D4402	274 min	420	cp
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D4402	112 min	214	cp
Viscosidade Brookfield a 177 GC SP21	D4402	57 a 285	76	cp
RTFOT penetração retida	D5	55 min	58	%
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D36	8 max	6,4	grau C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D113	20 min	>150	cm
RTFOT Variação em % massa	D2872	-0,5 a 0,5	-0,367	%
Ductilidade a 25 GC	D113	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5 min	100,0 (3)	%massa
Ponto de fulgor	D92	235 min	>300	grau C
Índice de suscetilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-0,9	N/A
Densidade relativa a 20/4 Graus celsius	D70	Anotar (1)	1,052	N/A
Aquecimento a 177 GC	X215	NESP (2)	NESP	N/A

Fonte: Refinaria Petrobras/REDUC.

Por meio da especificação disponibilizada pelo fabricante, foi traçado a curva de viscosidade Brookfield e encontrado às temperaturas de mistura e de compactação, como 163°C e 148°C, respectivamente. Vale destacar que se optou por trabalhar numa faixa de temperatura, obtida com os limites superiores e inferiores da curva.

- Temperatura de mistura entre 160°C e 165°C.
- Temperatura de compactação entre 145°C e 152°C.

Figura 37 - Curva de viscosidade Brookfield *versus* Temperatura.



Fonte: Própria autora.

3.3 PROJETO DE MISTURA SMA

Foram adotadas as curvas granulométricas dentro das faixas limítrofes das normas dos Estados Unidos (NAPA QIS 122) 19,0 mm e Alemanha SMA 16 B S (FGSV HALABI 2014). No proporcionamento dos agregados, buscou-se utilizar a máxima quantidade possível de agregados siderúrgicos em cada composição, a princípio, respeitando a distribuição granulométrica de cada material. Desse modo, foi possível usar 30% de agregados siderúrgicos para a faixa dos Estados Unidos e 50% de agregados siderúrgicos para a faixa da Alemanha. As composições granulométricas escolhidas são apresentadas a seguir:

Tabela 21 - Granulometria da mistura SMA 16mm (SMA_0%LD)

PENEIRAS		B1	PP	Granilha	Filer	Resultante Passante
Série ASTM	Abertura (mm)	37%	14%	44%	5%	100%
7/8"	22,4	100,0%	100,0%	100%	100,0%	100,0%
5/8"	16	87,3%	100,0%	100%	100,0%	95,3%
7/16"	11,2	25,3%	100,0%	100%	100,0%	72,4%
5/16"	8	2,5%	100,0%	100%	100,0%	49,9%
10	2	1,4%	86,5%	20%	100,0%	26,5%
230	0,063	1,1%	12,0%	1%	100,0%	7,4%

Fonte: Própria autora.

Tabela 22 - Composição granulométrica da mistura SMA 19mm (SMA_30%LD)

Peneiras		LD (3%)	B1	B0	Filer	Curva Granulométrica
Polegadas	Abertura (mm)	30%	51%	12%	7%	
1"	25	100%	100%	100%	100%	100%
3/4"	19	98%	99%	100%	100%	99%
1/2"	12,5	86%	51%	100%	100%	71%
3/8"	9,5	76%	12%	94%	100%	47%
nº 4	4,75	58%	3%	17%	100%	28%
nº 8	2,36	46%	3%	7%	100%	23%
nº 16	1,18	37%	3%	6%	100%	20%
nº 30	0,6	29%	2%	6%	100%	18%
nº 50	0,3	21%	2%	5%	100%	15%
nº 200	0,075	5%	1%	2%	100%	9%

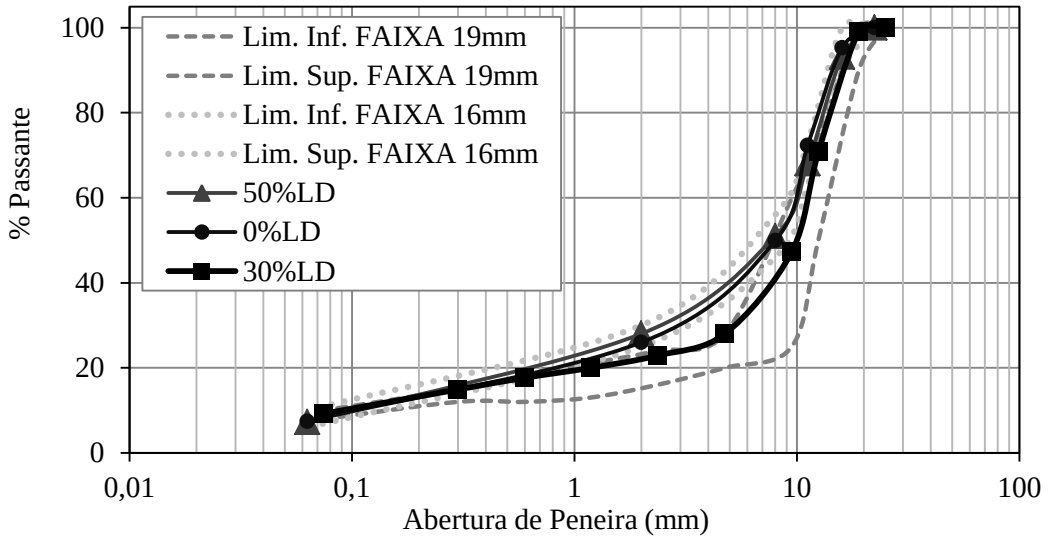
Fonte: Própria autora.

Tabela 23 - Granulometria da mistura SMA 16mm (SMA_50%LD)

Peneiras		LD (3%)	B1	B0	Filer	Granulometria (%)
Polegadas	Abertura (mm)	50%	31%	15%	4%	
7/8"	22,4	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
5/8"	16	94,3%	87,3%	100,0%	100,0%	93%
7/16"	11,2	82,8%	25,3%	98,9%	100,0%	68%
5/16"	8	72,2%	2,5%	67,4%	100,0%	51%
nº 10	2	46,4%	1,4%	2,5%	100,0%	28%
nº 230	0,063	5,5%	1,1%	1,0%	100,0%	7%

Fonte: Própria autora.

Figura 38 - Curvas granulométricas desta pesquisa



Fonte: Própria autora.

As misturas testadas foram denominadas da seguinte forma:

- SMA_30%LD_PP_s/fibra
- SMA_30%LD_PP_c/fibra
- SMA_30%LD_KR_s/fibra
- SMA_50%LD_PP_s/fibra
- SMA_50%LD_PP_c/fibra
- SMA_50%LD_KR_s/fibra
- SMA_0%LD_PP_s/fibra

Trata-se de misturas com 0%, 30% e 50% de agregado LD (3% de expansão), com e sem a inserção as fibras, com filer natural e com filer KR. Logo, houve variações no percentual de agregado siderúrgico, no tipo de material de enchimento (pó de pedra e KR moídos) e no uso de fibra de celulose (tipo TOPCEL, em pellet), cuja especificação pode ser vista na Tabela 24.

Tabela 24 - Especificação técnica da fibra TOPCEL

Especificações	Valor
Teor de fibra (%)	Aprox. 95-98
Acréscimo (%)	1,5 - 2,5
Densidade Aparente (g/l)	420 - 480
Umidade (%)	< 6.0
Resíduo de combustão (%)	Aprox. 15
Dosagem Recomendada (%peso)	0,3

Fonte: CFF GmbH & Co. KG, adaptado pela autora.

Figura 39 - Fibra de celulose em pellet

Fonte: Própria autora.

Após definição dos materiais e das composições granulométricas, prosseguiu com a definição do teor de projeto necessário para atender aos requisitos mínimos exigidos em norma. Para composição dos corpos de prova das misturas, todos os materiais foram peneirados e separados em cada fração nas suas respectivas peneiras. O conjunto de imagens da Figura 41 ilustra parte do procedimento realizado para dosagem e posterior confecção dos corpos de prova.

Figura 40 - Agr. siderúrgico peneirado e separado para as misturas.

Fonte: Própria autora.

Figura 41 - Ensaio Marshall

Fonte: Própria autora.

Com relação à usinagem dos corpos de prova, para dosagem e confecção de CP´s Marshall implementou a recomendação da NAPA (2002) para misturas SMA. Em que estabelece aplicação da energia de compactação igual a 50 golpes em cada face. O procedimento adotado foi descrito a seguir:

- As proporções dos agregados para composição de cada corpo de prova foram separadas individualmente, peneira por peneira, visando minimizar o erro na reprodução da granulometria escolhida para produção das misturas.
- Os agregados foram aquecidos à temperatura de mistura por duas horas. O ligante aquecido à temperatura de mistura por uma hora.
- As fibras de celulose foram adicionadas aos agregados aquecidos, sem aquecimento prévio e misturadas com energia suficiente para provocar a sua abertura, por meio do atrito com os agregados.
- Após a adição das fibras de celulose, foi adicionado o ligante asfáltico e realizado o processo de envolvimento dos agregados pelo ligante, durante um tempo médio de mistura manual de 5,5 minutos, em fogão a gás.
- Ao final da operação, a mistura foi aquecida, em estufa à temperatura de compactação por duas horas, posteriormente inserida nos moldes e compactada no equipamento Marshall (50 golpes em cada face).

Para obtenção de um esqueleto pétreo onde seja garantido o correto intertravamento entre os grãos de agregados graúdos é necessário que a quantidade de vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada $(\mathrm{VCA_{MIX}})$ seja menor ou igual aos vazios da fração graúda do agregado compactado $(\mathrm{VCA_{DRC}})$. A verificação da condição $\mathrm{VCA_{MIX}} \leq \mathrm{VCA_{DRC}}$ assegura o correto contato e formação do esqueleto pétreo para se evitar rupturas e possibilitar a correta transmissão de cargas do tráfego. De acordo com a NAPA (2002), para o cálculo devem-se aplicar as seguintes equações:

$$\mathrm{VCA_{DRC}} = \left(\frac{\mathrm{G_{CA}}\,\gamma_{\mathrm{w}} - \gamma_{\mathrm{s}}}{\mathrm{G_{CA}}\,\gamma_{\mathrm{w}}}\right) 100 \qquad (10)$$

Onde: $\mathrm{VCA_{DRC}}$ são os vazios da fração graúda do agregado seco compactado (%);

$\mathrm{G_{CA}}$ é a densidade aparente do agregado graúdo.

γ_S é a massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado (kg/m^3);

γ_W é a massa específica da água (998kg/m³).

$$VCA_{MIX} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}}\right) P_{bp} \quad (11)$$

Onde: VCA_{MIX} são os vazios da fração graúda do agregado obtido da mistura compactada (%);

G_{ca} é a densidade aparente do agregado graúdo;

G_{mb} é a densidade aparente da mistura compactada;

P_{bp} é a porcentagem de agregado graúdo em relação ao peso total da mistura.

A pesquisa fez uso de duas faixas granulométricas, com duas “peneiras de corte”. Para a faixa 19mm, a peneira de corte utilizada nos cálculos foi a peneira com abertura de 4,75mm (nº4) e para a Faixa 16mm, foi a peneira com abertura de 2mm (nº 10). Logo, foram encontrados percentuais bem próximos em ambas as peneiras. As misturas enquadradas na Faixa 19mm possui 71,87% de agregados graúdos enquanto as misturas enquadradas na Faixa 16mm 71,97%. Além disso, como se trata de agregados de origens diferentes (granítica e siderúrgica), a massa específica aparente e a massa unitária da fração graúda foram obtidas por meio da composição combinada dos agregados. Os resultados dos parâmetros que indicam que a condição de contato do esqueleto pétreo foi garantida ($VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC}$) são demonstrados na Tabela 26.

Tabela 25 - Densidade aparente do agr. graúdo, massa específica aparente

Misturas	G_{CA} (g/cm^3)	Gsb (g/cm^3)	γ_S (kg/m³)
SMA_30%LD	2,82	2,85	1632,59
SMA_50%LD	2,85	2,89	1678,54
SMA_0%LD	2,81	2,81	1569,44

Fonte: Própria autora.

Tabela 26 - VCA_{MIX} e do VCA_{DRC} no estado compactado

Misturas	VCA_{mix}	VCA_{DRC}
SMA_30%LD_PP_s/fibra	39,7%	42,0%
SMA_30%LD_PP_c/fibra	39,8%	42,0%
SMA_30%LD_KR_s/fibra	41,3%	42,0%
SMA_50%LD_PP_s/fibra	40,4%	41,0%
SMA_50%LD_PP_c/fibra	40,7%	41,0%
SMA_50%LD_KR_s/fibra	40,7%	41,0%
SMA_0%LD_PP_s/fibra	38,0%	44,0%

Fonte: Própria autora.

No Brasil a massa específica máxima é tradicionalmente obtida por meio da ponderação das massas específicas dos constituintes da mistura. A obtenção da Densidade Máxima Teórica (DMT) é feita por meio da seguinte fórmula:

$$\mathrm{DMT} = \frac{100}{\frac{\%\mathrm{CAP}}{\gamma_{\mathrm{CAP}}} + \frac{\%\mathrm{AG}}{\gamma_{\mathrm{AG}}} + \frac{\%\mathrm{AM}}{\gamma_{\mathrm{AM}}} + \frac{\%\mathrm{f}}{\gamma_{\mathrm{f}}}} \tag{12}$$

Onde:

%CAP, %AG, %AM, %f são as porcentagens de cimento asfáltico, agregado graúdo, agregado miúdo e filer, respectivamente.

$\gamma_{\mathrm{CAP}}, \gamma_{\mathrm{AG}}, \gamma_{\mathrm{AM}}, \gamma_{\mathrm{f}}$ são massas específicas reais do ligante, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do filer, respectivamente.

