



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

PRISCILA DO NASCIMENTO

USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS GRANULADO DE ALTO FORNO E
ACIARIA DO TIPO LD NA PRODUÇÃO DE MICRORREVESTIMENTO
ASFÁLTICO A FRIO

VITÓRIA

2020

PRISCILA DO NASCIMENTO

**USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS GRANULADO DE ALTO FORNO E
ACIARIA DO TIPO LD NA PRODUÇÃO DE MICRORREVESTIMENTO
ASFÁLTICO A FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas - Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

VITÓRIA

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS GRANULADO DE ALTO FORNO E
ACIARIA DO TIPO LD NA PRODUÇÃO DE MICRORREVESTIMENTO
ASFÁLTICO A FRIO

Priscila do Nascimento

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

Aprovada no dia **13 de novembro** por.

Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientadora – UFES

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna – UFES

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso
Doutora em Engenharia de Transportes
Examinadora Externa - UFC

Vitória – ES, novembro de 2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

N244u Nascimento, Priscila do, 1989-
Uso de agregados siderúrgicos granulado de alto forno e
aciaria do tipo LD na produção de microrrevestimento asfáltico a
frio / Priscila do Nascimento. - 2020.
117 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Pavimentos. 2. Escória. 3. Estradas - Manutenção e reparos.
4. Misturas com emulsão asfáltica. I. Pires, Patrício José
Moreira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração deste trabalho, tive a honra de conhecer pessoas maravilhosas, que me ajudaram muito, e não mediram esforços para sanar minhas dúvidas e compartilharem suas experiências. Diante disso, gostaria de agradecer a todos que me ajudaram nessa jornada de muito trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus, por seu imenso amor por mim. Sei que sem ele, nada seria possível, obrigada por guiar meus caminhos, por esta sempre comigo e por permitir mais essa conquista.

Imensa gratidão ao meu esposo, Sergio, por não medir esforços em me apoiar em tudo, muito obrigada! À minha mãe, irmãs, família e amigos por entenderem minha ausência por diversos momentos.

A toda equipe dos laboratórios de Geotecnia e Pavimentação e de Materiais da UFES, pelo tempo que se dedicaram a me ajudar, sempre com boa vontade. Meu sincero obrigada a Natália, Sidineidy, Breno, Henrique, Felipe e Adenis. Agradeço em especial ao Sidineyde que por diversas vezes se abdicou de seu descanso para me acompanhar à noite no laboratório, obrigada pela parceria, você foi muito importante na elaboração deste trabalho.

Agradeço imensamente a oportunidade que o grupo Disbral me proporcionou, em especial ao diretor técnico Renato Darim, que me permitiu conhecer as instalações da empresa em Aparecida de Goiânia. Tive o prazer de conhecer e aprender por quase duas semanas, sobre emulsões, técnicas de pavimentação asfáltica e o projeto de dosagem do microrrevestimento. Tenho imensa gratidão por todos os colaboradores que me trataram com tanto carinho durante minha permanência, em especial a equipe do laboratório de pavimentação, o Eng. Paulo Henrique, Nilson, Afrânio, Fabiano, Gleison, Francemberg e ao Sidiney. Tenho um imenso carinho ao Nilson, que estava sempre às ordens para me ajudar, sanar minhas dúvidas e compartilhar sua grande experiência, durante a execução dos meus ensaios experimentais.

Meu imenso agradecimento ao Eng. Wander Oliveira, da Stratura Asfaltos, que sempre esteve disposto a me ajudar, respondendo minhas dúvidas sempre que eu precisava, com muita paciência e atenção. Sua gigante experiência em projetos de microrrevestimento me ajudou a entender muita coisa que a teoria não ensina.

Ao meu orientador professor Dr. Patrício Pires, pela paciência e apoio na elaboração deste trabalho. Parabenizo pela dedicação ao laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFES, principalmente para elaboração desta pesquisa, no qual se empenhou em adquirir todos os equipamentos necessários para elaboração dos ensaios realizados. Agradeço a professora Ph.D. Jamilla Teixeira, por esta sempre disposta a ajudar, com paciência e empenho em tudo que faz. Parabéns professores Patrício e Jamilla pela dedicação e amor pelas pesquisas.

A Professora Ph.D. Verônica Castelo Branco, a Professora MsC. Daianne Diógenes e aluno Victor Cardoso, pelos ensaios realizados na Universidade Federal do Ceará e pela disponibilidade em sanar quaisquer dúvidas.

Um agradecimento especial ao MsC. Pedro Castro que me ajudou muito durante a elaboração desta pesquisa, compartilhando seus aprendizados com o microrrevestimento durante a elaboração do seu projeto de pesquisa e dissertação de mestrado.

Aos meus colegas do mestrado, Hully, Bárbara, Yago, Lucas e Sidineidy, obrigada por serem tão legais e companheiros, foi muito bom ter conhecido vocês. Sucesso a todos!

À empresa Arcellor Mittal Tubarão, pelo apoio técnico e financeiro, em especial ao Diego, Nocy e Ricardo, pela dedicação e apoio nesse projeto. Obrigada pela parceria com a UFES e por acreditar em nossas pesquisas.

Por fim, obrigada a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para essa realização.

RESUMO

O Microrrevestimento Revestimento Asfáltico a Frio (MRAF) é um dos tratamentos disponíveis para a manutenção e preservação de pavimentos asfálticos, atuando como camada selante, impermeabilizante e rejuvenescedora. Essa técnica assim como outras na pavimentação asfáltica, requer grande exploração de recursos naturais. Com isso, qualquer possibilidade de substituir material requerido nesse processo merece atenção. Além disso, essa técnica requer uso de agregados com características de alta qualidade (resistência à abrasão e durabilidade) e que são raros nas reservas naturais brasileiras, em especial no estado do Espírito Santo. Nesse contexto, a indústria siderúrgica se apresenta como uma ótima opção no fornecimento de agregados oriundos de diversas etapas do processo de fabricação do aço, chamados agregados siderúrgicos ou escórias, os quais possuem excelentes propriedades físicas e químicas. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o potencial de uso de agregados siderúrgicos na composição de misturas de MRAF, dentre elas, a escória granulada de alto forno (EGAF) e de aciaria do tipo LD. Foram dosadas três misturas contendo 67% de agregados naturais (AN) e 33% de siderúrgicos e uma mistura apenas com agregados naturais, fixando as misturas na faixa II de MRAF do DNIT. A escória de aciaria LD mostrou um excelente potencial na utilização em misturas de MRAF, uma vez que apresentou qualidades relevantes para o uso nessa técnica, tais como durabilidade, alta resistência a abrasão, forma cúbica, baixa reatividade e ausência de impurezas. Essas qualidades propiciaram excelentes resultados nos ensaios de desgaste por abrasão úmida (WTAT) que determina o teor mínimo de emulsão asfáltica e, com isso, a mistura contendo LD e AN obteve o menor teor ótimo de emulsão asfáltica. A EGAF obteve resultados próximos aos agregados naturais na dosagem de emulsão asfáltica. Quanto à avaliação das misturas após dosagem, os resultados foram satisfatórios e dentro das especificações normativas. Diante dos resultados apresentados, conclui-se que as escórias LD e EGAF têm elevado potencial para uso em misturas de MRAF.

Palavras-chave: Microrrevestimento asfáltico, Agregados siderúrgicos, Escória granulada de alto forno, Escória de aciaria.

ABSTRACT

Micro surfacing is one of the treatments available for the maintenance and preservation of asphalt pavements, acting as a sealing, waterproofing and rejuvenating layer. This technique, as well as others in asphalt paving, requires great exploration of natural resources, so any possibility of replacing the material required in this process deserves attention. In addition, this technique requires the use of aggregates with high quality parameters (such as abrasion resistance and durability) that are rare in Brazilian natural reserves, especially in the state of Espírito Santo. In this scenario, a steel industry presents itself as a great option in the supply of aggregates from different stages of the steelmaking process, called steel aggregates or slags, which have excellent physical and chemical properties. Thus, the objective of this research is to assess the potential use of slags in the composition of micro surfacing mixtures, including granulated blast furnace slag (GBFS) and LD steel aggregates. Three mixtures containing 67% of natural aggregates (NA) and 33% of slags and one mixture with natural aggregates only were dosed and all of them were in the diameter range II of the DNIT for micro surfacing mixtures. The LD slag showed an excellent potential, since it offers relevant characteristics for use in this material, such as durability, high abrasion, cubic shape, low reactivity and absence of impurities. These qualities provided excellent results in wet abrasion resistance tests which determines the minimum content of asphalt emulsion. Thus, the mixture containing LD and NA obtained the lowest optimum content of asphalt emulsion. GBFS mixtures obtained results close to the NA mixtures in the analysis of the emulsion dosage. Regarding the evaluation of mixtures after dosing, the results were satisfactory and within the normative specifications. Considering the results obtained, it is concluded that LD and GBFS slags aggregates have a high potential for use in micro surfacing mixtures.

Key-words: Micro surfacing, slag aggregates, granulated blast furnace slag, steel slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Execução de MRAF	16
Figura 2 - Aplicação do ligante, aplicação dos agregados e compactação	21
Figura 3 - Aplicação da lama asfáltica.....	22
Figura 4 - Aplicação de pintura de ligação	23
Figura 5 - Condição do pavimento vs tempo/tráfego	26
Figura 6 - Faixas granulométricas do MRAF	29
Figura 7 - Textura superficial do MRAF (Faixa I - Faixa II - Faixa III).....	30
Figura 8 - Esquema da produção da RC1C-E.....	34
Figura 9 - Efeito da ruptura da emulsão catiônica em contato com o agregado	35
Figura 10 - Determinação do teor de ligante asfáltico residual de projeto do MRAF.....	44
Figura 11 - Fluxo simplificado de produção.....	45
Figura 12 - Processos para fabricação do aço	47
Figura 13 - Conversor LD.....	48
Figura 14 - Escória de aciaria LD em diferentes granulometrias.....	48
Figura 15 - Pátio de Escória de Aciaria	50
Figura 16 - Problemas em revestimentos devido à expansão da escória de aciaria.....	51
Figura 17 - Esquema do processo de redução.....	54
Figura 18 - Programa experimental da pesquisa.....	58
Figura 19 - Agregados naturais a) Brita 0 b) Granilha c) Pó de brita.....	60
Figura 20 - Tanques de armazenamento de emulsões asfálticas na Disbral	61
Figura 21 - Agregados siderúrgicos a) EGAF b) LD	62
Figura 22 - Composição das misturas de MRAF.....	62
Figura 23 - Forma, angularidade e textura superficial dos agregados	64
Figura 24 - Variação da textura dos agregados de agregados graúdos.....	65
Figura 25 - Variação da angularidade dos agregados.....	65
Figura 26 - Variação de forma de agregados miúdos	65
Figura 27 - Ensaio Equivalente de areia	68
Figura 28 - Ensaio de azul de metileno	69
Figura 29 - Ensaio de Viscosidade Saybolt Furol.....	71
Figura 30 - Ensaio pelo método expedito - Resíduo seco por evaporação	72
Figura 31 - Aparelho para determinação da penetração do resíduo da emulsão.....	72

Figura 32 - Ensaio de ponto de amolecimento	73
Figura 33 - Ensaio de recuperação elástica no ductilômetro	73
Figura 34 - Moldagem teor ótimo de RC1C-E	75
Figura 35 - Determinação do teor de emulsão das misturas de MRAF	76
Figura 36 – Determinação do tempo de misturação.....	77
Figura 37 - Máquina LWT	77
Figura 38 – Execução do ensaio para determinação da adesão de areia pela máquina LWT.....	78
Figura 39 - Equipamento de desgaste WTAT	79
Figura 40 - Ensaio de resistência a abrasão úmida - WTAT	80
Figura 41 - Coesímetro e torquímetro	81
Figura 42 - Granulometria dos agregados.....	82
Figura 43 - Granulometria das misturas	83
Figura 44 - Distribuição da propriedade de angularidade - LD	92
Figura 45 - Distribuição da propriedade de angularidade - EGAF.....	92
Figura 46 - Distribuição da propriedade de angularidade - AN.....	93
Figura 47 - Difratoograma LD.....	94
Figura 48 - Difratoograma EGAF.....	94
Figura 49 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura Padrão).....	99
Figura 50 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 01)	100
Figura 51 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 02)	101
Figura 52 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 03)	102
Figura 53 - Adesividade das misturas	103
Figura 54 - Adesividade da mistura 1.....	104
Figura 55 – Determinação da coesão das misturas	105
Figura 56 – Corpos de prova após ensaio de coesão	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre LA e MRAF	22
Tabela 2 - Faixas granulométricas do MRAF	29
Tabela 3 - Falhas originados pelos agregados.....	31
Tabela 4 - Especificação de emulsão asfáltica catiônica elastomérica de ruptura controla – RC1C-E	36
Tabela 5 - Defeitos originados pela emulsão	37
Tabela 6 - Requisitos para projeto de dosagem do MRAF.....	42
Tabela 7 - Quantidades de materiais para projeto de dosagem do MRAF.....	43
Tabela 10 - Composição química - Escória LD	49
Tabela 11 - Gama completa da composição química da escória granulada de alto forno	55
Tabela 12 - Composição química da escória granulada de alto forno.....	56
Tabela 13 - Classificação proposta por Al Rousan (2004)	66
Tabela 14 - Classificação proposta por Ibiapina (2018)	66
Tabela 15 - Caracterização EGAF, LD e agregado natural.....	84
Tabela 16 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para a LD.....	87
Tabela 17 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para a EGAF.....	88
Tabela 18 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para os AN.....	88
Tabela 19 - Classificação dos agregados de LD, EGAF e AN	89
Tabela 20 – Composição mineralógica dos agregados.....	95
Tabela 21 - Resultados de FRX	96
Tabela 22 - Caracterização da Emulsão asfáltica RC1C-E.....	97
Tabela 23 - Tempo de mistura das misturas	98
Tabela 24 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura Padrão).....	98
Tabela 25 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 01).....	100
Tabela 26 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 02).....	101
Tabela 27 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 03).....	102
Tabela 28 - Resultados de WTAT após 6 dias de imersão	103
Tabela 29 - Resultados de coesão para as misturas	105

ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMA – Asphalt Emulsion Manufacturers Association

AN – Agregado natural

AS – Agregado Siderúrgico

BOF – *Blast Oxygen Furnace*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EFRA – Escória de alto forno resfriada ao ar

EGAF – Escória Granulada de Alto Forno

ISSA – *International Slurry Surfacing Association*

LD – *Linz-Donawitz*

LWT – *Loaded Wheel Tester*

MRAF – Microrrevestimento Asfáltico a Frio

OH – *Open Heart*

WTAT – *Wet Track Abrasion Test*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	TIPOS DE TRATAMENTOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	20
2.2	MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO	23
2.2.1	Definição e breve histórico	23
2.2.2	Campo de aplicações	25
2.2.3	Materiais empregados no MRAF	27
a)	Agregados	27
b)	Emulsão asfáltica	32
c)	Material de Enchimento ou Fíler mineral	38
d)	Água	39
e)	Aditivos	40
2.2.4	Projeto e dosagem do MRAF	41
2.3	PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE SIDERURGIA	45
2.3.1	Escória de aciaria	47
2.3.2	Escória de alto forno	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	MATERIAIS	59
3.1.1	Agregados naturais	59
3.1.2	Fíler mineral	60
3.1.3	Emulsão asfáltica	60

3.1.4	Agregados siderúrgicos	61
3.1.5	Composição das misturas de MRAF.....	62
3.2	MÉTODOS	63
3.2.1	Caracterização dos agregados.....	63
a)	<i>Granulometria dos agregados</i>	<i>63</i>
b)	<i>Forma</i>	<i>64</i>
c)	<i>Desgaste por Abrasão Los Angeles</i>	<i>67</i>
d)	<i>Durabilidade</i>	<i>67</i>
e)	<i>Equivalente de areia</i>	<i>67</i>
f)	<i>Densidade real, densidade aparente e absorção de água dos grãos</i>	<i>68</i>
g)	<i>Azul de Metileno</i>	<i>68</i>
h)	<i>Potencial Hidrogeniônico</i>	<i>69</i>
i)	<i>Expansão de escória de aciaria.....</i>	<i>69</i>
j)	<i>Difração de Raios X (DRX).....</i>	<i>70</i>
k)	<i>Fluorescência de Raios X (FRX)</i>	<i>70</i>
3.2.2	Caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E	70
a)	<i>Viscosidade Saybolt Furol a 50°C</i>	<i>70</i>
b)	<i>Peneiração</i>	<i>71</i>
c)	<i>Resíduo seco por evaporação.....</i>	<i>71</i>
d)	<i>Penetração</i>	<i>72</i>
e)	<i>Ponto de amolecimento</i>	<i>73</i>
f)	<i>Recuperação elástica</i>	<i>73</i>
3.2.3	Dosagem e avaliação das misturas de MRAF.....	74
a)	<i>Dosagem das misturas de MRAF</i>	<i>74</i>
b)	<i>Tempo mínimo de misturação</i>	<i>76</i>
c)	<i>Excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (LWT).....</i>	<i>77</i>
d)	<i>Perda por abrasão úmida (WTAT).....</i>	<i>79</i>

e)	Adesividade das misturas	80
f)	Coesão e características de cura pelo coesímetro	80
4	RESULTADOS	82
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E SIDERÚRGICOS	82
4.1.1	Caracterização de Forma (AIMS).....	86
4.1.2	Caracterização Química e Mineralógica	94
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA	97
4.3	DOSAGEM DAS MISTURAS DE MRAF	98
a)	<i>Mistura Padrão (MP)</i>	98
b)	<i>Mistura 1 (M1)</i>	99
c)	<i>Mistura 2 (M2)</i>	101
d)	<i>Mistura 3 (M3)</i>	102
4.4	AVALIAÇÃO DAS MISTURAS DE MRAF	103
a)	<i>Perda por abrasão úmida após 6 dias de imersão (WTAT)</i>	103
b)	<i>Adesividade das misturas</i>	103
c)	<i>Coesão das misturas</i>	105
5	CONCLUSÕES.....	107
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS.....	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Os pavimentos são estruturas de várias camadas, onde o revestimento é a camada que se destina a receber a carga dos veículos e as ações climáticas. Por essa razão, essa camada deve ser impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados, conforme a carga e a velocidade dos veículos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Em virtude das solicitações impostas pelo tráfego e das ações dos agentes atmosféricos (ar, sol e água), o ligante asfáltico sofre um processo de envelhecimento, onde se torna quebradiço e rígido. Obter um programa de manutenção do pavimento asfáltico é muito importante para reduzir a evolução dos defeitos, reabilitar as condições funcionais e aumentar a vida útil da rodovia, assim mantendo segurança e conforto aos usuários. Entretanto, essa manutenção deve ser realizada antes que a camada superficial perca sua capacidade estrutural (CERATTI e REIS, 2011; ZHENGBING, 2014).

Ouma *et al.* (2015), relata que a manutenção de pavimentos asfálticos tem como objetivo a conservação de sua superfície, a boa condição operacional e a preservação da estética. Os autores destacam que a segurança rodoviária está intimamente relacionada com o estado atual do pavimento, e ambos contribuem quase na mesma proporção para mais de 60% das necessidades de manutenção.

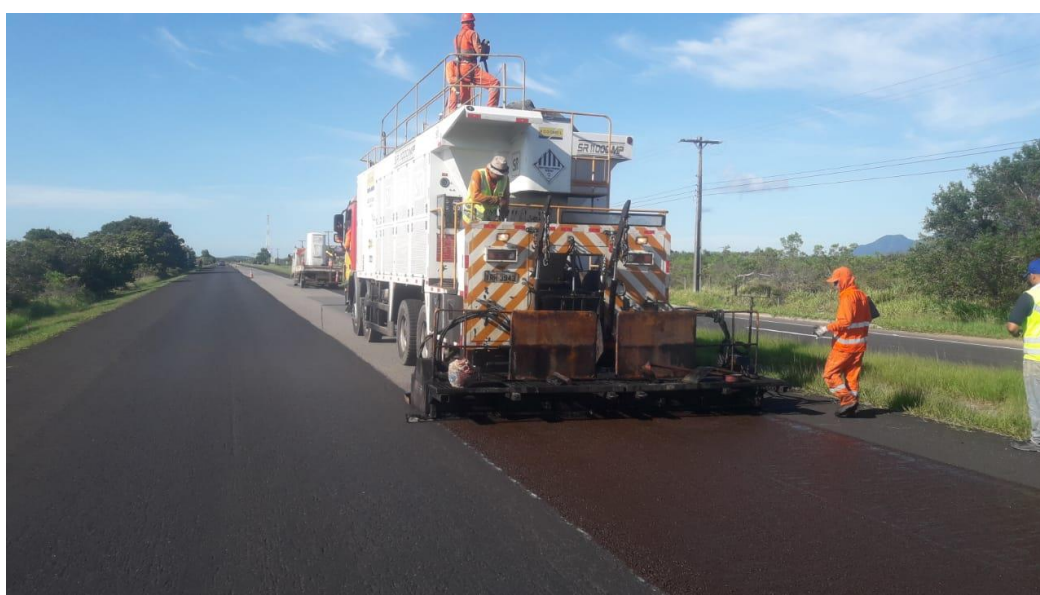
O microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF) é um dos tratamentos disponíveis para manutenção e preservação de pavimentos asfálticos. Se trata de uma combinação de mistura de agregados bem graduados (com forma cúbica e resistentes), emulsão asfáltica catiônica (elastomérica de ruptura controlada), material de enchimento (fíler) e outros aditivos, misturados e assentados em um pavimento estruturalmente sólido e previamente preparado. (ZULU e MUKENDI, 2018; DNIT 035, 2018).

O MRAF é uma técnica que utiliza emulsões asfálticas modificadas por polímero em sua composição para aumentar a sua vida útil e por utilizar o mesmo princípio e concepção, esta técnica pode ser considerada uma evolução das lamas asfálticas (BERNUCCI, 2010).

Segundo DNIT 035 (2018), o microrrevestimento asfáltico pode ser empregado como camada selante, impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou como camada antiderrapante de pavimentos. As espessuras de aplicação variam de 4 a 37mm aplicadas em até duas camadas.

A Figura 1 ilustra o serviço de MRAF sendo executado na ES 060 Rodovia do Sol, próximo ao km 50, em Guarapari – ES, com objetivo de realizar uma manutenção preventiva no pavimento, visando uma melhoria nas condições de aderência pneu-pavimento e impermeabilização da superfície.

Figura 1 - Execução de MRAF



Fonte: Autora

Knabben (2012) e Munhoz e Filla (2017) apresentaram resultados satisfatórios em relação ao atrito pneu-pavimento do MRAF, os pavimentos foram avaliados por meio do ensaio mancha de areia, no qual avalia a rugosidade geométrica da superfície ou macrotextura. Tais análises foram realizadas dois anos após aplicação do MRAF.

No Brasil os recursos de exploração de agregados naturais são geralmente abundantes, porém existem algumas regiões com escassez deste recurso, principalmente aquelas localizadas próximos aos grandes centros consumidores, o que encarece o preço para o consumidor final devido ao custo de transporte, além de gerar degradação ao meio ambiente. Esses são alguns dos fatores motivadores para a busca e utilização de materiais alternativos (RIBEIRO, 2008; CUTI, 2008).

Alguns tipos de agregados alternativos originados a partir de resíduos industriais vêm sendo aplicados na pavimentação. A reciclagem desses materiais gera benefícios diretos ao meio ambiente e ainda possibilita uma redução de custos na execução de obras quando há facilidade de se obter esses tipos de agregados. Alguns desses resíduos são provenientes do processo de fabricação do aço (LOIOLA, 2009).

Segundo o Instituto Aço Brasil (2020), em 2018 o Brasil alcançou o 9º lugar no ranking mundial de produção de aço bruto, sendo produzidos neste ano aproximadamente 35,4 milhões de toneladas. Segundo dados da empresa siderúrgica Arcelor Mittal Tubarão (2020), o estado do Espírito Santo é responsável por cerca de 25% da produção de aço nacional. Somente em 2018 esta empresa produziu aproximadamente 7 milhões de toneladas de aço bruto.

Durante a produção do aço nas indústrias siderúrgicas são gerados dois principais tipos de resíduos, que são resultados de processos diferentes, as escórias de alto forno e as escórias de aciaria, cada qual com suas características próprias. Em 2018 foram gerados 22 milhões de toneladas de coprodutos, sendo 40% coprodutos de alto forno e 27% de aciaria (IAB, 2020).

Diante do grande volume de resíduos e coprodutos gerados pela indústria siderúrgica, nas últimas décadas busca-se reinseri-los na economia de diversas formas. Dos agregados siderúrgicos de alto forno reaproveitados, 98% são utilizados como matéria prima para a produção de cimentos. Porém como o mercado da construção civil (maior consumidor do cimento) oscila conforme a economia do país, tem-se a necessidade de obter alternativas para esses coprodutos. Em relação as escórias de aciaria sua maior utilização são aplicações em pavimentações e nivelamento de terrenos/aterros (IAB, 2018).

Diante disto, esta pesquisa avaliar a possibilidade de uso de agregados alternativos, provenientes do processo de fabricação do aço, na produção do MRAF. São utilizados dois tipos de escórias, as geradas no alto forno (escória granulada de alto forno - EGAF) e na aciaria (*Linz-Donawitz* – LD) como substituição parcial dos agregados naturais na produção do MRAF. Primeiramente será apresentada uma revisão de literatura sobre a técnica de manutenção asfáltica (MRAF) e sobre os coprodutos siderúrgicos. Por meio de um programa experimental será possível avaliar a viabilidade técnica da utilização desses agregados siderúrgicos na produção de MRAF.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar por meio de um programa experimental, a viabilidade de incorporação de agregados siderúrgicos, provenientes da fabricação do aço (escória granulada de alto forno e de aciaria do tipo LD), na produção de misturas de microrrevestimento asfáltico a frio com substituição parcial de agregados naturais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as características dos agregados siderúrgicos e naturais, a fim de verificar os requisitos impostos na norma DNIT 035:2018 – Pavimentação asfáltica – Microrrevestimento asfáltico.
- Avaliar as diferenças na mineralogia e composições de óxidos dos agregados naturais e siderúrgicos por meio dos ensaios de Difração e Fluorescência de Raios-X respectivamente.
- Avaliar as diferenças na forma (angularidade, esfericidade e textura) dos agregados siderúrgicos e naturais por meio do ensaio de *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), a fim de verificar correlação do efeito da microtextura com os resultados dos ensaios de MRAF.
- Realizar estudo de dosagem de misturas com agregados naturais e de misturas com substituição parcial de agregados naturais por siderúrgicos, maximizando o percentual de agregados siderúrgicos, a fim de verificar os efeitos na variação do teor ótimo de emulsão asfáltica em relação a variação na composição de agregados de cada mistura estudada.
- Avaliar o comportamento das misturas de MRAF produzidas por meio de ensaios específicos tais como: determinação da perda por abrasão úmida após 60min e 6 dias de imersão, determinação da resistência a exsudação do asfalto, determinação da coesão e determinação da adesividade.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento da pesquisa, a dissertação está dividida nos 5 capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1 – Contém Introdução, justificativa, objetivos gerais e específicos e estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Trata-se da Revisão Bibliográfica que conceitua o que será necessário para compreensão do mostrado posteriormente.

Capítulo 3 – Estão apresentados os materiais, os métodos de ensaios de caracterização dos agregados, de dosagem e avaliação das misturas asfálticas.

Capítulo 4 – São apresentados e comentados os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Contém as conclusões dos resultados e as sugestões para trabalhos futuros.

Referências – Contém todas as fontes consultadas para realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE TRATAMENTOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Como muitos pavimentos atingem sua capacidade de manutenção terminal, está se tornando cada vez mais importante prolongar a vida útil do pavimento da forma mais econômica possível. Várias técnicas de reabilitação, manutenção de superfície ou tratamentos de superfícies foram desenvolvidas para prolongar a vida útil do pavimento, tanto para estradas de baixo volume ou também para as mais movimentadas (WANG, 2016).

O tratamento superficial, quando usado na manutenção de pavimento, tem como função selar a superfície trincada do pavimento existente contra água e ar, melhorar a qualidade da pista de rolamento e proteger a superfície contra o envelhecimento por oxidação. Além disso, o tratamento superficial restaura a superfície desgastada, mantém a superfície resistente ao deslizamento e melhora a visibilidade noturna pelas demarcações da pista.

O termo tratamentos de superfícies engloba uma ampla variedade de serviços rodoviários em que, geralmente, o ligante asfáltico e os materiais pétreos são aplicados em espessuras inferiores a 35mm, sobre bases granulares ou pavimentos estruturalmente adequados. Nessa modalidade de serviço, destacam-se os executados a frio no local, devido, principalmente, a sua simplicidade de aplicação, economia de energia no processo e nas operações de transporte e estocagem dos materiais (CERATTI, BERNUCCI e SOARES, 2015).

Ceratti e Reis (2011) também destacam a relevância do emprego das técnicas a frio, os autores relatam que a técnica economiza cerca de oito litros de óleo combustível por tonelada produzida, quando comparado ao uso de misturas a quente, além de contribuir para preservar a segurança, o meio ambiente e a saúde dos trabalhadores.

O tratamento superficial consiste no espalhamento de material betuminoso e agregado mineral sobre uma base estabilizada com ou sem mistura, no qual o agregado é colocado uniformemente sobre o material asfáltico, constituindo uma camada esbelta com uma espessura que varia em função do diâmetro do agregado e do tipo de tratamento superficial. Apresenta uma alta resistência ao desgaste e flexibilidade, proporcionando uma condição satisfatória para acompanhar as deformações do pavimento (LOIOLA, 2009).

Quanto a aplicação, os tratamentos de superfícies podem ser classificados em: (a) usinados (Lama Asfáltica - LA, Microrrevestimento Asfáltico a Frio - MRAF e *Cape Seal* – CS) e (b) sem mistura prévia (Tratamentos Superficiais por Penetração (TSP), conforme apresentados a seguir (LOIOLA, 2009; BERNUCCI et al, 2010; CERATTI et al, 2015; WANG 2016).

