



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

BÁRBARA LUIZA RIZ DE MOURA

**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**

VITÓRIA

2020

BÁRBARA LUIZA RIZ DE MOURA

**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**

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: Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira, Coorientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires.

VITÓRIA

2020

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

M929a Moura, Bárbara Luiza Riz de, 1992-
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 / Bárbara Luiza Riz de Moura. - 2020.
155 f. : il.

Orientadora: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.
Coorientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Escórias siderúrgicas. 2. Pavimentação asfáltica. 3. Adesividade ligante-agregado. 4. Energia de superfície. 5. Dano à umidade. I. Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif. II. Pires, Patrício José Moreira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**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**

Bárbara Luiza Riz de Moura

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.

Aprovada em: 14/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira (Orientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Dra. Thaisa Ferreira Macedo (Examinadora externa)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Ronaldo Pilar (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

AGRADECIMENTOS

Tantas vezes eu pensei no que escrever aqui e às pessoas a quem agradecer quando o momento de escrever esse texto chegasse... E cá estou, sem um discurso pronto à altura da minha gratidão! Agradeço às pessoas que passaram por mim nesse tempo de construção do trabalho exposto a seguir, ainda que por um breve momento ou com um simples gesto. As ciências exatas escondem muito trabalho atrás de, por vezes, apenas um número.

Dentre essas pessoas, estão os técnicos dos laboratórios de Geotecnia e Pavimentação e de Materiais da UFES ou profissionais sem nenhum vínculo direto a esse trabalho, mas que despenderam seu tempo para ajudar, simplesmente. Meu sincero obrigada a Felipe, Natália, Sidineidy, Breno, Adenis e rapazes da Kaeme Engenharia e Consultoria Rodoviária. Além disso, minha gratidão às monitoras e alunos de iniciação científica: Thayna, Nathália, Aline, Amanda, Leonardo, Viviane e, especialmente, Thalya, por ser super companheira nos trabalhos infundavelmente braçais.

Agradeço à professora Dra. Renata Antoun Simão por disponibilizar os laboratórios da COPPE-UFRJ e aos demais envolvidos nos ensaios que realizamos naquele período. Destaco o técnico Heleno e os alunos Yuri, Mieka e, principalmente, à Dra. Thaisa, por me ajudar imensamente durante minha estada na cidade do Rio de Janeiro e por enobrecer a banca com sua presença.

Ainda agradecendo pelos ensaios executados, preciso citar a professora Ph.D. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco e o aluno Victor pelos ensaios realizados na Universidade Federal do Ceará e pela disponibilidade em sanar quaisquer dúvidas. Além disso, a Ph.D. Mahdieh Khedmati e Ph.D. Yong-Rak Kim pelos ensaios realizados na *University of Nebraska*.

Aos meus colegas do mestrado, Rodolpho, Lucas, Yago, Hully, Priscila e Sidineidy, foi muito bom estar com vocês durante esse momento da minha vida. Sempre divertidas e leves, as suas presenças preenchiam o tempo em laboratório. Sucesso a cada um!

Minha gratidão à empresa Arcelor Mittal Tubarão, pelo apoio financeiro, por investir e acreditar na pesquisa e procurar o melhor caminho para seus produtos, além do fornecimento do material, objeto de estudo.

Agradeço ao meu coorientador, professor Dr. Patrício, por se dedicar à ampliação do nosso laboratório de Geotecnia e Pavimentação na UFES, abrindo mão, por vezes, de seus momentos pessoais para resolver questões burocráticas na implementação de projetos que promovem o

crescimento da pesquisa. À minha orientadora, professora Ph.D Jamilla, por mostrar caminhos e apresentar soluções, sempre com afetividade e compreensão de quem vê o outro com empatia e respeito. Pela dedicação em revisar sempre cuidadosamente toda produção, também conciliando com seu tempo em família para o cumprimento de prazos.