Cabe destacar que as misturas compactadas apresentaram absorção menor do que 2%, mas devido ao fato da mistura SMA possuir elevada concentração de vazios no seu exterior, durante a obtenção do peso saturado ocorre uma considerável perda de água na condição saturada com superfície seca. Por esse motivo, para encontrar a massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb}) utilizou-se a norma ASTM D1188-07 (2015).

O procedimento consiste na pesagem do corpo de prova no estado seco, no estado seco envolvido por um parafilme e submerso com o parafilme. A massa específica

do parafilme (0,7g/cm³) foi obtida com o emprego de um cilindro de calibração, de alumínio com 2,7g/cm^3 e 10 cm de diâmetro por 6 cm de altura. A G_{mb} é obtida pela seguinte equação:

$$\text{Massa específica} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{D} - \mathrm{E} - \frac{\mathrm{D} - \mathrm{A}}{\mathrm{F}}} \tag{13}$$

Onde: A é a massa do corpo de prova seco ao ar, g.

D é a massa do corpo de prova seco envolvido com parafilme, g.

E é a massa do corpo de prova envolvido com parafilme submerso, g.

F é a massa específica do parafilme à 25ºC.

Figura 42 - Detalhe de aberturas no exterior, parafilme e cilindro.

Fonte: Própria autora.

Após obtenção dos valores do DMT e G_{mb}, foi calculado o volume de vazios (Vv) das misturas através da Equação 14:

$$Vv = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{DMT}\right) \tag{14}$$

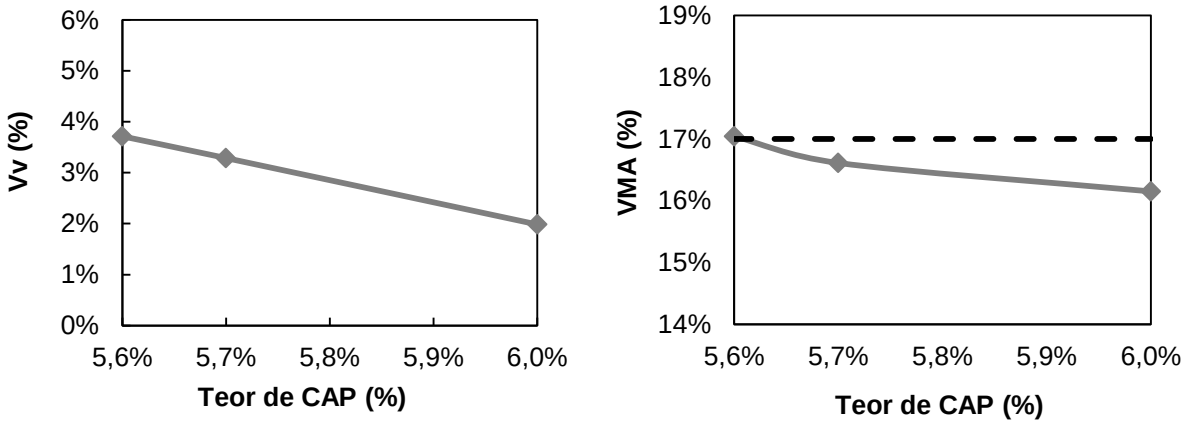
Para a obtenção do teor de projeto, foram moldados corpos de prova objetivando encontrar o volume de vazios em 4% (±0,5) e um teor mínimo de ligante 6%. É importante acrescentar que de acordo as diretrizes NAPA (2002), esse teor de ligante mínimo é para uma composição de agregados de densidade igual a 2,75. Como a densidade da mistura dos agregados é diferente, um ajuste deve ser feito para se determinar o teor mínimo necessário. O percentual mínimo de ligante deve ser acrescentado em 0,1% para cada incremento de 0,05 acima de 2,75 g/cm^3. A Tabela 27 mostra os valores mínimos requeridos para as misturas estudadas e os resultados da dosagem Marshall para as composições estudadas podem ser visualizados na Tabela 28. As Figuras 43 a 56 mostram graficamente os parâmetros volumétricos encontrados para as tentativas variando o teor de ligante.

Tabela 27 - Incremento no teor mínimo necessário

Misturas	Gsb	Teor
SMA_30%LD	2,85	6,2% min
SMA_50%LD	2,89	6,2% min
SMA_0%LD	2,81	6,1% min

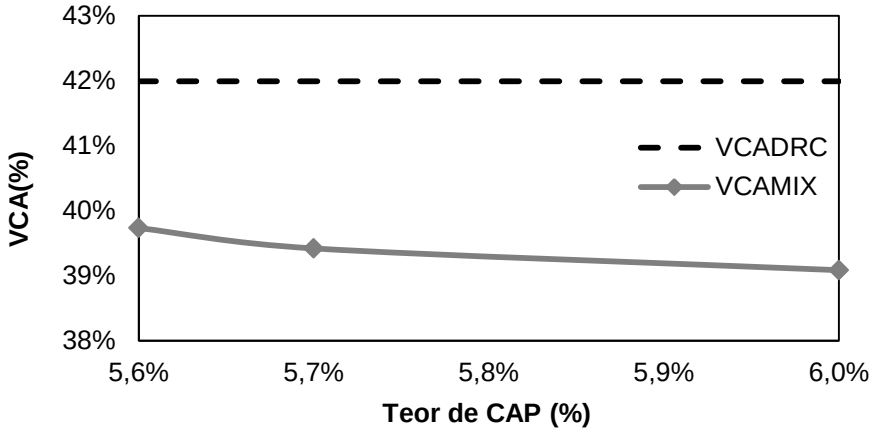
Fonte: Própria autora.

Figura 43 - Vv e VMA *versus* teor de ligante - SMA_30%LD_PP_s/fibra



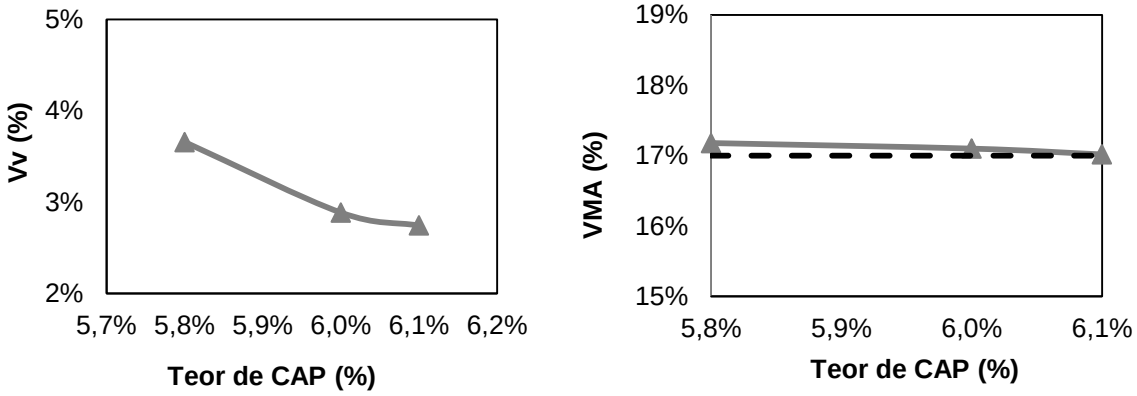
Fonte: Própria autora.

Figura 44 - VCAMIX e VCADRC *versus* teor de ligante - SMA_30%LD_PP_s/fibra



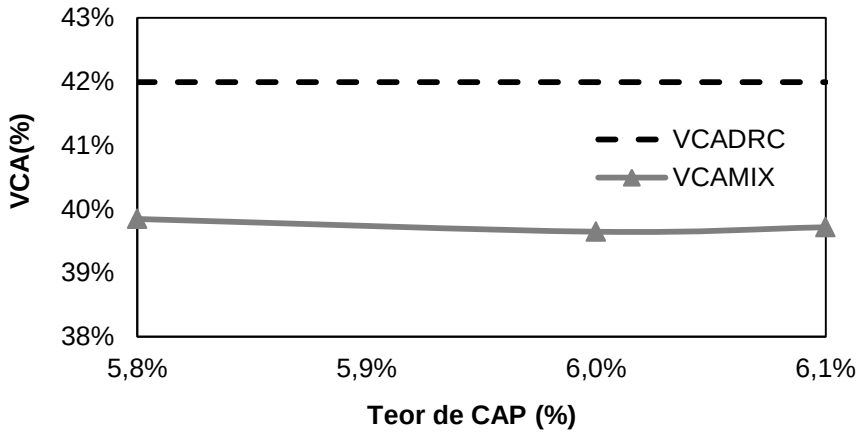
Fonte: Própria autora.

Figura 45 - Vv e VMA *versus* teor de ligante SMA_30%LD_PP_c/fibra



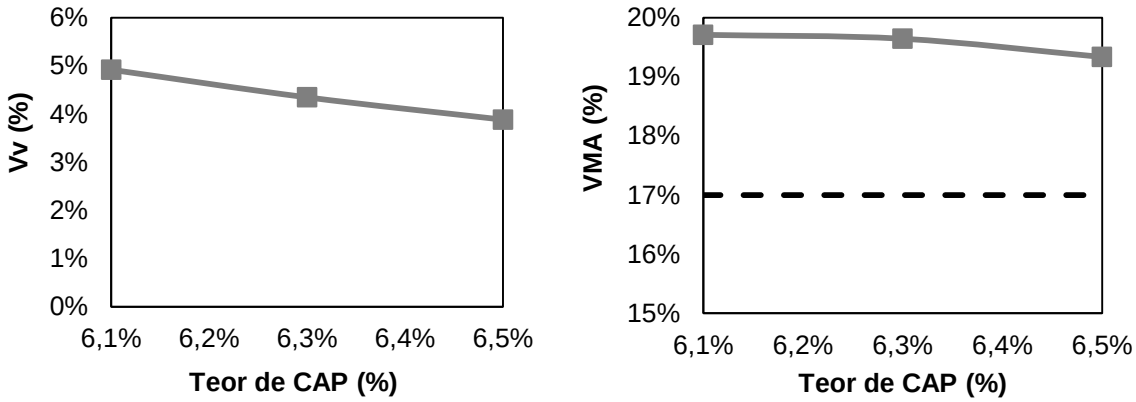
Fonte: Própria autora.

Figura 46 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} *versus* teor de ligante - SMA_30%LD_PP_c/fibra.



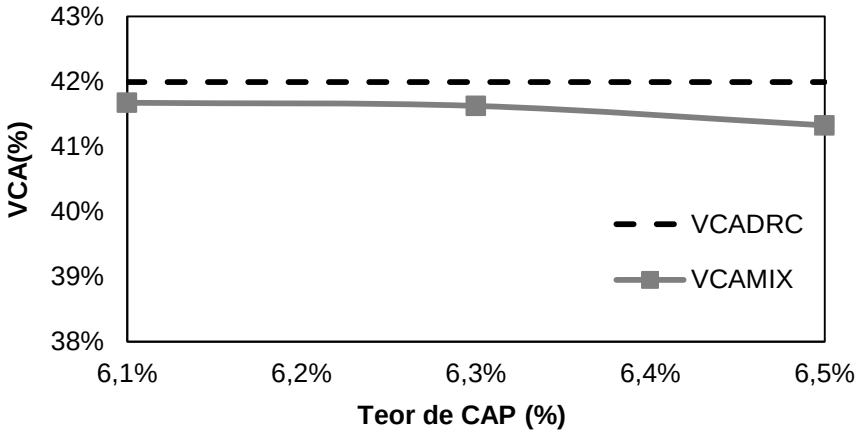
Fonte: Própria autora.

Figura 47 - Vv e VMA *versus* teor de ligante - SMA_30%LD_KR_s/fibra



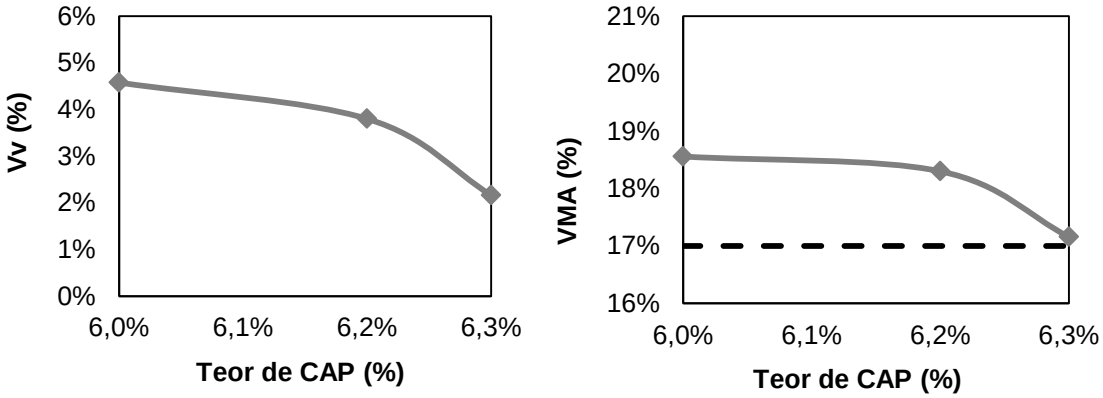
Fonte: Própria autora.