O tratamento superficial por penetração consiste no espalhamento de ligante asfáltico (emulsões asfálticas convencionais ou modificadas por polímeros elastoméricos) e subsequente aplicação dos agregados sobre a camada de ligante aplicada. A penetração, conforme ilustrado na Figura 2, se dá pela acomodação do agregado no ligante depositado sobre a base imprimada, e após a compactação, a adesão entre ligante e agregado é reforçada. Se trata de um revestimento flexível de pequena espessura, normalmente variando de 0,5cm a 2,5cm, sendo um dos métodos mais antigos para manutenção do pavimento asfáltico. Dependendo do número de camadas de ligantes e agregados podem ser definido como: tratamento superficial simples (TSS), tratamento superficial duplo (TSD) ou tratamento superficial triplo (TST) (CERATTI, BERNUCCI e SOARES, 2015).

Figura 2 - Aplicação do ligante, aplicação dos agregados e compactação



Fonte: ABEDA, 2010

A lama asfáltica consiste em uma mistura a frio de agregados com dimensão máxima de 9,5mm, material de enchimento (fíler), emulsão asfáltica de ruptura lenta e água. A mistura é espalhada de maneira uniforme sobre a superfície do pavimento, como pode ser visto na Figura 3. A lama asfáltica tem uma aplicação limitada, uma vez que apresenta desgaste elevado em rodovias de tráfego pesado (ABEDA, 2010).

Figura 3 - Aplicação da lama asfáltica



Fonte: ABEDA, 2010

O MRAF é considerado uma evolução da LA, ainda que tenha o mesmo princípio e concepção, emprega materiais, equipamentos e controles de qualidade e desempenho mais rigorosos. Sua durabilidade também é maior, sendo aplicado com sucesso em rodovias de tráfego pesado (ABEDA, 2010). A seguir serão apresentadas as principais diferenças entre as duas técnicas descritas, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferenças entre LA e MRAF

LA	MRAF
Admite agregados não britados (20% de areia lavada de rio)	Exige agregados mais grossos, 100% britados e de melhor qualidade
Utiliza emulsão asfáltica de ruptura lenta	Utiliza emulsão asfáltica elastomérica e de ruptura controlada
A cura do revestimento depende das condições climáticas	A cura é química e menos dependente das condições climáticas
A liberação ao tráfego é lenta	A liberação ao tráfego é controlada
Utilizada principalmente como camada selante e rejuvenescedora em vias de baixo e médio volume de tráfego	Utilizado como camada antiderrapante e de regularização para qualquer categoria de tráfego
Apresenta vida útil de aproximadamente 3 a 5 anos	Apresenta vida útil de aproximadamente 5 a 8 anos
Baixo rendimento na execução devido as condições climáticas	Alto rendimento na execução
Dependendo do substrato exigem aplicação de pintura de ligação	Apresenta ótima adesão ao pavimento existente

Fonte: Ceratti e Reis (2011)

O *cape seal* é um revestimento asfáltico delgado, onde são aplicadas duas técnicas de pavimentação em conjunto, o tratamento superficial simples (TSS) com agregados com diâmetro máximo variando entre 9 mm a 13 mm, que confere as características de reabilitação e flexibilidade em pavimentos com trincas não ativas, seguido de uma selagem com MRAF, que promove a impermeabilização e a rugosidade ideal a fim de garantir a segurança e conforto ao rolamento aos usuários da rodovia (CERATTI, BERNUCCI e SOARES, 2015).

A pintura de ligação citada na

Tabela 1, também se trata de um tratamento superficial, no qual consiste na aplicação de emulsão asfáltica catiônica, conforme indicação do projeto, sobre base coesiva ou pavimento a ser restaurado (Figura 4), objetivando promover condições de aderência entre as camadas (CERATTI, BERNUCCI e SOARES, 2015).

Figura 4 - Aplicação de pintura de ligação



Fonte: ABEDA, 2010

2.2 MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO A FRIO

2.2.1 Definição e breve histórico

Define-se o MRAF como sendo uma associação de agregado, material de enchimento (filer), emulsão asfáltica de ruptura controlada modificada por polímero elastomérico, água, aditivos, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada, podendo ser empregado como camada selante, impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou como camada antiderrapante de pavimentos (DNIT 035/2018 – ES, ISSA A-143/2010, NBR 14948/2003).

O MRAF foi desenvolvido na Alemanha no final dos anos 60, quando cientistas alemães começaram testando misturas de emulsões e agregados, a fim de encontrar maneiras de preencher as trilhas de roda em autos-estradas federais. Foi introduzido

pela primeira vez nos Estados Unidos em 1980, no Kansas, onde foram obtidos bons resultados na correção de afundamento de trilhas de rodas e defeitos superficiais nos revestimentos asfálticos. Desde então, a técnica se difundiu por diversos países, na conservação preventiva/corretiva de pavimentos em rodovias de volumes de tráfego médio e alto, bem como em rodovias de tráfego pesado (BROUGHTON et al., 2012; CERATTI e REIS, 2011; HASSAN, 1994).

Zulu e Mukendi (2018), apresentam resultados satisfatórios em aplicações do MRAF nos EUA, Europa, Canadá, China e África do Sul. Os autores apresentam as conclusões e lições aprendidas em cada execução da técnica, como por exemplo: nos Estados Unidos, o MRAF foi aplicado em 2007, No distrito de Dallas em Texas, na faixa III (mesma granulometria adotada pelo DNIT), utilizando 11% de emulsão asfáltica e 1% de cimento Portland, como desempenho e resultados após aplicação, os autores citaram que obtiveram boa textura superficial, ausência de fissuras e sulcos na superfície e uma vida útil mais longa que a prevista em projeto. Após 8 anos da aplicação, o pavimento apresentava bom desempenho. Os autores ressaltam que para alcançar bons resultados como este em Texas é necessária uma seleção prévia dos materiais a serem utilizados e de mão de obra qualificada para aplicação da técnica.

As primeiras aplicações de MRAF no Brasil ocorreram no ano de 1994, em trechos fiscalizados pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (CASTRO, 2014). Logo após, em 1997, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) fiscalizou a aplicação do MRAF no trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra (BR-116-SP), rodovia de intenso volume de tráfego. Entre 1998 e 2002, apenas no estado de São Paulo, foram contabilizados mais de 15 milhões de m² de microrrevestimento, equivalente a mais de 4.100 km de faixa (BERNUCCI et al, 2010).

Os relatórios de acompanhamento de desempenho de trechos construídos nos EUA no estado da Pennsylvania, Texas, Virginia, Ohio, entre outros, revelaram que a vida útil do microrrevestimento é superior a quatro anos. Essa tecnologia vem sendo bastante divulgada nos seminários internacionais, com experiências principalmente nos Estados Unidos, França, Espanha, Alemanha, em estradas de volume médio diário de até cerca de 4000 veículos por dia (PINTO e PINTO, 2015).

2.2.2 Campo de aplicações

Segundo Brasquímica (2019), o microrrevestimento asfáltico possui inúmeras finalidades, dentre elas destacam-se as seguintes: impermeabilizar revestimentos antigos com desgaste superficial, proteger revestimentos recentes de graduação aberta, selar fissuras (<3mm) e melhorar a estética de pavimentos antigos, elevar o coeficiente de atrito (pneu/pavimento/rugosidade), nivelar de trilhas de rodas / <2cm) além de prolongar a vida útil dos pavimentos asfálticos.

Ceratti e Reis (2011), relatam que o MRAF também pode ser utilizado como camada intermediária para retardamento do processo de reflexão de trincas e para o preenchimento de painéis, desde que sejam superficiais.

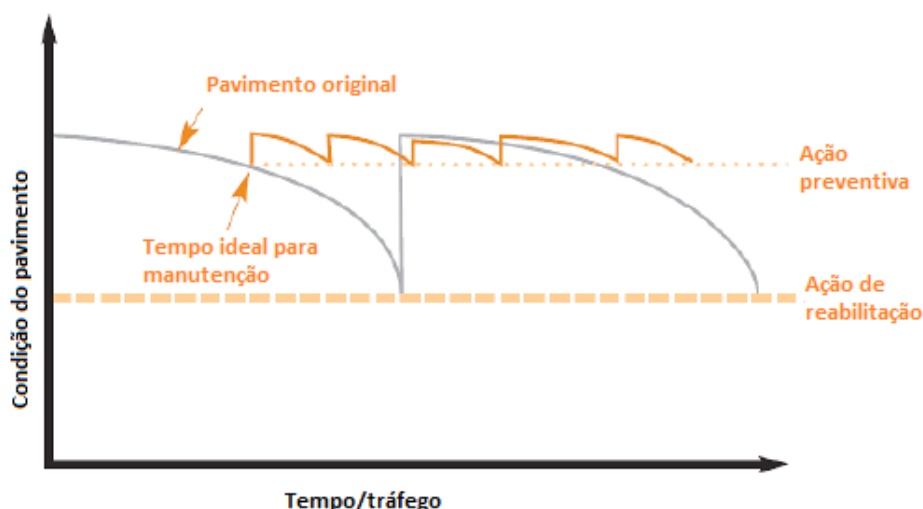
Com relação ao emprego no preenchimento de trilhas de roda, pode ser utilizado, porém para essa aplicação é utilizada uma caixa distribuidora especial com dois compartimentos separados que recebem a mistura e a espalham dentro das trilhas de roda. Segundo recomendações da ISSA A-143:2010 para cada 25 mm de mistura de MRAF aplicada na trilha deve-se acrescentar uma camada com 3 mm a 6 mm devido à ação de compactação do tráfego. Depois de preenchidas as trilhas de roda, deve-se aguardar o tempo necessário para a cura e liberação do MRAF ao tráfego. Para espessuras menores que 15 mm, geralmente a liberação ocorre entre 40 minutos e 1,5 hora após seu espalhamento na pista e para espessuras entre 15 mm e 40 mm admite-se até 2,5 horas, dependendo principalmente do volume de tráfego da rodovia (CERATTI e REIS, 2011).

Xiaoyu (2013), destaca que a tecnologia de microrrevestimento tem vantagens dentre as técnicas de manutenção asfáltica por ser um processo simples, de rápida construção e pouca poluição. Outra vantagem das técnicas a frio é a contribuição para redução dos gastos energéticos e preservação segurança, meio ambiente e saúde nos serviços de pavimentação (CERATTI e REIS, 2011).

O MRAF vem sendo aplicado com sucesso nas indústrias de pavimentação em todo o mundo devido ao seu curto tempo de cura, assim possibilitando a rápida abertura do tráfego, além de possuir flexibilidade para lidar com pequenos desgastes, sulcos, melhorar a textura da superfície, melhorar a qualidade do percurso e prolongar a vida útil do pavimento (YU, ZHANG, XIONG, 2017).

Xiaoyu (2013), relata que para ter um programa de preservação bem-sucedido, o tratamento correto deve ser aplicado antes que a camada do pavimento se deteriore a ponto de ter que executar uma reabilitação. A Figura 5 ilustra o resultado que uma manutenção preventiva tem quando aplicada no momento ideal em um pavimento.

Figura 5 - Condição do pavimento vs tempo/tráfego



Fonte: Galehouse *et al.*, (2003, apud Xiaoyu, 2012; adaptado)

Segundo Hassan (1994), as técnicas preventivas destinam-se a manter o pavimento em boas condições para o uso e são utilizadas como um meio de prevenir ou retardar a deterioração adicional do pavimento a um nível que exigiria técnicas corretivas ou reconstrução.

O MRAF também pode ser aplicado sobre pavimentos rígidos e sobre pontes e viadutos. Nesses casos, a técnica é utilizada principalmente para melhorar o coeficiente de atrito da superfície e regularizar possíveis depressões longitudinais criadas pela carga imposta por pneus de veículos pesados (HASSAN, 1994; SMITH e BEATTY, 1999).

Castro (2014) relata que o MRAF também é utilizado na revitalização de pistas de aeroportos, pelo fato de conferir bom acabamento superficial, conferindo um bom coeficiente de atrito e boa drenabilidade, garantindo uma operação segura para aeronaves.

2.2.3 Materiais empregados no MRAF

a) Agregados

O comportamento do pavimento asfáltico está diretamente relacionado com as características dos agregados. A avaliação da textura do revestimento asfáltico inclui principalmente microtexturas e macrotexturas. Macrotextura está intimamente relacionado pela forma, angularidade e tamanho dos agregados que constituem a mistura, enquanto a microtextura está associada às pequenas asperezas na superfície dos agregados, sendo influenciada pela mineralogia e textura de agregados cristalinos (XIAO *et al.*, 2018).

Os agregados constituem aproximadamente de 90 a 95% em peso da composição do MRAF. Dessa forma, a qualidade do agregado é fator preponderante para que se obtenha o MRAF com boa resistência. Um agregado de boa qualidade refere-se a um agregado com resistência a quebra, com boa durabilidade, com baixa presença de argila/silte, boa adesividade ao ligante betuminoso e com forma cúbica.

A utilização de 100% de materiais granulares, limpos, de elevada resistência mecânica, menores que 12,5 mm, oriundos da britagem de rocha, acompanhados de uma curva granulométrica bem graduada, conferem ao MRAF qualidade superior de desempenho quando comparado aos materiais similares como, por exemplo, a lama asfáltica (ABEDA, 2010).

Tutumluer *et al.* (2018), relatam que o desempenho de curto e longo prazo de qualquer sistema de pavimento construído depende em grande parte da qualidade dos materiais usados em diferentes camadas. As partículas de agregados são continuamente submetidas à degradação por meio de mecanismos de impactos e choques. Logo, as propriedades físicas e químicas dos agregados podem afetar a resistência, a durabilidade e o comportamento de deformação em camadas de pavimentos.

De acordo com a especificação do DNIT ES 035/2018 e ISSA A-143 (2010), os agregados devem apresentar as seguintes características: desgaste Los Angeles igual ou inferior a 30%, (DNER ME 035/98) durabilidade com perda inferior a 12% (DNER ME 089/94), equivalente de areia igual ou superior a 65% (DNER ME 054/97), adsorção no azul de metileno, máximo 10 ml (NBR 14949:2017) e índice de forma superior a 0,5 (DNER-ME 086/94).

Ceratti e Reis (2011), relatam a importância de realização desses ensaios durante a execução da obra, pois a composição da fonte do agregado e sua natureza química podem mudar durante a britagem dos materiais.

A reatividade dos agregados influencia na composição da emulsão asfáltica, no tipo e quantidade de emulsificantes a serem utilizados, conduzindo à variação do tempo de ruptura, materiais reativos rompem mais rápido do que materiais menos reativos. Diante disso, na formulação da emulsão, essa característica é muito importante. A reatividade do agregado é analisada por meio do ensaio azul de metileno (OMENA, 2009).

Reis (2005) e Pereira *et al.* (2018) citam que a reatividade dos agregados vai variar de acordo com a superfície química da superfície e do teor de finos. O autor relata que o granito e o basalto são os agregados mais utilizados no MRAF, o granito por sua vez possui baixa reatividade enquanto o basalto possui alta reatividade.

Para a seleção da dimensão dos agregados a serem utilizados no MRAF, as especificações brasileiras (DNIT 035/2018 e NBR 14948: 2003) contemplam três faixas granulométricas possíveis para serem utilizadas, dependendo da espessura e textura requerida para obra.

As duas primeiras faixas são correspondentes as faixas adotadas pela ISSA A-143/2010, porém uma terceira faixa foi adotada nas normas brasileiras.

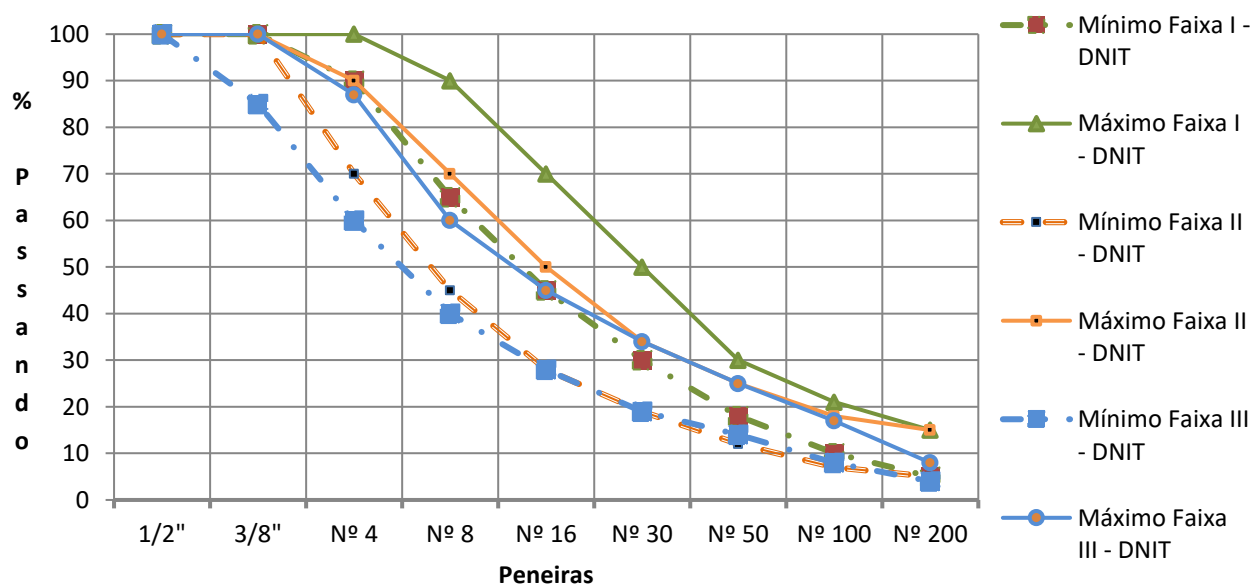
Na Tabela 2 e Figura 6 são apresentadas as faixas granulométricas conforme especificações de serviço do DNIT 035/2018.

Tabela 2 - Faixas granulométricas do MRAF

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso			Tolerância da curva de projeto (%)	
		Faixa I - DNIT Faixa II - ISSA	Faixa II - DNIT Faixa III - ISSA	Faixa III - DNIT		
Nome	Abertura (mm)				DNIT	ISSA
1/2"	12,5	-	-	100	-	-
3/8"	9,5	100	100	85 - 100	± 5	-
nº 4	4,75	90 - 100	70 - 90	60 - 87	± 5	± 5
nº 8	2,36	65 - 90	45 - 70	40 - 60	± 5	± 5
nº 16	1,18	45 - 70	28 - 50	28 - 45	± 5	± 5
nº 30	0,6	30 - 50	19 - 34	19 - 34	± 5	± 5
nº 50	0,33	18 - 30	12 - 25	14 - 25	± 5	± 4
nº 100	0,15	10 - 21	7 - 18	8 - 17	± 3	± 3
nº 200	0,075	5 - 15	5 - 15	4 - 8	± 2	± 2

Fonte: DNIT 035/2018 – ES e ISSA A-143, 2010

Figura 6 - Faixas granulométricas do MRAF



Fonte: Autora

Segundo Ceratti e Reis (2011), a faixa I, graduação mais fina, é utilizada para restaurar características impermeabilizantes e utilizada sobre pavimentos envelhecidos e trincados.

A faixa II, graduação média, fornece características antiderrapantes a camada de rolamento em rodovias de tráfego pesado, essa faixa é a mais utilizada sobre pavimentos desgastados e polidos. Já a faixa III, graduação mais grossa, geralmente é utilizada como camada de regularização e para preenchimento de trilhas de roda. A Figura 7 ilustra as características dos materiais das três faixas citadas.

Figura 7 - Textura superficial do MRAF (Faixa I - Faixa II - Faixa III)



Fonte: Ceratti e Reis (2011)

Segundo especificações do DNIT 035/2018, a faixa I é recomendada para uso em rodovias de média intensidade de tráfego e em aeroportos, geralmente é empregada com consistência bem fluida. As faixas II e III são recomendadas para utilização em rodovias de tráfego intenso, cobrimento de trilhas de roda, camada de texturização ou nivelamento.

Ceratti e Reis (2011) ressaltam que a faixa III também pode ser utilizada como primeira camada, para preenchimentos de depressões e trilhas de rodas, sendo recoberta por uma ou duas camadas da faixa I ou II.

Segundo Abeda (2013), podem ocorrer falhas construtivas relacionadas aos agregados na execução do MRAF, a Tabela 3 apresenta algumas causas, possíveis efeitos e medidas preventivas a serem adotadas.

Tabela 3 - Falhas originados pelos agregados

Causas	Possíveis efeitos	Controles
Falta de finos	• Baixa consistência da mistura com possíveis escorrimentos da água ou emulsão. Mistura muito fluída, afetando o tempo de ruptura. • Tempo de cura elevado • Desprendimento de material graúdo • Superfície mais aberta e rugosa	• Granulometria: verificação do estudo de dosagem
Excesso de finos	• Aumento da velocidade de ruptura • Superfície mais fechada e lisa • Patologias futuras como deslocamento do MRAF	• Granulometria: verificação do estudo de dosagem)
Segregação do fíler na mistura de agregados	• Aparecimento de pontos de fíler na massa ou manchas claras localizadas em pontos determinados	• Inspeção da umidade do fíler • Verificação da dosagem de fíler, conforme o estudo de dosagem
Qualidade inadequada dos finos	• Aumento da velocidade de ruptura • Diferenças de coloração na superfície (manchas ou riscos) • Excessivo consumo de aditivo • Má adesão ao substrato (base) • Consumo excessivo de água	• Granulometria: verificação do estudo de dosagem • Verificação da qualidade do agregado miúdo através do ensaio de Equivalente de Areia
Contaminação do agregado com outros agregados maiores	• Presença de agregados graúdos na aplicação • Estrias longitudinais na massa aplicada	• Inspeção visual dos montes de agregados • Peneiração prévia dos agregados

Fonte: Abeda (2013)

b) Emulsão asfáltica

Segundo DNIT 035/2018 e ISSA A-143/2010 a emulsão asfáltica utilizada no MRAF deve ser do tipo RC1C-E, emulsão catiônica, modificada por polímero elastomérico e de ruptura controlada, conforme especificações da norma DNIT 128/2010-EM.

A emulsão do tipo RC1C-E contém polímeros do tipo borracha termoplástica (SBS) ou látex de borracha sintética (SBR), e confere ao microrrevestimento vantagens como (CERATTI E REIS, 2011):

- ✓ Menor suscetibilidade térmica, com redução dos riscos de exsudação em climas quentes e maior flexibilidade e elasticidade em climas frios.
- ✓ Melhores características adesivas ao substrato e na selagem de fissuras
- ✓ Maior retenção dos agregados (coesão), resistência a desgaste por abrasão e a oxidação (envelhecimento).

A Brasquímica (2019) também apresenta vantagens para a emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura controlada, tais como: aumenta o ponto de amolecimento, maior resistência ao envelhecimento, excelente adesividade com todos os agregados, estocagem a temperatura ambiente, alta trabalhabilidade, reduz consumo de energia por não haver consumo de combustível no aquecimento, manuseio e estocagem, menor agressão ao meio ambiente e não é inflamável.

Abeda (2010) define emulsão como uma dispersão de pequenas partículas de um líquido em outro líquido, assim a emulsão pode ser formada por dois líquidos não miscíveis onde geralmente a fase continua é a água. As emulsões asfálticas apresentam composição química variável conforme sua utilização, geralmente são compostas por 30% a 50% de água, 50% a 70% de cimento asfáltico (CAP) e 0,1% a 2,5% de agentes emulsificantes.

AEMA (2017), define emulsão asfáltica como uma mistura homogênea de gotículas asfálticas minúsculas suspensas em água, que contém três principais componentes químicos: cimento asfáltico, água e emulsificante. Esses componentes são unidos pela influência mecânica de um moinho coloidal, dispositivo mecânico de alta velocidade, que cisalha o asfalto em pequenos glóbulos.

Para os autores Ronald e Luis (2016), as emulsões asfálticas são geralmente compostas por gotículas de 5 a 55 µm de asfalto dispersas em água, o teor de asfalto

pode variar de acordo com a aplicação, no entanto, para fins de fabricação é tipicamente compreendido entre 50% a 80% em peso

Os autores ainda ressaltam que as propriedades da emulsão asfáltica como viscosidade e estabilidade dependem de diversas variáveis, como: propriedades de fase contínua (salinidade e pH), relação água / óleo, estrutura molecular, tamanho das gotículas (e sua distribuição) e o procedimento estabelecido para preparar a emulsão.

As emulsões modificadas incluem polímero e entre as vantagens das emulsões, modificadas ou não, está a redução da viscosidade do CAP possibilitando a sua utilização em temperaturas bem menores, reduzindo a liberação dos voláteis e os custos com energia (CERATTI E REIS, 2011).

As emulsões asfálticas são dispersões de asfalto em água estabilizada por um sistema químico, na qual são utilizados em sua fabricação, agentes emulsificantes e asfalto, onde permite que ele se disperse uniformemente, criando uma mistura temporária. Após aplicação da emulsão asfáltica ocorre a ruptura da mistura, a água evapora deixando para trás o asfalto, chamado asfalto residual (GRANSBERG, 2010).

O agente emulsionante ou emulsificante é uma substância que reduz a tensão superficial, o que permite que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água por algum tempo, evitando a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência (junção de partes que se encontravam separadas). A proporção típica entre óleo e água é de 60 para 40%. O tempo de permanência da separação entre os glóbulos de asfalto pode ser de semanas até meses, dependendo da formulação da emulsão (BERNUCCI et al., 2010).

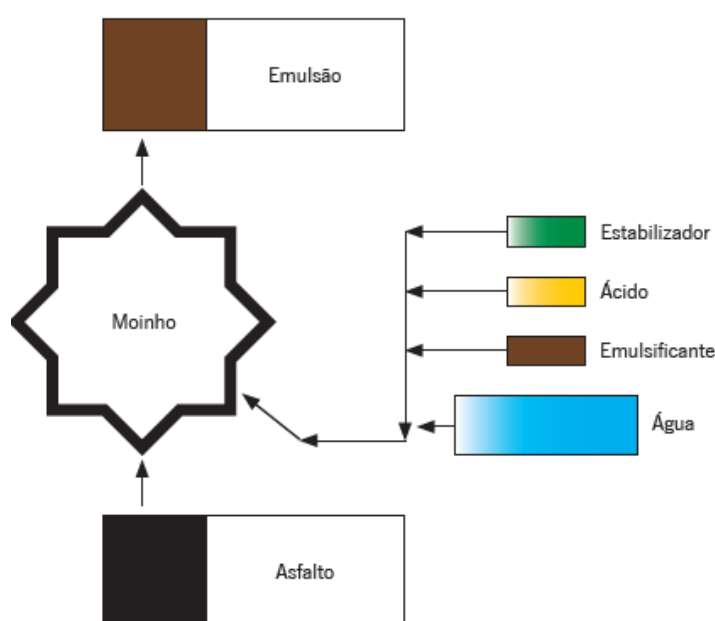
O agente emulsificante de uma emulsão asfáltica catiônica é geralmente um sal de amina, que se comporta como uma base fraca. Quando este encontra-se em contato com a superfície do agregado reage quimicamente promovendo a adesividade satisfatória do asfalto residual da emulsão (resistência à ação da água) com praticamente todos os tipos de agregados. (ABEDA, 2010).

Os emulsificantes são estruturas orgânicas que apresentam uma parte polar, que possui afinidade com os hidrocarbonetos do CAP e uma parte apolar que possui afinidade com as moléculas de água. O uso de emulsificante em suspensões asfálticas tem a finalidade de dar estabilidade, de diminuir a tensão superficial e de revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora, mantendo-os dispersos na

emulsão. A quantidade de emulsificantes utilizados em geral não ultrapassa 2,5% em massa de emulsão asfáltica (CERATTI, BERNUCCI e SOARES, 2015).

Para fabricação da emulsão pelo processo convencional, ilustrada na Figura 8, o cimento asfáltico (cerca de 62% de CAP) é aquecido a uma temperatura entre 140° a 145°C e a fase aquosa entre 50° a 60°C, na qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsificantes, onde esses componentes são unidos pela influência mecânica do moinho coloidal, com alta capacidade de trituração, produzindo a emulsão asfáltica.

Figura 8 - Esquema da produção da RC1C-E

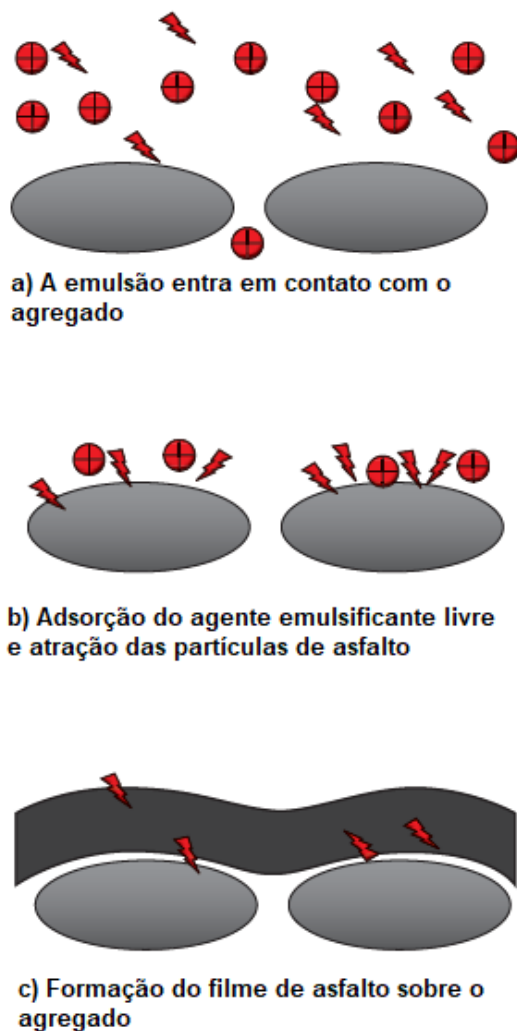


Fonte: Abeda (2010)

Quando os glóbulos de asfalto da emulsão dispersos na água entram em contato com o agregado mineral, ocorre o processo de ruptura. Vários fatores influenciam na velocidade em que ocorre a separação e a evaporação da água, tais como: tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, teor de umidade dos agregados, das temperaturas dos materiais, da temperatura do ambiente, tipos de emulsificantes utilizados na emulsão e da ação mecânica de compactação. Assim o sinal de ruptura é dado pela mudança de cor da emulsão, que passa de marrom para preta. Ocorre então a adsorção de uma película sobre o material pétreo pela reconstituição do asfalto residual, independentemente de o agregado estar seco ou úmido, com a consequente evaporação da água de dispersão, conforme ilustrado na Figura 9 (ABEDA, 2010; PINTO e PINTO, 2015).