Aos meus queridos amigos e familiares, cujos inúmeros nomes não me atrevera citar, obrigada por serem tão queridos e amáveis, por estarem sempre por perto ou alcance de uma mensagem, por serem personagens nos melhores momentos da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Wallace e Gessi, que têm parte em tudo o que sou e faço. Por nunca terem estabelecido limite para as minhas realizações; ao contrário, sendo sempre trampolim para o próximo pulo. Por fazerem de mim o projeto de suas vidas. Por serem amor e colo.

“Eis que estou convosco todos os dias, até o fim dos tempos” (Mt 28:20). E tenho certeza de que Ele sempre esteve, mesmo nos dias difíceis. Obrigada, Deus, pela oportunidade, pelo trabalho e por colocar no meu caminho todas as vidas acima.

*“Aprender é a única coisa de que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e nunca
se arrepende.”*

Albert Schweitzer

RESUMO

A implementação de pavimentos rodoviários é uma prática que requer grande exploração de recursos naturais. Qualquer possibilidade de substituir material requerido nesse processo merece atenção, sobretudo, se isso também for solução para outra questão: destino de produtos industriais intermediários. Nessa linha, a indústria siderúrgica se apresenta como uma ótima opção no fornecimento de agregados oriundos de diversas etapas do processo de fabricação do aço. Dentre elas, escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA) e de aciaria (LD) são destaques para uso em pavimento asfáltico devido às suas características favoráveis como estabilidade, resistência à abrasão e de forma. A LD tem um fator limitante à sua implementação, que é a tendência à expansão volumétrica desse coproduto quando em contato com umidade e calor. Contudo, ela apresenta excelente recobrimento pelo ligante asfáltico. Contrariamente, a escória de alto forno não possui boa adesividade ao material betuminoso quando submetida a um teste usual de adesividade. A fim de verificar os mecanismos de adesividade ligante-escória e compreender quais características dos agregados colaboram para uma melhor adesão a ligantes asfálticos, neste estudo foi realizada a caracterização de forma, termodinâmica e química em amostras de EFRA e LD. Verificou-se que a LD possui características favoráveis à boa adesividade ao ligante em relação à EFRA, tais como energia livre de superfície superior, baixo teor de sílica e alto teor de ferro, pH mais básico, além de melhor resistência à abrasão, dureza e maior módulo de elasticidade. A fim de verificar o desempenho dos dois agregados siderúrgicos em misturas asfálticas, procedeu-se com testes mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, de resistência à tração por compressão diametral e de dano devido à umidade induzida realizado em misturas asfálticas com substituição parcial de 25% ao agregado natural por coprodutos (EFRA ou LD). Mais ainda, a mistura com EFRA foi dosada adicionando 1,5% de aditivo para melhoria da adesividade, sendo eles cal hidratada, pó *Flue Gas Desulfurization* e pó *Electrostatic Precipitator* (ambos também produtos intermediários do processo siderúrgico, cujas composições químicas são ricas em cálcio e ferro, respectivamente) e pó de agregado natural. Mesmo com a melhoria que os aditivos proporcionaram em relação à mistura de EFRA sem aditivo, o desempenho da LD foi mais satisfatório que o das misturas contendo EFRA. Tendo em vista apenas as misturas com EFRA, foi possível notar relação de melhoria no grupo com adição de cal e de pó EP, principalmente. Apesar disso, a EFRA não deve ser descartada, pois se apresenta melhor que o agregado natural em muitos aspectos.

Palavras-chave: Escória de alto forno, escória de aciaria, adesividade, dano à umidade, misturas asfálticas.