Figura 48 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} *versus* teor de ligante - SMA_30%LD_KR_s/fibra



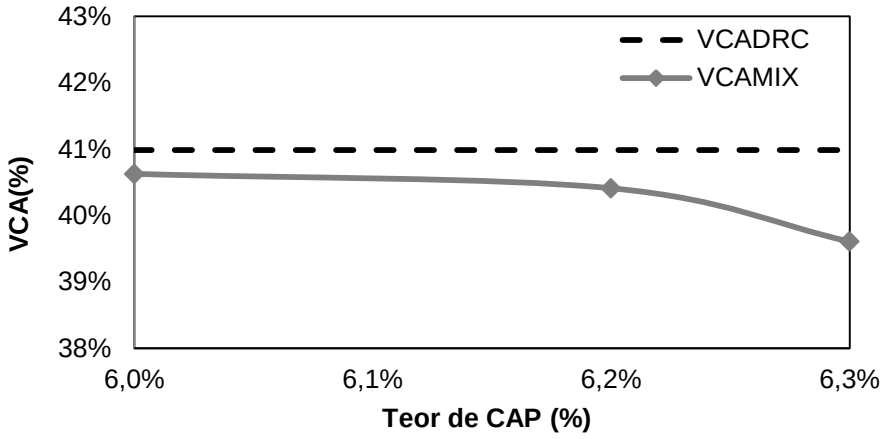
Fonte: Própria autora.

Figura 49 - Vv e VMA *versus* teor de ligante - SMA_50%LD_PP_s/fibra



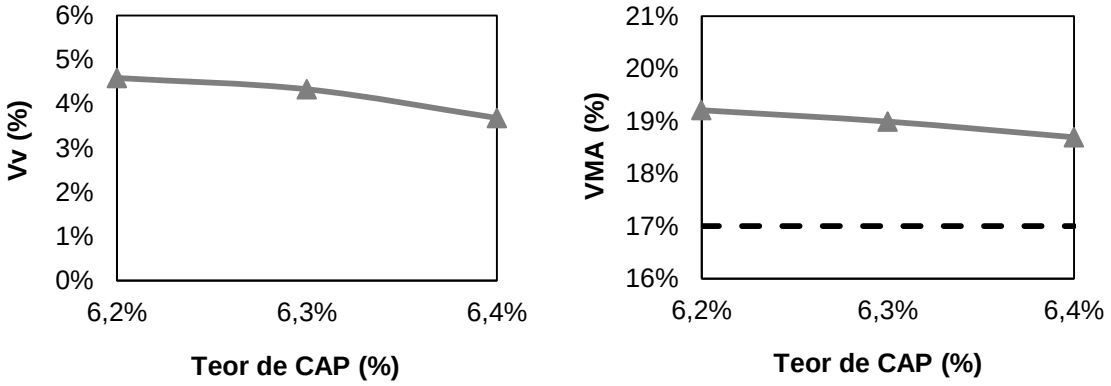
Fonte: Própria autora.

Figura 50 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} *versus* teor de ligante - SMA_50%LD_PP_s/fibra.



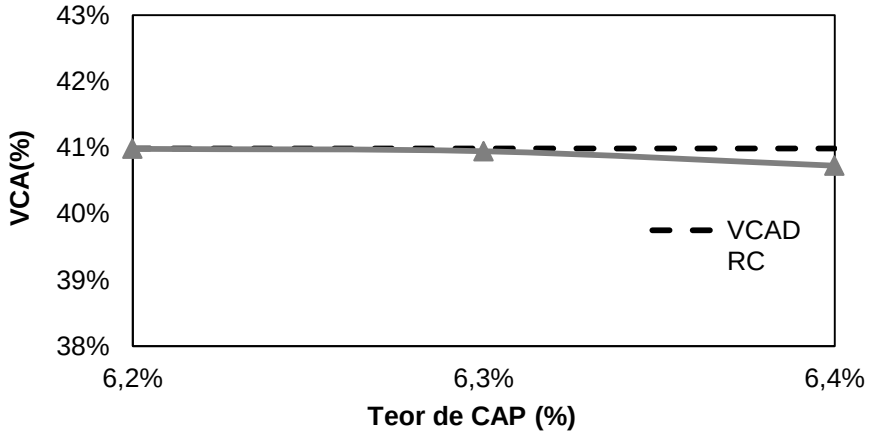
Fonte: Própria autora.

Figura 51 - Vv e VMA *versus* teor de ligante - SMA_50%LD_PP_c/fibra



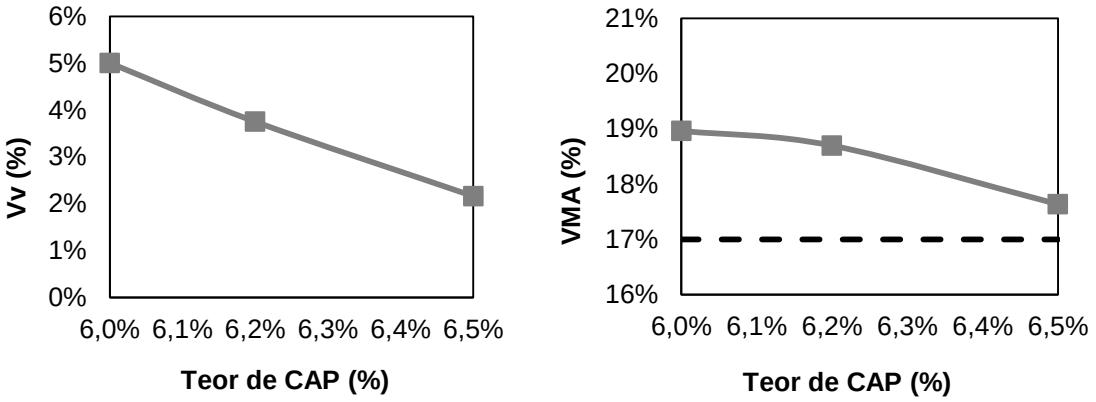
Fonte: Própria autora.

Figura 52 - VCA_{MIX} e VCA_{DRC} *versus* teor de ligante - SMA_50%LD_PP_c/fibra



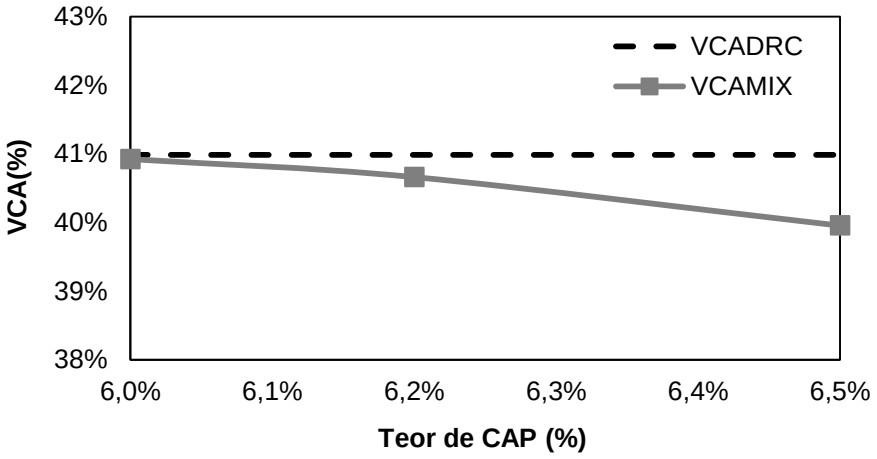
Fonte: Própria autora.

Figura 53 - Vv e VMA *versus* teor de ligante -SMA_50%LD_KR_s/fibra



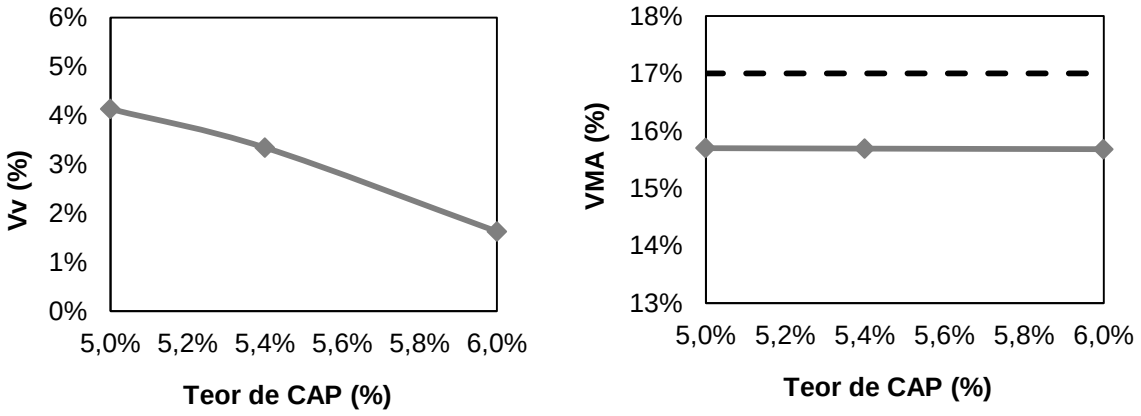
Fonte: Própria autora.

Figura 54 - VCAMIX e VCADRC *versus* teor de ligante - SMA_50%LD_KR_s/fibra



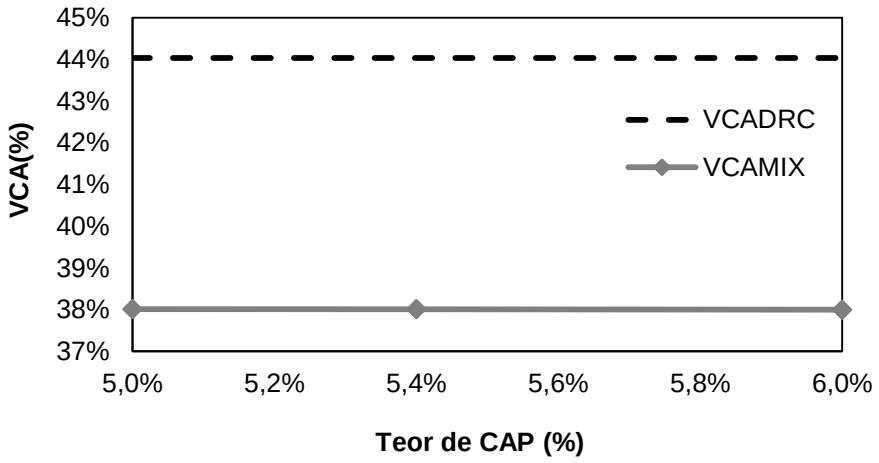
Fonte: Própria autora.

Figura 55 - Vv e VMA *versus* teor de ligante - SMA_0%LD_PP_s/fibra



Fonte: Própria autora.

Figura 56 - VCAMIX e VCADRC *versus* teor de ligante - SMA_0%LD_PP_s/fibra



Fonte: Própria autora.

Tabela 28 - Resultados da Dosagem

Misturas	Teor de Projeto (%)	DMT	Gmb	Vv (%)	VMA(%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	5,6	2,611	2,505	3,7	17,0
SMA_30%LD_PP_c/fibra	5,8	2,602	2,502	3,6	17,2
SMA_30%LD_KR_s/fibra	6,5	2,548	2,463	3,9	19,3
SMA_50%LD_PP_s/fibra	6,2	2,613	2,509	3,8	18,3
SMA_50%LD_PP_c/fibra	6,4	2,605	2,504	3,7	18,7
SMA_50%LD_KR_s/fibra	6,2	2,611	2,507	3,8	18,7
SMA_0%LD_PP_s/fibra	5,0	2,598	2,502	4,1	15,7

Fonte: Própria autora.

Ao analisar os resultados, percebe-se que todas as misturas garantiram a condição de contato do esqueleto pétreo ($VCA_{MIX} \leq VCA_{DRC}$). Além disso, a mistura com 0%LD ficou com um VMA abaixo do limite de 17% e as misturas com 30%LD sem fibra, 30%LD com fibra e 0%LD não alcançaram o teor mínimo necessário para o projeto SMA (6%).

O efeito da fibra pode ser observado ao considerar as misturas com a mesma graduação e tipo de enchimentos diferentes. A adição de fibra tende a aumentar o conteúdo do ligante. O efeito do filer também foi notado, ao substituir pó de pedra por filer de KR na mistura com 30% aumentou significativamente a quantidade necessária de ligante. Esse resultado está relacionado à absorção do filer de KR. Entretanto, para as misturas com 50% LD, a substituição de pó de pedra por KR não

afetou o teor ótimo de ligante. Isso pode ser explicado pela porcentagem de filer adicionada para atender aos critérios de limite das diferentes faixas de graduação (na mistura com 30%LD foi utilizado 7% de KR, enquanto que na mistura com 50%LD foi utilizado 4%). Desse modo, o efeito das características do filer foi mais relevante nas misturas da Faixa 19 mm.

É importante ressaltar que inicialmente buscava-se o atendimento a especificação americana do NCAT in NCHRP Project 9-8 para a Faixa 19 mm, utilizando 30% de agregado siderúrgico. No entanto, devido à impossibilidade de enquadramento na especificação americana e após verificar uma considerável melhora nos teores devido ao aumento de agregado siderúrgico na mistura, optou-se por utilizar a Faixa 16 mm proposta por FGSV (2015).

Assim, foi possível projetar misturas que se enquadrassem nos limites SMA 16BS com 50%LD. Porém, vale destacar que, assim como Tavares (2012), foi percebida uma maior dificuldade no processo de envolvimento dos agregados siderúrgicos pelo ligante. O tempo médio de mistura manual passou de quatro minutos com 0%LD para sete minutos com 50%LD. Tavares (2012) afirma que, como se trata de um material diferente do convencional, talvez o parâmetro de 4% de vazios não deveria ser absoluto na fase de definição do teor de projeto. Cabe ressaltar que o principal diferenciador do relatório da FGSV AK 7.3.3. “Inovações” de H Al ABI (2015) da Alemanha para misturas SMA, está no projeto de dosagem com possibilidade de redução do índice de vazios até 1,5%. Algumas pesquisas realizadas no Brasil encontraram valores de teor de projeto ou VMA abaixo do limite imposto no SMA, conforme Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados de pesquisas brasileiras com SMA

Autores	Vv (%)	Teor de CAP (%)	VMA (%)
SILVA (2016)	4,00	5,1	16,28
RAMOS (2015)	4,20	5,5	17,00
SILVA (2012)	4,35	5,5	18,06
TAVARES (2012)	3,70	6,0	11,20
TAVARES (2012)	3,90	7,5	16,00
SILVA (2012)	4,00	5,6	18,00
MOTTA *et al.* (2010)	3,75	4,5	14,47
MOTTA *et al.* (2010)	3,57	5,0	15,44
DO VALE (2007)	3,5	5,9	17,00

Fonte: Própria autora.