Nas emulsões catiônicas o processo de ruptura se dá principalmente por reação química de atração eletrostática entre o emulsificante e o agregado.

Figura 9 - Efeito da ruptura da emulsão catiônica em contato com o agregado



Fonte: Abeda (2010)

As emulsões catiônicas apresentam boa adesividade aos agregados cujas cargas elétricas superficiais são eletronegativas, como os arenitos e granitos, que possuem elevada porcentagem de sílica (PINTO e PINTO, 2015).

Ceratti e Reis (2011), ressaltam que o controle da emulsão asfáltica do tipo RC1C-E permite a execução dos serviços até mesmo à noite, com tempo de liberação da pista para o tráfego entre uma a três horas, porém essa liberação irá depender da formulação da emulsão asfáltica, que deve possuir emulsificantes específicos para isso, certos emulsificantes dependem do sol para cura, emulsificantes para aplicação noturna são mais caros, assim aumentando o valor da emulsão asfáltica.

Segundo DNIT 128/2010, as emulsões RC1C-E devem apresentar as características descritas na Tabela 4, de modo que, em sua utilização, seja alcançada a máxima eficiência.

Tabela 4 - Especificação de emulsão asfáltica catiônica elastomérica de ruptura controla – RC1C-E

Método	Descrição	<u>Valores especificados</u>	
		Mínimo	Máximo
NBR 14491	Viscosidade Saybolt-Furol, s, a 50°C (s)	-	70
NBR 6570	Sedimentação, % massa	-	5
NBR 14393	Peneiração, retido na peneira 0,84 mm, % massa	-	0,1
NBR 6300	Resistência à água de cobertura de área, % massa	-	-
	Agregado seco	80	-
	Agregado úmido	60	-
NBR 6567	Carga da partícula	Positiva	-
NBR 6299	pH	-	6,5
NBR 6568	Destilação – solvente destilado a 360°C, % volume		0
	Resíduo seco, % massa	62	-
NBR 6576	Penetração a 25°C, 100 g, 5s, 0,1 mm	45	150
NBR 6560	Ponto de amolecimento, °C	55	-
NBR 15184	Viscosidade Brookfield a 135°C, spindle 21, 20 rpm, cP	600	-
NBR 15086	Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm, %	70	-

Fonte: DNIT 128/2010 – EM

Segundo Ceratti e Reis (2011), podem ocorrer defeitos originados pela emulsão, a Tabela 5 apresenta algumas causas, possíveis efeitos e controles.

Tabela 5 - Defeitos originados pela emulsão

Causas	Possíveis efeitos	Controles
Emulsão com baixa estabilidade química	• Rupturas parciais de mistura com formação de grumos • Espalhamento irregular • Excessivo consumo de aditivo • Má adesão ao substrato (base)	• Tempo de misturação
Emulsão com alta estabilidade química	• Velocidade de ruptura muito lenta • Escorrimento da emulsão	• Tempo de misturação
Emulsão com sedimentação	• Diferenças de coloração no espalhamento da massa por teor diferente de ligante	• Inspeção visual do tanque de armazenamento
Emulsão com peneira	• Entupimento em bombas e filtros da máquina • Formação de sedimentos ou natas insolúveis	• Ensaio de peneiramento
Emprego de emulsão quente	• Prematura ruptura da emulsão na mistura • Variação no consumo de aditivo • Má adesão ao substrato (base)	• Medição da temperatura da emulsão
Inadequado conteúdo de ligante na emulsão asfáltica	• Falta ou excesso de ligante na mistura	• Ensaio de verificação do teor de resíduo asfáltico por evaporação

Fonte: Ceratti e Reis (2011)

c) Material de Enchimento ou Fíler mineral

Segundo especificações do DNIT 035/2018, o material de enchimento deve ser constituído por materiais finamente divididos, não plásticos, secos, isento de grumos com graduação granulométrica bem definida, tais como pó de pedra, cimento Portland, cal hidratada, do tipo CH-I e pós-calcários conforme estabelece a norma DNER – EM 367/97.

Na composição do MRAF os materiais de enchimento mais utilizados são o cimento Portland CP-II e a cal hidratada CH-1.

A norma americana ISSA A-143/2010, estabelece que o percentual de fíler varie de 0 a 3%, e relata que seu objetivo é melhorar a consistência da mistura e ajustar o tempo de ruptura e cura.

O fíler na mistura de microrrevestimento acelera ou retarda a ruptura, isso depende da reatividade dos agregados e do tipo de emulsificante utilizado na emulsão asfáltica, ou seja, depende da interação química entre emulsão e agregados. Outro fator que interfere é a temperatura da pista, quanto maior a temperatura, mais rápida será a ruptura da mistura. Com isso, ressalta a importância da experiência do construtor, que durante a aplicação irá controlar o teor de fíler da mistura.

O cimento Portland ou cal hidratada CH-1 tem a finalidade de preencher os vazios do agregado mineral graúdo e melhorar a coesão da massa asfáltica aplicada. A utilização de fíler mineral minimiza a segregação de agregados devido ao incremento da consistência da mistura asfáltica e acelera o processo de ruptura e cura pelo aumento da velocidade de liberação da água e, conseqüentemente, da sua coesão (ABEDA, 2010).

Segundo Ceratti e Reis (2011), a utilização do fíler mineral na composição do MRAF possui quatro objetivos, tais como:

- ✓ Melhorar a graduação da composição da mistura de agregados;
- ✓ Aumentar a compatibilidade e a consistência da mistura asfáltica, mitigando a segregação do agregado e ou afloramento do ligante;
- ✓ Auxiliar no processo de ruptura e cura da emulsão, acelerando a expulsão de água;
- ✓ Aumentar a coesão final da mistura;

d) Água

De acordo com as especificações DNIT ES 035/2005, a água utilizada no MRAF deve ser limpa, isenta de matéria orgânica, óleos e outras substâncias prejudiciais à ruptura da emulsão asfáltica. Durante o processo de mistura, deve ser empregada uma quantidade suficiente para promover uma consistência adequada.

A norma ISSA A-143/2010 específica que a água a ser utilizada na mistura do MRAF deve ser livre de sais e contaminantes, e ressalta que se a qualidade da água tiver em questão, esta deve ser enviada ao laboratório, assim como as outras matérias primas, para execução do projeto de mistura.

A presença de sais solubilizados (não visíveis) na água de misturação, acarretam reação de desestabilização da emulsão asfáltica, tornando impraticável a operação de usinagem do microrrevestimento, sendo importante o encaminhamento da amostra da mesma, que será utilizada na realização dos serviços, juntamente com os materiais britados que serão transportados para o canteiro de obras (“britagens recentes”), para o laboratório de projeto da mistura asfáltica, para a comprovação de suas características técnicas (BRASQUIMICA, 2019).

Segundo Castro (2014) o teor de água utilizado na mistura do MRAF é por volta de 4% a 12% do peso do agregado seco, porém este teor pode ser ajustado dependendo das condições meteorológicas e da taxa de absorção do agregado.

Misturas com pouca quantidade de água pode dificultar o espalhamento na pista e prejudicar a adesão ao pavimento existente, mas por outro lado, se utilizada em porcentagens muito elevadas pode deixar a mistura com aspecto muito fluido, causando segregação e exsudação no revestimento asfáltico. Outro aspecto importante é que se a mistura for muito rígida, pode ocorrer o rompimento prematuro na caixa distribuidora ou o arrastamento de material na distribuição, causando estrias ou frisos na superfície acabada. (ABEDA, 2010).

Ceratti e Reis (2011) destacam que o teor de água de mistura deve ser definido por meio do ensaio do cone de consistência, conforme especificações da NBR 14746, podendo ser ajustado durante a aplicação do MRAF. Os autores também citam que misturas ligeiramente secas apresentam maior velocidade de cura e melhor desempenho em relação às misturas mais úmidas.

Dessa forma, durante o projeto da mistura, um teor ótimo de água é determinado para aplicação em campo. No campo, a quantidade de água necessária na mistura é afetada pela quantidade de umidade no agregado, a umidade do ambiente, vento e temperatura, além da quantidade de umidade que a superfície do pavimento absorve. Conforme as condições mudam, o operador deve alterar a quantidade de água para manter uma consistência uniforme.

e) Aditivos

Quando necessário, podem ser empregados aditivos para acelerar ou retardar a ruptura da emulsão na execução do microrrevestimento asfáltico. O tipo, bem como as quantidades, deve ser definido pelo laboratório como parte do projeto de mistura (DNIT 035/2018 e ISSA A-143/2010).

Segundo a Brasquímica (2019), as características mineralógicas dos agregados indicam, já no projeto da mistura a necessidade do emprego destes materiais, ou ainda, se será necessária a adição no ato da aplicação devido a condições climáticas (altas temperaturas) no local da obra.

Segundo Ceratti e Reis (2011), podem ser empregados dois tipos de aditivos, os aditivos químicos para controle da velocidade de ruptura da emulsão e os aditivos de reforço (fibras), para melhoria das propriedades mecânicas de flexibilidade do revestimento.

O aditivo químico é composto por agentes tensoativos catiônicos compatíveis com os emulsificantes utilizados na formulação da emulsão asfáltica no projeto de MRAF, na prática seu teor varia de 0 a 2% em peso de agregado seco. Geralmente é aplicado para retardar o processo de ruptura da emulsão em aplicações cujo pavimento esteja com temperatura elevada (acima de 30°C) ou quando os agregados são muito reativos, apresentando valores elevados no ensaio de azul de metileno e baixo equivalente de areia (CERATTI e REIS, 2011).

A necessidade de utilização de aditivos químicos bem como o seu teor, é determinada por meio do ensaio “determinação do tempo mínimo de misturarão”, seguindo especificações da NBR 14758.

Os aditivos visam ampliar a “janela de trabalhabilidade” da mistura, permitindo que uma mistura trabalhe a uma temperatura maior do que para que foi projetada.

Temperaturas elevadas pedem o uso de aditivos retardadores, enquanto temperaturas baixas requerem aditivos aceleradores (VIVONE, 2014).

Os aditivos químicos normalmente atuam com objetivo de acelerar ou retardar o processo de ruptura das emulsões, os mais utilizados incluem emulsionantes, sulfato de alumínio, cloreto de alumínio, Sulfato de amônia, sais inorgânicos, aminas e bórax (GRANSBERG, 2010).

É importante salientar que quando a emulsão asfáltica é produzida considerando as características químicas dos agregados, os aditivos químicos são dispensáveis, assim minimizando o custo da obra.

As fibras podem ser de origem orgânica ou mineral, os tipos mais comuns de fibras utilizadas são: de vidro, de poliéster, acrílica e de polipropileno. Sua dosagem varia entre 0,1 a 0,5% em peso do agregado. A utilização desse material juntamente com o ligante elastomérico resulta em vários benefícios como: bom comportamento a temperaturas extremas e ganho de resistência a tração e ao cisalhamento, minimizando riscos de segregações, exsudações, trincas ou perda de materiais pétreos durante utilização da via (CERATTI e REIS, 2011).

Zulu e Mukendi (2018), relatam que o uso de fibras na mistura do MRAF tem a função de melhorar a durabilidade da superfície tratada. Já a Brasquímica (2019), destaca que as fibras são utilizadas para aumentar a flexibilidade e a resistência mecânica do sistema retardando a propagação das trincas do revestimento antigo.

2.2.4 Projeto e dosagem do MRAF

Materiais de boa qualidade são importantes para o desempenho adequado de misturas de microrrevestimento, no entanto, não é garantido uma mistura satisfatória, uma vez que alguns materiais podem ser incompatíveis quando misturados, assim não apresentando características físico-químicas adequadas. Por esta razão os ensaios de mistura são importantes na avaliação do MRAF (CERATTI e REIS, 2011).

Os autores relatam que no projeto de dosagem primeiramente deve ser realizada uma seleção e caracterização dos materiais, bem como a seleção da faixa granulométrica a ser utilizada no projeto, posteriormente devem ser realizadas as seguintes etapas: avaliação da consistência da mistura (por meio do ensaio do cone), determinação do tempo mínimo de mistura, determinação do teor de aditivo regulador de ruptura

(se previsto em projeto), determinação da coesão úmida e características de cura, determinação da adesividade , determinação da perda por abrasão úmida (WTAT), determinação do excesso de asfalto e adesão de areia (LWT) e determinação do teor de ligante residual de projeto.

A norma DNIT 035/2018 orienta que a dosagem adequada do microrrevestimento asfáltico deve ser obtida com base nos ensaios recomendados pela ISSA - *International Slurry Surfacing Association* e apresenta os métodos e condições de dosagem conforme Tabela 6.

Segundo a ISSA A-143 (2010), a compatibilidade dos agregados, da emulsão RC1C-E, da água, da carga mineral e dos outros aditivos, deve ser avaliada no projeto de mistura, e este deve apresentar a proporção de cada material individualmente a ser utilizado na composição do MRAF.

A Tabela 6 apresenta os respectivos ensaios recomendados pelas normas DNIT 035/2018 ISSA A-143/2010 e NBR 14498/2003, bem como seus respectivos valores limites.

Tabela 6 - Requisitos para projeto de dosagem do MRAF

Ensaio	Normas	Especificações
Tempo mínimo de misturação	TB-113/1990 NBR 14758/2014	Mínimo 120 seg.
Determinação da adesividade	TB-114/1990 NBR 14757/2017	Mínimo 90% coberto
Desgaste por abrasão úmida (WTAT)	TB-100/1990 NBR 14746/2014	Após 1 hora de imersão: 538 g/m ² Após 6 dias de imersão: 807 g/m ²
Determinação da coesão	TB-139/1990 NBR 14798/2017	30 min após moldagem: Mínimo 12 kg.cm 1 hora após moldagem: Mínimo 20 kg.cm
Determinação da adesão de areia pela máquina LWT	TB-109/1990 NBR-14841/2015	Máximo 538 g/m ²

Fonte:DNIT 035/2018; NBR 14498/2003 e ISSA A-143/2010

Além das especificações das faixas granulométricas dos agregados mostrados na Tabela 2, a norma DNIT 035/2018 estabelece limites para teores de asfalto residual, fíler, taxa de aplicação e espessura de camadas para as três faixas conforme Tabela 7.

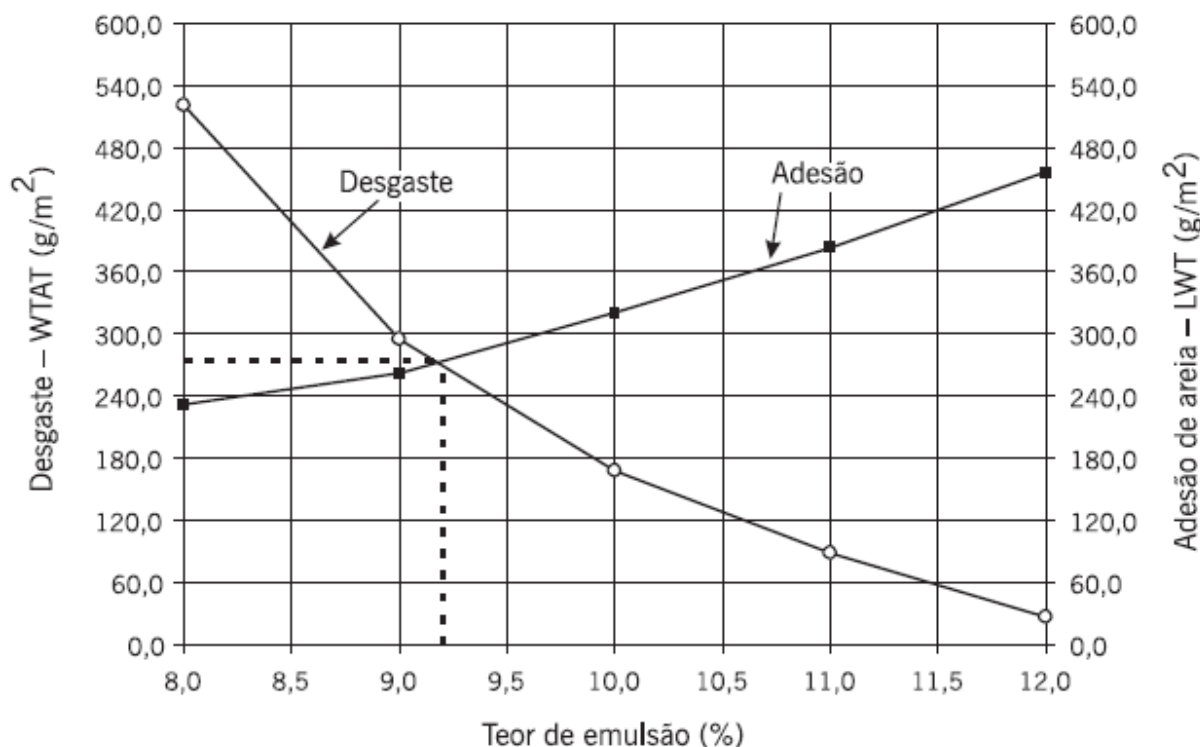
Tabela 7 - Quantidades de materiais para projeto de dosagem do MRAF

Itens	Unidade	Faixa I	Faixa II	Faixa III	Tolerância da curva de projeto (%)
Asfalto residual	% em peso do agregado	7,5-13,5	6,5-12,0	5,5-7,5	±0,2
Fíler	% em peso do agregado	0-3	0-3	0-3	-
Taxa de aplicação	kg/m ²	05-11	08-16	15-30	-
Espessura	Mm	04-15	06-20	12-37	
Utilização		Rodovias de média intensidade de tráfego e aeroportos	Rodovias de tráfego pesado, trilhas de roda, camada de texturização ou nivelamento	Rodovias de tráfego pesado, trilhas de roda, camada de texturização ou nivelamento	-

Fonte: DNIT 035/2018

O teor ótimo da emulsão asfáltica de projeto é determinado graficamente com a combinação dos ensaios de perda por abrasão úmida (WTAT) e excesso de asfalto e adesão de areia (LWT). O ensaio WTAT também determina o teor mínimo do ligante residual, enquanto o ensaio LWT determina o teor máximo. (PINTO e PINTO, 2015). A Figura 10 ilustra um exemplo gráfico da combinação dos dois ensaios.

Figura 10 - Determinação do teor de ligante asfáltico residual de projeto do MRAF



Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Segundo Hassan (1994), os testes de mistura são conduzidos para determinar se os componentes primários, emulsão e agregado, são compatíveis (ou seja, se há boa aderência entre eles), verificar a necessidade de utilização de aditivos, em caso afirmativo, em que concentração; e verificar a faixa de concentração de água sobre a qual misturas homogêneas podem ser obtidas.

Vale destacar que conforme apresentado na Tabela 7, a norma de MRAF define um teor mínimo de asfalto residual, no caso da faixa II, o teor mínimo é 6,5%. Dessa forma, para uma emulsão com 62% de resíduo seco - CAP (teor mínimo para a emulsão RC1C-E), resultaria em um teor de 10,4% de emulsão asfáltica. Dessa forma, a figura apresentada por Bernucci *et al.* (2010), apresenta a reta pontilhada na intersecção das duas curvas, porém nesse caso, o teor ótimo a ser adotado, deveria ser o mínimo da norma.

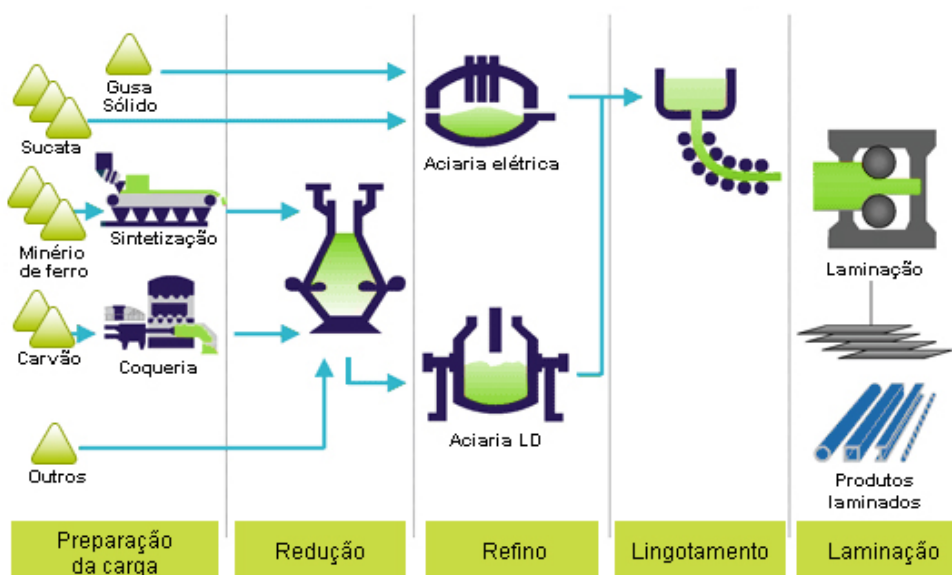
A mistura deve ser produzida na consistência e estabilidade ideal, se a mistura estiver muito rígida, ela pode se fixar prematuramente na caixa de distribuição, impossibilitando a aplicação. Se a mistura for muito fluida, a emulsão e finos podem migrar para a superfície, impactando na resistência à derrapagem (PATRICK, 2018).

2.3 PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE SIDERURGIA

Segundo o Instituto Aço Brasil, em seu último relatório anual disponível, o Brasil ocupa a nona posição na produção de aço no mundo e é o maior produtor da América Latina. Em 2018 a produção de aço bruto no Brasil foi de aproximadamente 35,4 milhões de toneladas, e no mundo todo foi produzido 1.809,1 milhões de toneladas de aço bruto. Os setores da construção civil, de bens capitais, automotivo e eletrodomésticos foram os principais consumidores de aço no ano de 2018.

A fabricação do aço pode ser dividida em cinco etapas: preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxo simplificado de produção



Fonte: IAB, 2015

As principais matérias-primas utilizadas no processo de fabricação são o carvão e o minério de ferro. O carvão é aquecido a uma temperatura entre 1100°C a 1300°C na coqueria, dando origem ao coque, que é utilizado como combustível. Na sinterização é fabricado o sínter, resultado de uma aglomeração a quente de finos de minérios de ferro, cal (retém as impurezas do metal, forma a escória e protege o forno contra os ataques químicos) e finos de coque. Após o resfriamento, britagem e peneiramento do sínter, ele é enviado aos altos fornos junto com o coque. Na etapa de redução o oxigênio é aquecido a uma temperatura de 1000°C e é soprado pela parte de baixo do alto forno, o carvão em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido

chamado ferro gusa. Nesta etapa também são utilizados fundentes, como por exemplo o quartzo, calcário ou dolomita, utilizados para corrigir o pH do minério de ferro. Após a redução saem do alto forno o gusa e a escória de alto forno, que são separadas por diferença de densidade, essas escórias são muito utilizadas na fabricação do cimento (IAB, 2015 e AMT, 2015a).

Antes da etapa de refino, o ferro gusa passa por um processo de dessulfuração ou perda de enxofre excessivo por meio de adições de elementos químicos, que pode ser realizado no carro torpedo ou no Kambara Reactor (KR), equipamento disponível em algumas indústrias siderúrgicas. O tempo de dessulfuração no reator vai depender do tipo de aço a ser produzido, quanto menor a quantidade de enxofre requerida, maior será o tempo de dessulfuração. Nesta etapa também são geradas escórias, chamadas escória KR.

Posteriormente na etapa de refino, o ferro gusa é levado para aciaria, nesse processo podem ser utilizados diferentes tipos de fornos, tais como: convertedor à oxigênio (LD – *Linz-Donawitz* ou BOF – *Blast Oxygen Furnace*), forno de arco elétrico (EAF – *Electric Arc Furnace*), ou com utilização do forno *Siemens-Martin* (OH – *Open Hearth*) (MACHADO. 2000).

A aciaria é responsável por transformar o ferro gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro e aço em aço líquido. No convertedor LD é realizado a oxidação do banho com a injeção de oxigênio, assim parte do carbono contido no ferro gusa é removido juntamente com impurezas. Durante o processo de refino, são geradas as escórias de aciaria, muito utilizadas em pavimentação.

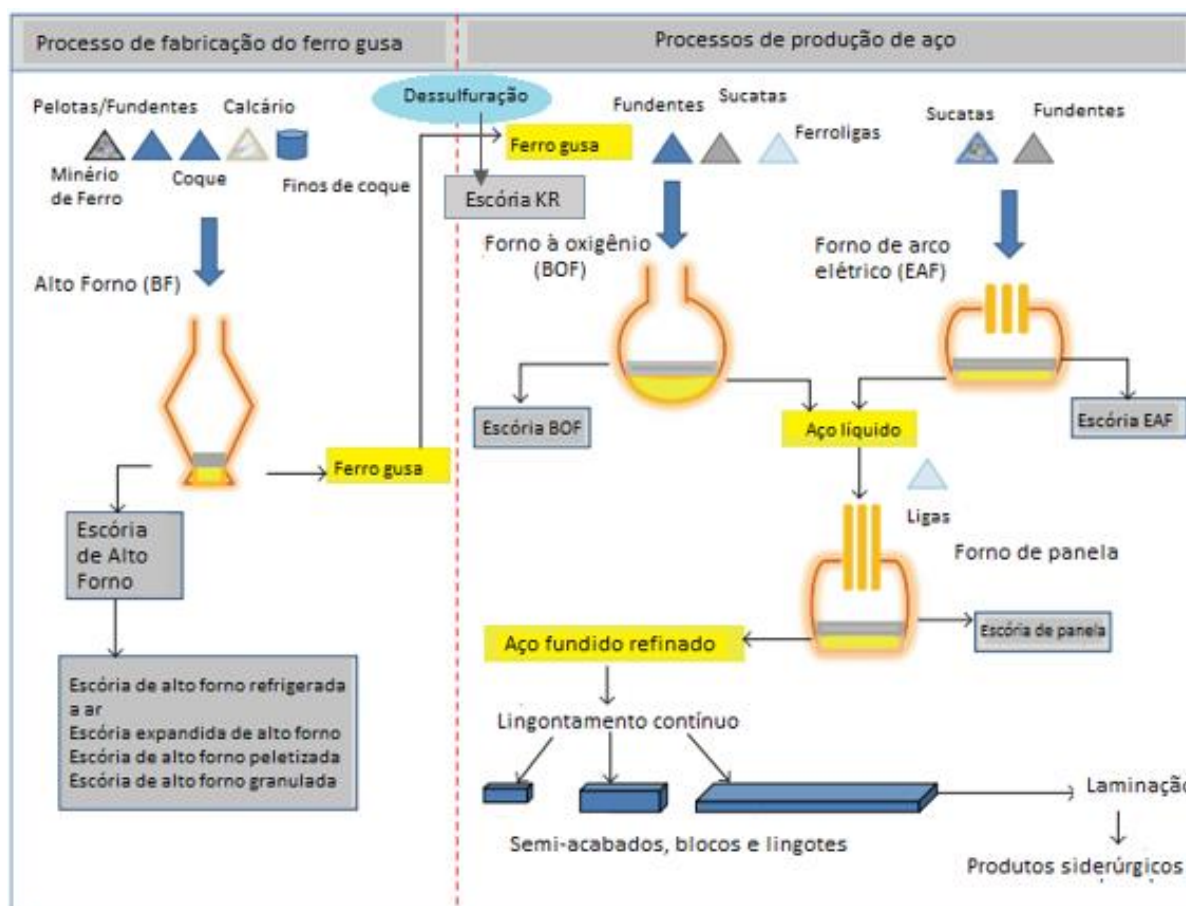
Essa etapa citada é considerada como refino primário, para o tratamento final do aço, que dependerá da sua disposição final, é necessária a realização de um refino secundário. O refino secundário é realizado na panela de aço, para isso é necessário a adição de ligas nobres, como por exemplo, Molibdênio (Mo), Cromo (Cr), Níquel (Ni) e Vanádio (V). O tipo dessas adições químicas dependerá da aplicação final para aquele aço produzido, por exemplo se será usado para fabricação de eletrodomésticos, construção civil, indústria automotiva, entre outros.

A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos. Por fim na etapa de laminação, os semi-acabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados

laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e ou composição química (IAB, 2015 e AMT, 2015a).

A Figura 12 exhibe de forma simplificada todo o processo citado, bem como os resíduos gerados em cada etapa.

Figura 12 - Processos para fabricação do aço



Fonte: Yildirim e Prezzi (2011)

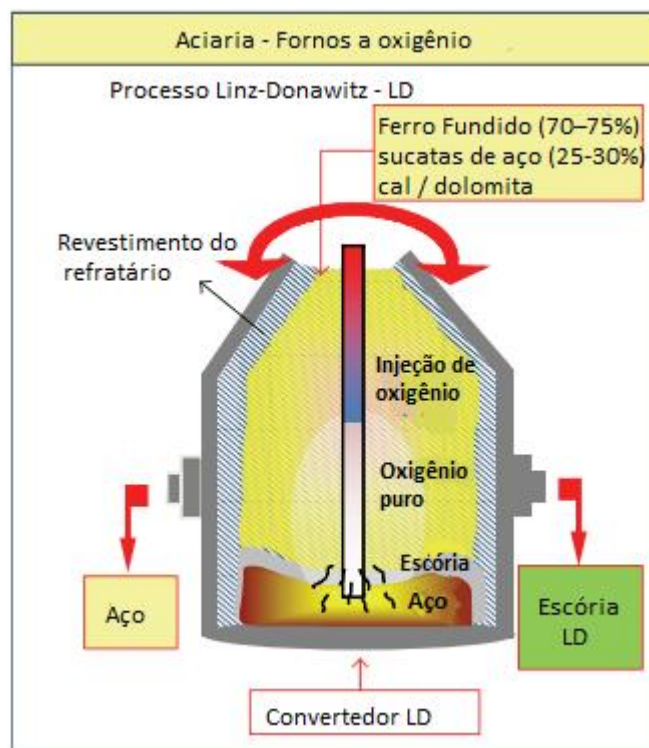
2.3.1 Escória de aciaria

Como mencionado no item anterior, a etapa de aciaria pode ser realizada por diferentes tipos de fornos, tais como: forno à oxigênio, arco elétrico ou *Siemens-Martin*. Nesta pesquisa será utilizada a escória de aciaria do tipo LD, processada no conversor à oxigênio.