ABSTRACT

The implementation of road pavements is a practice that requires great exploitation of natural resources. Any possibility of replacing material required in this process deserves attention, especially if this is also a solution for another issue: destination of intermediate industrial products. In this line, a steel industry presents itself as a great option in the supply of aggregates from different stages of the steelmaking process. Among them, the air-cooled blast furnace slag (ACBFS or EFRA) and steel slag (LD) are highlights for use in the asphalt pavement due to its favorable characteristics such as resistance, abrasion resistance and shape. LD has a limiting factor to its implementation, which is a tendency for the volumetric expansion of this co-product when in contact with humidity and heat. However, it shows excellent recovery by asphalt binder. On the other hand, blast furnace slag does not have good adhesion to the bituminous material when subjected to a usual adhesion test. In order to verify the adhesion mechanisms and understand which characteristics of the aggregates collaborate for a better adhesion to asphalt binders, in this study a characterization of form, thermodynamics and chemistry was carried out in EFRA and LD tests. It was found that LD has favorable characteristics to good adhesion to the binder in relation to EFRA, such as higher surface free energy, low silica content and high iron content, more basic pH, in addition to better resistance to abrasion, hardness and greater modulus of elasticity. In order to verify the performance of the two steel aggregates in asphalt mixtures, Marshall stability and creep test, diametral compression tensile strength and damage by inhaled moisture carried out in asphalt mixtures with partial replacement of 25% at natural aggregate by co-products (EFRA or LD). Furthermore, the mixture with EFRA was dosed by adding 1.5% additive to improve adhesion, being hydrated lime, Flue Gas Desulfurization powder and Electrostatic Precipitator powder (both also intermediate products of the steelmaking process, whose chemical compositions are rich in calcium and iron, respectively) and natural aggregate powder. Even with the improvement that the additives provided in relation to the mixture of EFRA without additive, the LD performance was more satisfactory than that of mixtures containing EFRA. Considering only the mixtures with EFRA, it was possible to notice an improvement relationship in the group with the addition of lime and EP powder, mainly. Despite this, EFRA should not be discarded, as it is better than the natural aggregate in many ways.

Keywords: Blast furnace slag, steel slag, adhesiveness, moisture damage, asphalt mixture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção da escória no Alto forno	28
Figura 2 - Formação da escória na aciaria	29
Figura 3 - Processo siderúrgico simplificado	29
Figura 4 - Superfície do agregado silicoso em contato com a água	31
Figura 5 - Teor de silício em alguns tipos de rocha.....	32
Figura 6 - Representação esquemática da massa asfáltica fora de escala	39
Figura 7 - Representação esquemática do deslocamento filme ligante em agregado. Fora de escala.	43
Figura 8 - Matriz dos materiais utilizados	47
Figura 9 - Matriz experimental de caracterização dos materiais	48
Figura 10 - Matriz experimental em misturas asfálticas.....	48
Figura 11 - Curva de Viscosidade do CAP 50/70 utilizado	50
Figura 12 - Coleta dos agregados naturais na pedreira Brasitália	51
Figura 13 - Tipos de agregados naturais utilizados	51
Figura 14 - Escórias (a) EFRA e (b) LD.	52
Figura 15 - Aditivos.....	53
Figura 16 - (a) Máquina Los Angeles; (b) Agregados com carga abrasiva e (c) Medição de massa de carga	57
Figura 17 - Esquema do ensaio NBR 12583 (ABNT, 2017) (a) Peneiramento e secagem dos agregados, (b) Amostras secas, (c) Mistura entre ligante e agregados, (d) Submersão da mistura em água destilada e (e) Mistura vertida em cerâmica	59
Figura 18 - Propriedades de forma do agregado	61
Figura 19 - Variação de textura superficial do agregado graúdo	61
Figura 20 - Variação de forma do agregado miúdo.....	62
Figura 21 - Variação para angularidade dos agregados graúdos e miúdos	62
Figura 22 - Equipamento AIMS com as amostras de agregados.....	62
Figura 23 - Exemplo de imagem topográfica de agregado obtida pelo LSM	65
Figura 24 - Amostras de (a) EFRA e (b) LD sendo coletadas e (c) extraídas para os ensaios de análise de superfície.....	66
Figura 25 - Componentes da Energia de Superfície de uma gota sobre um sólidoz.....	67
Figura 26 - (a) Goniômetro Ramé-Hart; (b) Gota visto pelo programa; (c) Amostra posicionada para ensaio	69