Afonso *et al.* (2016), em seu estudo em Portugal, demonstraram resultados de teor de ligante abaixo daquele encontrado em países europeus. Na formulação da mistura SMA 16 o teor ótimo de ligante de 5,5% foi encontrado.

3.4 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Independente do enquadramento nos limites normativos, todas as misturas estudadas foram submetidas aos ensaios de estabilidade, fluência e escorrimento para verificação do atendimento aos parâmetros de dosagem bem como aos ensaios mecânicos adicionais (resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida e abrasão Los Angeles), a fim de verificar as suas características técnicas.

3.4.1. Ensaio de Estabilidade e Fluência

Para a determinação da estabilidade e fluência, foi utilizada a norma de ensaio Marshall DNER-ME 043/95. Em resumo, após a confecção dos corpos de prova seguiu-se com a extração a 25°C e posterior imersão em banho-maria a 60°C durante 40 minutos. Em seguida, cada corpo de prova foi inserido no molde de compressão, que estava à temperatura de 25°C. O conjunto (molde e corpo de prova) foi posicionado na prensa de compressão axial computadorizada (5t), e programada para que o êmbolo se movimentasse a 5cm/min até o rompimento do corpo de prova. O valor da estabilidade Marshall é obtido após leitura da carga necessária ao rompimento em Kgf e correção da espessura do corpo de prova ensaiado por meio do seguinte fator:

$$f = 927{,}23h^{-1{,}64} \tag{15}$$

A obtenção do valor de fluência é simultânea com o defletômetro. No final, os resultados de carga e fluência até o rompimento são disponibilizados em uma planilha.

Figura 57 - Estabilidade e Fluência Marshall.

Fonte: Própria autora.

3.4.2 Ensaio de Escorrimento de Misturas Não Compactadas

O ensaio de escorrimento de misturas asfálticas não compactadas, normatizado pela ASTM D6390-11 (2017), avalia o escorrimento das misturas a níveis aceitáveis. Determina a quantidade de ligante que se desprende dos agregados em uma mistura solta quando a amostra é mantida a elevadas temperaturas. O ensaio de escorrimento é particularmente aplicável a misturas de graduação aberta (CPA) e misturas descontínuas do tipo SMA. Simula o escoamento durante a produção, armazenamento, transporte e aplicação da mistura.

O escorrimento do ligante foi testado à temperatura de mistura (163°C) e 15°C acima (178°C). Em resumo, prepara-se a mistura asfáltica, efetua a pesagem da cesta vazia (A), da cesta com a amostra (B), do prato antes (C) e após ser colocado sob a cesta na estufa pelo período de uma hora (D). A porcentagem de escorrimento é determinada por meio da seguinte expressão:

$$\text{Escorrimento}(\%) = \frac{(\mathrm{D} - \mathrm{C})}{(\mathrm{B} - \mathrm{A})} \times 100 \qquad (16)$$

Sendo: A = Massa da cesta vazia (g).

B = Massa da cesta e amostra (g).

C = Massa do recipiente de captura vazio (g).

D = Massa do recipiente com ligante escorrido (g).

De acordo com a norma, para que não haja escorrimento do ligante asfáltico na produção e espalhamento da mistura durante a aplicação, o valor de escorrimento não deve ultrapassar o valor de 0,3%.

3.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio para determinação da resistência à tração obtida de forma indireta por meio da compressão diametral dos corpos de prova moldados em laboratório seguiu o procedimento descrito na norma da ABNT NBR 15087/2012. O método submete os corpos de prova, com diâmetro (D) conhecido, a uma carga de compressão na velocidade de deslocamento de 0,8±0,1mm/s, obter a carga de ruptura (F) e calcula o valor da resistência à tração por compressão diametral (RT) por meio da equação 17:

$$\mathrm{RT} = \frac{2\mathrm{F}}{\pi \mathrm{DH}} \tag{17}$$

Figura 58 - Ensaio de tração por compressão diametral (NBR 15087:2012)

Fonte: Própria autora.

3.4.4 Ensaio Cantabro

Foi realizado o ensaio Cantabro para determinar o desgaste por abrasão, conforme procedimento de ensaio descrito na norma DNER-ME 383/99. O ensaio consiste em pesar-se cada corpo de prova, antes (P) e após (P’) as 300 revoluções do tambor, sem carga abrasiva. O cálculo do desgaste é encontrado após aplicação da fórmula 18:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \tag{18}$$

Figura 59 - Ensaio de Desgaste por abrasão Los Angeles

Fonte: Própria autora.

Em sua pesquisa, Takahashi *et al.* (2011) utilizam um método japonês (Hosoubinran 3-7-2) para obter a abrasão de superfície. Constatou que a taxa de geração de pó por abrasão de misturas com escória é de 1,5 a 3,0 vezes maior do que a mistura de referência. Sugere que a fragmentação dos agregados de escória depende não apenas da resistência à abrasão do agregado de escória, mas também de outros fatores, como o intertravamento entre agregado e material asfáltico.

3.4.5 Dano por Umidade Induzida

Para o ensaio de dano por umidade induzida foram produzidos conjuntos de seis corpos de prova no teor de projeto com volume de vazios entre 6% e 8%. O ensaio descrito pela norma ABNT NBR 15617/2015 consiste na saturação de três corpos de prova, acondicionamento em presença de água e determinação do dano com o ensaio de tração.

O procedimento de condicionamento deve ser seguido quando o grau de saturação estiver entre 55% e 80%. O conjunto de três corpos de prova de cada mistura foi submetido ao condicionamento referente à elevada severidade. Foram embalados em filme plástico parafinado e colocados em um saco plástico impermeável com 10ml de água. Submetidos ao resfriamento a temperatura de -18±3°C por um período de 16 horas, imerso em banho de água a 60±1°C por 24 horas, com submersão imediata em banho de água a 25±1°C por três horas e por último submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A razão de resistência à tração retida (RRT) foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$RRT = \frac{RT_2}{RT_1} \tag{19}$$

Onde:

RT_1 é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que não sofreram condicionamento.

RT_2 é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que sofreram condicionamento.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Neste capítulo serão apresentados uma síntese das características dos agregados estudados e os resultados dos ensaios físicos e mecânicos das sete misturas. Foram avaliadas as características e comportamentos do SMA, levando-se em consideração a norma, a distribuição granulométrica, o teor de projeto e o emprego de fibras de celulose. Para cada mistura e ensaio executado, foram moldados três corpos de prova no teor de projeto e realizado os ensaios de estabilidade e fluência Marshall, escorrimento, resistência à tração por compressão diametral, desgaste por abrasão e para o ensaio de dano por umidade induzida moldou-se um conjunto de seis corpos de prova. Segue resumo dos resultados de caracterização física dos agregados.

Tabela 30 - Resumo das características dos agregados desta pesquisa

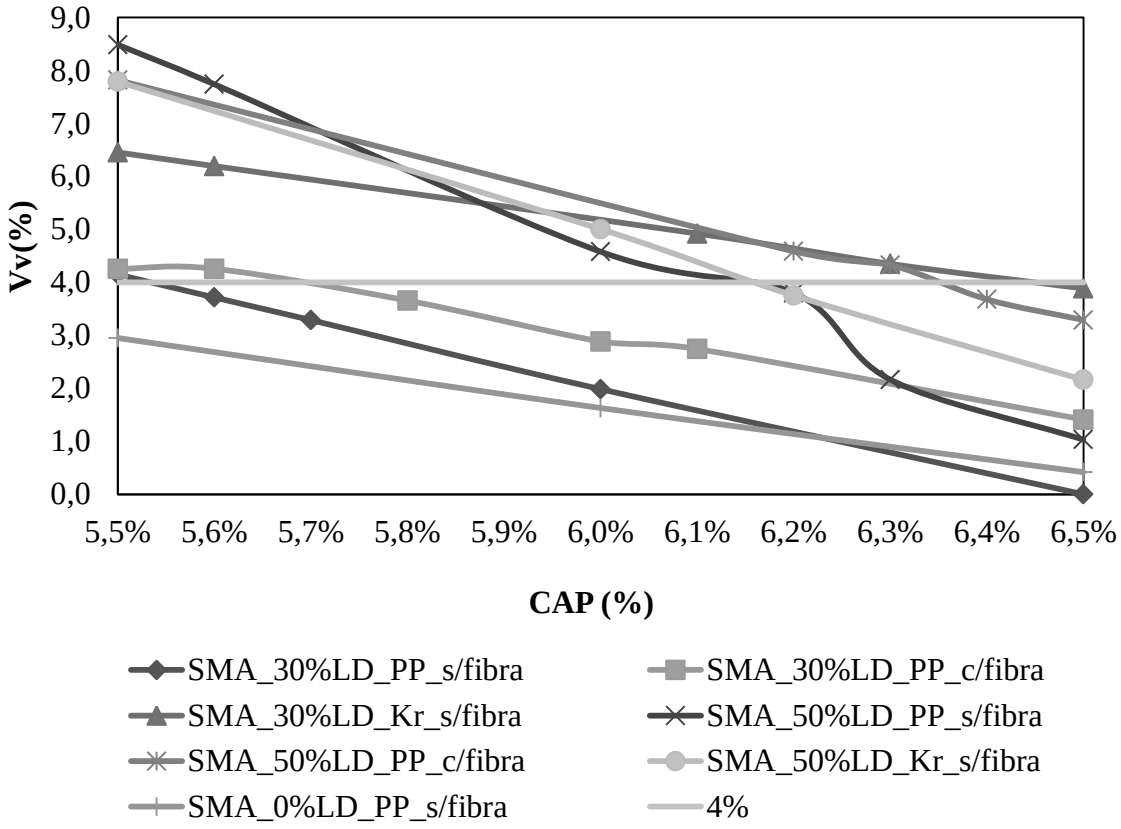
Ensaios	Métodos	Resultados			
		KR	LD	AN	Requerido
Massa específica real (g/cm^3) – KR moída	DNER 085/94	2,70	2,91	2,76	-
Massa específica do agregado miúdo (g/cm^3)	DNER-ME 194/98	3,43	3,07	2,86	-
Densidade aparente do agregado graúdo	DNER - ME 081/98	2,73	2,95	2,81	-
Densidade Real do agregado graúdo	DNER - ME 081/98	3,73	3,43	2,85	-
Absorção (%)	DNER - ME 081/98	9,90	4,68	0,58	Max 2%
Superfície específica (cm^2/g) - PP e KR moídos	ABNT NBR 16372/2015	10.225	-	3.536	-
Equivalente de areia	ABNT NBR 12052/1992	-	82,5%	-	Min 65%
Massa unitária - Método A (kg/dm³)	ABNT NM 45/2006	-	1,81	1,48 (Brita 1); 1,51 (Brita 0); 1,57(pó de pedra);1,44 (Granilha)	-
Massa unitária - Método C (kg/dm³)	ABNT NM 45/2006	1,53	1,77	1,57 (Brita 1); 1,56 (Brita 0); 1,57(pó de pedra); 1,53 (Granilha)	-
Abrasão “Los Angeles” (% Perda)	NBR NM 51/2001	32,2	21,5	41,6	Máx. 30
Durabilidade a sulfato de sódio	DNER-ME 089/94	24,20	5,34	1,97	Máx. 15
Adesividade	DNER-ME 078/94	satisfatório	satisfatório	satisfatório	-

Fonte: Própria autora.

Alguns resultados merecem destaque, como o de absorção do agregado graúdo da KR (9,9%) e da LD (4,68%) acima do limite de 2%. Além dos resultados de abrasão “Los Angeles” do agregado natural (41,6%) e da KR (32,2%); e de durabilidade da KR (24,20) acima do limite máximo de 15.