No processo utilizado forno à oxigênio, conversor LD, não há necessidade de fonte de calor externa. Ocorre a mistura do ferro gusa líquido, minério ou sucatas ferrosas (necessárias para o balanço térmico), fundentes (cal, dolomita calcinada) e oxigênio no convertedor. *Yildirim e Prezzi (2011)*, relatam o processo de refino no convertedor

LD conforme ilustrado na Figura 13. O aço é fabricado por meio das seguintes operações: carregamento do convertedor, sopragem, controle da temperatura e composição química e enfim a formação do aço líquido e da escória, separados por diferença de densidade.

Figura 13 - Convertedor LD



Fonte: Yildirim e Prezzi (2011)

Após sair do conversor, a escória de aciaria LD passa pelo processo de resfriamento no pátio, britagem e peneiramento, além disso é realizado a separação da fração metálica, e enfim a escória é classificada segundo sua granulometria (0 a 19 mm, 19mm a 32mm e 32mm a 75mm), conforme Figura 14 respectivamente (AMT, 2015b).

Figura 14 - Escória de aciaria LD em diferentes granulometrias



Fonte: AMT (2015b)

Segundo IAB (2019) dos 22 milhões de resíduos produzidos em 2018, 27% são de escória de aciaria. A sua principal aplicação foi como base para a pavimentação de vias e estradas (AMT, 2015b).

Segundo a Arcelor Mittal Tubarão (2020), em 2018 foram produzidas aproximadamente 723 toneladas de resíduos do tipo LD, e caracteriza quimicamente a escória de aciaria LD de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química - Escória LD

Elemento	Escória de Aciaria LD (% em massa)
Óxido de Cálcio (CaO)	23-46
Óxido de Magnésio (MgO)	5-13
Dióxido de Silício (SiO ₂)	11-15
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,8-4
Ferro total (Fe)	14-22

Fonte: AMT (2015)

Para Wang (2016), a escória de aciaria pode ser representada por um sistema quaternário CaO-MgO-SiO₂-FeO. No entanto, as proporções desses óxidos e a concentração de outros componentes menores são altamente variáveis e variam de lote para lote (mesmo em uma planta) dependendo das matérias-primas, tipo de aço produzido, condições do forno e assim por diante.

Segundo a AMT (2015b), devido às suas excelentes propriedades físicas, as escórias de aciaria possuem vasta utilização na engenharia civil. Suas principais aplicações são em base e sub-base rodoviária, drenos rodoviários, cobrimento de pátios, concreto, aterro, lastros ferroviários, revestimentos asfálticos, taludes e fertilizantes agrícolas.

Moura (2020), Schumacher (2017) e Azeredo (2018), apresentaram em suas pesquisas por meio de ensaios de adesividade que a escória de aciaria LD possui elevada interação ligante-agregado, item fundamental para aplicação em revestimentos asfálticos. Isso ocorre, pois, a LD possui características favoráveis para isso, como baixo teor de sílica e alto teor de ferro em sua composição, pH mais básico, além de melhor resistência à abrasão e dureza.

Porém a principal questão que existe quanto à utilização da escória de aciaria LD como agregado para obras de pavimentação é a possibilidade de ocorrer expansão deste material.

Para Motz e Geiseler (2001), a presença de CaO e MgO são os principais responsáveis pelo processo expansivo das escórias de aciaria. Em contato com a água esses minerais reagirão aos hidróxidos, e dependendo da taxa de cal livre e / ou MgO livre esta reação provoca um aumento de volume da escória, combinado principalmente com desintegração dos pedaços de escória e perda de força.

Segundo Schumacher (2018), no Brasil os tratamentos de redução da expansão das escórias de aciaria LD são ao tempo, ao tempo com molhagem e aeração diária.

A cura a céu aberto é realizada empilhando o material em alturas reduzidas de aproximadamente 1,5 a 2,0 metros, ou manter o material em contato permanente com água (CASTELO BRANCO, 2004). A Figura 15 ilustra vários empilhamentos de escória de aciaria.

Figura 15 - Pátio de Escória de Aciaria



Fonte: Autora

Algumas siderurgias na Alemanha e no Japão utilizam o tratamento a vapor para acelerar as reações de hidratação das escórias de aciaria. O vapor pode reduzir rapidamente a expansão em uma escória nova e estabilizar a expansão residual das escórias envelhecidas. O tempo de estabilização pode ser reduzido de meses para dias (MOTZ e GEISELER, 2001).

O ensaio de expansão mais utilizado é realizado com base nas especificações da norma DNIT 113/2009 - ME - Avaliação do potencial de expansão da escória de

aciaria, no qual é baseado no método PTM-130 desenvolvido pelo Departamento de Transportes da Pensilvânia. Este método tem como objetivo determinar o potencial de expansão do AS, estabelecendo limites para que o resíduo possa ser empregado na pavimentação.

As patologias em detrimento da expansão das escórias podem ser identificadas por surgimento de trincas radiais e do estufamento do revestimento asfáltico. Essas patologias podem ocorrer independente da escória ser empregada em camadas granulares de pavimentos ou em revestimentos asfálticos (CASTELO BRANCO, 2004). A Figura 16 apresenta situações onde ocorreram problemas de expansão, tais como trincamentos e erupções respectivamente.

Figura 16 - Problemas em revestimentos devido à expansão da escória de aciaria



Fonte: Castelo Branco (2004)

No entanto Schumacher (2018), concluiu em sua pesquisa que quando o agregado siderúrgico está envolvido com o ligante asfáltico, suas características expansivas podem ser minimizadas e/ou estabilizadas.

Wang (2016), alerta sobre o alto peso unitário de certas escórias de aço, que nesse caso dificultam aplicações mais amplas devido a razões econômicas, principalmente o custo de transporte.

Segundo a AMT (2015b), as escórias LD apresentam as seguintes características: capacidade de carga elevada em relação aos materiais pétreos, alta resistência ao desgaste, propriedades cimentares e alta densidade, porém ela ressalta que é importante ter ciência que a granulometria interfere nessas propriedades; granulometrias menores apresentam menor resistência e menor expansão; granulometrias maiores apresentam maior resistência e maior expansão.

Atualmente para serem utilizadas como agregado para pavimentação, no Brasil as escórias de aciaria devem atender aos requisitos estipulados na especificação de materiais DNER - EM 262/94:

- ✓ Potencial de expansão determinado pelo PTM 130 (*Pennsylvania Testing Method*), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (atualmente Método DNIT ME 113/2009): máximo de 3% de expansão ou o valor de determinado pela especificação particular de projeto;
- ✓ Teor de impurezas: as escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas e de contaminação com escórias de alto forno, solos e outros materiais que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- ✓ Granulometria: a composição granulométrica da escória de aciaria deve se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2") e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2") de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto. A granulometria da escória de aciaria destinada a revestimentos deverá ser função de estudo em laboratório para atendimento das características de projeto;

A norma também apresenta limites que as escórias de aciaria devem atender, tais como:

- ✓ Absorção de água determinada pelo método NBR NM 53:2009: máximo de 1% a 2% em peso;
- ✓ Massa específica determinada pelo método NBR NM 53:2009: de 3 a 3,5 g/cm³;
- ✓ Massa unitária determinada pelo método NBR NM 45:2006: de 1,5 a 1,7 kg/dm³;
- ✓ Desgaste por abrasão Los Angeles determinado pelo método ABNT NM 51:2000: máximo igual a 25% para sub-base e revestimento;
- ✓ Durabilidade ao sulfato de sódio, determinada pelo método ASTM C88-76, cinco ciclos: máximo de 5%.

2.3.2 Escória de alto forno

Os altos fornos são unidades industriais de processos contínuo, onde ocorre a redução dos óxidos contidos no minério de ferro e a separação das impurezas que o acompanham. Desse processo é obtido o ferro gusa e gerado resíduos, as chamadas

escórias de alto forno, que resultam da fusão das impurezas do minério de ferro juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque. A escória fundida é uma massa que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada o ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento. O tipo de resfriamento confere às escórias de alto forno diferentes propriedades, os tipos de resfriamento são: (WANG, 2016; SBRIGHI NETO, 2011; AMT, 2015c):

- Resfriada ao ar ou Cristalizada: São depositadas em estado líquido em pátios apropriados, onde são resfriadas ao ar. Por ser um processo lento, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto não adquirem poder de aglomerante hidráulico. Essa escória recebe o nome de escória bruta de alto-forno, podendo ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, substituindo materiais pétreos, por exemplo, como agregados para construção civil (AMT, 2015c; RMRC, 2019).
- Resfriada com água ou Granulada: A escória em estado líquido é transportada para os granuladores, equipamentos utilizados para o resfriamento brusco, por meio de jatos de água sob alta pressão em tanques.
Nos granuladores são necessárias 8 toneladas de água para resfriar 1 tonelada de escória, provocando uma redução instantânea da temperatura de 1500°C para 100°C. Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula vitrificando e recebe o nome de escória granulada de alto forno. Devido ao seu grande potencial hidráulico, a escória granulada de alto forno moída tem propriedades cimentícias, que fazem uma substituição parcial adequada ou aditiva ao cimento Portland (AMT, 2015c, WANG, 2016; RMRC, 2019).
- Resfriamento por expansão: Se a escória derretida é resfriada e solidificada pela adição de quantidades controladas de água, ar ou vapor, o processo de resfriamento e solidificação pode ser acelerado, aumentando a natureza celular da escória e produzindo espuma expandida ou leve produtos. A escória espumosa é distinguível da escória de alto forno refrigerada a ar pela sua relativamente elevada porosidade e baixa densidade aparente (RMRC, 2019).
- Resfriada por peletização: Se a escória derretida é resfriada e solidificada com água e o ar resfriado em um tambor giratório, pelotas, em vez de uma massa sólida, podem ser produzidas. Ao controlar o processo, as pelotas podem ser mais cristalinas, o que é benéfico para uso agregado ou mais vitificado (vítreo), o que

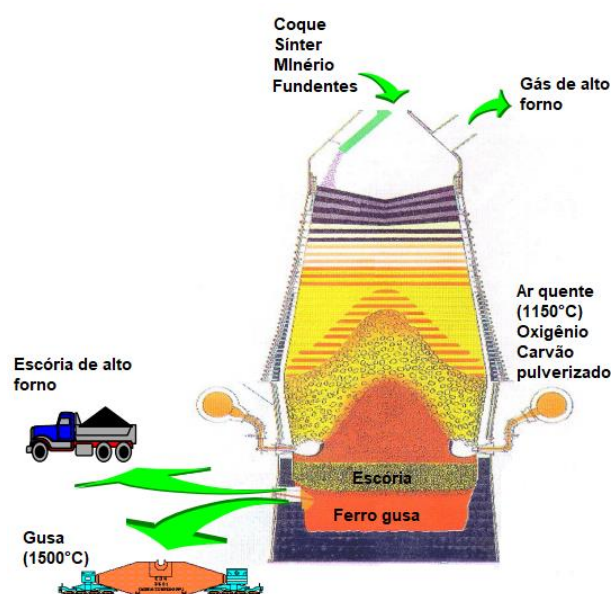
é mais desejável em aplicações cimentícias. Uma extinção mais rápida resulta em maior vitrificação e menos cristalização (RMRC, 2019).

No estado do Espírito Santo a escória granulada de alto forno é resfriada em larga escala pelo método de resfriamento rápido com água, nos tanques granuladores, porém quando os granuladores estão em manutenção é necessário a realização do resfriamento ao ar, assim gerando a escória bruta de alto forno também conhecida como *Dry pit*. Segundo a Arcelor Mittal Tubarão, em 2018 foram produzidas aproximadamente 1,5 milhões de EGAF e 85 mil de *Dry pit* no estado do Espírito Santo.

De acordo com Wang (2016), os métodos de resfriamento e processamento podem modificar a escória física e mineralogicamente, e fabricar diferentes produtos de escória para várias aplicações, tais como agregados, materiais cimentícios, e materiais resistentes a derrapagens para superfícies de pavimentos, por exemplo.

A Figura 17 exhibe de forma esquemática a etapa de redução no alto forno.

Figura 17 - Esquema do processo de redução



Fonte: Scheid, 2011

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2019) cerca de 40% dos coprodutos gerados no ano de 2018 (22 milhões de toneladas), foram de escória de alto forno. Apenas no estado do Espírito Santo, são gerados cerca de 200 a 300 Kg/t de gusa. (IAB, 2018; AMT 2015c).

Segundo Silva (2019) e AMT (2015c), a composição química das Escórias de Alto Forno produzidas varia dentro de limites relativamente estreitos. Os elementos que participam são os óxidos de: cálcio (CaO), silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃) e magnésio (MgO). Temos ainda, em quantidades menores, FeO, MnO, TiO₂, S, etc. É importante ressaltar que essa composição vai depender das matérias primas e do tipo de gusa fabricado. A composição química é de extrema importância e vai determinar as características físico-químicas das escórias de alto forno.

Wang (2016), apresenta a gama completa da composição química da escória granulada de alto forno com base em análises de mais de 100 fontes de diferentes países, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Gama completa da composição química da escória granulada de alto forno

Elemento	Escória de Alto Forno
Óxido de Cálcio (CaO)	31-50
Dióxido de Silício (SiO ₂)	27-45
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	7-24
Óxido de Magnésio (MgO)	1-18
Ferro ou Óxido de ferro (FeO - Fe ₂ O ₃)	0,3-2
Óxido de manganês (MnO)	0,1-2,3
Enxofre (S)	0,6-3
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	< 0,1

Fonte: Wang (2016)

De acordo com Wang (2016), a composição química geral pode variar em uma ampla faixa de diferentes operações, dependendo da natureza do minério, da composição química dos fundentes, do consumo de coque e do tipo de ferro usado. Essas variações afetam o conteúdo relativo dos quatro principais constituintes (cal, sílica, alumina e magnésia) e as quantidades dos constituintes minoritários (enxofre na forma de sulfeto e óxidos de ferro e manganês).

Na Tabela 10. é apresentada a composição química da escória granulada de alto forno de uma siderúrgica do estado do Espírito Santo (AMT) que condiz com a apresentada anteriormente.

Tabela 10 - Composição química da escória granulada de alto forno

Elemento	Escória de Alto Forno
Óxido de Cálcio (CaO)	41,6%
Dióxido de Silício (SiO ₂)	33,65%
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	12,42%
Óxido de Magnésio (MgO)	7,95%
Ferro ou Óxido de ferro (FeO - Fe ₂ O ₃)	0,45%
Óxido de titânio (TiO ₂)	0,73%

Fonte: Arcelor Mittal (2020)

Nesta dissertação, a escória de alto forno a ser estudada é a granulada, obtida por meio de resfriamento brusco em tanques granuladores conforme explicado anteriormente.

Segundo a norma DNER 260-94, a escória granulada de alto forno, tem diâmetro máximo de 5 mm, com 95%, em peso passando na peneira de abertura nominal de 4,8mm. A norma especifica que devido sua granulometria, são comparáveis aos agregados miúdos, areia por exemplo, com propriedades hidráulicas (de cimentação), devendo ser testadas em conformidade com as normas vigentes de agregado miúdo.

As principais características da escória granulada de alto forno são o grau de vitrificação (teor de vidro), composição química, composição mineralógica e finura. Estas características influenciam a sua reatividade e, de um modo geral, é tanto maior quanto maior for o seu teor de vidro, embora existam escórias, com fases cristalinas, reativas (AGUILAR et al., 2010).

Para utilização da escória granulada de alto forno como agregado miúdo pode ser necessário um novo processamento para melhor adequá-la a esta aplicação, uma vez que, em relação à areia natural, a escória granulada de alto-forno possui um teor insuficiente de finos. Essa característica coloca o seu uso em desvantagem, com relação à areia natural, assim como as formas angulosas dos grãos, a densidade e granulometria variáveis. Sendo esses fatores desfavoráveis à trabalhabilidade e à homogeneidade do concreto (MARRIAGA et al., 2011).

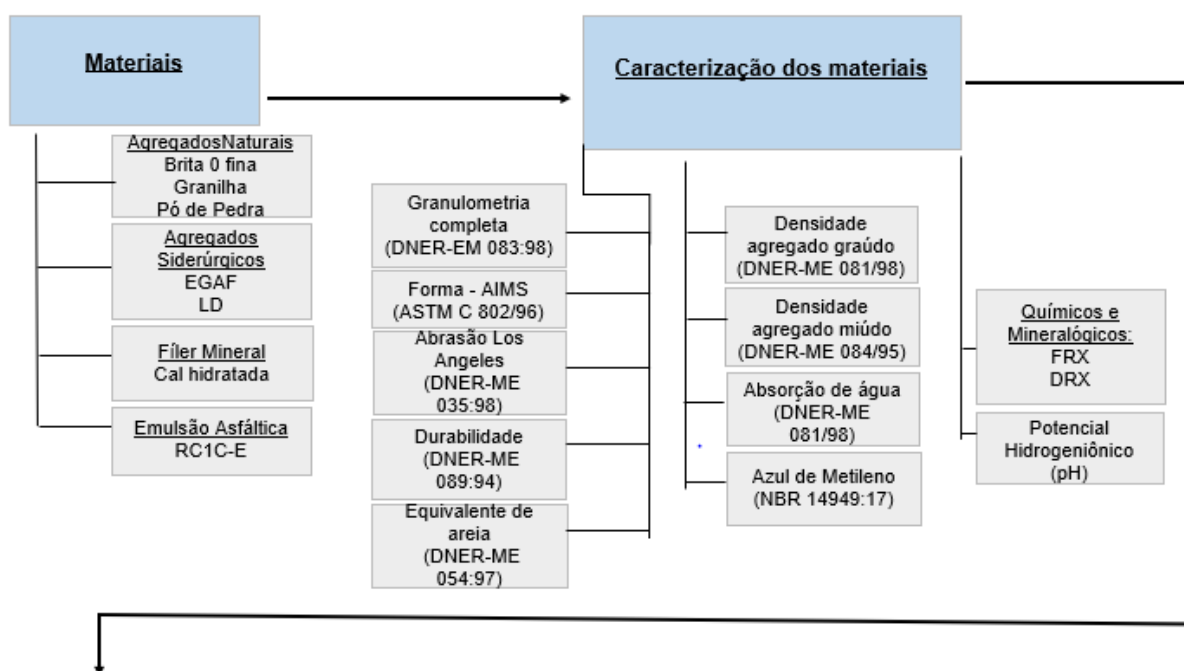
Assim, uma opção para melhorar a granulometria da escória granulada de alto forno para utilização como agregado miúdo é corrigir o teor de finos, a correção da curva granulométrica pode ser feita por meio da mistura da escória com areia fina ou pó de brita por exemplo.

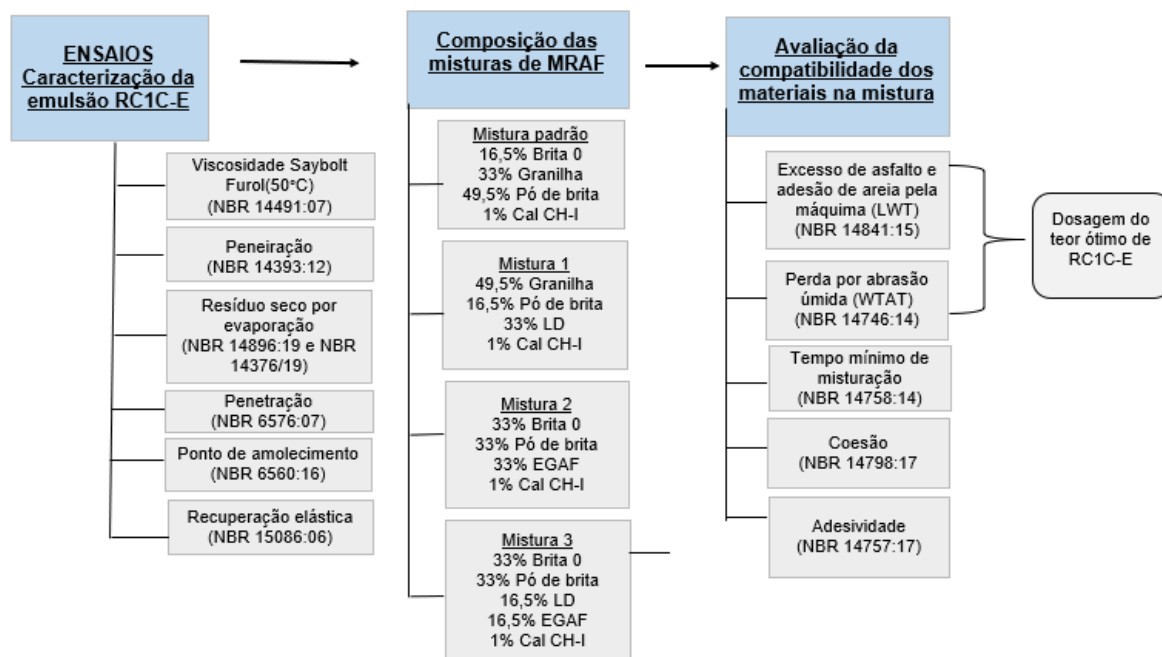
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa e será abordado as técnicas e processos utilizados para caracterização dos materiais e avaliação das misturas. O programa experimental visa analisar o comportamento de misturas de MRAF com a substituição parcial de agregados naturais por agregados siderúrgicos.

A Figura 18 ilustra um fluxograma com as etapas do programa experimental, onde são apresentados os materiais, ensaios realizados para caracterização dos materiais, composição das misturas asfálticas, procedimento para dosagem das misturas e metodologia empregada para avaliar o desempenho das misturas em laboratório.

Figura 18 - Programa experimental da pesquisa





Fonte: Autora

3.1 MATERIAIS

Para realização do programa experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Agregados naturais: Brita 0, granilha lavada e pó de brita
- Cal hidratada CH-I
- Emulsão asfáltica RC1C-E
- Agregados siderúrgicos: Escória granulada de alto forno e escória de aciaria LD.

3.1.1 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados para composição das misturas são de origem granítica e foram provenientes da pedreira Brasitália, localizada no município de Cariacica no estado do Espírito Santo. Esses agregados são comumente utilizados na construção civil, para fabricação de concretos usinados, blocos de concreto e nas usinas de asfalto para fabricação de massa asfáltica. Os agregados naturais utilizados têm as seguintes dimensões: brita 0 com diâmetro de 0 a 9,5mm, a granilha e o pó de brita com diâmetro de 0 a 4,75mm, a Figura 19 ilustra estes materiais.

Figura 19 - Agregados naturais a) Brita 0 b) Granilha c) Pó de brita



Fonte: Autora

3.1.2 Fíler mineral

Optou-se por utilizar a cal hidratada CH-I como fíler mineral, por ser um material usualmente utilizado em misturas de microrrevestimentos, a cal hidratada foi fornecida por uma obra de construção civil.

3.1.3 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada na mistura do MRAF deve ser catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura controlada (RC1C-E). Esse tipo de ligante é empregado em obras que utilizam o MRAF como revestimento, não sendo permitido o uso de outro tipo de ligante, conforme exigido em normas vigentes.

A emulsão utilizada no programa experimental, foi fornecida pelo grupo Disbral, empresa localizada no município Aparecida de Goiânia no estado de Goiás. A Figura 20 ilustra os tanques de armazenamento de emulsões na empresa. A empresa enviou o certificado de qualidade da emulsão contento todos os resultados de ensaios exigidos pela norma DNIT 128/2010, onde foi possível conferir que os requisitos

estabelecidos pela norma foram atendidos. Além disso foi possível repetir em laboratório alguns desses ensaios utilizando equipamentos disponíveis, para conferência dos resultados enviados pela empresa, tais como: Viscosidade Saybolt-furol, peneiração, resíduo seco por evaporação, penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica.

Figura 20 - Tanques de armazenamento de emulsões asfálticas na Disbral



Fonte: Autora

3.1.4 Agregados siderúrgicos

Os agregados siderúrgicos (AS) que foram utilizados nesta pesquisa para compor as misturas de MRAF, foram disponibilizados pela empresa Arcelor Mittal Tubarão localizada no município de Serra no estado do Espírito Santo. Sendo eles respectivamente, escória granulada de alto forno (EGAF) e escória de aciaria LD. As escórias foram coletadas pela empresa Kaeme consultoria, no pátio de escória da empresa, em sacos de 50kg. A coleta foi realizada de acordo com NBR 10007 (amostragem de resíduos sólidos).

Nas misturas de MRAF foram utilizadas porcentagens de 33% e 16,5% desses agregados siderúrgicos em misturas substituindo parcialmente os AN. Os agregados siderúrgicos foram caracterizados visando atender as exigências para serem aplicados em misturas de MRAF.

A escória de aciaria LD foi fornecida com a graduação de 0 a 19mm, dessa forma, foi necessário realizar o peneiramento do material para enquadramento na faixa de trabalho, o material retido na peneira com diâmetro de 9,5mm foi descartado

A EGAF foi fornecida com diâmetro de 0 a 4,8mm, dessa forma ela foi utilizada nas misturas integralmente com substituição parcial dos AN. A Figura 21 ilustra os agregados siderúrgicos utilizados na pesquisa.

Figura 21 - Agregados siderúrgicos a) EGAF b) LD



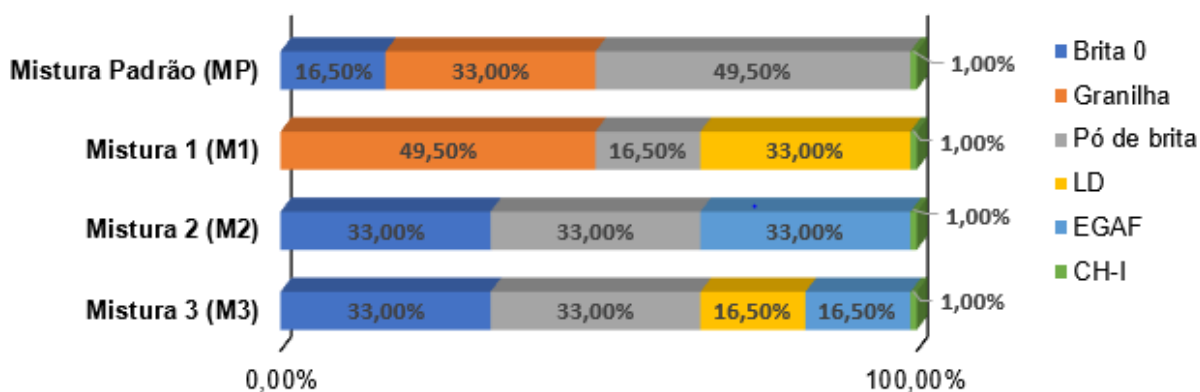
Fonte: Autora

3.1.5 Composição das misturas de MRAF

Após análise da composição granulométrica de cada material individualmente, foi possível definir a composição de cada mistura a fim de atender a faixa II da norma de microrrevestimento asfáltico do DNIT 035:2018.

A Figura 22 ilustra a composição das misturas estudadas nesta pesquisa.

Figura 22 - Composição das misturas de MRAF



Fonte: Autora

O critério adotado para essas misturas foi maximizar percentual de agregado siderúrgico utilizado, respeitando a faixa granulométrica almejada, o percentual utilizado dos dois agregados siderúrgicos foi o mesmo, a fim de melhor comparação. Na mistura 1 (M1) foi maximizado o percentual em massa de LD, na mistura 2 (M2) de EGAF e na mistura 3 (M3) usou-se os dois agregados em porcentagens iguais em massa, a fim de verificar a possibilidade de interação desses agregados na mesma mistura. Por fim a mistura padrão (MP) (apenas com agregados naturais) se trata de uma referência para comparação com as demais, quando é substituído parcialmente os agregados naturais por siderúrgicos.

3.2 MÉTODOS

O programa experimental foi dividido em três etapas: a primeira etapa refere-se à caracterização completa dos agregados naturais e siderúrgicos e da emulsão asfáltica. Além disso é apresentada a composição das misturas estudadas, definidas por meio de análise da composição granulométrica de cada agregado, a fim de atender a faixa granulométrica exigida para as misturas de microrrevestimentos. Na segunda etapa é realizada a dosagem da emulsão asfáltica nas misturas por meio dos ensaios LWT e WTAT, a fim de definir o teor ótimo de emulsão para cada mistura estudada. Posteriormente, na terceira etapa, são realizados os ensaios exigidos para avaliar a compatibilidade e desempenho das misturas em laboratório.

3.2.1 Caracterização dos agregados

A norma DNIT 035/2018 (Microrrevestimento asfáltico – especificações de serviço) especifica os aspectos físicos que os agregados utilizados nas misturas devem apresentar, além disso, é importante observar as especificações da norma DNER 262/94 (Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários).

a) *Granulometria dos agregados*

Para a análise granulométrica dos agregados naturais e siderúrgicos, foram seguidas as orientações da norma DNER 083/98 (análise granulométrica), na qual prescreve os procedimentos para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos por peneiramento. De acordo com a norma DNIT 412/19 (Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos), os agregados são classificados em: Agregados graúdos (maiores que 4,75mm), Agregados miúdos (passam na peneira de 4,75mm e ficam retido na peneira de 0,15mm), Material de enchimento (passam

100% na peneira de 0,15mm e passam mais que 65% na peneira de 0,075mm) e Material pulverulento ou fíler (menores que 0,075mm).

b) *Forma*

Para análise da forma e das propriedades de superfície dos agregados naturais e siderúrgicos, foi utilizado o método de análise *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*. Este método foi desenvolvido para analisar as propriedades de forma, angularidade e textura por meio do Processamento Digital de Imagem (PDI) (IBIAPINA, 2018 e BESSA, 2012).