Figura 27 - Amostra ensaiada com CAP 50/710 sob aquecimento	69
Figura 28 - Esquema de varredura de uma amostra no AFM.....	72
Figura 29 - Gráfico força x distância com destaque para o Trabalho da Adesão.....	72
Figura 30 - Equipamentos para ensaio AFM - (a) Microscópio de Força Atômica (b) Amostra de EFRA posicionada (c) Idem b (d) CAP sendo ensaiado para aderir à ponta (e) Ponta com ligante ao Microscópio Eletrônico (f) Amostra sendo ensaiada por varredura	74
Figura 31 - Esquema de difração do feixe e interferência construtiva	75
Figura 32 - Difratoograma de um agregado natural de concreto.....	76
Figura 33 - Dosagem Marshall para mistura com 25% de EFRA.....	79
Figura 34 - Etapas da Dosagem Marshall: (a) Aquecimento dos agregados, (b) Pesagem CAP, (c) Mistura, (d) Mistura pronta para ir à estufa, (e) Colocação mistura no molde, (f) Compactação Marshall, (g) Identificação dos CP's, (h) CP's aguardando desmolde e (i) CP's desmoldados	80
Figura 35 - Misturas asfálticas propostas com aditivos.....	81
Figura 36 - Aparelho para determinação da Estabilidade e Fluência Marshall.....	83
Figura 37 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	84
Figura 38 - CP's produzidos para ensaio de dano à umidade.....	85
Figura 39 - Esquema do condicionamento para o Dano à Umidade - Saturação, congelamento, banho térmico e rompimento por tração.....	86
Figura 40 - Ensaio Dano à Umidade desenvolvido em laboratório: (a) Saturação dos CP's, (b) CP's embalados com plástico filme, (c) Processo de embalagem dos CP's, (d) CP's no freezer, (e) CP's no banho térmico, (f) Banho a 25°C antes do rompimento, (g) Medição de altura e diâmetro, (h) Rompimento no aparato de tração por compressão e (i) CP's rompidos	86
Figura 41 - Curva granulométrica dos agregados naturais, EFRA e LD.....	90
Figura 42 - Ensaio de adesividade nos agregados a) EFRA e b) LD	91
Figura 43 - Ensaio de adesividade de EFRA (a) sem fíler e recoberta preliminarmente com 1.5% de (b) cal hidratada, (c) pó FGD e (d) pó EP.....	92
Figura 44 - Módulo de elasticidade x frequência	94
Figura 45 - Gráfico dureza x frequência.....	94
Figura 46 - Ensaio adesividade para EFRA e LD em diferentes frações	98
Figura 47 - Imagem de (a) EFRA, (b) LD e (c) Agregado natural no microscópio de varredura a laser.....	99
Figura 48 - Resultado de microscopia de varredura a laser para EFRA, LD e agregado natural	100