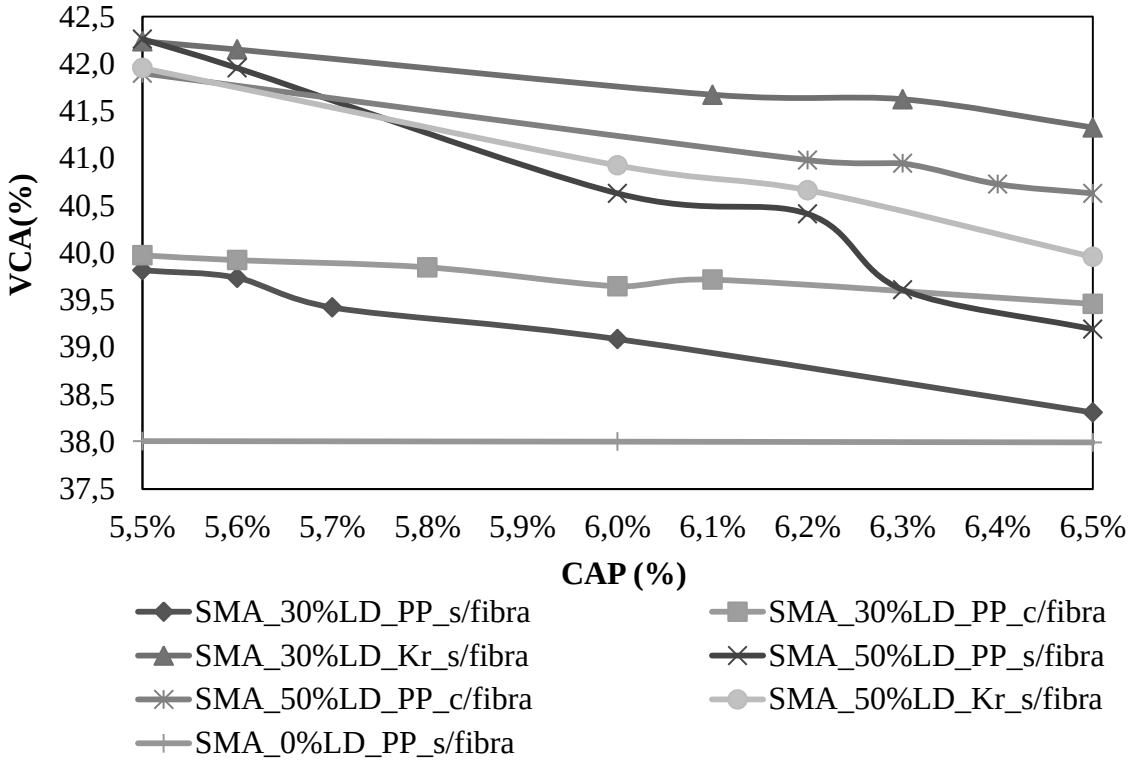
Em relação aos resultados do projeto de mistura é possível perceber que o uso de fibras e de filer KR promovem uma correlação positiva (para o mesmo percentual de agregados) entre o volume de vazios e o aumento de VMA e estabilidade Marshall. A mistura com 0%LD não atinge os 4% de volume de vazios necessário. Além disso, a mistura com 30%LD sem fibras e 30%LD com fibras alcançam os 4%Vv, no entanto abaixo do teor mínimo necessário de 6%.

Figura 60 - Volume de vazios das misturas



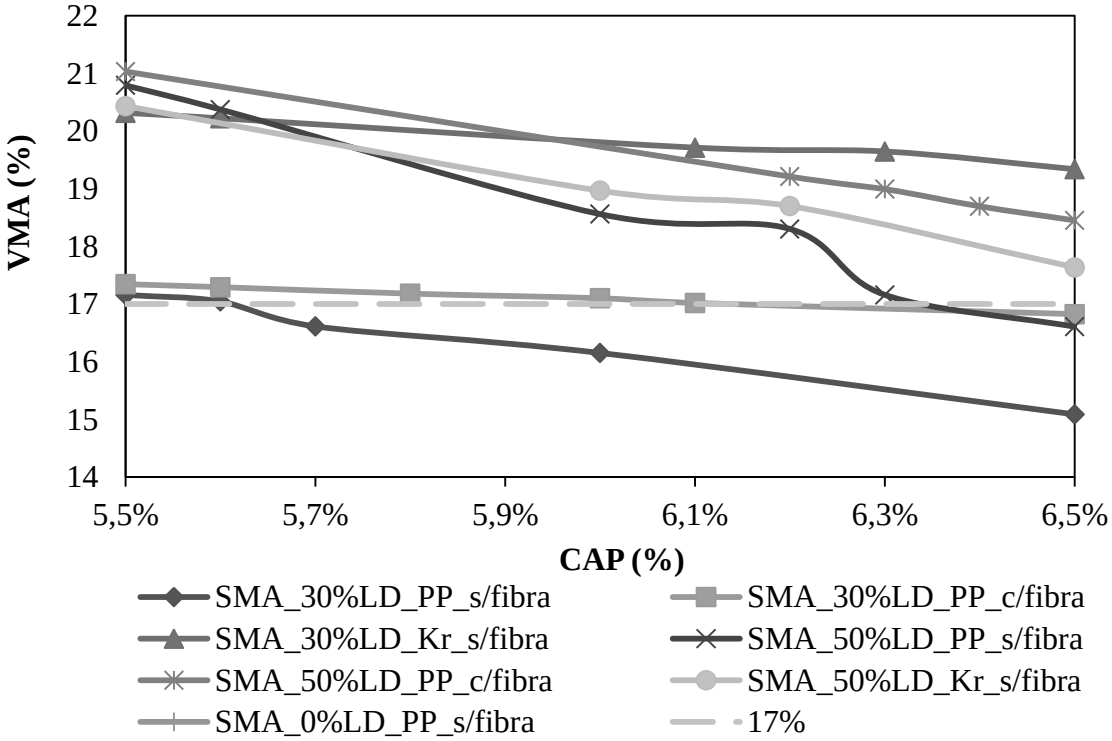
Fonte: Própria autora

Figura 61 - VCA da mistura de agregados



Fonte: Própria autora

Figura 62 - VMA da mistura de agregados



Fonte: Própria autora

4.1 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA

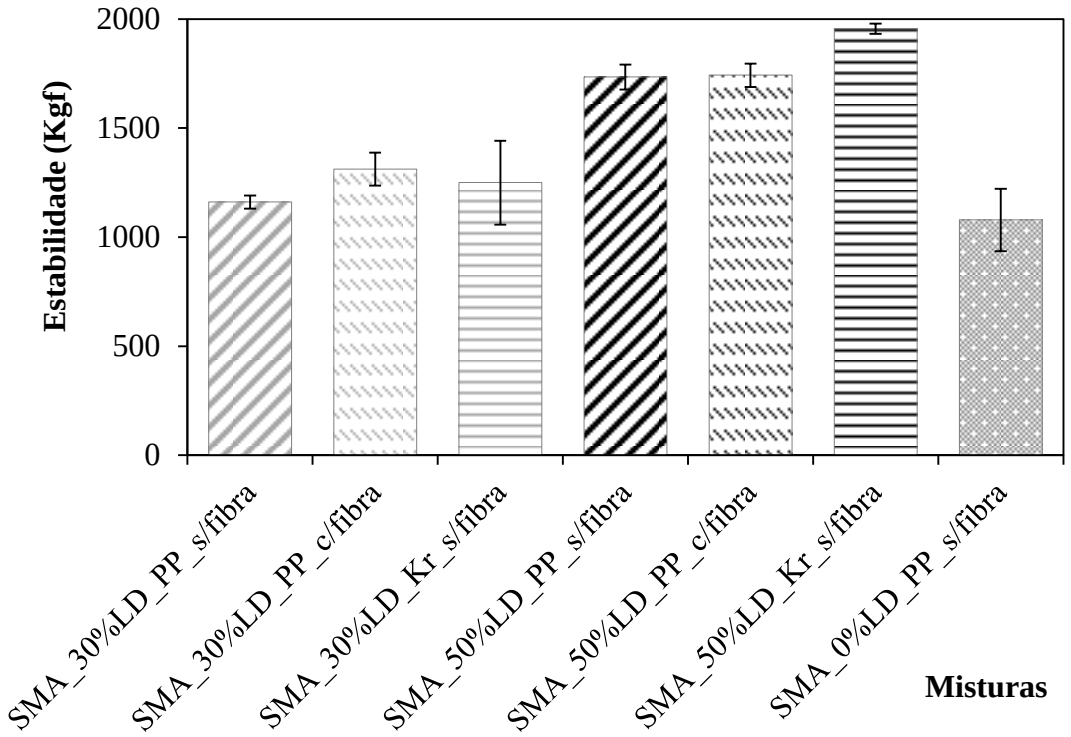
Os resultados do ensaio de estabilidade e fluência Marshall das misturas são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Estabilidade e Fluência Marshall

Misturas	TP (%)	Fluência (dmm)	Estabilidade (Kgf)	Coeficiente de Variação de Estabilidade (%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	5,6	5,0	1161	2,6
SMA_30%LD_PP_c/fibra	5,8	4,7	1311	5,8
SMA_30%LD_KR_s/fibra	6,5	3,0	1250	15,4
SMA_50%LD_PP_s/fibra	6,2	5,0	1734	3,3
SMA_50%LD_PP_c/fibra	6,4	4,8	1742	3,1
SMA_50%LD_KR_s/fibra	6,2	4,8	1956	1,2
SMA_0%LD_PP_s/fibra	5,0	3,3	1078	13,3

Fonte: Própria autora.

Figura 63 - Resultado gráfico da Estabilidade Marshall



Fonte: Própria autora.

Todas as misturas superaram o limite requerido para misturas do tipo SMA, de 6200N (632,2Kgf). As misturas com 50% agregados siderúrgicos apresentaram valores superiores de estabilidade Marshall. Isto pode ser devido à abrasão, angularidade e/ou esfericidade do agregado siderúrgico utilizado, que possibilita um melhor atrito interno entre os grãos e maior resistência ao cisalhamento. De acordo com Ziari *et al.* (2015), o agregado siderúrgico proporciona melhores resultados de estabilidade Marshall devido à estrutura e angularidade do agregado.

É importante ressaltar que as misturas com fibra demonstraram resultados equiparáveis as de igual granulometria sem fibras. Sheng *et al.* (2017) demonstraram o efeito positivo de fibras na estabilidade Marshall. Segundo Chen *et al.* (2010), as fibras reforçam a matriz por causa da rede espacial que forma, proporcionando uma maior adesão e estabilização de ligante asfáltico. A Figura 3 indicou que os tipos e percentuais de fibras apresentam uma relação importante entre o teor e a estabilidade Marshall, com incrementos proporcionais.

4.2 ESCORRIMENTO

Os resultados médios de escorrimento das misturas estudadas podem ser vistos na Tabela 32 e Figura 64. Nota-se que a quantidade de ligante drenado foi muito pequena (inferior ao limite de 0,3%), não havendo necessidade de adição de fibras para evitar o escorrimento do ligante. Apesar disso, optou-se por verificar o efeito que as fibras promovem quando misturadas com agregados siderúrgicos.

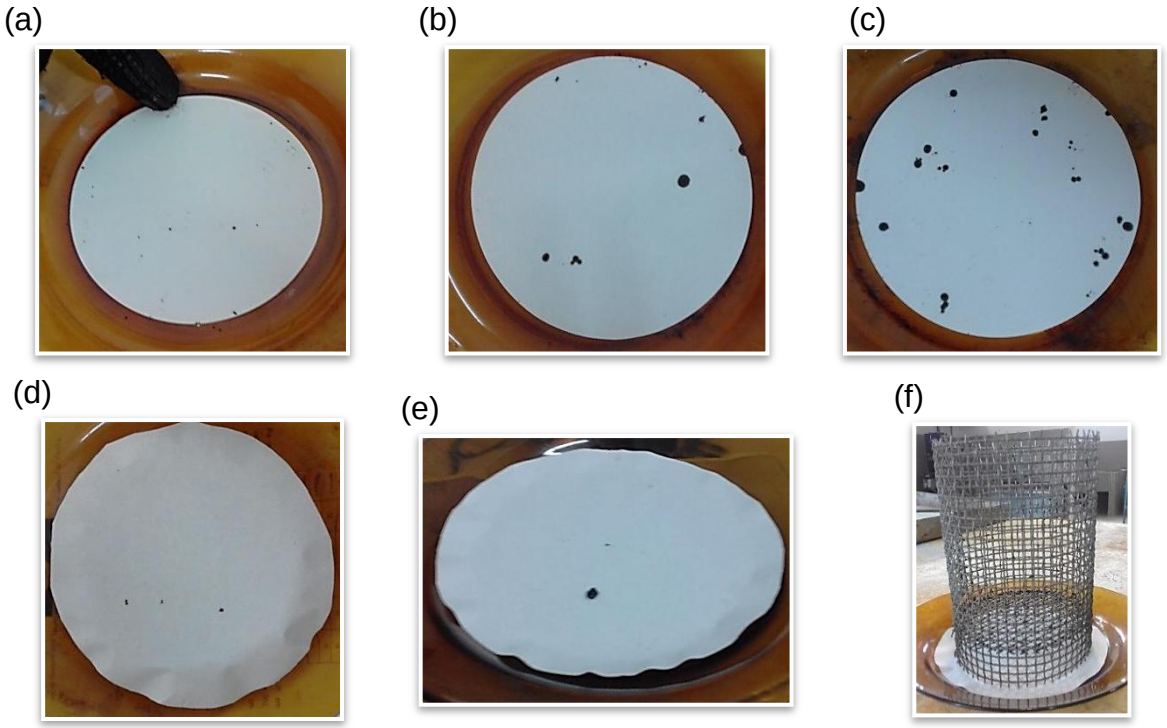
Tabela 32 - Valores do ensaio de escorrimento a 163°C e 178°C.

Misturas	TP (%)	Temperatura (°C)	Escorrimento (%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	5,6	163	0,00
		178	0,00
SMA_30%LD_KR_s/fibra	6,5	163	0,00
		178	0,00
SMA_50%LD_PP_s/fibra	6,2	163	0,00
		178	0,00
SMA_50%LD_KR_s/fibra	6,2	163	0,00
		178	0,00
SMA_0%LD_PP_s/fibra	5,0	163	0,01
		178	0,02

Fonte: Própria autora.