A análise de forma relaciona as três dimensões dos agregados, podendo ser classificado planos, alongados, lamelar ou esférico, o termo esférico assemelhasse ao termo cúbico, isso significa que as três dimensões dos agregados são iguais ou próximas entre si. A angularidade tem por objetivo descrever os ângulos existentes ao longo da superfície das partículas, ou seja, avalia as arestas que os agregados possuem. Por fim a textura, avalia as irregularidades superficiais dos agregados (DIÓGENES, 2018). A Figura 23 ilustra essas três propriedades.

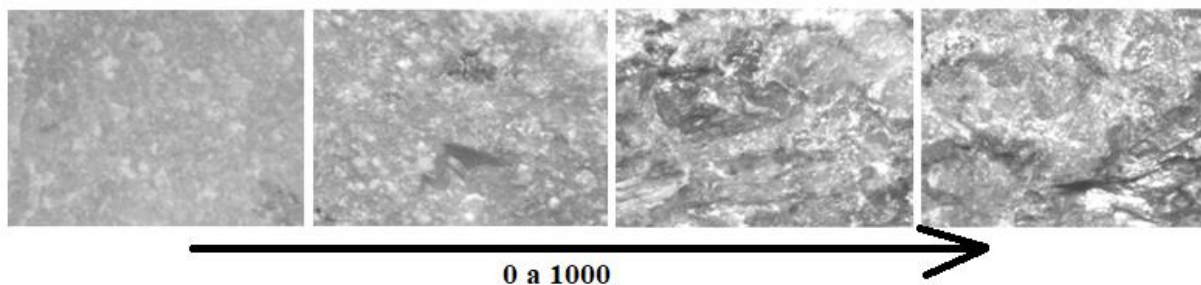
Figura 23 - Forma, angularidade e textura superficial dos agregados



Fonte: Diógenes (2018)

Segundo Ibiapina (2018), para partículas maiores ou iguais a 4,75mm (agregados graúdos), o fator de forma é avaliado por meio da esfericidade, no qual apresenta uma relação entre as três dimensões do agregado. O valor dessa propriedade varia de 0 a 1, quanto mais cúbico for o grão, maior o fator. A análise da textura superficial, também aplicável a agregados graúdos, é quantificada por meio de variações no nível de cinza dos pixels das imagens capturadas durante o ensaio, seu valor varia de 0 a 1000, quanto maior este fator, mais rugosa a partícula. A Figura 24 ilustra esta variação.

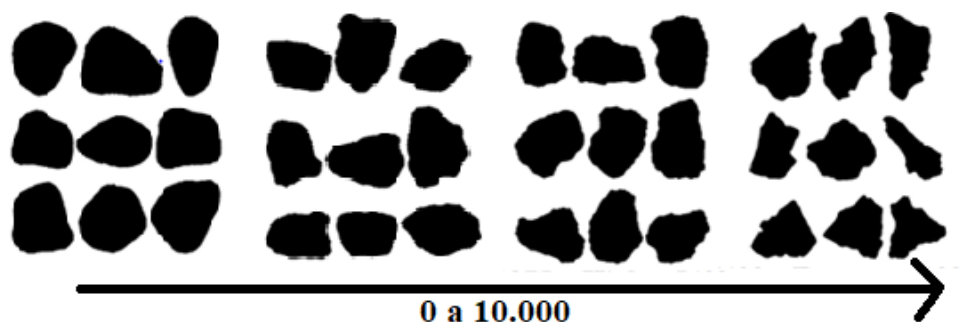
Figura 24 - Variação da textura dos agregados de agregados graúdos



Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

A angularidade é analisada nos agregados graúdos e miúdos (menores que 4,75mm), nesta análise é observada as alterações de direção existente ao longo do contorno da partícula, pode variar de 0 a 10.000, assim quanto mais arredondada é uma partícula, menor será o valor da angularidade, conforme Figura 25.

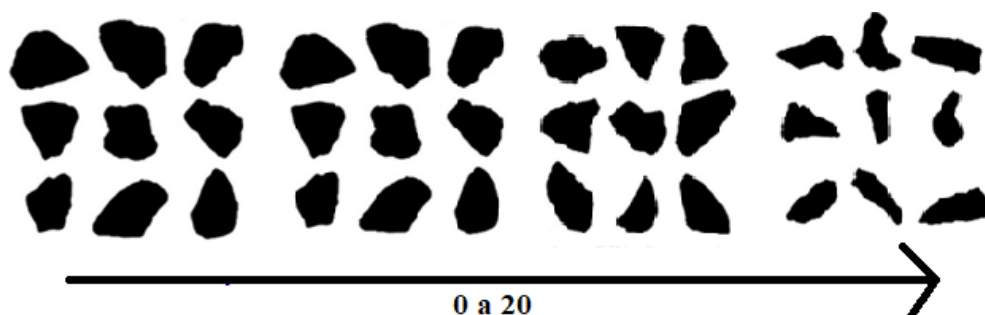
Figura 25 - Variação da angularidade dos agregados



Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

Para análise de forma dos agregados miúdos, são utilizados parâmetros de forma 2D, no qual indica o quanto alongada é a partícula, esse parâmetro varia de 0 a 20, neste caso, quanto maior o fator, mais alongada é a partícula (Figura 26).

Figura 26 - Variação de forma de agregados miúdos



Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

Para a classificação dos resultados obtidos no AIMS, foi utilizada a metodologia de Al Rousan (2004) e a proposta de Ibiapina (2018), conforme a Tabela 13 e Tabela 14. Rousan (2004) utilizou um banco de dados composto por treze agregados graúdos e cinco miúdos oriundos de vários estados americanos e realizou análises estatísticas para propor valores limites para classificação das propriedades de forma dos agregados. Por sua vez, Ibiapina (2018) utilizou um banco de dados composto por agregados de mineralogias distintas, de diferentes estados brasileiros, também utilizando de métodos estatísticos para propor a classificação dos agregados.

Tabela 11 - Classificação proposta por Al Rousan (2004)

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

Fonte: Al Rousan (2004)

Tabela 12 - Classificação proposta por Ibiapina (2018)

Propriedade	Valores Limites				
Forma 2D	< 4,0 Circular	4, 0 - 11,0 Semicircular	11,0 - 15,5 Semialongado	> 15,5 Alongado	-
Angularidade	< 1260 Arredondado	1260 - 4080 Subarredondado	4080 - 7180 Subangular>	> 7180 Angular	-
Esfericidade	< 0,5 Achatado/ Alongado	0,5 - 0,7 Baixa esfericidade	0,7 - 0,9 Esfericidade moderada	> 0,9 Alta esfericidade	-
Textura Superficial	< 260 Polido	260 - 440 Macio	440 - 600 Baixa rugosidade	600 - 825 Rugosidade moderada	> 825 Alta rugosidade

Fonte: Ibiapina (2018)

c) *Desgaste por Abrasão Los Angeles*

O ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles, tem por objetivo avaliar o desgaste sofrido pelos agregados graúdos quando inseridos em equipamentos padronizados contendo certa quantidade de carga abrasiva e submetidos a um determinado número de revoluções com velocidade determinada em norma. A norma utilizada nesta pesquisa foi a DNER-ME 035/98 (determinação da abrasão “Los Angeles”), o tamanho da amostra, a carga abrasiva e o número de revoluções dependem da granulometria do agregado a ser ensaiado. No caso desta pesquisa, a graduação ensaiada do material foi a “D” (4,8mm – 2,4mm), onde uma amostra de 5kg (m) de material foi submetida a 500 rotações com velocidade de 30 rpm juntamente com uma carga abrasiva proveniente de 6 esferas de aço com massa total de 2,5kg. O valor da perda por abrasão (A) é expresso pela porcentagem em peso, do material que passa (m’), após o ensaio, pela peneira de malha de 1,7mm, conforme equação 1 abaixo:

$$A = (m - m')/m \times 100\% \quad (1)$$

d) *Durabilidade*

A durabilidade dos agregados dos agregados foi analisada por meio da norma DNER-ME 089/94 (Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio). Este parâmetro é importante para determinar a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfatos.

Uma determinada quantidade de massa de agregados é imersa em solução de sulfato de sódio por um período de 16 a 18 horas a temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Após esse período, a amostra é drenada e colocada em estufa a 110°C para secar até constância de massa, após peso constante, a amostra é resfriada e o processo repetido conforme o número de ciclos que se deseja. Após isso, o material é peneirado conforme norma e é avaliada a porcentagem de massa perdida, a durabilidade é obtida por uma média ponderada. Nesta pesquisa foram realizados cinco ciclos, a fim de atender a norma DNER-EM 262/94 (Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários). No agregado natural também foi realizado cinco ciclos.

e) *Equivalente de areia*

Este ensaio foi realizado pela norma DNER-ME 054/97 (Equivalente de areia), no qual tem por objetivo determinar a relação volumétrica que corresponde à razão entre a

altura do nível da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de massa de agregado miúdo (passantes da peneira de 4,8mm). O resultado para obtenção do equivalente de areia é obtido de uma média aritmética de três determinações, e é expresso em porcentagem, conforme equação 2 abaixo. A Figura 27 ilustra o ensaio em andamento.

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (2)$$

Figura 27 - Ensaio Equivalente de areia



Fonte: Autora

f) Densidade real, densidade aparente e absorção de água dos grãos

Para determinação da densidade real dos agregados miúdos (diâmetro de 4,75 mm a 0,075mm), foi adotado o procedimento da norma DNER-ME 084/95 (Agregado miúdo – determinação da densidade real).

Na determinação da densidade aparente e absorção de água dos agregados graúdos (diâmetro de 9,5mm a 4,75mm), foi consultada a norma DNER-ME 081/98 (Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo).

Os resultados apresentados para estes experimentos equivalem a média de três determinações.

g) Azul de Metileno

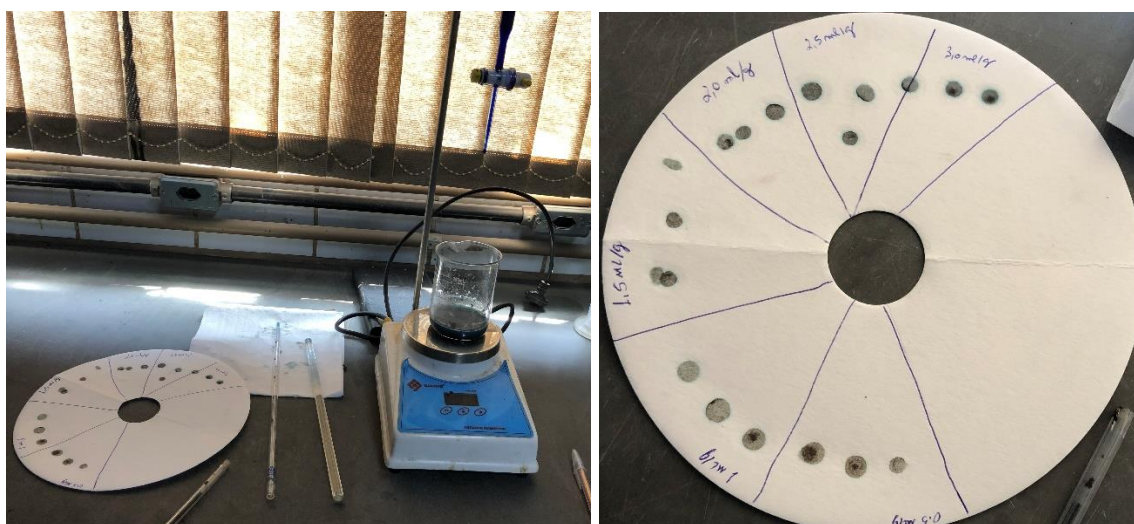
O ensaio azul de metileno, foi realizado de acordo com a norma NBR 14949:2017 (Microrrevestimentos asfálticos – caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno), na qual estabelece o procedimento para determinar o teor de

argilo-minerais dos agregados (fração passante na peneira de 0,075mm), indicando a reatividade superficial destes.

Após a preparação da amostra (cerca de 1g) e com o auxílio do agitador magnético, a solução preparada com o azul de metileno é inserida em uma bureta e liberada a cada 0,5ml na amostra em agitação. Com o auxílio de um bastão, é retirada uma gota em suspensão que é disposta em um papel filtro, este processo é repetido até que em torno da borda desta gota apareça um halo azulado.

Nesta pesquisa foi realizado este experimento para todos os agregados naturais e siderúrgicos. A Figura 28 ilustra o ensaio em execução.

Figura 28 - Ensaio de azul de metileno



Fonte: Autora

h) Potencial Hidrogeniônico

O resultado de pH apresentado nesta pesquisa foi realizado pelo laboratório de análise agronômica e ambiental.

i) Expansão de escória de aciaria

A escória de aciaria utilizada nesta pesquisa, LD, possui uma expansão média de 2,31%, conforme apresentado por Izoton (2020), no qual utilizou o mesmo material em sua pesquisa. O autor realizou o ensaio de expansibilidade de acordo com as especificações da norma DNIT 113/2009 (Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio). A expansão da LD está de acordo com a norma DNER 262/94 (escória de

aciaria para pavimentos rodoviários), na qual especifica que a expansão máxima deve ser 3%.

j) Difração de Raios X (DRX)

A análise de difração de raios-x foi realizada nos agregados siderúrgicos (LD e EGAF), com isso foi possível conhecer as características mineralógicas desses materiais.

Este ensaio foi realizado pela empresa Nanobusiness Informação e Inovação Ltda em um difratômetro de raio-X (X'Pert Pro MPD PANalytical) com faixa de varredura de 10 a 90° e fenda de 0,5°.

As amostras de agregados foram enviadas após preparação, que consistiu em: secar em estufa, moer no almofariz e peneirar na peneira com malha de 0,075mm.

k) Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-x, foi realizado para os agregados naturais, siderúrgicos e a cal hidratada, esta análise possibilita conhecer as composições químicas desses materiais, por meio de uma determinação qualitativa dos elementos atômicos, na qual é apresentada os resultados em função dos óxidos dos elementos presentes na estrutura do material.

Este experimento foi realizado pela empresa FRX Service em um equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raio X WDS, da Philips, modelo PW-2404, tubo anodo de Rh.

As amostras, assim como no DRX, foram secas, moídas e peneiradas na peneira com abertura de 0,075mm.

3.2.2 Caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E

Os ensaios realizados com a emulsão apresentados a seguir, foram realizados no laboratório de geotecnia e pavimentação da UFES, que adquiriu os aparelhos necessários para realização destes experimentos, no qual foi possível confirmar os resultados enviados pela empresa que forneceu a emulsão asfáltica.

a) Viscosidade Saybolt Furol a 50°C

Para determinação deste parâmetro, foi seguida a NBR 14491:2007 (Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade Saybolt Furol), que tem como objetivo determinar a consistência máxima da emulsão para uma boa mistura homogênea e

distribuição uniforme no campo do MRAF. Este ensaio foi realizado por meio de um aparelho chamado viscosímetro Saybolt Furol, o resultado é reportado de forma empírica, no qual fornece o valor da viscosidade em segundos saybolt furol. A Figura 29 ilustra o viscosímetro e ensaio em execução.

Figura 29 - Ensaio de Viscosidade Saybolt Furol



Fonte: Autora

b) Peneiração

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 14393:2012 (Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração), que tem por objetivo determinar a qualidade da emulsão, devido a verificação da quantidade de resíduo asfáltico (pelotas de CAP) que permanece retido na peneira nº 20 (abertura de 0,841mm).

c) Resíduo seco por evaporação

Nesta pesquisa, este ensaio foi realizado de duas maneiras, a primeira conforme a NBR 14376:2019 (Ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expedito) e a segunda conforme a NBR 14896:2019 (Ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas em estufa).

Este ensaio tem o objetivo de determinar a quantidade de resíduo seco (CAP) presentes na emulsão asfáltica. A Figura 30 ilustra o ensaio em execução pelo método expedito.

Figura 30 - Ensaio pelo método expedito - Resíduo seco por evaporação



Fonte: Autora

d) Penetração

Para determinação da consistência a 25°C no estado semisólido do resíduo asfáltico da emulsão, foi realizado o ensaio conforme a NBR 6576:2007 (Materiais asfálticos – Determinação da penetração). Este ensaio fornece uma medida indireta da consistência do resíduo da emulsão, ele indica a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha penetra a amostra de resíduo por 5 segundos, o aparelho utilizado neste ensaio é ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Aparelho para determinação da penetração do resíduo da emulsão



Fonte: Autora

e) Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento determina a temperatura de fluidez do resíduo asfáltico da emulsão, é uma medida empírica que correlaciona a temperatura que o resíduo amolece quando aquecido. Este ensaio foi realizado conforme a NBR 6560:2016 (Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola). O resultado é expresso por meio de médias de temperaturas lidas em graus Celsius, quando cada uma das esferas de aço toca a placa de referência, após terem atravessado os anéis. A Figura 32 ilustra o ensaio em execução.

Figura 32 - Ensaio de ponto de amolecimento



Fonte: Autora

f) Recuperação elástica

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 15086:2006 (Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro). Neste ensaio é determinado a recuperação elástica mínima para o resíduo da emulsão asfáltica. O teste é realizado no aparelho ductilômetro (Figura 33), é realizado em temperatura controlada a 25°C e velocidade de 5cm/min. Após 20cm de estiramento do corpo de prova, o ensaio é interrompido, onde é seccionado o fio de ligante (em seu ponto médio), observando após 60 minutos quanto houve de retorno das partes seccionadas. A Figura 33 ilustra o ensaio em execução.

Figura 33 - Ensaio de recuperação elástica no ductilômetro



Fonte: Autora

3.2.3 Dosagem e avaliação das misturas de MRAF

Após definição das misturas, foi realizado o ensaio de tempo mínimo de mistura a fim de verificar o tempo mínimo para a mistura dos materiais antes do início da ruptura da emulsão e com isso verificar a necessidade de utilização de aditivo regulador de ruptura. Este ensaio também auxilia para uma avaliação inicial da compatibilidade dos agregados com a emulsão.

Em seguida, para determinação do teor ótimo da emulsão asfáltica foi realizado os ensaios LWT (Loaded Whell Test) e WTAT (Wet Track Abrasion Test).

Após definição do teor ótimo de emulsão para as quatro misturas, foram realizados os ensaios exigidos para avaliação destas misturas, tais como: Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro MCT, determinação da adesividade das misturas e determinação de perda por abrasão úmida (WTAT), após seis dias de imersão em água. Os ensaios de determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (LWT) e perda por abrasão úmida (WTAT) após uma hora de imersão em água são avaliados durante os ensaios para dosagem.

a) Dosagem das misturas de MRAF

Para determinação do teor ótimo de emulsão asfáltica a ser aplicado nas misturas de MRAF, é preciso realizar os ensaios LWT e WTAT, conforme mencionado anteriormente. Para isso é necessário moldar corpos de prova com teores distintos de emulsão, e esses são submetidos aos dois ensaios.

Castro (2014), utilizou os seguintes percentuais: 10,5%, 11%, 11,5% e 12% na sua dosagem. Ceratti e Reis (2011) recomendam no mínimo três teores, e orientam que o conteúdo total de líquidos (teor de emulsão e água) deve permanecer constante, isso ajuda a não alterar a consistência das amostras e não influenciar nos resultados. Apaza et al (2016) realizou a dosagem com os percentuais de 10%, 12%, 14% e 16%. Reis (2005), moldou os corpos de provas com as porcentagens de 8%, 10%, 12%, 13%, 14% e 15%.

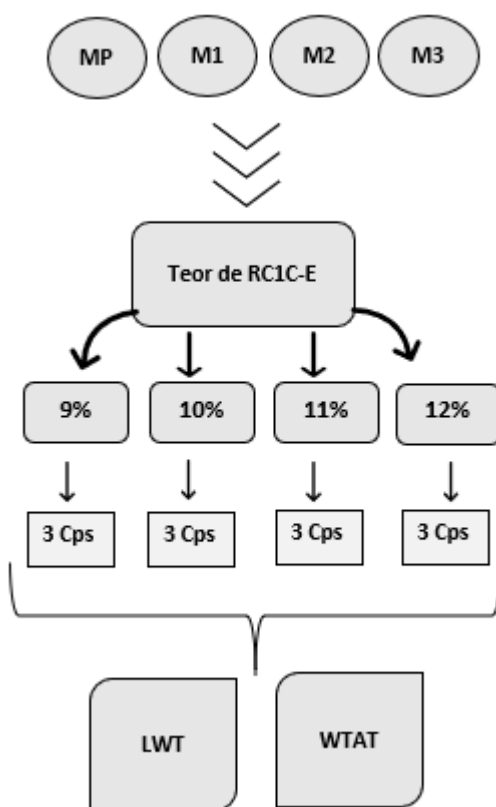
No quadro 1 da norma de microrrevestimento (DNIT 035:2018), especifica para a faixa II (faixa das misturas deste trabalho) que o teor mínimo para o asfalto residual deve ser entre 6,5% a 12% em peso do agregado. Para a emulsão RC1C-E, segundo a norma (DNIT 128:2010), o teor mínimo do resíduo seco (CAP) na emulsão deve ser

62% em massa, supondo esse teor mínimo de CAP, o teor mínimo de emulsão orientado pela norma é 10,48%.

Nesta pesquisa, os corpos de provas foram moldados com as porcentagens de 9%, 10%, 11% e 12%.

Para cada mistura foram moldados três corpos de provas (CPs), para cada teor de emulsão e para cada ensaio (LWT e WTAT), totalizando 48 CPs para o ensaio LWT e 48 CPs para o ensaio WTAT. A Figura 34 ilustra a representação esquemática dessa moldagem.

Figura 34 - Moldagem teor ótimo de RC1C-E

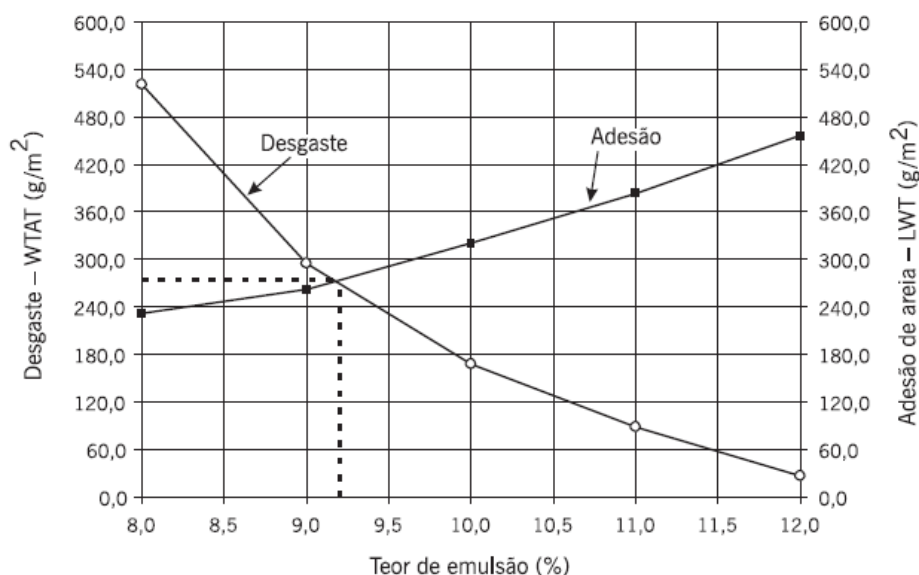


Fonte: Autora

Após submeter os corpos de provas aos ensaios LWT e WTAT, os resultados obtidos são representados por meio de um gráfico, onde na interseção das curvas dos dois ensaios (Figura 35) pode se determinar o teor de projeto a ser adotado. Essa interseção significa que aquele teor de emulsão será suficiente para não desgastar a mistura acima do valor limite e para não ocorrer exsudação acima do permitido na camada de revestimento. Pode acontecer da interseção das duas curvas, apontar um teor ótimo de emulsão abaixo do mínimo especificado na norma de MRAF (DNIT

035:2018), algumas obras de concessionárias privadas utilizam teor abaixo da norma, uma vez que estão assegurados com os resultados positivos exigidos por norma vigente.

Figura 35 - Determinação do teor de emulsão das misturas de MRAF



Fonte: Bernucci et al. (2010)

Neste trabalho apenas uma mistura teve o teor ótimo (interseção das curvas) abaixo do mínimo da norma, porém o teor escolhido foi o mínimo da norma para seguir com os outros ensaios. No entanto, foram realizados os ensaios com o teor de emulsão abaixo da norma para comparação dos resultados.

b) Tempo mínimo de misturação

Este ensaio foi realizado conforme a norma NBR 14758:2014 (Microrrevestimentos asfálticos – Determinação do tempo de misturação), e tem por objetivo determinar o tempo mínimo para a mistura dos materiais antes do início da ruptura da emulsão asfáltica.

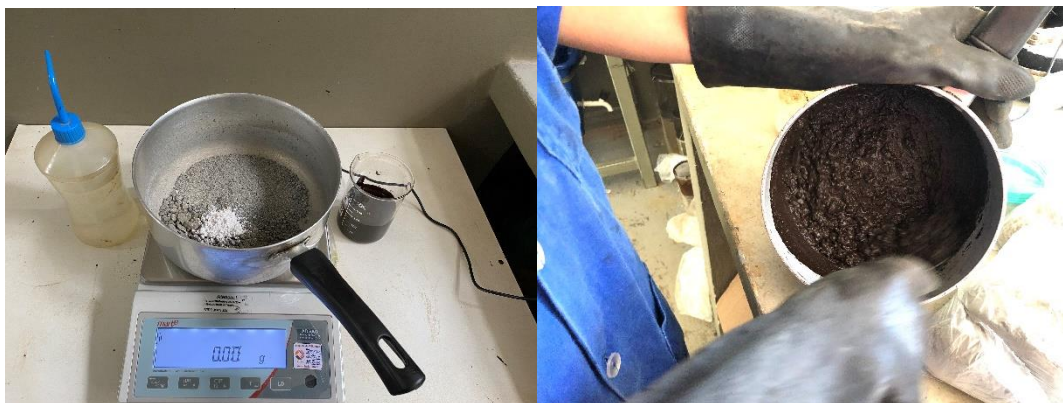
O ensaio é realizado de forma simples, é executada a mistura dos materiais (agregados, fíler e emulsão), essa mistura deve permanecer de forma semifluida, com consistência homogênea, com agregados totalmente recobertos pela emulsão, sem escorrimento de líquidos, por no mínimo 120 segundos.

Ceratti e Reis (2011), orienta que este tempo seja estendido de 180 a 300 segundos, pois como o ensaio é realizado em laboratório com temperatura controlada

(aproximadamente 25°C), e no campo pode ocorrer variações de temperatura. Os autores salientam que esse tempo é essencial para uma distribuição uniforme do MRAF.

A Figura 36 ilustra o ensaio em execução.

Figura 36 – Determinação do tempo de misturação



Fonte: Autora

c) Excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina (LWT)

Para determinação da resistência à exsudação de asfalto (adesão da areia na superfície do corpo de prova de MRAF), foi realizado o ensaio na máquina LWT (Figura 37), conforme NBR 14841:2015 (Misturas asfálticas – Determinação da adesão de areia em microrrevestimento asfálticos a frio por meio da máquina LWT), que submete um corpo de prova de MRAF à ação compactadora do movimento de uma roda de borracha, simulando o tráfego. Além disso, este ensaio determina o teor máximo de ligante residual a ser utilizado no MRAF.

Figura 37 - Máquina LWT

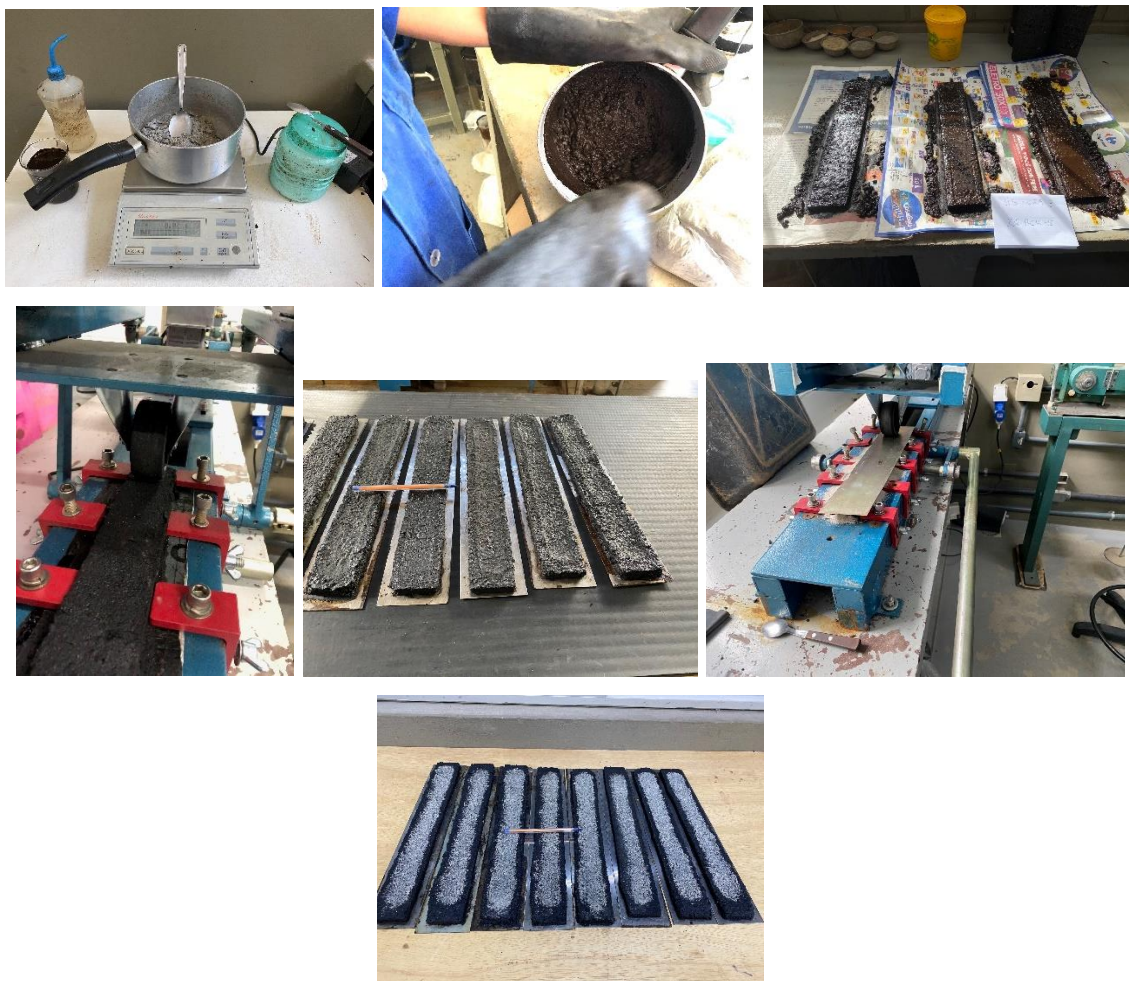


Fonte: Autora

Para preparação do corpo de prova, os materiais devem ser misturados e após isso essa mistura é disposta no molde com dimensões de 50mm de largura, 381mm de comprimento e 9,5mm de altura. Para moldar as misturas estudadas nesta pesquisa utilizou-se aproximadamente 600 gramas de agregados.