Figura 49 - Gotas sobre as amostras de EFRA e LD.....	101
Figura 50 - Imagem do cálculo da energia de superfície pelo DROPImage software para (a) EFRA e (b) LD	102
Figura 51 - Gotas de CAP depositados sobre EFRA e LD.....	103
Figura 52 - Mapas de varredura para EFRA.....	104
Figura 53 - Mapas de varredura para LD	105
Figura 54 - Representação dos Mapas 1 – (a) EFRA sem ligante, (b) EFRA com ligante; Mapas 2 – (c) EFRA sem ligante, (d) EFRA com ligante; Mapas 3 – (e) EFRA sem ligante, (f) EFRA com ligante	106
Figura 55 - Representação dos Mapas 1 – (a) LD sem ligante, (b) LD com ligante; Mapas 2 – (c) LD sem ligante, (d) LD com ligante; Mapas 3 – (e) LD sem ligante, (f) LD com ligante	107
Figura 56 - Trabalho da força de adesão nas três regiões: (a) EFRA e (b) LD	108
Figura 57 - Gráfico força x distância para mapa 1 com ligante (destaque para as distâncias) - a) EFRA e b) LD	109
Figura 58 - Difratoograma EFRA.....	110
Figura 59 - Difratoograma LD.....	110
Figura 60 - Curva granulométrica da composição na Faixa C	115
Figura 61 - Curva VV x RBV para dosagem da EFRA	116
Figura 62 - Gráfico de Estabilidade Marshall	120
Figura 63 - Gráfico para Tração por Compressão Diametral	124
Figura 64 - Resultado de RTCD e RRT no DUI	127
Figura 65 - CP's DUI rompidos. (a) 25%ACBFS_s/aditivo; (b) 25%ACBFS_Cal e (c) 25%ACBFS_FGD	129
Figura 66 - CP's DUI rompidos. (a) 25%ACBFS_EP; (b) 25%ACBFS_AN e (c) 25%LD ..	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos da siderurgia brasileira no ano de 2018.....	25
Tabela 2 - Composição química comparativa entre EFRA, cimento e clínquer	33
Tabela 3 - Composição química LD, rochas granítica e calcária	36
Tabela 4 - Especificações do CAP 50/70 utilizado na pesquisa.....	49
Tabela 5 - Número de partículas analisadas no AIMS para a EFRA	63
Tabela 6 - Número de partículas analisadas no AIMS para a LD	63
Tabela 7 - Classificação proposta por Al Rousan (2004).....	64
Tabela 8 - Classificação proposta por Ibiapina (2018).....	64
Tabela 9 - Granulometria conforme norma para camadas asfálticas	78
Tabela 10 - Parâmetros CP's para DIU	87
Tabela 11 - Caracterização EFRA, LD e agregado natural	88
Tabela 12 - Massa específica e pH dos aditivos.....	93
Tabela 13 - Valores dos picos para módulo de elasticidade dos coprodutos	95
Tabela 14 - Classificação dos agregados de EFRA e LD.....	96
Tabela 15 - Valores de Ângulo de Contato	101
Tabela 16 - Energia de superfície das escórias em ergs/cm ²	102
Tabela 17 - Valores de referência de ângulo de contato (°)	102
Tabela 18 - Composição mineralógica dos agregados	111
Tabela 19 - Resultados FRX da EFRA e LD	112
Tabela 20 - Resultados FRX dos aditivos	113
Tabela 21 - Parâmetros para misturas dos ensaios mecânicos	117
Tabela 22 – CP's para Estabilidade e Fluência Marshall	118
Tabela 23 - CP's para Tração por Compressão Diametral	119
Tabela 24 - Resultados para Estabilidade e Fluência Marshall.....	120
Tabela 25 - Resultados para Tração por Compressão Diametral	123
Tabela 26 - Valores de RTCD para CP's do DUI.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AN	Agregado Natural
B0	Brita 0
B1	Brita 1
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DUI	Dano à Umidade Induzida
EFRA	Escória de alto forno resfriada ao ar
EP	<i>Electrostatic Precipitator</i>
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
PP	Pó de Pedra
RBV	Relação Betume-Vazios
RRT	Razão de Resistência à Tração Retida
RT	Resistência à Tração
RTCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
US	<i>United States</i>
VV	Volume de Vazios

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Geral	23
1.2.2. Específicos	23
1.3. Estrutura da Dissertação	24

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Produção de Resíduos e Coprodutos na Siderurgia	25
2.2. Formação das Escórias no Processo Siderúrgico.....	26
2.3. Influência dos Agregados na Adesividade Ligante-Agregado	30
2.4. Escória de Alto Forno	32
2.4.1. Escória de Alto Forno na Pavimentação.....	34
2.5. Escória de Aciaria	36
2.5.1. Escória de Aciaria na Pavimentação	37
2.6. Adesividade	38
2.6.1. Teorias da Adesão Agregado-Ligante	40
2.6.2. Mecanismos de perda de adesividade macroscópicos.....	42
2.6.3. Avaliação de Adesividade e de Dano por Umidade	44
2.6.4. Melhoradores de Adesividade	44

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. Materiais	49
3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo.....	49
3.1.2. Agregados Naturais (AN).....	50
3.1.3. Escórias EFRA e LD	51
3.1.4. Aditivos	52
3.2. Métodos	55
3.2.1. Caracterização dos Materiais.....	55
3.2.2. Caracterização das Misturas Asfálticas	77