Figura 64 - Ensaio de Escorrimento

(a) SMA_50%LD_PP_s/fibra, (b) SMA_50%LD_KR_s/fibra, (c) SMA_0%LD_PP_s/fibra, (d) SMA_30%LD_PP_s/fibra, (e) SMA_30%LD_KR_s/fibra, (f) Cesta



Fonte: Própria autora.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

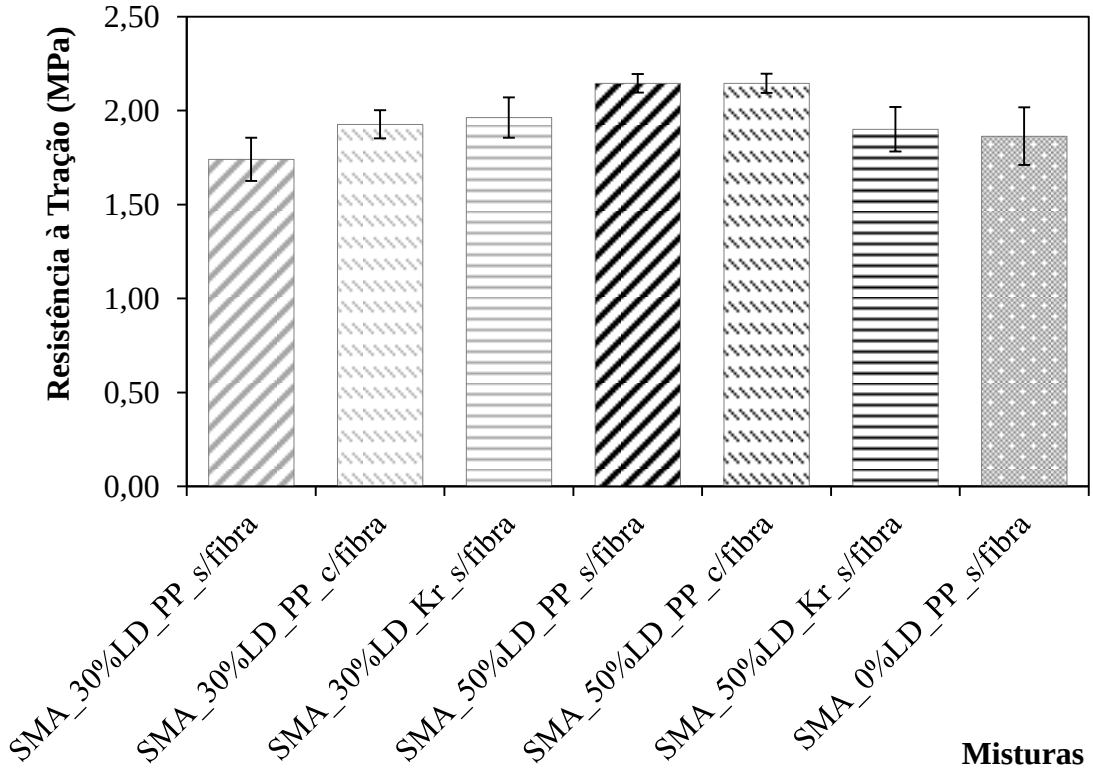
Para cada mistura foram moldados três corpos de prova com volume de vazios de 4±0,5% e os resultados de resistência à tração são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resistência à tração das misturas estudadas.

Misturas	TP (%)	RT (MPa)	Coeficiente de variação (%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	5,6	1,74	6,6
SMA_30%LD_PP_c/fibra	5,8	1,93	3,9
SMA_30%LD_KR_s/fibra	6,5	1,96	5,4
SMA_50%LD_PP_s/fibra	6,2	2,15	2,3
SMA_50%LD_PP_c/fibra	6,4	2,15	2,4
SMA_50%LD_KR_s/fibra	6,2	1,90	6,2
SMA_0%LD_PP_s/fibra	5,0	1,86	8,2

Fonte: Própria autora.

Figura 65 - Resultado gráfico do ensaio de RT



Fonte: Própria autora.

Percebe-se que o concreto asfáltico do tipo SMA possui resistência à tração acima do limite imposto pelo DNIT 031/2006 para concreto asfáltico tradicional. Verifica-se que todas as misturas estudadas apresentaram RT bem superiores ao valor de 0,65MPa. Além disso, a resistência à tração das misturas estudadas demonstrou possuir resultados semelhantes, principalmente ao se analisar o coeficiente de variação de cada uma.

Em geral, o resultado indica que, apesar da alta rigidez encontrada para as misturas com agregado siderúrgico, às mesmas ainda assim possuem flexibilidade para atender as tensões de tração a que são submetidas na interface da camada de revestimento com a camada de base quando sujeitas a carregamento por tráfego. No entanto, este único ensaio não é conclusivo a respeito da resistência à tração. Recomenda-se o uso de ensaios com carregamento dinâmico para simular o efeito temporal do acúmulo de tensões de tração nas misturas asfálticas.

4.4 DESGASTE POR ABRASÃO

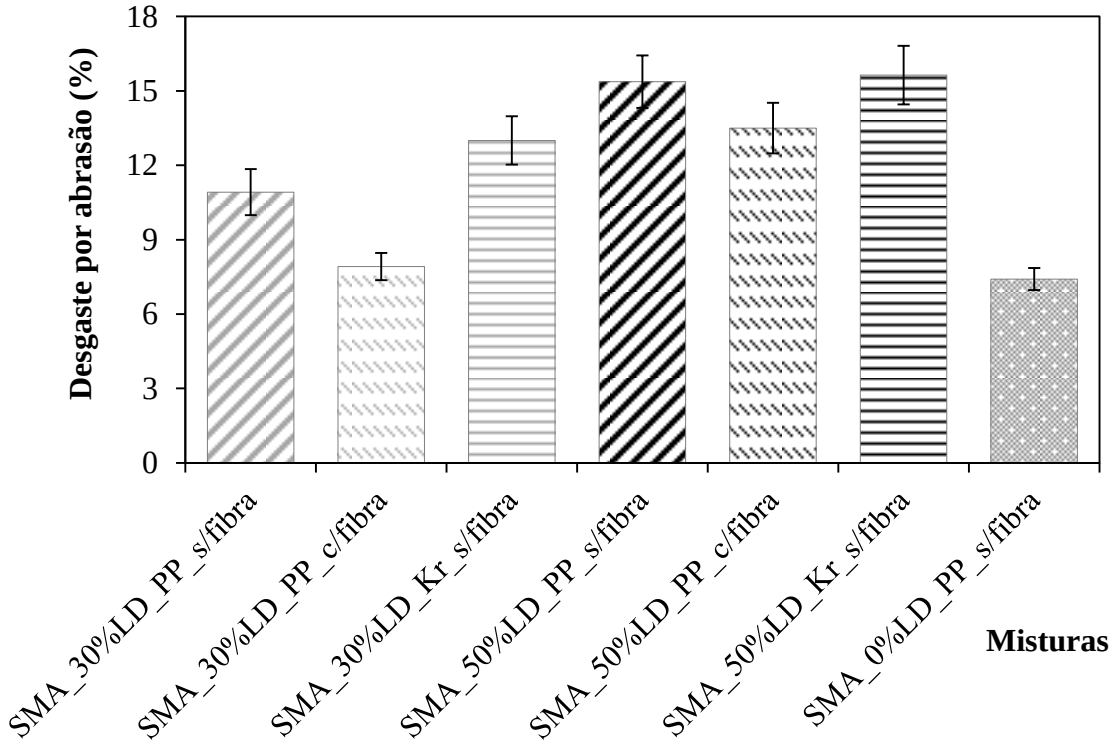
Os resultados do ensaio Cantabro de cada mistura estudada podem ser visualizados a seguir:

Tabela 34 - Resultados do desgaste por abrasão

Misturas	TP (%)	Desgaste por Abrasão (%)	CV(%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	5,6	10,9	8,5
SMA_30%LD_PP_c/fibra	5,8	7,9	6,9
SMA_30%LD_KR_s/fibra	6,5	13,0	7,5
SMA_50%LD_PP_s/fibra	6,2	15,4	6,9
SMA_50%LD_PP_c/fibra	6,4	13,5	7,5
SMA_50%LD_KR_s/fibra	6,2	15,6	7,5
SMA_0%LD_PP_s/fibra	5,0	7,4	6,0

Fonte: Própria autora.

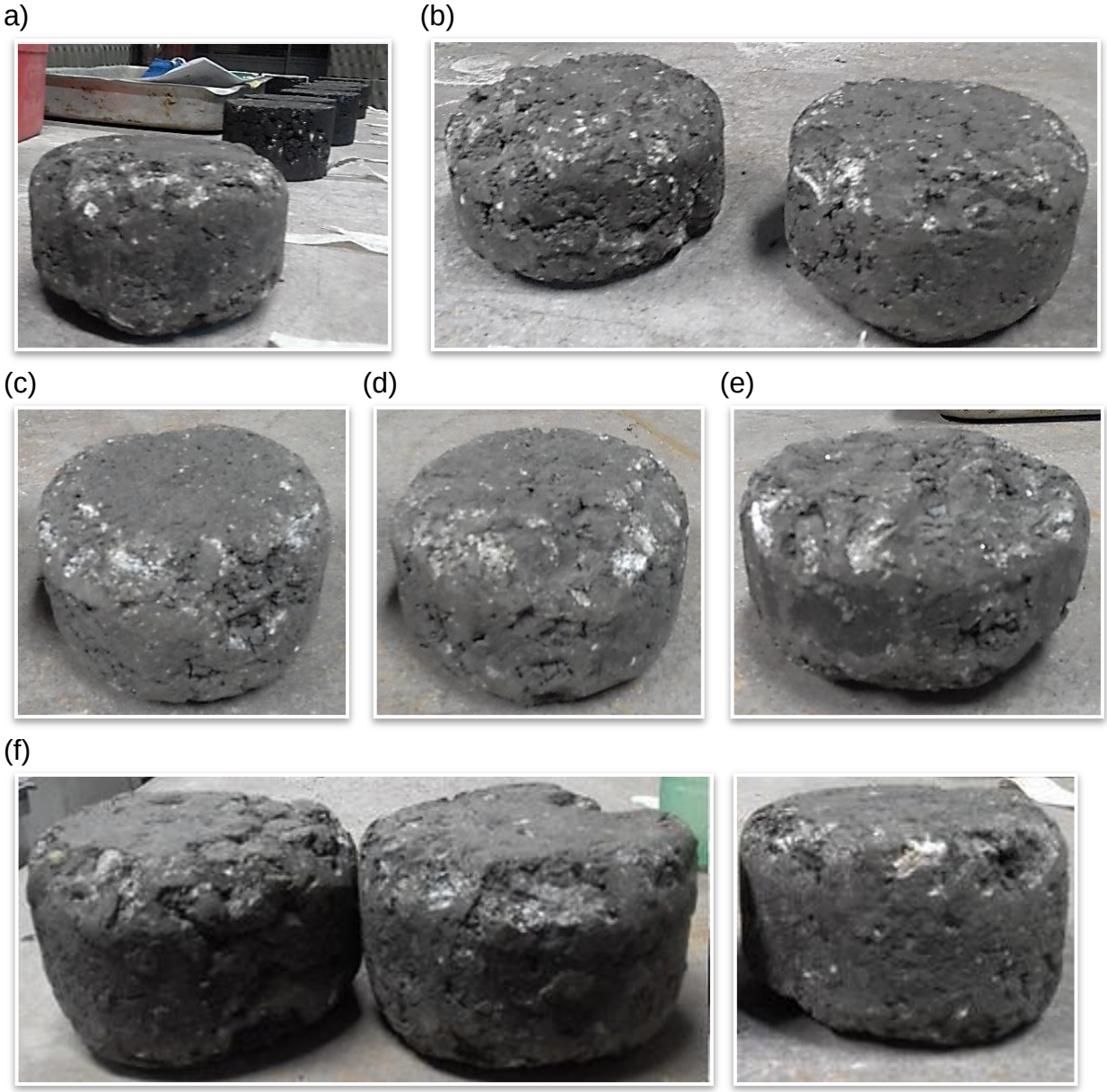
Figura 66 - Resultado gráfico do desgaste por Abrasão



Fonte: Própria autora.

Figura 67 - Ensaio de Abrasão

(a) SMA_50%LD_PP_s/fibra; (b) SMA_50%LD_KR_s/fibra; (c) SMA_0%LD_PP_s/fibra; (d) SMA_30%LD_PP_s/fibra; (e) SMA_30%LD_KR_s/fibra; (f) SMA_30%LD_PP_c/fibra



Fonte: Própria autora.

Analisando os resultados, foi possível perceber que as misturas estudadas apresentam um bom desempenho quanto ao desgaste por abrasão. Ao analisar o efeito da fibra, deve-se considerar o incremento de 0,2% de CAP que também pode ser um dos fatores responsáveis pela melhora quanto ao desgaste de até 3%. O maior percentual de CAP por outro lado não interferiu nos resultados da resistência a abrasão com filer KR. Este resultado está relacionado com a maior absorção do

material da mistura com 7%KR. Já na mistura com menor percentual de filer KR (4%), a absorção não interferiu no resultado. Demonstrando que o percentual de filer KR utilizado pode interferir na resistência ao desgaste.

O resultado pode estar associado à interação da escória com o ligante asfáltico (TAKAHASHIA *et al.* 2011). A escória, assim como o calcário, tem uma área de superfície específica elevada. Guo *et al.* (2017) sugerem que o efeito da adsorção de filer de calcário interfere nas propriedades reológicas e químicas do ligante. O pesquisador constatou que a adesão das moléculas do ligante ao calcário (que possui maior área de superfície específica) é duas vezes maior do que a do granito.

No entanto, segundo Takahashia *et al.* (2011), a escória possui menor capacidade de ancoragem, ou seja, liberam os fragmentos mais facilmente do que o concreto asfáltico com agregados naturais. Afirma que o intertravamento entre o agregado de escória e o ligante asfáltico, está relacionado à microtextura da superfície, sendo este um dos possíveis fatores significativos para explicar os resultados experimentais. De acordo com Wang et al. (2011), os efeitos das interações físico-químicas, o teor de CaO e a finura do material pode causar alteração no desempenho do mastique asfáltico, este efeito, no entanto, varia com o tipo de ligante.