Após a cura da mistura (aproximadamente 24h na estufa à 60°C), esse corpo de prova é submetido a compactação com 1000 (mil) ciclos sob carga de 56kg. Após isso, o corpo de prova é seco em estufa a temperatura de 60°C e em seguida aproximadamente 200g de areia normatizada à temperatura de 80°C, é espalhado sobre o corpo de prova e este é submetido a mais 100 (cem) ciclos de compactação. Por fim a amostra é pesada a fim de aferir o aumento de massa devido a adesão da areia na amostra. A taxa máxima estabelecida pela norma de microrrevestimento (DNIT 035:2018) é de 538g/m². A Figura 38 ilustra o ensaio em execução.

Figura 38 – Execução do ensaio para determinação da adesão de areia pela máquina LWT



Fonte: Autora

d) Perda por abrasão úmida (WTAT)

Este ensaio foi realizado conforme a norma ABNT 14746:2014 (Microrrevestimento a frio e lama asfáltica – Determinação de perda por abrasão úmida WTAT). Este experimento tem o objetivo de determinar a resistência à abrasão de misturas de microrrevestimentos sob ação simulada da água e do tráfego, onde é realizado uma simulação dos efeitos de um veículo esterçando e freando sobre uma superfície úmida, além de definir o teor mínimo de ligante residual a ser utilizado nas misturas.

A preparação do corpo de prova é similar à do ensaio LWT, após misturação dos materiais, a mistura é disposta em um molde com dimensões de 280mm de diâmetro e 9,5mm de altura. Para moldar as misturas estudadas nesta pesquisa utilizou-se aproximadamente 1400 gramas de agregados.

Após a cura do corpo de prova, ele deve ser imerso em água a 25°C por um período de 60 a 75 minutos, a seguir a amostra é colocada na máquina, coberta com água a temperatura de 25°C e inicia-se o ensaio a uma velocidade de 110 rpm. A borracha do equipamento, com características normativas, executa movimentos rotativos em contato com a amostra durante um certo período. Nesta pesquisa a máquina utilizada foi a misturadora N-50 (Figura 39), o tempo de operação para este equipamento é de 315 segundos (5 minutos e 15 segundos).

Figura 39 - Equipamento de desgaste WTAT



Fonte: Autora

Posteriormente a amostra desgastada é lavada e seca em estufa a 60°C, o resultado da perda de peso é expresso em total de gramas perdidas por unidade de área desgastada (g/m²). Segundo especificações vigentes, a perda máxima de peso por abrasão admitida é de 538g/m² para amostras imersas em água durante uma hora e de 807g/m² para amostras imersas em água durante seis horas. A Figura 40 ilustra o ensaio em execução.

Figura 40 - Ensaio de resistência a abrasão úmida - WTAT



Fonte: Autora

e) Adesividade das misturas

O ensaio de adesividade foi realizado de acordo com a norma NBR 14757:2017 (Microrrevestimentos e lama asfálticas - Determinação da adesividade de misturas), que tem por objetivo determinar de forma qualitativa a adesividade (resistência à água) após a cura. O ensaio consiste em submeter uma amostra da mistura curada em água destilada em ebulição por três minutos. Após a secagem da amostra, é realizado uma análise visual da superfície do agregado, estimando a porcentagem de sua área recoberta pela película de asfalto. Para um resultado igual ou maior que 90%, é considerado uma adesividade satisfatória, se a porcentagem for entre 75% a 90% considera-se uma adesividade razoável e para resultados abaixo de 75% a adesividade é considerada não satisfatória.

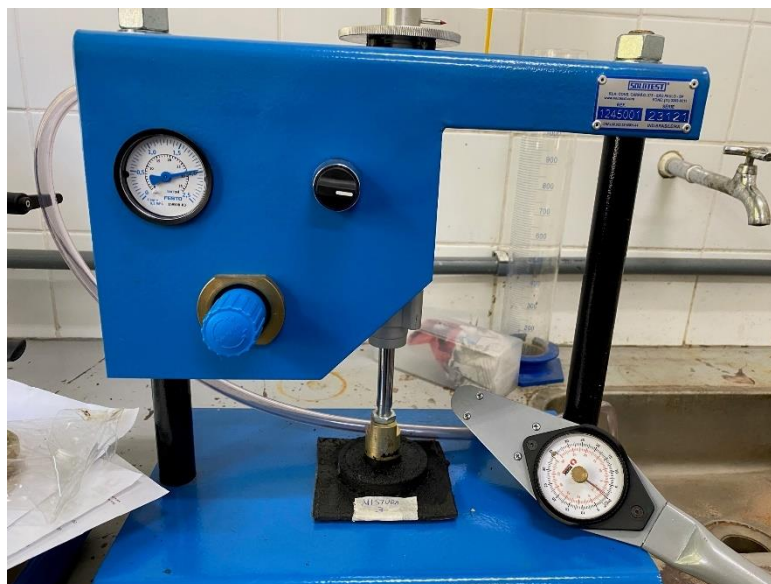
f) Coesão e características de cura pelo coesímetro

O ensaio de coesão, realizado conforme a NBR 14798 (Microrrevestimentos asfálticos- Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro) tem por objetivo determinar a resistência ao torque superficial de uma mistura durante o seu processo de cura. Também é possível determinar o tempo de cura e de liberação do tráfego por meio deste ensaio.

Ceratti e Reis (2011) citam que o tempo de cura é o tempo necessário para que uma toalha de papel pressionada sobre a superfície não manche, absorvendo água clara, isenta de emulsão livre.

Para realização deste ensaio foi utilizado o coesímetro MCT e torquímetro (medidor de pressão analógico) conforme a Figura 41.

Figura 41 - Coesímetro e torquímetro



Fonte: Autora

Este ensaio consiste em aplicar uma pressão de 200 Kpa no corpo de prova e medir a resistência à torção em intervalos de 30, 60, 90, 120 e 150 min, essa pressão representa a exercida por um veículo médio.

A norma de microrrevestimento (DNIR 035:2018), especifica que para o tempo de 30min, é aceitável que o valor do torque obtido seja de no mínimo 12kg.cm, já para o tempo de 60min, espera-se obter um torque com valor mínimo de 20kg.cm.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos os resultados dos ensaios apresentados no capítulo anterior e as observações analisadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

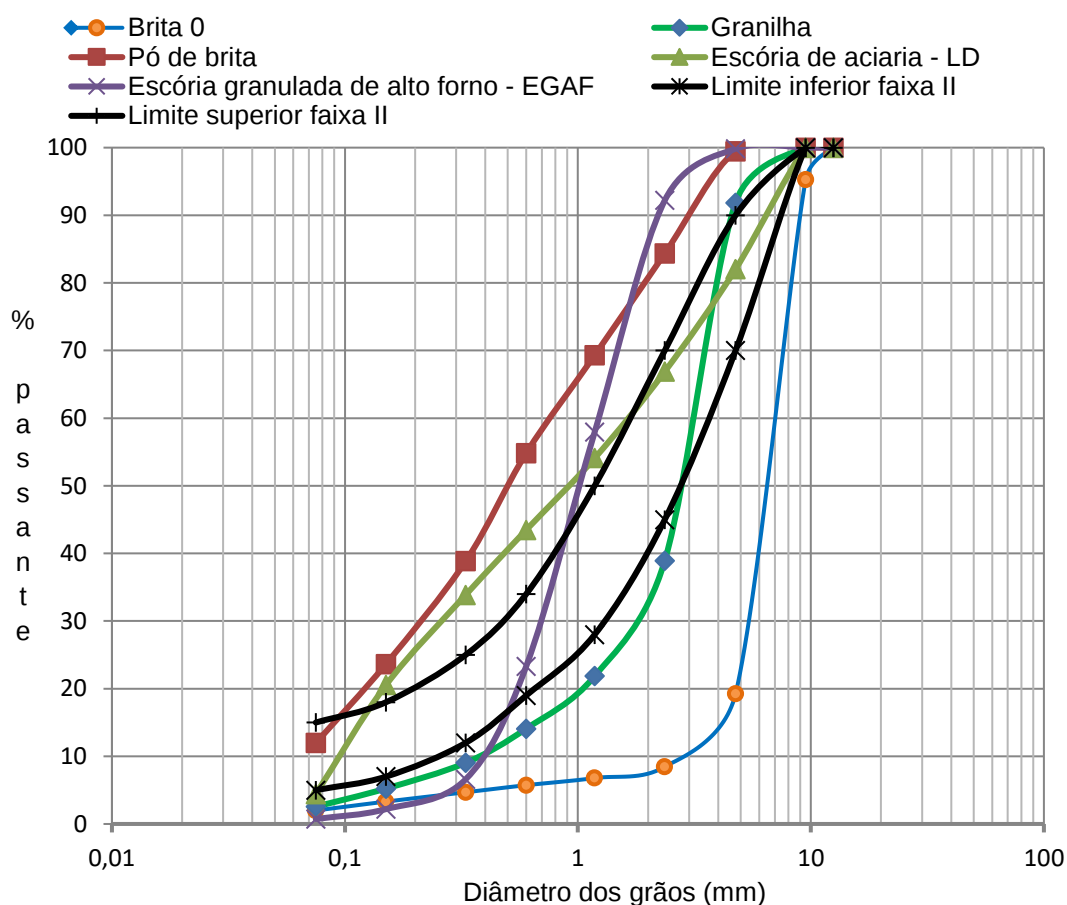
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E SIDERÚRGICOS

A primeira etapa realizada foi a granulometria individual de cada agregado (natural e siderúrgico) a fim de verificar as possíveis misturas priorizando utilizar os agregados em sua forma original.

As curvas foram comparadas aos limites inferiores e superiores da faixa II do DNIT (faixa utilizada nesta pesquisa), e em seguida, foi realizada a combinação dos agregados a fim de obter uma curva granulométrica dentro desta faixa.

Na Figura 42, são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados naturais e siderúrgicos, bem como os limites inferiores e superiores da faixa II.

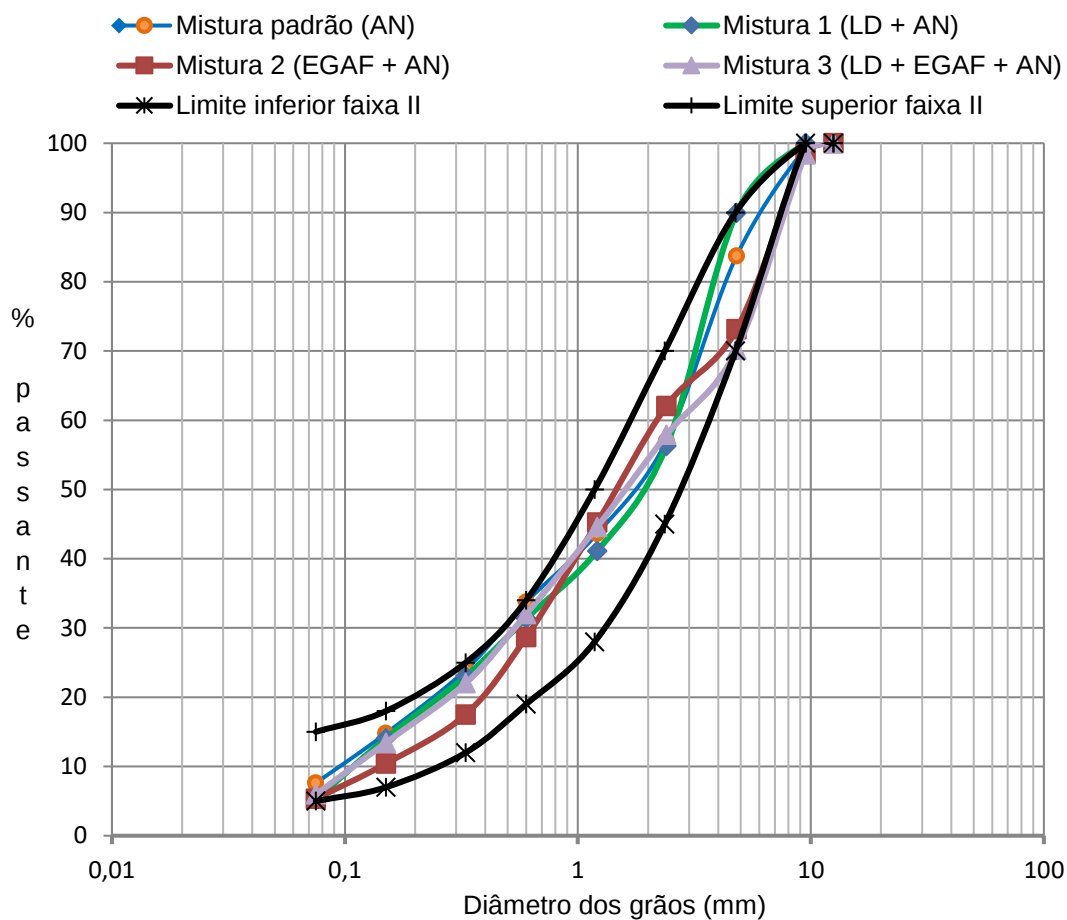
Figura 42 - Granulometria dos agregados



Fonte: Autora

A Figura 43 apresenta as curvas granulométricas das misturas apresentadas na Figura 46, como pode ser visto, todas se adequam dentro dos limites da faixa II do DNIT.

Figura 43 - Granulometria das misturas



Fonte: Autora

O Tabela 13 apresenta os resultados de caracterização dos agregados segundo a norma DNIT 035:2018 e DNER-EM 262:94.

Tabela 13 - Caracterização EGAF, LD e agregado natural

Ensaio (Caracterização dos agregados)	Normas	Resultados					Limites DNIT-ES 035/2018	Limites DNER-EM 262/94 (LD)
		LD	EGAF	Brita 0	Granilha	Pó de brita		
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035:98	21,78%	-	44,86%	41,42%	-	Igual ou inferior 30%	Máximo 25%
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054:97	76,03%	99,69%	76,33%	93,53%	81,97%	Igual ou superior 65%	-
Densidade real do agregado miúdo (g/cm³)	DNER-ME 084/95	3,296	2,790	2,865	2,875	2,801	-	3 - 3,5
Densidade aparente do agregado graúdo (g/cm³)	DNER-ME 081/98	3,243	-	2,825	-	-	-	3 - 3,5
Absorção de água #3/8" - #4 (%)	DNER-ME 081/98	2,128%	-	1,079%	-	-	-	1 - 2
Durabilidade (%)	DNER-ME 089/94	2,21%		11,42%			Inferior 12%	0 - 5
Absorção de azul de metileno (ml/g)	NBR 14949/2017	2,0	6,5	10,0	8,0	8,0	Máximo 10ml	-
pH (potencial hidrogeniônico)	-	12,3	9,6	9,8	8,9	8,9		-

Fonte: Autora

Conforme os resultados apresentados na Tabela 13, nota-se que o agregado siderúrgico LD atendeu aos requisitos impostos pela norma vigente específica para uso de escórias de aciaria para pavimentos rodoviários, ao mesmo tempo, atendeu as exigências que a norma vigente para misturas de MRAF determina para os agregados a serem utilizados em suas misturas.

Com relação a escória granulada de alto forno (EGAF), não existe uma norma específica para seu uso em pavimentos rodoviários, a norma DNER 260:94 (Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários) é específica as escórias não granuladas (resfriadas ao ar). Em seu item 5.2 é esclarecido que para as escórias granuladas de alto forno deverá ser consultada as exigências específicas para agregado miúdo.

Dessa forma, nesta pesquisa a EGAF será avaliada da mesma maneira que os agregados naturais, desse modo apenas analisando os requisitos exigidos na norma de microrrevestimento (DNIT 035:18).

A resistência ao desgaste do agregado siderúrgico LD é superior quando comparada aos agregados naturais. A perda por abrasão da LD foi de 21,78%, enquanto a do agregado natural foi acima de 40%. Não foi necessário realizar este ensaio com a escória granulada de alto forno pois sua granulometria não se encaixa nas faixas

exigidas na norma do ensaio abrasão Los Angeles. A norma de microrrevestimento (DNIT 035:18), especifica que a abrasão Los Angeles dos agregados deve ser igual ou inferior a 30%, porém a norma admite valores superiores uma vez que os agregados tenham obtido desempenho satisfatório em utilização anterior. Esse parâmetro tem grande relevância no desempenho do MRAF, uma vez que agregados mais resistentes, tendem a ter maior durabilidade em campo durante o uso do pavimento asfáltico. Dessa forma, tem-se a grande vantagem de utilizar esse agregado siderúrgico na composição do MRAF, uma vez que ele possui essa excelente característica e está dentro da especificação normativa, diferente dos agregados naturais.

Com relação aos resultados de equivalente de areia, todos os agregados atenderam a condição imposta pela norma DNIT 035:18.

O valor de massa específica superior da LD em relação aos agregados naturais e EGAF, já era esperado, devido a sua composição química, onde o ferro está presente. Embora a norma de microrrevestimento não exige a realização deste ensaio, ele é muito importante uma vez que influenciará negativamente no transporte, devido ao aumento de peso da carga transportada para um mesmo volume. Esse elevado valor de massa específica da LD em relação aos outros agregados, também influencia em um maior consumo de ligante, uma vez que o teor de ligante de projeto é em relação ao peso dos agregados, ou seja, para um mesmo volume de misturas com LD (com maior peso em massa), quando comparado as misturas sem LD, é necessário uma quantidade maior de emulsão asfáltica, uma vez que sua porcentagem é em relação ao peso dos agregados.

Nota-se que a absorção de água da escória LD é duas vezes a absorção do agregado natural. Segundo Castro (2014), isso influencia no teor de água a ser utilizado na mistura de MRAF. Nesta pesquisa observou-se que nas misturas contendo LD, era necessário a adição de uma a duas gramas a mais de água para uma boa trabalhabilidade da mistura e facilidade na moldagem dos corpos de provas.

Em relação a durabilidade, a norma para utilização de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários (DNER 262:94) é bem mais criteriosa que a norma de microrrevestimentos (DNIT 035:18). A durabilidade da LD é bastante superior quando comparada aos agregados naturais, porém esse parâmetro foi atendido para as duas normas.

Quanto ao pH dos agregados (siderúrgicos e naturais), constata-se que todos foram superiores a 7, porém é importante observar o teor de silício em cada agregado, pois isso pode torná-lo mais ou menos básico. Segundo Bernucci et al. (2010) quanto menor o teor de silício, mais básico será o material. Os autores também citam que materiais ácidos costumam apresentar problemas com adesividade, enquanto materiais básicos costumam apresentar ótimos resultados de adesividade com o ligante asfáltico.

Embora os agregados naturais e a EGAF não sejam tão básicos quanto a LD (pela quantidade de silício em suas composições – que serão apresentados mais a diante), a emulsão RC1C-E é catiônica e possui emulsificantes em sua composição, que confere característica de boa adesividade entre o ligante e os agregados. Por esse motivo, nesta pesquisa não houve problemas com adesividade nas misturas (conforme será apresentado nos ensaios de avaliação das misturas). Os autores Pinto e Pinto (2015), conforme mencionado no item 2.2.3b), também chegaram a essa conclusão.

Por fim, a reatividade superficial dos agregados naturais foi bem superior quando comparada aos agregados siderúrgicos. A reatividade da EGAF também foi superior à da LD. Neste ensaio, o azul de metileno com carga positiva (catiônica), vai neutralizando a carga negativa do agregado (aniônico), com isso quanto maior o valor de adsorção do azul de metileno, mais reativo será o agregado. Castro (2014), também encontrou um resultado baixo de reatividade para escória de aciaria, mesmo resultado encontrado nesta pesquisa. Segundo o autor, agregados poucos reativos tendem a ter uma boa compatibilidade com a emulsão asfáltica.

Entretendo nesta pesquisa, a emulsão utilizada RC1C-E (Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada por polímeros elastoméricos), teve uma boa compatibilidade com todos os agregados, não necessitando do uso de aditivos nas misturas.

4.1.1 Caracterização de Forma (AIMS)

Na norma de microrrevestimento (DNIT 035:18), especifica que o índice de forma dos agregados utilizados nas misturas deve ser superior a 0,5 (DNER 086:94). Valores iguais ou acima deste índice, significa que os agregados possuem uma forma mais cúbica, segundo Bernucci et al (2010), Ceratti e Reis (2011) e Castro (2014), em

pavimentação asfáltica é importante a utilização de agregados com essa forma, de maneira a garantir maior intertravamento dos agregados na mistura, com isso tornando ela menos quebradiça durante a ação do tráfego.

Segundo Masad et al (2001), um importante aspecto a ser considerado sobre as partículas de um agregado é sua morfologia, que pode ser subdividida em forma, angularidade e textura superficial. Essas três propriedades estão ligadas, respectivamente, à relação entre as dimensões da partícula, às arestas existentes e ao grau de rugosidade de sua superfície e podem ser chamadas, conjuntamente, de propriedades de forma (MASAD et al, 2001).

Diante disso, nesta pesquisa optou-se por realizar a avaliação das propriedades de forma dos agregados pelo método *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*.

A quantidade de partículas estudadas no AIMS para cada parâmetro analisado, são apresentadas nas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16, o programa forneceu valores para classificar a forma 2D e a angularidade dos agregados miúdos e a angularidade, textura, e esfericidade dos agregados graúdos para os agregados siderúrgicos (LD e EGAF) e os agregados naturais (AN).

Tabela 14 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para a LD

Diâmetro	Forma (2D)	Angularidade	Textura	Forma (Esfericidade)
12,5-19	-	-	-	-
9,5-12,5	-	48	48	48
4,75-9,5	-	50	49	50
2,36-4,75	-	50	49	49
1,18-2,36	153	153	-	-
0,60-1,18	151	151	-	-
0,30-0,60	150	150	-	-
0,15-0,30	151	151	-	-
0,075-0,15	152	152	-	-
Abaixo 0,075	126	126	-	-

Fonte: Autora

Tabela 15 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para a EGAF

Diâmetro	Forma (2D)	Angularidade	Textura	Forma (Esfericidade)
12,5-19	-	-	-	-
9,5-12,5	-	-	-	-
4,75-9,5	-	-	-	-
2,36-4,75	-	50	49	49
1,18-2,36	153	153	-	-
0,60-1,18	151	151	-	-
0,30-0,60	150	150	-	-
0,15-0,30	146	151	-	-
0,075-0,15	151	151	-	-
Abaixo 0,075	131	131	-	-

Fonte: Autora

Tabela 16 - Quantidade de partículas analisadas no AIMS para os AN

Diâmetro	Forma (2D)	Angularidade	Textura	Forma (Esfericidade)
12,5-19	-	-	-	-
9,5-12,5	-	50	50	48
4,75-9,5	-	50	50	50
2,36-4,75	-	50	49	50
1,18-2,36	152	152	-	-
0,60-1,18	151	151	-	-
0,30-0,60	152	152	-	-
0,15-0,30	150	150	-	-
0,075-0,15	151	151	-	-
Abaixo 0,075	131	131	-	-

Fonte: Autora

Foi realizada a classificação por meio da metodologia de Al Rousan (2001) e Ibiapina (2018), conforme foi apresentado no item 3.2.1. Os resultados desta classificação encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Classificação dos agregados de LD, EGAF e AN

		LD		EGAF		AN	
		Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)	Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)	Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
Forma 2D	Circular	45,50%	2,90%	9,50%	0,70%	22,20%	0%
	Semicircular	26,20%	93,90%	24,00%	79,60%	35,20%	93,70%
	Semialongado	23,30%	2,90%	40,70%	17,60%	33,30%	6,20%
	Alongado	5,00%	0,20%	25,70%	2,20%	9,40%	0,10%
Angularidade	Arredondado	21,00%	4,00%	3,40%	0,70%	10,00%	0,80%
	Subarredondado	56,90%	75,80%	33,30%	38,80%	58,10%	70,00%
	Subangular	17,10%	20,10%	39,20%	58,80%	24,30%	29,00%
	Angular	4,90%	0,10%	24,10%	2%	7,60%	0,30%
Textura Superficial	Polido	8,20%	24,70%	18,40%	42,90%	2,20%	4,50%
	Macio	20,50%	45,90%	30,60%	32,70%	2,80%	8,40%
	Baixa Rugosidade	17,80%	16,40%	10,20%	18,40%	1,70%	30,30%
	Rugosidade moderada	28,10%	8,90%	22,40%	6,10%	7,90%	47,80%
	Alta Rugosidade	25,30%	4,10%	18,40%	0%	85,40%	9,00%
Esfericidade	Achatado/Alongado	8,20%	2,00%	0%	0,00%	20,90%	2,80%
	Baixa esfericidade	23,10%	29,30%	20,40%	20,40%	31,60%	49,70%
	Esfericidade moderada	38,10%	67,30%	49,00%	73,50%	28,20%	45,20%
	Alta esfericidade	30,60%	1,40%	30,60%	6,10%	19,20%	2,30%

Fonte: Autora

Quanto à forma dos agregados graúdos e miúdos (forma 2D, angularidade e esfericidade), a partir dos resultados apresentados na Tabela 17, foi possível obter as seguintes conclusões das classificações destes agregados para os dois autores:

Na análise de Forma 2D, para o autor Al Rousan (2004), os grãos da escória LD é distribuído entre circular, semicircular e semialongado. E para o autor Ibiapina (2018), a LD é classificada em semicircular. A EGAF é classificada pelo primeiro autor como semicircular e semialongada e para o segundo autor, esse agregado possui os grãos semicirculares em sua maioria. Por fim o agregado natural, é classificado pelo primeiro autor em circular, semicircular e semialongado e pelo segundo autor semicircular. Nota-se que para os dois autores, não houve distinção para a forma 2D dos três materiais, os caracterizando com uma forma mais arredondada.

Na análise da angularidade, o autor Al Rousan (2004) classificou a LD com grãos arredondados e subarredondados, o autor Ibiapina (2018) a classificou como subarredondada e subangular. A EGAF e o AN foram classificados pelos dois autores como subarredondados e subangulares. Com isso, conclui-se que para o primeiro autor, os grãos da LD são menos angulares que os grãos da EGAF e AN. Para o segundo autor, analisando as porcentagens nos resultados, a EGAF é mais angular que os outros dois agregados, à caracterizando com quinas mais agudas.

Por fim na análise de esfericidade, Al Rousan (2004) classificou as escórias com esfericidade de moderada a alta e Ibiapina (2018) as classificou com esfericidade moderada. Na análise do AN, para o primeiro autor, a esfericidade ficou bem distribuída partindo de achatado a alta esfericidade, e para o segundo autor os grãos desses agregados possuem de baixa a moderada esfericidade. Diante disso, nota-se que as escórias possuem uma forma mais cúbica que os agregados naturais, dessa forma possuindo melhor desempenho nas misturas de MRAF.

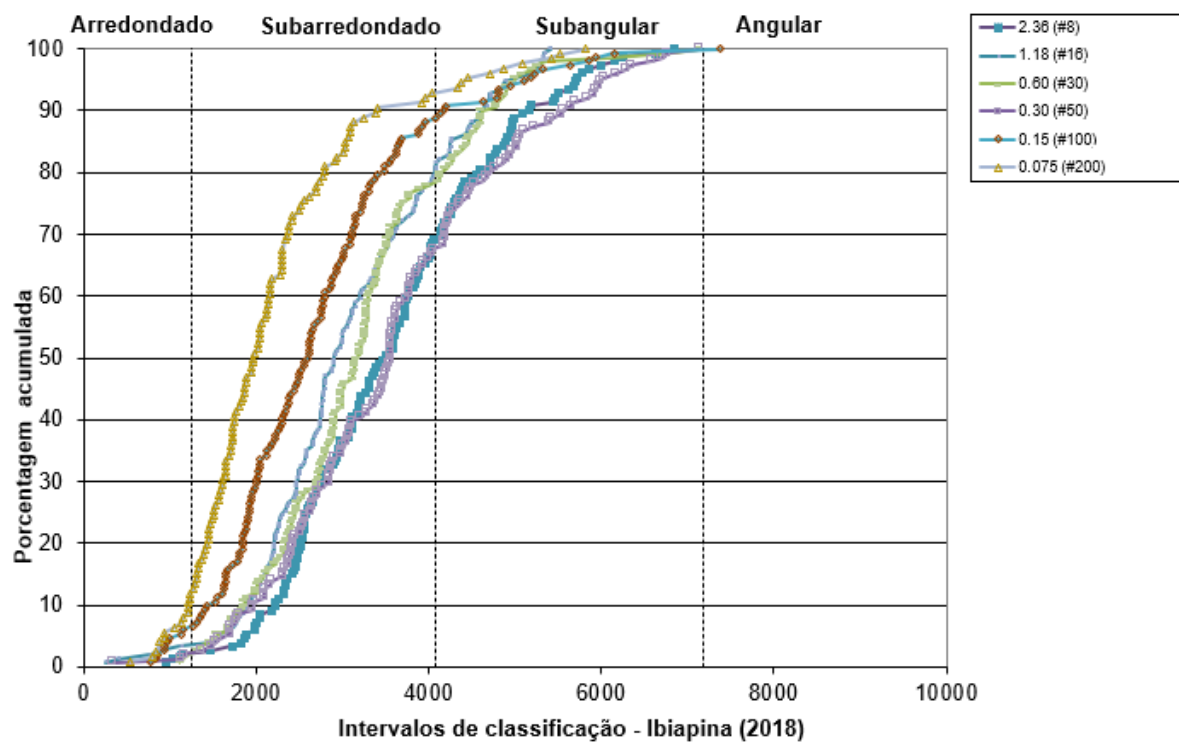
Em relação a textura superficial, Al Rousan (2004) apresenta uma distribuição homogênea para os grãos das duas escórias, partindo de polido até a alta rugosidade, enquanto Ibiapina (2018) classifica as duas escórias com grãos polidos, macios e com baixa rugosidade. Os agregados naturais para Rousan (2004) possuem alta rugosidade enquanto para Ibiapina (2018) são bem distribuídos entre baixa a moderada rugosidade. Diante disso, nota-se que os agregados naturais possuem melhor textura que os agregados siderúrgicos.