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1. Caracterização de Parâmetros Gerais dos Agregados.....	88
4.2. Caracterização Avançada das Escórias EFRA e LD.....	90
4.2.1. Adesividade do ligante ao agregado	91
4.2.2. Caracterização do Módulo de Elasticidade e Dureza	93
4.2.3. Caracterização das Propriedades de Forma	95
4.2.4. Caracterização Termodinâmica	100
4.2.5. Caracterização Química e Mineralógica.....	109
4.3. Caracterização de Misturas Asfálticas	114
4.3.1. Dosagem Marshall das Misturas Asfálticas	114
4.3.2. Preparação de CP's para Ensaio Mecânicos	116
4.3.3. Estabilidade e Fluência Marshall.....	119
4.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral RTCD	122
4.3.5. Dano Devido à Umidade Induzida (DUI).....	125

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES	131
5.1. Sugestões para estudos futuros	134
REFERÊNCIAS	135

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura viária tem papel fundamental no desenvolvimento político e econômico de um país. Para um sistema de transportes eficiente é necessária a implementação de programas de construção de vias adequadas, atendendo às exigências de conforto, segurança e economia. Do ponto de vista construtivo, são necessárias milhões de toneladas de materiais granulares para construção de vias de transporte, aeroportos, ferrovias etc. Fica evidente que a pavimentação reflete o desenvolvimento e trata-se de um dos elementos de infra-estrutura que mais dependem de recursos naturais não renováveis. Em 2014, no Brasil, o consumo de agregado em tonelada/habitante chegou a 2,7 no nordeste; 3,1 no norte; seguido por 4,1 no sudeste e sul e 4,5 no centro-oeste (NASCIMENTO, 2003; JAMSHIDI et al., 2017; ANEPAC, 2019).

Nascimento (2003) enfatiza o alto custo econômico e ambiental que a exploração desses recursos naturais acarreta. Inyim et al.(2016) corroboram ao afirmarem que a exploração desses recursos naturais é responsável por quase 50% da emissão total de gases de efeito estufa (GEE) na construção de pavimentos.

O consumo de bens cresce juntamente com a população mundial, o que demanda desenvolvimento tecnológico e, conseqüentemente, exploração de recursos naturais que afetam o equilíbrio natural do planeta. Os processos industriais de diversos setores que são necessários ao mundo moderno trazem consigo uma enorme carga de resíduos e coprodutos – produtos meio - inerentes a esses processos. A destinação adequada desse material tornou-se indispensável e a conscientização do desenvolvimento de mecanismos capazes de reduzir o impacto que o retorno nesse material ao ambiente pode gerar (LUCAS e BENATTI, 2008).

Estudos desenvolvidos para valorizar e viabilizar a reciclagem de resíduos industriais são uma oportunidade para redução de custos na disposição final, possibilidade de diversificação de produtos e no surgimento de uma nova matéria-prima, que não está limitada apenas ao setor que lhe deu origem, mas que pode ser aplicada em diversas áreas. Com isso, a indústria deixa de dispendir custos para segregar, armazenar e transportar esse material e ele deixa de ser depositado em aterros e lixões, preservando a saúde e segurança da população (SOUZA, 2007).

Pedrosa (2010) destaca as três maneiras de utilização dos resíduos: reuso, reciclagem e recuperação. A primeira delas, também conhecida como reutilização, é o aproveitamento do resíduo de forma que ele passe por pouco ou nenhum tratamento, estando ele basicamente nas condições em que foi descartado. A reciclagem é o processo em que o resíduo retorna ao sistema produtivo como matéria-prima, sendo submetido a um novo processamento. Por último, a recuperação é o processo que pretende segregar do resíduo o material mais valioso.

Tendo em vista as grandes quantidades de matérias-primas e energia despendidas numa indústria siderúrgica, seu impacto ambiental sempre foi importante. O esforço para redução dos impactos ambientais não se limita ao tratamento dos rejeitos e mudança nas rotinas de produção para meios mais eficientes e menos energéticos. As usinas têm se preocupado também em medidas de conservação de energia e dos recursos naturais. A produção do aço dá origem a vários tipos de coprodutos, como escória de alto-forno, o pó de alto-forno, a lama de alto-forno, a escória de dessulfuração, a escória de aciaria, a lama grossa e fina de aciaria e demais resíduos. As escórias são maior parte, totalizando cerca de 60% do total de coprodutos produzidos (GEYER, 2001; PEDROSA, 2010).