Em geral, o emprego de fibras melhorou a resistência ao desgaste. Especula-se que a rede tridimensional formada com o uso de fibras promove uma maior resistência ao deslizamento de agregados na superfície. O uso da fibra de celulose na mistura foi essencial nesse caso. Bruce (2003) afirma que a fibra retém o ligante a altas temperaturas, resultando em uma camada de mastique mais espessa.

4.5 DANO POR UMIDADE INDUZIDA

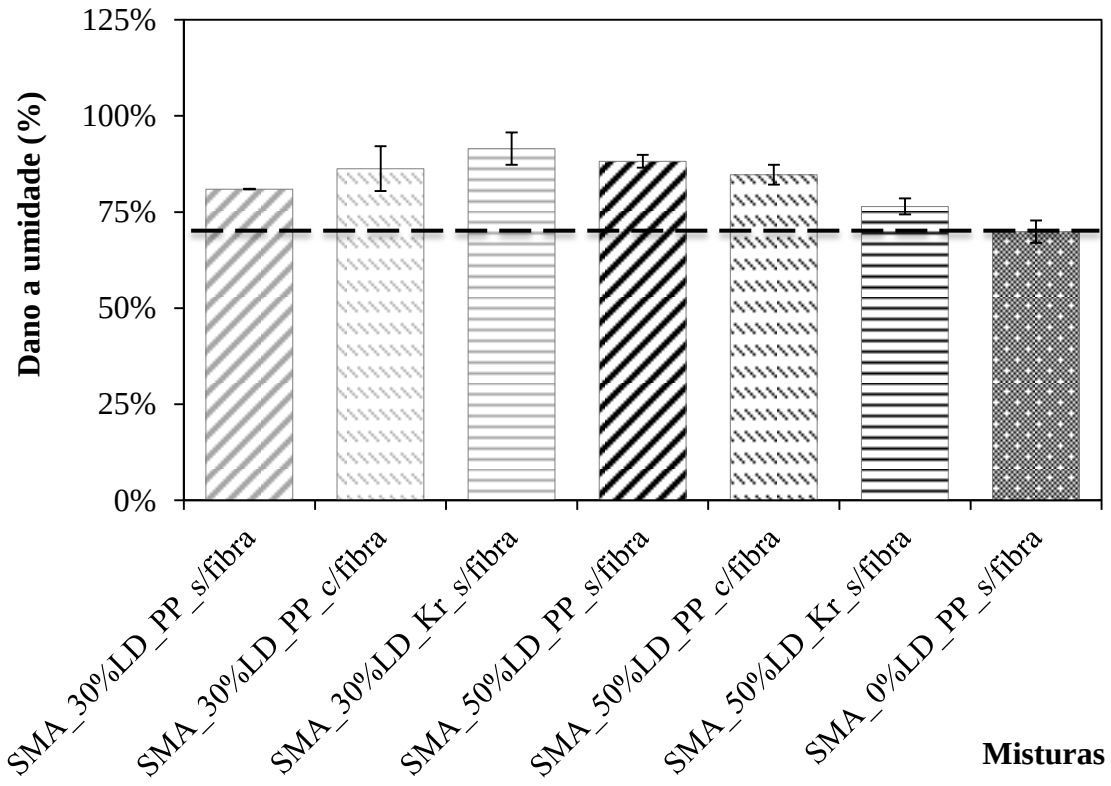
A verificação da sensibilidade à água das misturas em condições de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água pode ser visualizada na Tabela 35. Para esse ensaio, o percentual mínimo requerido, de acordo com NAPA (2002) é de 70%.

Tabela 35 - Resultado do ensaio de dano à umidade SMA 16 BS.

Mistura	Resistência à Tração retida (RRT)	CV (%)
SMA_30%LD_PP_s/fibra	0,81	0,1
SMA_30%LD_PP_c/fibra	0,79	4,6
SMA_30%LD_KR_s/fibra	0,91	7,4
SMA_50%LD_PP_s/fibra	0,88	1,9
SMA_50%LD_KR_s/fibra	0,76	2,7
SMA_50%LD_PP_c/fibra	0,85	3,0
SMA_0%LD_PP_s/fibra	0,70	4,1

Fonte: Própria autora.

Figura 68 - Resultado gráfico do Dano por umidade



Fonte: Própria autora.

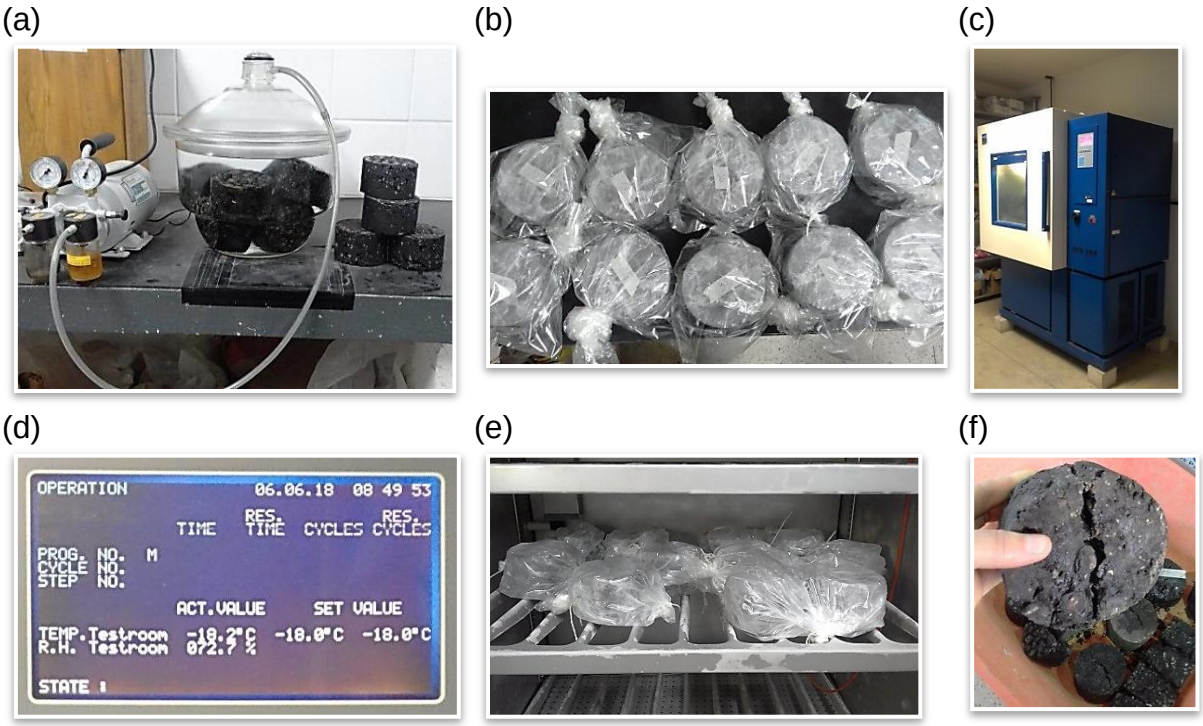
Observa-se que outros mecanismos, além da adsorção do material, podem estar agindo de forma positiva quanto à resistência a umidade. Percebe-se que o filer moído possivelmente está agindo como um modificador do ligante. Em geral, houve

uma pequena variação percentual nos resultados, mas as misturas com agregado siderúrgico atenderam aos requisitos de suscetibilidade à umidade.

É importante dizer que ao se investigar a substituição do agregado graúdo natural por escórias de aciaria esperava-se encontrar um aumento na sensibilidade à umidade do concreto asfáltico, por causa do envolvimento dos agregados. No entanto, assim como Chen *et al.* (2015), o ensaio de sensibilidade à umidade mostrou que a espessura do filme não afetou adversamente a durabilidade do concreto asfáltico quanto ao dano por umidade.

Figura 69 - Ensaio de Dano por umidade induzida

(a) Saturação dos CPs; (b) CPs embalados (c) câmara climática (d) Temperatura de -18°C; (e) CPs após 16h a -18°C; (f) CP após ensaio de resistência à tração.



Fonte: Própria autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, o uso do agregado siderúrgico em revestimentos asfálticos fornece uma nova perspectiva para redução das ameaças dos resíduos sólidos no ambiente e corrobora com a redução da extração de recursos naturais não renováveis, além de possibilitar a execução de um revestimento nobre no país, como o concreto asfáltico do tipo SMA. No entanto, cabe ressaltar que estudos mais aprofundados devem ser feitos para possível aplicação em larga escala em um futuro próximo.

5.1 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos dados obtidos neste trabalho de pesquisa foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O agregado siderúrgico proveniente da escória de aciaria tratada, com 3% de expansão (acerita), atende as características principais para o seu uso em misturas asfálticas do tipo SMA.
- Apresenta resultados satisfatórios de abrasão *Los Angeles*, durabilidade, adesividade e morfologia. Itens fundamentais em misturas do tipo SMA, haja vista a alta interação entre os agregados e a elevada resistência.
- A absorção dos agregados, com 50% agregado siderúrgico e 50% agregado natural, apresentou valor dentro do máximo previsto pela norma AASHTO M-325 de 2%.
- O maior percentual de agregado siderúrgico (50%) promove uma melhora nos teores de projeto.
- O uso do CAP 50/70 convencional pode ser um fator preponderante em relação ao envolvimento dos agregados. Uma vez que a maioria das misturas do tipo SMA é feita com ligantes modificados.
- O filer de KR moída demonstrou ser uma opção no projeto de mistura SMA. A KR não é recomendada para uso como agregados graúdos e miúdos, devido às suas características de alta absorção e baixa durabilidade.
- O uso de fibra de celulose e o uso de filer KR promove uma correlação positiva (para o mesmo percentual de agregados) entre o volume de vazios e o aumento de VMA e estabilidade Marshall.

- A fibra de celulose proporcionou uma melhora no intertravamento entre o agregado siderúrgico e o ligante. Tendo em vista, os melhores resultados de resistência ao desgaste.
- As misturas com agregado siderúrgico demonstraram bons resultados quanto à estabilidade e fluência, escorrimento, resistência à tração, abrasão e dano por umidade induzida.

Contudo, o agregado siderúrgico proveniente da escória de aciaria, que após tratamento é conhecida como acerita, atende os requisitos das normas e apresenta um bom comportamento mecânico quando misturado com 50% agregado natural.

5.2 SUGESTÕES

- Avaliar o efeito da adição de agregado siderúrgico a longo prazo através da análise de amostras de SMA envelhecidas;
- Avaliar a possibilidade do uso de escória LD não tratada em misturas SMA;
- Avaliar o desempenho em campo em trecho experimental com o traço 50% estudado;
- Avaliar o efeito da substituição do ligante asfáltico estudado por ligante modificado por pó de borracha de pneus inservíveis;
- Avaliar outros tipos de agregados siderúrgicos, como escória de alto forno, na produção de misturas SMA;
- Realizar ensaios de flow number, fadiga, módulo dinâmico nas misturas estudadas para uma caracterização mecânica mais avançada.

REFERÊNCIAS

AFONSO, J.; GOMES, L. **Misturas betuminosas do tipo SMA – A experiência da Mota-Engil Engenharia e Construção.** 8° Congresso Rodoviário Português, Lisboa, LNEC, 10p, 2016.

AHMEDZADE, P.; SENGOZ, B. **Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete.** Journal of Hazardous Materials, Vol. 165, pp. 300-305, 2009. DOI:10.1016.

AL-ROUSAN, T.M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, 229p. 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R-46**: Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA). 2008.

_____. **AASHTO ND T 166**: BULK SPECIFIC GRAVITY OF COMPACTED ASPHALT MIXTURES USING SATURATED SURFACE-DRY SPECIMENS. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2726**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. 2014.

_____. **ASTM D1188**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. 2015.

_____. **ASTM D6390-11**: Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. 2017.

ANDERSON, R.M.; BAHIA, H.U. **Evaluation and selection of aggregate gradations for asphalt mixtures using Superpave.** Transp. Res. Rec.: Transp. Res. Board, 1583, pp. 91–97, 1997. DOI: 10.3141/1583-11.

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 208p., 2006.

ARCELORMITTAL. **Escória de aciaria com redução de expansão – ACERITA**. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalo - go_produtos/acerita/acerita.asp>. Acesso em: 09/05/2018. 2015.

ARTERIS. **Especificação particular para execução de concreto asfáltico usinado a quente – SMA**. Centro De Desenvolvimento Tecnológico (CDT). Designação ARTERIS ES 031- Rev. 0, 2015.

ASI, I.M; QASRAWI, H.Y.; SHALABI, F.I. **Uso de agregado de escória de aço em misturas de concreto asfáltico Lata.** J. Civil Eng., 34, 8, pp. 902 – 911, 2007. DOI: 10.1139/L07-025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12052**: Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15087**: Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15617**: Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

_____.**NBR 16364**: Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

BELIGNI, M.; VILLIBOR D. F.; CINCERRE J. R.(2000). **Misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matic Asphalt): Solução para revestimentos de pavimentos de rodovias e vias urbanas de tráfego intenso.** In: Anais da Reunião Anual de Pavimentação - 32º RAPv. Brasil: v. 01 pp. 590-605, 2000.

BLAZEJOWSKI, K. **Stone matrix asphalt: Theory and practice.** Taylor & Francis Group. BoCa Ratón – FL, CRC Press, 2011.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros.** 3ª. Reimpressão, 2010.

BROWN, E. R.; M. HAININ, A. COOLEY; G. HURLEY. **Relationships of HMA In-place air voids, lift thickness, and permeability.** NCHRP Project 9-27, Vol. II, Part 3 – Task 3, 2003.

BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO; V.T; SOARES, J.B.; NOGUEIRA, J.A. **Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt**, J. Mater. Civil Eng. 27, 7, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001181.