Esse parâmetro de rugosidade não é mencionado nas características exigidas para agregados em misturas de microrrevestimento, portanto segundo Ibiapina (2018), Pazos (2015), Bessa (2012) e Masad et al (2003) é uma propriedade importante, uma vez que exerce influência significativa no desempenho de misturas asfálticas com relação a propriedades de atrito, ou seja, resistência a derrapagem que o revestimento oferece. Esse parâmetro é muito importante para o MRAF, uma vez que uma de suas principais vantagens é a melhoria do atrito entre o pneu-pavimento (melhorando índices de segurança aos usuários). Segundo Bessa (2012), Alves (2014) e Araújo (2017), a forma em que os agregados se juntam é influenciada diretamente pela textura de suas partículas, agregados com texturas mais rugosas propicia um maior atrito entre suas partículas, podendo tornar a mistura mais resistente e assim menos propícia a sofrer deformações.

Vale destacar que os resultados para textura apresentados na Tabela 17 são para agregados graúdos, uma vez que o AIMS não possui ferramentas capazes de fornecer valores de textura superficial para agregados miúdos. Porém um estudo realizado por Masad et al. (2001), provou que existe uma forte correlação entre angularidade e rugosidade para agregados miúdos, pelo fato de a similaridade da análise no programa ser medida por meio de imagens em escalas de cores, o autor provou que quanto maior a angularidade maior será seu índice de textura. Diante disso e pelo fato das misturas de MRAF na faixa II possuírem em sua composição mais de 70% de agregados miúdos, foi realizado uma análise da angularidade dos agregados miúdos para verificar esta correlação.

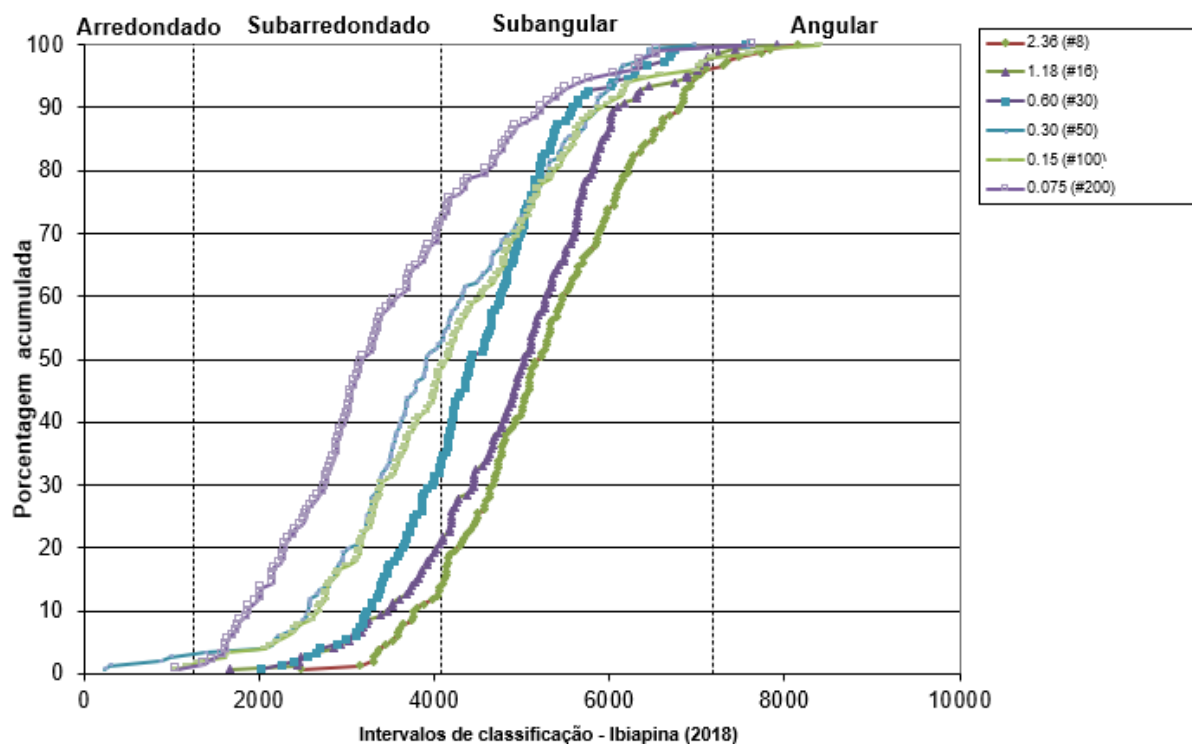
Como os dois autores não se diferem, quanto a classificação de angularidade dos agregados, serão apresentadas as curvas (Figura 44 , Figura 45 e Figura 46) com os intervalos referente a classificação de Ibiapina (2018).

Figura 44 - Distribuição da propriedade de angularidade - LD



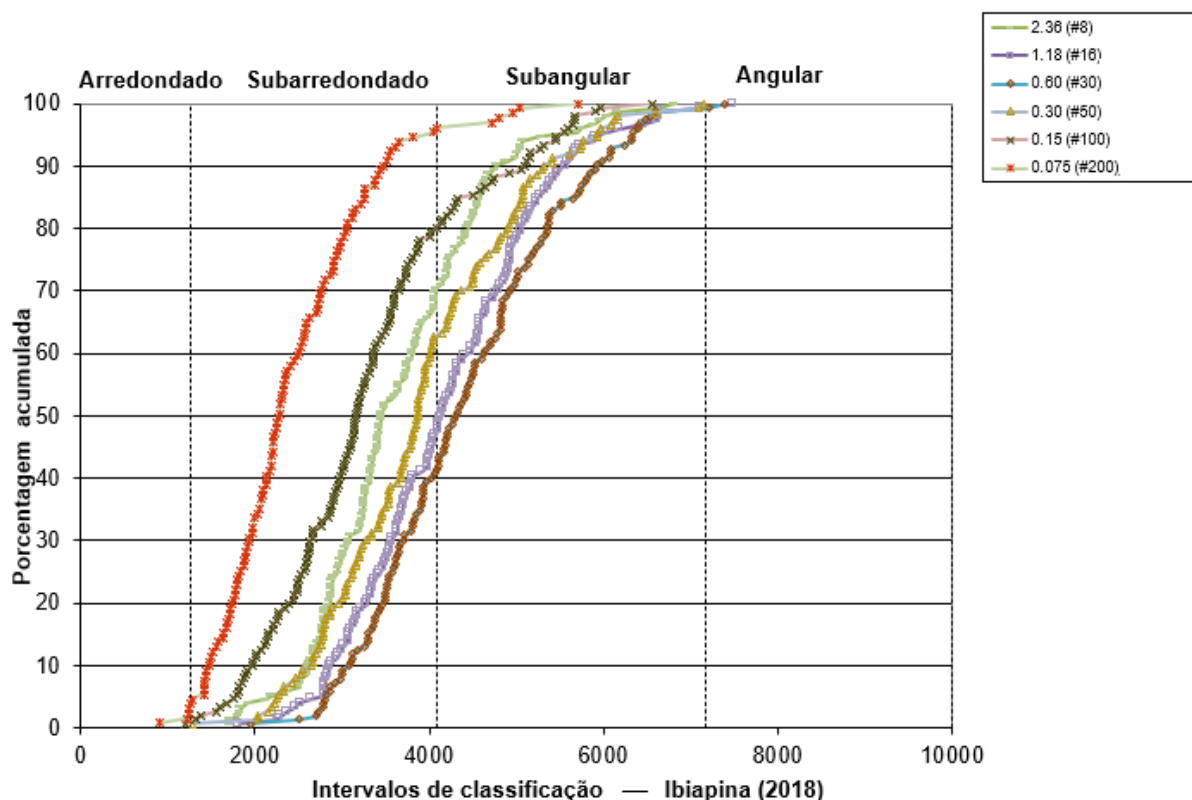
Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

Figura 45 - Distribuição da propriedade de angularidade - EGAF



Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

Figura 46 - Distribuição da propriedade de angularidade - AN



Fonte: Autora, adaptado de arquivo *Stockpile* do Programa AIMS

Em uma análise geral das figuras acima, nota-se que os agregados miúdos da escória LD encontra-se em sua maioria na faixa de angularidade subarredondada, enquanto a escória EGAF têm os grãos bem divididos entre subarredondados e subangulares. O agregado natural possui os grãos divididos entre angularidade subarredondados e subangulares, porém com maior parte dos grãos na faixa subarredondado, parecido com a escória LD.

Diante disso, utilizando a correlação de Massad *et al.* (2001), os agregados miúdos da escória EGAF apresentaram maior rugosidade quando comparado aos agregados miúdos da LD e do agregado natural.

Porém, concluiu-se nesta pesquisa, que a rugosidade dos agregados não age sozinha no que diz respeito a misturas mais resistentes para o MRAF. Pois a mistura com a escória LD, obteve melhores resultados no que fiz respeito ao desgaste por abrasão úmida, no ensaio WTAT, ou seja, a LD tornou-se a mistura mais resistente quanto ao desgaste. Nesse caso, deve ser avaliado outros parâmetros, como a esfericidade e angularidade dos agregados.

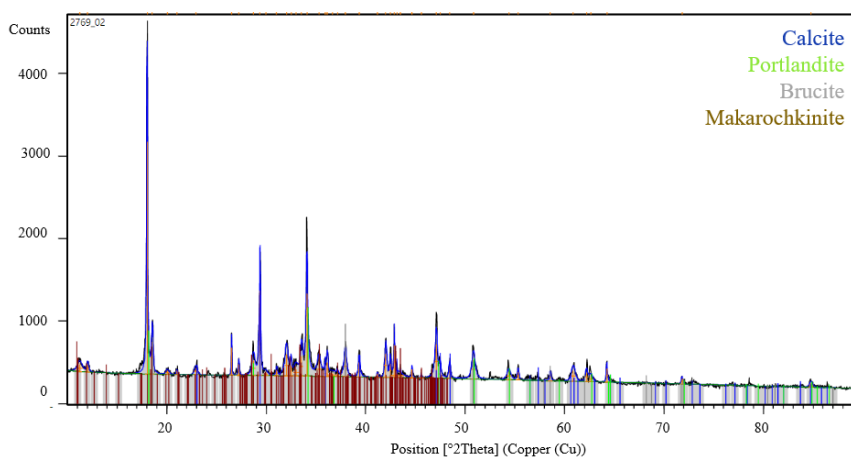
4.1.2 Caracterização Química e Mineralógica

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de difração de raios-X e fluorescência de raios-X. A DRX verifica os minerais da estrutura cristalina e o FRX a composição química dos agregados em questão.

4.1.2.1 Difração de Raios-X (DRX)

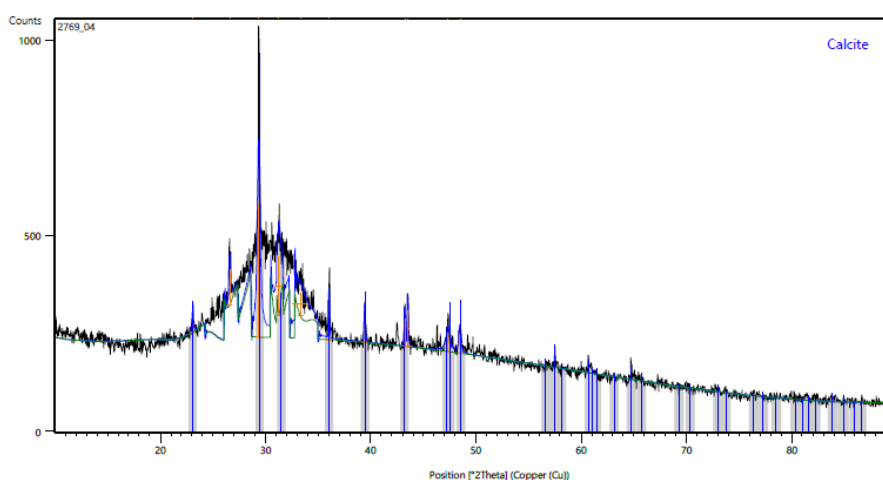
A análise de DRX, foi realizada para os agregados siderúrgicos (LD e EGAF), por meio desta foi possível determinar os minerais presentes nesses agregados. As Figura 47 e Figura 48 apresentam os difratogramas obtidos nesta análise.

Figura 47 - Difratograma LD



Fonte: Relatório 2769 Nanobusiness

Figura 48 - Difratograma EGAF



Fonte: Relatório 2769 Nanobusiness

A partir dos difratogramas, os minerais indicados nesses agregados são apresentados na Tabela 18, e a fim de elucidar a correlação destes com os agregados naturais,

também são apresentadas composições mineralógicas de três autores, de agregados graníticos (como os utilizados nesta pesquisa).

Tabela 18 – Composição mineralógica dos agregados

LD	EGAF	Agregados de origem granítica		
		Granito	Granito	Granito
Calcita	Calcita	Quartzo	Clorita	Biotita
Portlandita		Albita	Albita	Anfíbólio
Brucita		Feldspato	Anortita	Plagioclásio
<i>BioMakarochkinite</i>		Clorita	Quartzo	Quartzo
		Muscovita	Feldspato	Feldspato
		Anortita	Muscovita	Muscovita
		Outros	Outros	Outros
		Apeageyi, Grenfell e Airey (2014)	Zhang et al. (2015)	Diógenes (2018)

Fonte: Autora

Diante desses resultados, observa-se que os agregados siderúrgicos não apresentam minerais em comuns aos de origem granítica.

Segundo Reis (2005) e Moura (2020), agregados de origem granítica, apresentam natureza mais ácida e possuem má adesividade. Os agregados siderúrgicos, possuem em comum a Calcita em sua composição mineralógica, esse mineral apresenta uma forte ligação ligante-agregado, contribuindo para melhor adesividade. Reis (2005), salienta que os agregados de origem granítica necessitam de utilização de emulsões de ruptura controlada para melhor adesividade, que como já sabido, possuem emulsificantes que propiciam melhor adesividade com agregado.

4.1.2.2 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Na Tabela 19 são apresentados os resultados de FRX para os agregados siderúrgicos e os naturais.

Tabela 19 - Resultados de FRX

Componente	LD	EGAF	AN
Al ₂ O ₃	2,89%	10,12%	14,75%
CaO	38,01%	41,90%	7,63%
Cr ₂ O ₃	0,18%	<0,01%	<0,01%
Fe ₂ O ₃	17,50%	0,57%	8,81%
K ₂ O	0,07%	0,34%	3,11%
MgO	13,53%	6,89%	2,51%
MnO	2,25%	0,41%	0,12%
Na ₂ O	<0,1%	<0,1%	2,79%
P ₂ O ₅	0,88%	0,01%	2,52%
SiO ₂	7,63%	37,49%	54,21%
TiO ₂	0,31%	0,57%	1,68%
ZrO ₂	-	-	0,10%
SO ₃	0,49%	1,51%	-
ZnO	0,02%	<0,01%	-

Fonte: Autora

Conforme os resultados apresentados, nota-se que as escórias LD e EGAF possuem teores de óxido de cálcio similares. Na LD a presença de ferro e manganês é mais elevada quando comparada a EGAF e aos agregados naturais. A EGAF e o agregado naturais se aproximam quanto ao teor de óxido de silício e alumínio em sua composição, quanto ao silício, se explica o fato de terem pH parecidos (conforme apresentado na Tabela 13).

Os teores de óxido de silício próximos da EGAF e do agregado natural também explicam a alta reatividade que esses agregados apresentaram (conforme já apresentado), enquanto a LD apresentou baixíssima reatividade por possuir um baixo teor deste óxido. O parâmetro de reatividade como já sabido, confere a boa compatibilidade dos agregados com a emulsão asfáltica, entretanto a emulsão utilizada nesta pesquisa (RC1C-E), obteve boa compatibilidade com todos os agregados, como já mencionado.

Acredita-se que a emulsão RC1C-E poderia ser produzida com menor quantidade de emulsificante para ser utilizada com a LD, uma vez que os emulsificantes são dosados conforme a reatividade do material. Agregados mais reativos demandam mais

emulsificantes ou emulsivos próprios para esse tipo de agregado, que de uma forma ou outra, encarecem a emulsão.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

Conforme mencionado capítulo 3, a empresa fabricante e fornecedora da emulsão asfáltica utilizada nessa pesquisa (RC1C-E), concedeu o certificado de qualidade deste material, onde foi possível verificar os resultados dos ensaios realizados pela empresa, e assim confirmar os limites estabelecidos pela norma de emulsões asfáltica (DNIT 128:2010). Como já sabido, foi possível realizar alguns destes ensaios em laboratório a fim de confirmar tais resultados. Na Tabela 20 são apresentados os resultados realizados pela autora e pela empresa, bem como os limites da norma vigente para emulsões asfálticas. Nota-se que todos os resultados apresentados atenderam aos limites estabelecidos pela norma, assim sendo apropriada para o uso nas misturas de microrrevestimento.

Tabela 20 - Caracterização da Emulsão asfáltica RC1C-E

Ensaio (Caracterização da emulsão)	Normas	Resultados Autora	Resultados Disbral	Limites DNIT-ES 128/2010
Viscosidade Saybolt-furol , 50°C (s)	NBR 14491/07	23	24	Máximo 70
Peneiração, retido peneira 841 µm (%)	NBR 14393/12	0,03%	0,02%	Máximo 0,1
Resíduo seco por evaporação (%)	NBR 14376/19	62,50%	62,20%	Mínimo 62
Penetração, 100g, 5s, 25°C, (0,1 mm)	NBR 6576/07	50	49	Mínimo 45 Máximo 150
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560/16	65	60	Mínimo 55
Recuperação elástica, 20 cm, 25°C (%)	NBR 15086/06	73,5%	73,0%	Mínimo 70
Viscosidade Brookfield , 135°C, SP 21, 20 rpm(cP)	NBR 15184/04	-	750	Mínimo 600
Sedimentação (%)	NBR 6570/16	-	0,7%	Máximo 5
Carga de partícula	NBR 6567/15	-	Positiva	Positiva

Fonte: Autora

4.3 DOSAGEM DAS MISTURAS DE MRAF

Como já sabido, para definição do teor ótimo de emulsão asfáltica das misturas de microrrevestimento, são realizados os ensaios LWT e WTAT.

Conforme já mencionado no capítulo 3, antes da realização dos ensaios, é necessário realizar o teste do tempo mínimo de misturação, a fim de verificar se a mistura atenderá ao tempo mínimo exigido em norma e verificar se haverá necessidade do uso de aditivos.

Na Tabela 21, são apresentados os resultados deste teste para todas as misturas.

Tabela 21 - Tempo de misturação das misturas

Mistura	Teor de água (%)	Teor de emulsão (%)	Tempo de misturação (s)
Padrão	8	10	210
Mistura 1	8	10	195
Mistura 2	8	10	275
Mistura 3	8	10	255

Fonte: Autora

Diante desses resultados, nota-se que a emulsão utilizada atendeu ao tempo mínimo de misturação para todas as misturas desta pesquisa, não sendo necessário a utilização de aditivos para controlar o tempo de misturação.

Neste item serão apresentados as curvas e determinação do teor de emulsão asfáltica para cada mistura estudada. Todas as misturas seguiram a metodologia de moldagem apresentadas no capítulo 3 (Figura 34).

a) *Mistura Padrão (MP)*

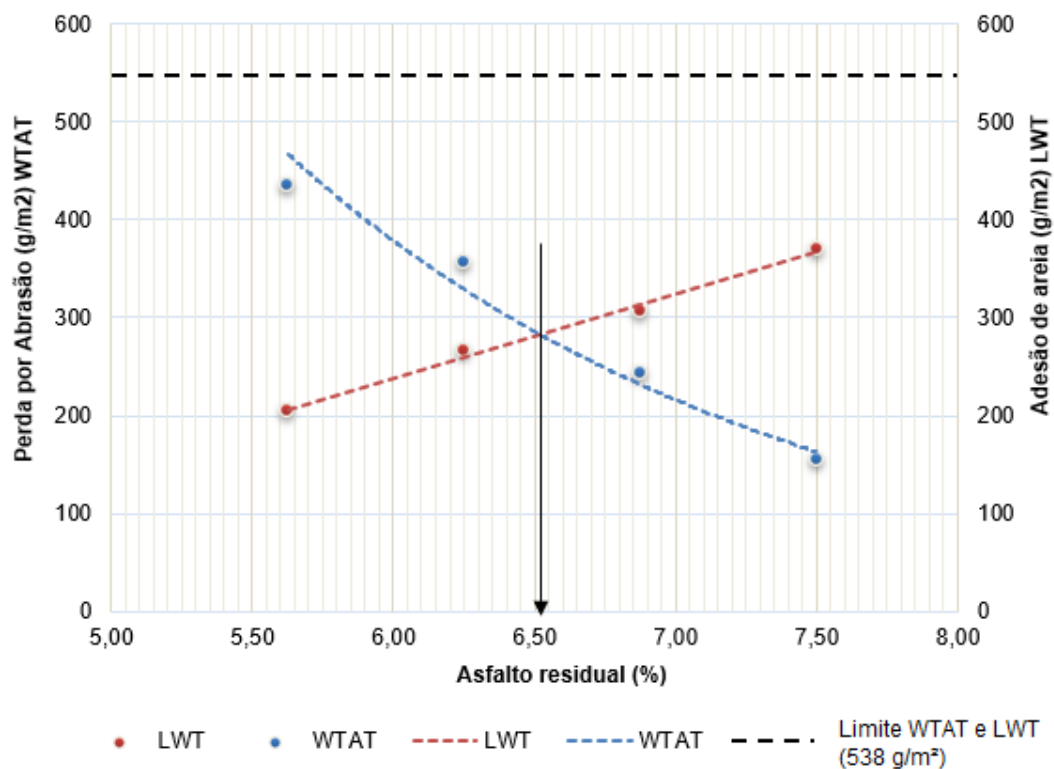
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 22 e sua representação gráfica na Figura 49.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura Padrão)

MISTURA PADRÃO				
Asfalto residual (%)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)	LWT (g/m²)	WTAT (g/m²)
5,63	9	9	204,2	436
6,25	10	8	265,97	357,3
6,88	11	7	305,88	242,5
7,5	12	6	369,33	154,15
Teor ótimo de emulsão: 10,43% - Asfalto residual: 6,52%				

Fonte: Autora

Figura 49 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura Padrão)



Fonte: Autora

Nota-se que para os teores de emulsão ensaiados, os limites estabelecidos pela norma DNIT 035:18 não foram ultrapassados, esse limite é indicado em linha tracejada (538 g/m²).

A partir desses resultados, verifica-se que essa mistura de MRAF pode ser executada com teores até de 12%, pois os resultados estão abaixo do limite para desgaste e exsudação, porém quanto maior o teor de emulsão utilizado, maior o custo da obra. Para o teor de 9% de emulsão, os resultados também permaneceram dentro dos limites, porém utilizar esse teor, implica em está fora dos padrões estabelecidos pela norma DNIT 035:18.

O teor ótimo dessa mistura como já mencionado no capítulo 3, se dá a partir da intercessão dos dois gráficos, logo para a mistura padrão o teor ótimo de emulsão foi de 10,43%.

b) Mistura 1 (M1)

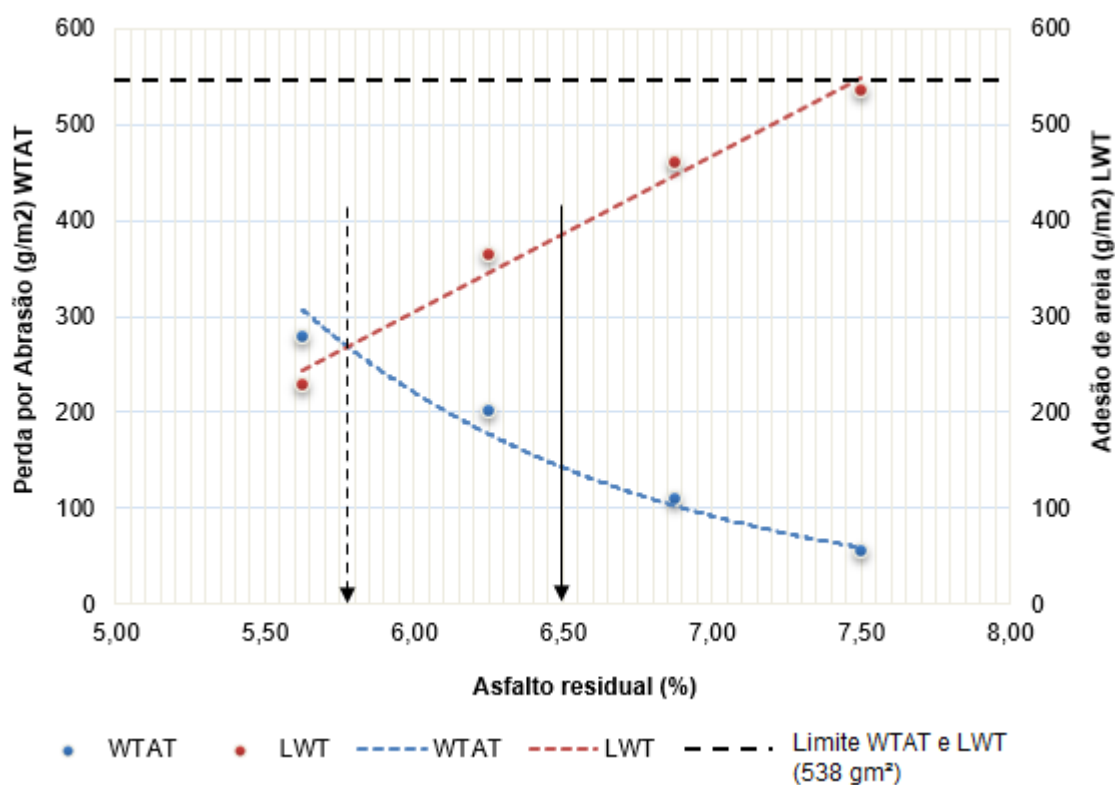
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 23 e sua representação gráfica na Figura 50.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 01)

MISTURA 01 (AN + LD)				
Asfalto residual (%)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)	LWT (g/m ²)	WTAT (g/m ²)
5,63	9	9	227,73	278,3
6,25	10	8	363,45	200,4
6,88	11	7	458,82	108,4
7,5	12	6	534,03	55,14
Teor ótimo de emulsão: 10,4% - Asfalto residual: 6,5%				

Fonte: Autora

Figura 50 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 01)



Fonte: Autora

Para a mistura 1, nota-se que os valores de desgaste foram bem menores em relação a mistura padrão, isso se deve ao fato que a LD tem maior resistência quanto a perda por abrasão. A perda por abrasão úmida da mistura 1 foi três vezes menor que a mistura padrão. Com relação a resistência a exsudação de asfalto, os resultados foram próximos nas duas misturas, a mistura 1 obteve resultados um pouco maior. Portanto para os teores ensaiados, o limite estabelecido em norma não foi ultrapassado.

Analisando a Figura 50, percebe-se que a interseção das duas curvas (seta tracejada) ocorreu com teor de asfalto residual abaixo do mínimo estabelecido em norma (6,5%). O teor nesta interseção foi de 5,8% de asfalto residual, que significa um teor de emulsão de 9,28% (uma vez que o teor de CAP nesta emulsão foi de 62,5%). Como já sabido, a norma DNIT 035:18 estabelece um teor mínimo de asfalto residual de 6,5% para misturas na faixa II.