Como comentado, o pavimento requer um grande volume de matéria-prima e a inserção desse material residual granular na pavimentação seria uma excelente oportunidade de evitar a exploração de recursos naturais e direcionar o acúmulo desses coprodutos em locais inadequados. Embora internacionalmente vários estudos (Aziz et al., 2014; Bocci, 2018; El-Badawy, Gabr e El-Hakim, 2019; Maharaj et al., 2017; Tarbay, Azam e Badawy, 2019; Wang, 2016) apontem características técnicas viáveis de utilização de escória como agregado em misturas asfálticas, a implantação de agregados siderúrgicos em pavimentos no Brasil ainda não é uma realidade absoluta. Os efeitos desses materiais em associação ao ligante asfáltico ainda não estão completamente definidos. Há dificuldades a serem compreendidos, como a má adesividade ao ligante asfáltico da escória de alto forno resfriada ao ar e a tendência de expansão que a escória de aciaria possui devido ao cálcio e ao magnésio livres, mas que, por outro lado, possui excelente adesividade ao material betuminoso. Entender por que materiais de origem similar têm comportamentos tão diferentes nesse importante parâmetro na pavimentação é a coluna dorsal dessa pesquisa.

1.1. Justificativa

Compreendendo que a economia circular é uma necessidade dos dias atuais, utilizar apenas recursos naturais finitos para pavimentação de uma estrada, por exemplo, é visto como um desperdício. Substituir os recursos naturais por coprodutos industriais é benéfico, visto que é uma oportunidade para aplicar grandes volumes de resíduos e/ou subprodutos e reduzir o impacto ambiental. Os subprodutos industriais são fontes alternativas de agregados para a produção de misturas asfálticas. Possuem propriedades físicas semelhantes ao agregado natural, composição química similar ao cimento Portland e podem ser beneficiados para permitir o seu uso (DAS et al., 2007; AHMED, 1993; AIREY, THOM e COLLOP, 2004).

Dentre os subprodutos industriais, aqueles provenientes da indústria siderúrgica têm sido cada vez mais estudados e empregados nas diversas camadas de pavimento. Destacam-se, neste trabalho, o uso de escórias de alto forno resfriadas ao ar (EFRA), na literatura internacional referida como *Air Cooled Blast Furnace Slag* (ACBFS) ou iron slag e a escória de aciaria, Steel Slag ou LD (Linz-Donawitz, relativo ao tipo de refino). A primeira (EFRA) é produto do carbonato de cálcio reduzido em associação ao óxido de silício, além de outros compostos remanescentes do processo de fabricação do ferro gusa, como óxidos de alumínio e de magnésio. A segunda (LD) é composta majoritariamente pelos óxidos de cálcio e de ferro, seguidos pelos de silício, de magnésio e de manganês (RONDÓN-QUINTANA, RUGE-CÁRDENAS e FARIAS, 2019; AZIZ et al., 2014); MOURA et al., 2019).

A escória de alto forno EFRA possui propriedades interessantes à sua inserção como material de pavimentação, como destaca Wang (2016), tais como solidez, resistência à abrasão, alto ângulo de fricção e forma angular, que justificam a sua aplicação. Da mesma forma, a escória de aciaria LD possui características favoráveis à sua aplicação em pavimentos, tais como alta estabilidade, propriedades friccionais promissoras e resistência à decapagem (KIM et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2019).