BUKOWSKI, J.; YOUTCHEFF, J.; HARMAN, T. **A review of aggregate and asphalt mixture specific gravity measurements and their impacts on asphalt mix design properties and mix acceptance.** Tech Brief. US Department of Transportation. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology. pp. 01-39, 2010.

CHEN, J.; HSIEH, W., LIAO, M. **Effect of coarse aggregate shape on engineering properties stone mastic asphalt applied to airport pavements**, Int. J. Pavement Res. Technol. 6, 5, pp. 595-601, 2013. DOI : 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).595.

CHEN, H; XU, Q. **Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder.** Fuel 89, pp.1616-1622, 2010. DOI:10.1016/j.fuel.2009.08.020.

CHEN, S-H; LIN, J-D; HUANG, D; HUNG, C-T. **Effect of film thickness and voids in mineral aggregate in basic oxygen furnace slag dense-graded asphalt concrete**. Journal of Testing and Evaluation. Vol. 43, N° 2, 2015. DOI:10.1520/JTE20140079.

CHESNER, W.H.; STEIN, C.W.; COLLINS, R.J.; VAN HELDEN, L. **Waste and recycled materials in the transportation industry**. NCHRP 4-21 – Information Database, version 1.0.8. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001.

CHO, B; CHOI, H. **Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder**. Construction and Building Materials. Vol. 123, pp. 436-443, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO Nº 420**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias

químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. 2009.

_____. **RESOLUÇÃO N° 430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. 2011.

COOLEY, L. A., B. D. PROWELL, M. R. HAININ. **comparison of the saturated surface-dry and vacuum sealing methods for determining the bulk specific gravity of compacted hma.** Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, pp. 56-96, 2003. ISSN: 0270-2932.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: 2017. **Pesquisa CNT de rodovias 2017:** relatório gerencial, Brasília: CNT: SEST: SENAT, pp.403, 2017.

Companhia Siderúrgica Nacional: CSN. **Coprodutos**, vendas especiais, placas, químicos, Co-produtos. 24p, RJ, 2016.

DE ARAUJO, W. P.; DE LIMA, M. M. C.; SOLIMANI, L. C. S. **Escória de aciaria LD para uso como corretivo agrícola**, 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET, RJ, 10p, 2015.

DE OLIVEIRA, E. B. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos), UFMG, 128p, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 078**: Agregado graúdo, 1994.

_____. **ME 085**: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real, 1994.

_____. **ME 089**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. 1994.

_____. **EM 262**: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários, 1994.

_____. **PRO 263**: Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários, 1994.

_____. **ME 043**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. 1995.

_____. **ME 081**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo, 1998.

_____. **ME 194**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, 1998.

_____. **ME 383**: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 113**: Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio. 2009.

_____. **031 ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço, 2006.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **lei 10.233**. Lei de Reestruturação dos Transportes Aquaviário e Terrestre. Brasília. 2001.

DO VALE, A. C. **Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Ceará, 147p. 2007.

DRÜSCHNER, L.; SCHÄFER, V. **Asphalt Guide. Stone Mastic Asphalt**. Ed.: German Asphalt Association. 37p., 2005.

EL-HAGE, R. B. El. **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.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION: **EAPA, 1998**. Heavy Duty Surfaces: The arguments for SMA. Holanda, 40p, 1998.

FERNANDES J., J. L., NEVES F., C. L. D., BERNUCCI, L. L. B. **Uso do ligante asfalto-borracha em misturas asfálticas SMA.** ICTR, Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Costão do Santinho, Florianópolis. Santa Catarina. 11p., 2004.

FREITAS, H. B.; DA MOTTA, L. M. G. **Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado**. Transportes, v. 16, n. 2, p. 5-12, 2008.

GARDETE, D; PICADO-SANTOS, L.; CAPITÃO, S. **Influência dos procedimentos de determinação da baridade em misturas betuminosas densas e stone mastic asphalt.** In: Atas do 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico-RELACRE. p. 123-130, 2016.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 187p., 2001.

GOGOLIN, D. SMA – **Eine Asphaltsorte und ihre Anwendung.** Asphalt. DAV-Informationsveranstaltung. Essen, 56p. 2015.

GONÇALVES, R. d. M. **Incorporação de coproduto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Estruturas). Universidade Federal do Espirito Santo, 115p., 2016a.

GONÇALVES, Deyvid RR; FONTES, Wanna C; MENDES, Julia C; SILVA, Guilherme JB; PEIXOTO, Ricardo AF. **Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag.** Waste Management & Research, Vol. 34, 2, pp. 107–112, 2016b.

GROENNIGER ,J. ; FALCHETTO, A. C.; ISAILOVIĆ, Ivan; WANG, Di; WISTUBA, Michael P. **Experimental investigation of asphalt mixture containing Linz-Donawitz steel slag**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Vol. 4, Issue 4, pp. 372-379, 2017. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.05.009.

HARSCO (2017). ASIC - **Agregados Artificiais.** Disponível em:< http://ecoasic.com/apresentacao/>. Acesso em: 11 mar. 2017.

HINRICHSEN, J.; HEGGEN, J. **Minimum VMA in HMA based on gradation and volumetric properties.** Transportation Research Board. 30p., 1996.

IBGE. Estrutura territorial. **DOU nº124** de 30/06/2017. Disponível em: <https://ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=destaques>. Acesso em: 05 mai 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Aço Brasil: 2015a. **Relatório de sustentabilidade.** Disponível em: <http://acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 28 mai 2018.

_____. Aço Brasil: 2015b. **Etapas.** Disponível em: <http://acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acesso em: 20 jul. 2018.

_____. Aço Brasil: 2016. **Dados consolidados do setor.** Disponível em: <http://acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>. Acesso em: 30 mai 2018.

_____. Aço Brasil: 2017. **Estatística Preliminar, nº 034, Janeiro 18**. Disponível em: <http://acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp?par=201712>. Acesso em: 12 jun. 2018.

KANDAHL, P., HOFFMAN, G. **The use of steel slag as bituminous concrete fine aggregate. Final report,** Research Project No. 79-26, Pennsylvania Department of Transportation, in cooperation with US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1982.

KOGBARA, R.B.; MASAD, E.A; KASSEM, E.; SCARPAS, A., ANUPAM, K. **A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements**, Constr. Build. Mater. 114, n°1, pp. 602-617, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

KUO, W. T. **Properties of Compressed Concrete Paving Units Made Produced Using Desulfurization Slag,** Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol.34, n°.5, 7p., 2015. DOI 10.1002/ep.12129.

MARTINHO, F.; LANCHAS, S.; NUNEZ, R.; BATISTA, F.; MIRANDA, H. **A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas.** Lisboa: 7º Congresso Rodoviário Português (CRP), 2013.

MOGHADDAM, T. B.; KARIM, M. R.; SYAMMAUN, T. **Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles.** Construction and Building Materials, v. 34, p. 236-242, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054.

MOTTA, L. M; RIBEIRO, F. L. B; ESTEFEN, S. F. **Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto.** UFRJ COPPE. Rio de Janeiro. PEC – 8650. 2010.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA.** Dissertação (Mestrado em Ciências), UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 151p., 2003.

MULTISERV HARSCO. **Perspectiva de Comercialização do Agregado Siderúrgico.** II Workshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro. 50f. 2008. Disponível em:<http://abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_fernandoramos.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2017.

NAIDU, G; ADISESHU, S. **Influence of coarse aggregate shape factors on bituminous mixtures**, Int. J. Eng. Res. Appl. (IJERA). 2011.

NanoBusiness Informação e Inovação Ltda. **Ensaio de difração de raios-X e Fluorescência de raios-X.** Relatório n°1394 e 1395. Pólo Tecnológico de Xerém. Duque de Caxias, RJ. 2017.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – **NAPA: 1996**. Hot Mix Asphalt for High Stress Applications. Rut Resistence in HMA Pavements Series 119. 1996. National Asphalt Pavement Association, EUA, 1996.

_____. **NAPA: 2002.** 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.** 2004, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 80p. 2004.

NORTH DAKOTA ASPHALT CONFERENCE. **SMA – Stone Mastic Asphalt.** A Wearing Course for High Traffic/High Load Applications. April 2, Bismarck, ND, 17p, 2013.

NORTON, J. **Use of steel furnace slag in bituminous mixtures.** Research Report No. 78 TB-23, Michigan Department of Transportation, Lansing, Mich. 1979.

ODA, S.; FERNANDES JR, J. L.; ILDEFONSO, J. S. **Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures.** Construction and Building Materials, Vol.26, n°1, pp.13-20, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.030.

OLIVEIRA, C. F. **Uso de coproduto de dessulfuração de Reator Kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Espirito Santo. 108p, 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. OMS. **Sobre o ruído.** Agência Europeia do Ambiente. Disponível em:< https://eea.europa.eu/pt/themes/noise/about-noise>. Acesso em: 10 jun 2018. 2016.

ONOFRE, F. C., LOPES, M. M., ARAUJO JUNIOR, P. C., VALE, A. C., OLIVEIRA FILHO, C. M. S., SOARES, J. B. 2008. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo SMA, concreto asfáltico e areia-asfalto.** Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Vol. 22, 2008.

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. Tese (Doutorado em ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 297p. 2017.

PEREIRA, W. C.; SILVA, D. M.; Carvalho, J. D. O.; SOBRINHO, N. M. B. D. A.; NETO, A. R; BÔAS, R. C. V. **Alternativas de utilização de resíduos sólidos alcalinos na disposição de resíduos contaminados: estudo de caso no estado do Rio de Janeiro**, Brasil. Eng. sanit. ambient, Vol. 13, n°2, p. 163-170, 2008.

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

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 118p. 2002.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas.** Tese (doutorado). 174p, 2007.

ROSSINI-LAKE, L., JIANG, J., CURTIS, C. **Reclaimed steel slag pavements for use as aggregates--Highway 10 test sections**. Interim Report, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, Ont. 1995.

SHENG, Y.; LI , H.; GUO, P.; ZHAO, G.; CHEN, H.; XIONG, R. **Effect of fibers on mixture design of stone matrix asphalt.** Applied Sciences, Vol. 7, n°3, p. 297, 2017. DOI:10.3390/app7030297.

SILVA, M.B. **Caracterização de misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 89p. 2012.

SILVA, S. N; VIEIRA, A. T. d. O; OLIVEIRA, M. D. d. S; CORREA, F. S.; JUNIOR, F. V. **Aplicação de escória de aciaria LD à fabricação de cimento portland CP III.** 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET, RJ, 2015.

SILVA, C. C. d.; GOMES, J. F. **Análise de desempenho funcional e mecânico do concreto asfáltico tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para pavimentos aeroportuários.** Graduação (Bacharel em Engenharia Civil), 77p, 2016.

SOUZA, E. B. d. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação.** Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos). 128p. Belo Horizonte, 2007.

SOUZA, L.T.; KIM, Y.R. **Effects of aggregate angularity on mix design characteristics and pavement performance MPM-10**, Nebraska Department of Roads, Lincoln, NE, 2009.

SUCHISMITA, A; PANDA, M.; CHATTARAJ, U. **Resilient characteristics of stone matrix asphalt mixes.** ACEE Int. J. on Civil and Environmental Engineering, Vol. 01, N° 01, 2011. DOI: 01.IJCEE.01.01.523.

SHENG, G.; HUANG, P.; WANG, S.; CHEN, G. **Potential reuse of slag from the kambara reactor desulfurization process of iron in an acidic mine drainage treatment.** J. Environ. Eng., 140,7, pp.1-6, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000841.

TAKAHASHI, F; SHIMAOKA, T; GARDNER, K. KIDA, A. **Size-dependent enrichment of waste slag aggregate fragments abraded from asphalt concrete.** Journal of Hazardous Materials. Vol. 194, pp. 209-215, 2011. DOI:10.1016/j.jhazmat.2011.07.086.

TAVARES, D. S. **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo sma com agregado siderúrgico.** 2012. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

TONG, Z. *et al.* **Characterization and valorization of Kanbara reactor desulfurization waste slag of hot metal pretreatment.** Waste and Biomass Valorization, Vol. 7, n°1, pp.1-8, 2016. DOI 10.1007/s12649-015-9429-5.

WANG, H.; BU, Y; WANG, Y; YANG, X.; YOU, Z. **The effect of morphological characteristic of coarse aggregates measured with fractal dimension on asphalt mixture's high-temperature performance**, Adv. Mater. Sei. Eng., 10p., 2016. DOI: 10.1155/2016/6264317.

WEN, H., WU, E., BHUSAL, S. **Evaluation of steel slag as hot mix asphalt aggregate. washington center for asphalt technology (WCAT),** Washington State University, Pullman. 2014.

WU, S.; YANG, W.; XUE, Y.; LIN, Z. **Design and preparation of steel slag SMA**. Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed. Vol. 18, n°. 3, 2003. DOI: 10.1007%2FBF02838469.

WU, S., XUE, Y., YE, Q., CHEN, Y. **Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures.** Building and Environment. Vol. 42, pp.2580-2585, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.008.

XUE, Y., WU, S., HOU, H., *et al.* **Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture.** Journal of Hazardous Materials 138, 2, pp. 261-268, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.073.

YAN, X; WANG, Z.; RAO, M.; LI, M. **Investigation of Cement-Emulsified Asphalt in Plastic Concrete.** Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2018, 13p., 2018. DOI: 10.1155/2018/3929682.

ZHAO, J.; YAN, P.; WANG, D. **Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle.** Journal of Cleaner Production 156 pp. 50-61, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.029.

ZIARI, H; NOWBAKHT, S.; REZAEI, S.; MAHBOOB, A. **Laboratory investigation of fatigue characteristics of asphalt mixtures with steel slag aggregates.** Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2015, 5 p., 2015. DOI:10.1155/2015/623245.