Diante disso, nessa pesquisa foi realizado os ensaios para avaliação das misturas para os dois teores (10,4% e 9,28% de emulsão), a fim de verificar se ao utilizar um menor teor de emulsão, são atendidos os requisitos estabelecidos em norma.

c) *Mistura 2 (M2)*

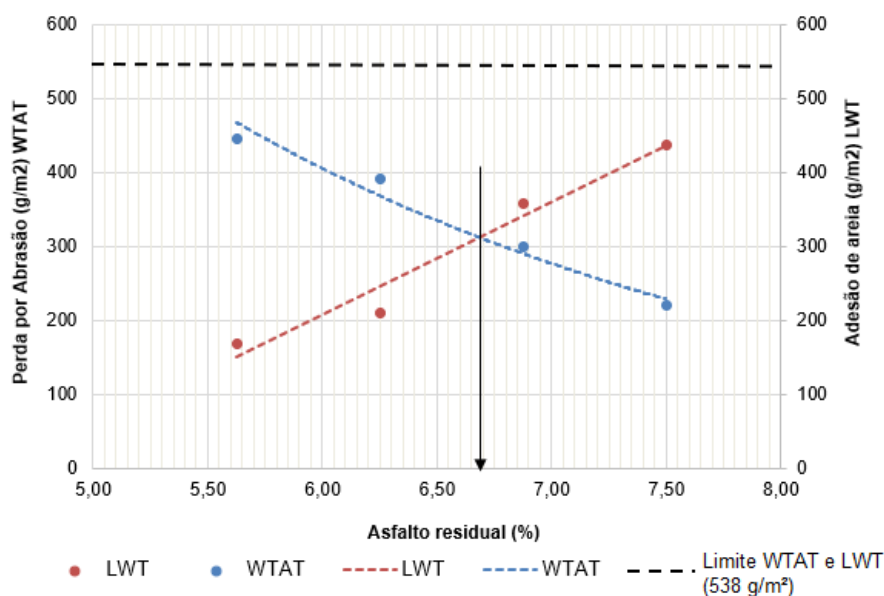
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 24 e sua representação gráfica na Figura 51.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 02)

MISTURA 02 (AN + EGAF)				
Asfalto residual (%)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)	LWT (g/m²)	WTAT (g/m²)
5,63	9	9	168,59	444,6
6,25	10	8	210,66	390,3
6,88	11	7	357,36	299,9
7,5	12	6	435,82	219,28
Teor ótimo de emulsão: 10,72% - Asfalto residual: 6,7%				

Fonte: Autora

Figura 51 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 02)



Fonte: Autora

Os teores ensaiados para mistura 2, também não ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma para misturas de MRAF, nessa mistura o teor ótimo foi de 10,72% de emulsão asfáltica. Os resultados de perda por abrasão úmida e resistência a exsudação de asfalto foram próximos da mistura padrão.

d) *Mistura 3 (M3)*

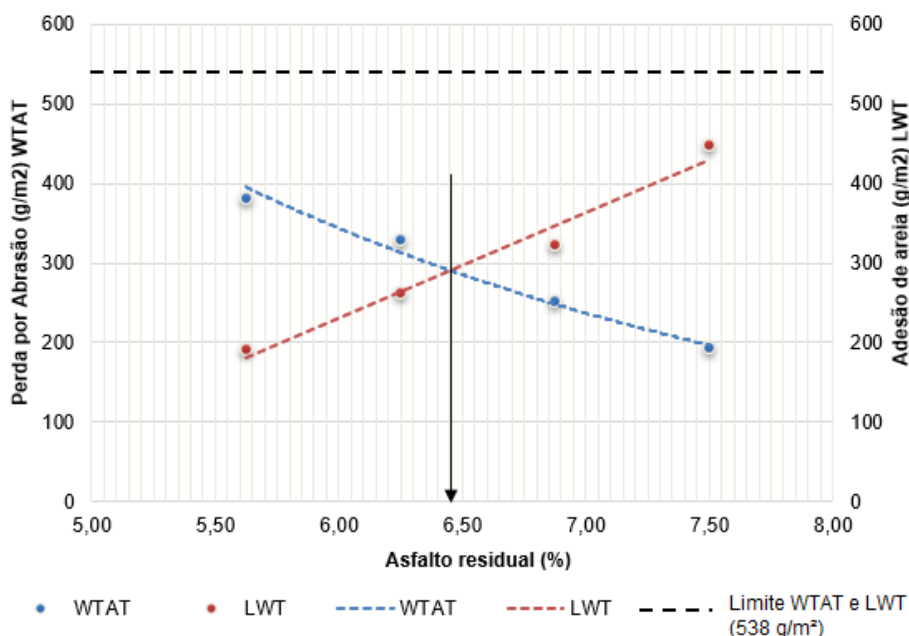
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 25 e sua representação gráfica na Figura 52.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios WTAT e LWT (Mistura 03)

MISTURA 03 (AN + LD +EGAF)				
Asfalto residual (%)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)	LWT (g/m ²)	WTAT (g/m ²)
5,63	9	9	191,47	380,8
6,25	10	8	260,55	329,1
6,88	11	7	321,11	250,8
7,5	12	6	446,48	192,47
Teor ótimo de emulsão: 10,4% - Asfalto residual: 6,5%				

Fonte: Autora

Figura 52 - Definição do teor de emulsão asfáltica (Mistura 03)



Fonte: Autora

Por fim na mistura 3, nota-se que para os teores ensaiados o limite estabelecido em norma também não foi ultrapassado e a interseção das curvas mostra um teor ótimo de emulsão para essa mistura de 10,4%.

4.4 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS DE MRAF

Definido os teores ótimos para cada mistura estudada, foram realizados os ensaios para avaliação das misturas, a fim de verificar se todas atendem aos requisitos impostos na norma de MRAF (DNIT 035:18).

a) *Perda por abrasão úmida após 6 dias de imersão (WTAT)*

Foram moldadas quatro amostras para cada mistura, utilizando o teor ótimo de emulsão, e após seis dias de saturação, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio WTAT. A Tabela 26 apresenta os resultados médios do desgaste obtido em cada mistura.

Tabela 26 - Resultados de WTAT após 6 dias de imersão

Mistura	Teor ótimo de emulsão (%)	WTAT (g/m ²) 6 dias
Mistura Padrão	10,43	459,74
Mistura 1	10,4	336,16
Mistura 1	9,28	357,58
Mistura 2	10,72	494,54
Mistura 3	10,4	495,35

Fonte: Autora

A norma ISSA A-143:2010 (*Recommended Performance Guideline For Micro Surfacing*), estabelece que após seis dias de saturação, o desgaste máximo deve ser de 807 g/m², nota-se que para todas as misturas o desgaste por abrasão úmida foi bem inferior ao máximo especificado em norma. Nesse caso todas as misturas atenderam a esse requisito.

Destacam-se as misturas com adição de escória LD, que obtiveram os menores resultados de desgaste, quanto para 60 minutos de saturação e para 6 dias, este resultado comprova que esse material, é muito mais resistente que os agregados naturais, tornando a mistura mais resistente quanto a abrasão úmida, característica relevante para misturas de MRAF.

b) *Adesividade das misturas*

Os resultados do ensaio de adesividade segundo a NBR 14757:17, são apresentados na Figura 53.

Figura 53 - Adesividade das misturas



Fonte: Autora

Como pode ser observado, todas as misturas tiveram adesividade satisfatória com a utilização do teor ótimo em cada mistura. Mesmo para os agregados menos básicos como EGAF e AN, isso ocorre pelo tipo de emulsão utilizada (RC1C-E), empregada em misturas de MRAF.

Para a mistura 1, foi realizado o teste de adesividade com os dois teores (9,28% e 10,4%), conforme apresentado na Figura 54.

Figura 54 - Adesividade da mistura 1



Fonte: Autora

Nota-se que mesmo utilizando um teor menor que o mínimo estabelecido pela norma, os agregados tiveram um bom recobrimento do ligante asfáltico, não se viu diferença de recobrimento dos teores apresentados. Sendo assim a adesividade para os dois teores foi satisfatória.

c) *Coesão das misturas*

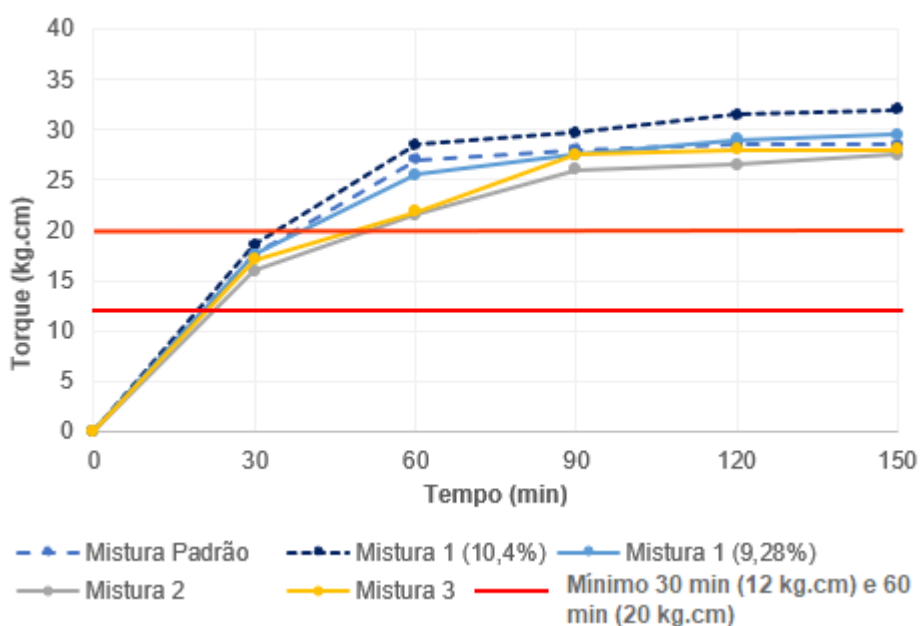
Os resultados do ensaio de coesão segundo a NBR 14798:17, são apresentados na Tabela 27 e a representação gráfica na Figura 55.

Tabela 27 - Resultados de coesão para as misturas

	Mistura Padrão 10,43%	Mistura 01 10,4%	Mistura 01 9,28%	Mistura 02 10,72%	Mistura 03 10,4%	Limite DNIT-ES 035/2018
Tempo (min)	Torque kg.cm	Torque kg.cm	Torque kg.cm	Torque kg.cm	Torque kg.cm	Torque kg.cm
0	0	0	0	0	0	0
30	17,5	18,5	17,5	16	17	12
60	27	28,5	25,5	21,5	21,8	20
90	28	29,7	27,5	26	27,5	-
120	28,5	31,5	29	26,5	28	-
150	28,5	32	29,5	27,5	28	-

Fonte: Autora

Figura 55 – Determinação da coesão das misturas



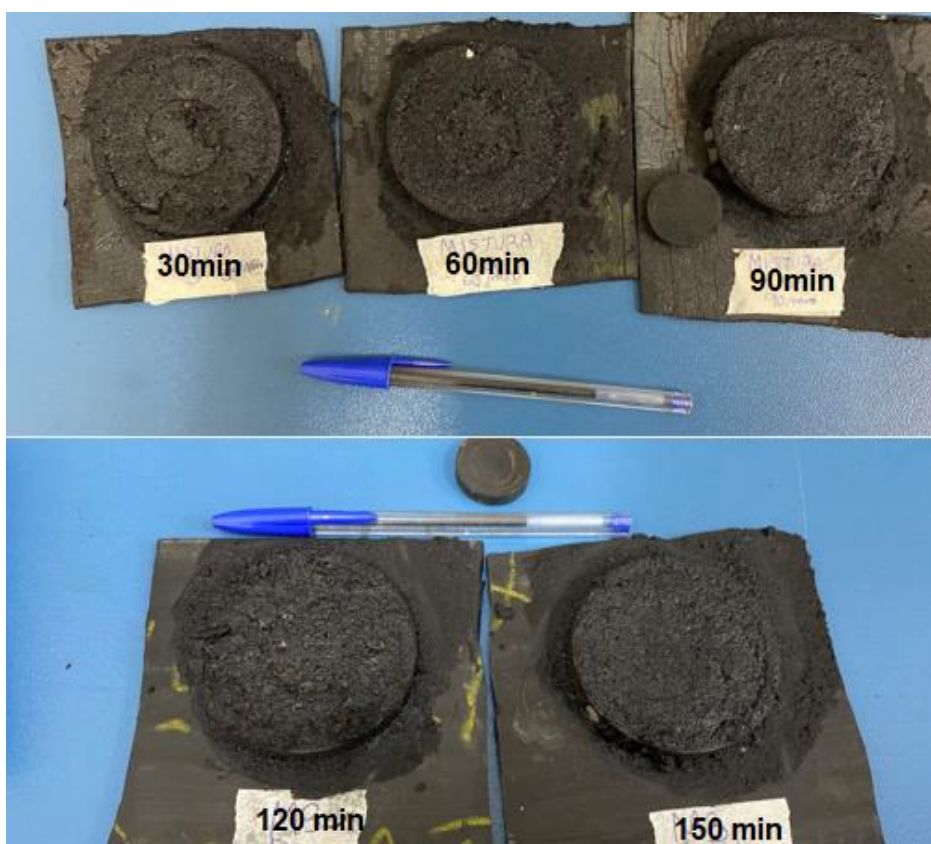
Fonte: Autora

Diante dos resultados apresentados, nota-se que as misturas estão bem coesas, com isso possibilitando liberar o tráfego no tempo ideal para microrrevestimento. A norma (DNIT 035:18), determina que a coesão para o tempo de 30 minutos deve ser 12kg.cm e para o tempo de 60 minutos 20kg.cm, logo todas as misturas atenderam a essa exigência.

Percebe-se que o valor da coesão após o tempo de 90 min não varia muito, o gráfico tende a uma reta. A Figura 56 ilustra os corpos de provas ensaiados, observa-se que no teste de coesão dos tempos de 90, 120 e 150 minutos o corpo de prova não sofre desagregação superficial ao torque, com isso mantendo a coesão aproximadamente constante.

Essa boa coesão, se dá pela emulsão asfáltica utilizada, com isso é possível comprovar que ela possui de fato uma ruptura controlada, característica essencial para utilização em misturas de microrrevestimento, outros tipos de emulsão (ruptura lenta, utilizada para lamas asfálticas) não iriam apresentar tais resultados.

Figura 56 – Corpos de prova após ensaio de coesão



Fonte: Autora

5 CONCLUSÕES

De uma maneira geral, por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa, foi constatado que os agregados siderúrgicos têm potencial para serem empregados em misturas de MRAF. Os dois agregados siderúrgicos atenderam a todas as exigências para essas misturas, em especial a escória de aciaria LD que obteve resultados relevantes para obter misturas de MRAF com mais qualidade.

Dessa forma, a partir dos resultados apresentados nesta dissertação, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Quanto a caracterização física dos agregados naturais e siderúrgicos, os resultados foram satisfatórios e atenderam aos requisitos normativos para uso em MRAF. A escória de aciaria LD também atendeu as exigências para seu uso em pavimentos asfálticos.
- Quanto a análise da forma dos agregados, por meio dos resultados obtidos no AIMS, foi possível observar que não houve distinção na forma 2D dos agregados miúdos, siderúrgicos e naturais, todos apresentaram grãos mais circulares. Com relação a angularidade, notou-se que a EGAF e o AN possuem angularidades similares, a escória LD apresentou menor angularidade que os dois agregados citados. Foi possível observar que as escórias apresentam esfericidade pouco maior que o agregado natural. Por fim, esses parâmetros não foram concludentes nos resultados do comportamento das misturas de MRAF.
- Em misturas de MRAF a rugosidade superficial dos agregados não afetou diretamente na resistência da mistura como citado na teoria apresentada por diversos autores, uma vez que a mistura com a escória LD, obteve os melhores resultados com relação a resistência a abrasão úmida da mistura.
- Por meio da análise da composição química desta pesquisa, constatou-se que o óxido de silício presente em grande abundância nos agregados naturais e na EGAF propiciou maior reatividade nesses agregados. A escória LD apresentou um teor baixo deste óxido, isso explica a baixa reatividade que este agregado obteve. Além disso, a quantificação desses óxidos citados, explicam os resultados de pH, apesar de todos se apresentarem como básicos (pH acima de 7), a LD se apresentou mais básica por possuir em sua composição um teor de óxido de silício mais baixo.

- Apesar da variação de reatividade dos agregados utilizados nesta pesquisa, a emulsão asfáltica utilizada obteve boa compatibilidade com todos eles, não necessitando de adição de aditivos químicos. Essa verificação foi por meio do ensaio de tempo de mistura, que obteve resultados satisfatórios dentro dos parâmetros normativos. É importante destacar que essa característica depende do tipo e quantidade de emulsificantes utilizado na emulsão asfáltica.
- Acredita-se que a emulsão RC1C-E poderia ser produzida com menor quantidade de emulsificante para ser utilizada com a LD, uma vez que os emulsificantes são dosados conforme a reatividade do material. Agregados mais reativos demandam mais emulsificantes ou emulsivos próprios para esse tipo de agregado, que de uma forma ou outra, encarecem a emulsão.
- Foi possível verificar que a emulsão utilizada nesta pesquisa é de fato catiônica, elastomérica e de ruptura controlada, uma vez que ela propiciou ótimas características adesivas com os agregados, mesmo alguns deles possuindo má histórico de adesividade por suas características químicas (como os agregados naturais e a escória granulada de alto forno). Outro fato foram os ótimos resultados de coesão das misturas, que só são conferidos para este tipo de emulsão, com isso possibilitando rápida liberação do tráfego. Isso é possível pois essas emulsões possuem em suas formulações emulsificantes que propiciam essas características.
- Quanto ao teor de emulsão asfáltica das misturas estudadas, constatou-se a tendência apresentada na literatura, quanto maior o teor de emulsão na mistura maior será a exsudação e menor o desgaste. A mistura padrão (apenas com agregados naturais), apresentou um teor ótimo de emulsão de 10,43%. A mistura contendo 33% de escória LD (mistura 1), obteve os melhores resultados para desgaste por abrasão úmida, essa mistura apresentou baixos desgastes, até mesmo para baixo teor de emulsão, com isso proporcionando a diminuição do percentual ótimo da emulsão asfáltica. O teor ótimo da mistura 1 foi de 9,28%, abaixo do mínimo exigido em norma, que é 10,4%. As misturas com 33% de EGAF (mistura 2) e com 16,5% de LD e 16,5% de EGAF (mistura 3) apresentaram teores ótimos próximos da mistura de referência, 10,72% e 10,4% respectivamente. De uma maneira geral, todas as misturas apresentaram bons resultados, em nenhuma delas foi ultrapassado os limites para exsudação e desgaste, assim viabilizando o uso desses agregados siderúrgicos em misturas de microrrevestimentos. Mesmo

obtendo resultados dentro dos limites estabelecidos em norma, com 9,28% de emulsão (mistura 1), a utilização de um teor menor que o mínimo estabelecido em norma, pode implicar em problemas futuros com a durabilidade da mistura.

- Quanto aos resultados do desgaste das misturas após seis dias de imersão em água, eles seguiram a mesma tendência após imersão em uma hora, todas as misturas apresentaram valores abaixo do estabelecido em norma, com destaque da mistura 1 (com 33% de LD) que obteve os valores mais baixos de desgaste.

Diante do apresentado, conclui-se que a utilização de agregados siderúrgicos em misturas de microrrevestimento é viável, uma vez que todos os testes exigidos em normas foram atendidos de forma satisfatória. Além disso, a utilização do agregado siderúrgico LD nessas misturas, mostrou um elevado aumento na resistência da mistura, contribuindo para uma diminuição no teor de emulsão utilizado, assim reduzindo o custo da obra. Porém para uma correta verificação desse parâmetro, é necessária uma avaliação a longo prazo da mistura em campo, para verificar se a utilização de um teor abaixo do estabelecido como mínimo em norma, influencia na vida útil da mistura.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das análises obtidas nesta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- Construções de trechos experimentais de MRAF, utilizando agregado siderúrgico LD com porcentagem ótima de emulsão apresentada nesta pesquisa (9,28%), avaliando sua durabilidade a longo prazo.
- Avaliação em trechos experimentais dos fatores de forma dos agregados em misturas de MRAF, analisando a micro e macro textura do pavimento após serem submetidos a solicitações impostas pelo tráfego e da ação atmosférica.
- Avaliação da utilização em conjunto de escória LD e escória de alto forno resfriada ao ar livre, com intuito de formar uma curva apenas com os dois agregados siderúrgicos a fim de verificar possível utilização em misturas de MRAF.
- Comparar emulsões asfálticas de MRAF, quanto ao teor de emulsificantes, a fim de verificar a correlação deste parâmetro com a reatividade dos agregados.
- Analisar os efeitos da expansão da escória de aciaria a longo prazo em misturas de MRAF.

REFERÊNCIAS

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ, 2010

ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Diretrizes para Execução e Controle da Qualidade de Microrrevestimento Asfáltico a Frio**. Informativo técnico nº 6. Rio de Janeiro, 2013.

AGUILAR, M. O. A.; BORGES, P. C.; GARCÍA, E. J. I. **Hydraulic binders of fluorgypsum-portland cement and blast furnace slag, stability and mechanical properties**. Construct. Build. Mater., V. 24(5), p. 631–63. 2010.

ALVES, V. A. H. S. **Avaliação da Resistência a Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2014.

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Doctor of Philosophy degree, Texas A&M University, 229p, 2004.

APAZA, F. R. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; SOUSA, M. A. S.; CASTRO, C. D. **Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico**. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET), Revista Transporte. Vol. 26, p.118-138, 2016.

ARAUJO, V. M. C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas em face a compactação para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens**. Universidade Federal do Ceará (UFC). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Dissertação de mestrado. Fortaleza, 2017.

ARCELOR MITTAL TUBARÃO - AMT. **Escória de Aciaria LD**. 2015b. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_a_ciaria_ld/in_natura.asp>. Acesso em: 16/01/2019.

_____.AMT. **Escória de Alto Forno**. 2015c. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/introducao.asp>. Acesso em: 16/01/2019.

_____.AMT. **Fluxo de produção.** 2015a. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/quem-somos/usina/fluxo-producao/index.asp>. Acesso em: 16/01/2019.

Asphalt Emulsion Manufacturers Association - **AEMA. Recommended Performance Guidelines.** 2017. Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.aema.org/resource/resmgr/publications/recommend_performance_guidel.pdf. Acesso em: 03/02/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14948.** Microrrevestimentos asfálticos a frio modificados por polímero Materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 14841:** Misturas asfálticas - Determinação da adesão de areia em microrrevestimentos asfálticos a frio por meio da máquina LWT. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14798:** Microrrevestimentos asfálticos - Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14757:** Microrrevestimentos e lamas asfálticas - Determinação da adesividade de misturas. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14758:** Microrrevestimentos asfálticos - Determinação do tempo de misturação. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 14746.** Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT): Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 14949.** Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno: Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14491.** Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade Saybolt Furol: Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 14393.** Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração: Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14376.** Ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expedito: Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 6576.** Materiais asfálticos – Determinação da penetração: Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6560.** Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola: Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15086.** Ligantes asfálticos – Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro: Rio de Janeiro, 2006.

AZEREDO, L. B. **Verificação do potencial de uso de resíduos siderúrgicos provenientes de diferentes etapas do processo de refino do aço como agregados em misturas asfálticas do tipo SMA.** Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2018.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Petrobras / ABEDA. Rio de Janeiro, 3ª Reimpressão, 2010.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.** Universidade Federal do Ceará (UFC). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Dissertação de mestrado. Fortaleza, 2012.

BRASIL ARCELOR MITTAL. **Coprodutos – Escória de Alto-Forno.** 2020. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: 06/09/2020.

BRASQUÍMICA. Informações técnicas. **Microrrevestimento Asfáltico a Frio.** 2019. Disponível em: https://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg_pub_det.cfm/microrrevestimento-asfaltico-a-frio>. Acesso em: 05/01/2019.

BROUGHTON, B.; LEE, S.; KIM, Y. **30 Years of Microsurfacing: A Review.** ISRN Civil Engineering. Vol . 2012, p. 1-7, 2012.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2004.

CASTRO, P. B. **Avaliação Do Emprego de Agregados Alternativos em Microrrevestimento Asfáltico**. Universidade Federal do Ceará (UFC). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Dissertação de mestrado. Fortaleza, 2014.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Guia técnico, ABEDA. Rio de Janeiro, 2015.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de Microrrevestimento Asfáltico a Frio - MRAF**. Instituto Pavimentar. Rio de Janeiro, 2011.

CUTI, C. A. C. **Metodologia para cadastro georreferenciado de pedreiras – Estudo de caso de duas pedreiras no entorno de Goiânia/GO**. Projeto de Pesquisa - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - EM 262**: Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER - EM 260**: Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER - ME 035**: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER - ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER - ME 081**: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER - ME 084**: Agregado Miúdo – Determinação da densidade real – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. **DNER - ME 367**: Materiais de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 035 – ES**. Pavimentação asfáltica - Microrrevestimento asfáltico - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 113 – ME**. Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **DNIT 128 – EM**. Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2010.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Ceará (UFC). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2018.

GRANSBERG, D. D.; **Microsurfacing**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP 411. Vol. 41-12, 125 p. 2010.

HASSAN, R. **Surface Rehabilitation Techniques: State of the Practice Design, Construction and Performance of Micro-Surfacing**. Federal Highway Administration (FHWA). Washington. Estados Unidos, 1994.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo Siderúrgico**, 2015 Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 16/01/2019.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/A%C3%A7o%20Brasil%20%C2%BB%20Completo.pdf>>. Acesso em: 16/01/2019.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Folder Aço Brasil Sustentabilidade 2019**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wpcontent/uploads/2019/08/Folder_AcoBrasil_Economia_2019.pdf>. Acesso em: 08/09/2020.

IBIAPINA, D. S. **Proposição de Um Sistema de Classificação das Propriedades de Forma de Agregados Caracterizados com o Uso do Processamento Digital de Imagens para a Seleção de Materiais Brasileiros**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 173p, 2018.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION (ISSA). **ISSA A-143**. Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing. Annapolis, MD. Estados Unidos, 2010.

IZOTON, S. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos no desempenho mecânico de misturas asfálticas envelhecidas contendo escória de aciaria LD**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2020.

KNABBEN, R. M. **Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. 2012.

LOIOLA, P. R. R. **Estudos de Agregados e Ligantes Alternativos para Emprego em Tratamentos Superficiais de Rodovias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza. 2009.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Universidade de São Paulo. Escola politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Dissertação de Mestrado, São Paulo, 2000.

MARRIAGA, L. J.; CLAISSE, P.; GANJIAN, E. **Effect of steel slag and portland cement in the rate of hydration and strength of blast furnace slag pastes**. J. Mater. Civ. Eng., V. 23(2), p. 153–160. 2011.

MASAD, E. A. et al. **Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance**. In: Transportation Research Record 1757. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 148-156, 2001.

MASAD, E. A. et al. **Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance**. Research Report ICAR 203-1. 2003. Disponível em: <<https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/35367>>. Acesso em: 01/06/2020.

MOURA, B. L. R. **Avaliação da adesividade ligante-escória sob aspectos físicos, químicos e termodinâmicos e correlação com desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo diferentes fíleres melhoradores de adesividade**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2020.

MOTZ, H.; GEISELER, J. **Products of steel slags an opportunity to save natural resources**. Waste Management. Vol. 21, p. 285-293. Alemanha, 2001.

MUNHOZ, D.; FILLA, J. C. **Avaliação do desempenho da recuperação de pavimentos tratados com o microrrevestimento**. Revista Técnico-Científica do Crea-PR. Paraná. 2017.

OMENA, W. GREGA.ASFALTOS. **Emulsões Asfálticas**. 2009. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos-e-links>>. Acesso em: 30/01/2019.

OUMA, Y. O.; OPUDO, J; NYAMBENYA, S. **Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS for Road Pavement Maintenance Prioritization: Methodological Exposition and Case Study**. Vol. 2015, p. 1-17, 2014.

PATRICK, S. **Guidelines and Specifications for Microsurfacing**. Austroads, Research Report – AP-R569-18. Vol. 9, 37 p. Austrália, 2018.

PAZOS, A. G. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no Comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2015.

PEREIRA, F. M.; NEVES, P. C. P.; LENZ, D. M.; VERNEY, J. C. K. **Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no estado do Rio Grande do Sul**. Revista Matéria. V. 23, p. 1-10. 2018.

PINTO, S.; PINTO, I. E.; **Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. 1 ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2015.

RECYCLED MATERIALS RESOURCE CENTER (RMEC). **Blast Furnace Slag - Material Description**. Disponível em: <<https://rmrc.wisc.edu/ug-mat-blast-furnace-slag/>>. Acesso em: 28/01/2019.

REIS, M. **Um estudo da influência da granulometria dos agregados no desempenho do microrrevestimento asfáltico a frio quanto ao deslocamento lateral e vertical**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2005.

RIBEIRO, L. F. M. **Análise da cadeia produtiva do setor de mineração de rochas para produção de agregados no Estado de Goiás, com vistas ao aproveitamento dos resíduos em aplicações geotécnicas**. Projeto de Pesquisa - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2008.

RONALD, M.; LUIS, F.P.; **Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties**. Science Direct, Construction and Building Materials. Vol. 2016, p. 162-173. 2016.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados Naturais, Britados e Artificiais para concreto. Concreto: Ciência e tecnologia**. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 1.v, v.7, p. 233-260. 2011.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2018.

SILVA, M. F. **Caracterização elementar das frações granulométricas da escória granulada oriundas de três altos-fornos**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2019

SMITH, R. E.; BEATTY, C. K. **Microsurfacing Usage Guidelines**. Transportation Research Record Vol.1680, p. 13-17. 1999.

TUTUMLUER, E.; MOAVENI, M.; QAMHIA, I. I. A. **Aggregate Quality Requirements for Pavements - A Synthesis of Highway Practice**. NCHRP Synthesis 524.Vol. 20-05, p. 1-96, 2018.

VIVONI, A. M. **Análise das especificações de microrrevestimento asfáltico a frio**. 2014. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2014/bt10a.htm>>. Acesso em: 05/02/2019.

WANG, G. C.; **The Utilization of slag in Civil Infrastructure Construction**. WP – Woodhead Publishing. Book. 442 p. EUA. 2016

XIAO, Y.; WANG, F.; CUI, P.; LEI, L.; LIN, J.; YI, M. **Evaluation of Fine Aggregate Morphology by Image Method and Its Effect on Skid Resistance of Micro-Surfacing**. MDPI, Materials. Vol. 11, p.1-14. 2018.

XIAOYU, M. H. **The application analysis of micro-surfacing in high grade highway asphalt pavement preventive maintenance**. Applied Mechanics and Materials. Vols. 256-259, p. 1882-1886. China. 2013.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. **Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. Advances in Civil Engineering.** Hindawi Publishing, Corporation Advances in Civil Engineering. V. 2011, p. 1–13. USA 2011.

YU, J.; ZHANG, X.; XIONG, C. **A methodology for evaluating micro surfacing treatment on asphalt pavement based on grey system models and grey rational degree theory.** Construction and Building Materials. Vol. 150, p. 214-226. China. 2017.

ZHENGBING, L. **Asphalt Pavement Preventive Maintenance Technology Overview. Applied Mechanics and Materials.** Vols. 638-640, p. 1135-1138, Switzerland, 2014.

ZULU, K.; MUKENDI, K. K. **An In-Depth Evaluation of Micro-Surfacing Treatment. Civil. Engineering Journal,** Vol. 4, p. 2242-2251, 2018.