Os dois coprodutos acima mencionados, EFRA e LD, são produzidos em etapas distintas do processo de fabricação do aço. Primeiramente, têm-se a etapa de alto forno, onde acontece a remoção do oxigênio do minério de ferro, dando origem ao ferro gusa – matéria-prima do aço – e uma parte não metálica, denominada escória de alto forno. Esta pode ser resfriada lentamente ao ar ou, de forma brusca, com água. Esse último método, apesar de custar mais à siderurgia, propicia à escória características mineralógicas de interesse da indústria cimenteira, que a consome rapidamente para produção do cimento de escória. Se, por alguma razão, a

indústria cimenteira não for capaz ou não se interessar em absorver esse produto, esse procedimento de resfriamento deixa de ser economicamente viável, e a escória de alto forno passa a ser resfriada ao ar, o que resulta em um maior volume de EFRA não absorvido por outras indústrias. Dessa forma, as indústrias siderúrgicas têm interesse de verificar outras aplicações para este material. Uma alternativa é o uso de EFRA em camadas de revestimento de pavimento flexíveis.

Considerando que o estado do Espírito Santo é um dos maiores produtores nacionais de aço, tendo produzido 7 milhões de toneladas de aço bruto em 2016, segundo Morandi et al. (2017), verifica-se a necessidade de estudos que apontem por alternativas de uso para a EFRA com vistas à garantir seu bom desempenho em misturas asfálticas, principalmente em relação às características de adesividade na matriz betuminosa.

No caso da escória de aciaria LD, Loures et al. (2018) comentam que o agregado siderúrgico já é utilizado em outros países desde 1979 em infraestrutura de estradas; o que só passou a acontecer no Brasil em 1986. Contudo, registros de problemas referentes a capacidade expansiva desse agregado em pavimentos minimizaram o uso deste material em pavimentação. Contudo, as características expansivas desta escória podem ser diminuídas através de processos de cura, resultando na estabilização de seus óxidos e viabilizando seu uso na pavimentação asfáltica. A tendência à expansão do coproduto LD não é o foco desse trabalho, mas pode ser elucidado pelos trabalhos de Teixeira et al. (2019) e Izoton et al. (2019).

Com o objetivo de avaliar a viabilidade de uso das escórias como agregados em misturas asfálticas, amostras de EFRA e LD foram ensaiadas para verificação de critérios de aplicação em concreto asfáltico previstos na norma DNIT 031/2006. Constatou-se que a EFRA fornecida pela empresa Arcelor Mittal Tubarão não atendia no requisito da adesividade com o ligante betuminoso, diferentemente do que ocorreu com a LD, que apresentou excelente recobrimento betuminoso.

A fim de entender as causas da má adesividade de uma escória em relação à outra, procuraram-se ensaios não convencionais e avançados para a qualificação e quantificação dos mecanismos de adesão ligante-escória segundo aspectos físicos, químicos e termodinâmicos. A adesão é a capacidade do agregado de ser envolvido pelo ligante, geralmente devido à interação química, à adesão física e ao intertravamento mecânico – ou uma junção desses. Uma boa adesão ligante-agregado é fundamental para se evitar os danos por fadiga e por umidade (HOU et al., 2018; VASCONCELOS et al., 2008). Trincas nessa interface são indicativos de baixa adesividade entre os compostos da matriz betuminosa. A interação entre ligante e agregado é muito mais influenciada pela química do agregado que pela do ligante, no que diz respeito à

adesão entre eles e ao dano à umidade, pois um mesmo agregado pode apresentar variação na adesividade devido às diferenças na composição química dos agregados, que definem as forças de interação formadas com o ligante (CURTIS, ENSLEY e EPPS, 1993; ZHANG et al., 2015; AGUIAR-MOYA et al., 2016).

No aspecto químico, as escórias se diferenciam consideravelmente em relação às porcentagens de óxidos de SiO_2 e Fe_2O_3 : esses dois óxidos desempenham um papel importante em relação à adesão entre o ligante asfáltico e o agregado de escória segundo os trabalhos de Cala et al. (2019a; 2019b). Agregados que são negativamente carregados em presença de água, como é o caso dos agregados silicosos, possuem baixa adesividade ao ligante asfáltico (que, assim como esses agregados, também é de caráter ácido). Paralelamente a isso, aqueles que possuem carga positiva quando em meio aquoso, apresentando compostos como cálcio, magnésio, ferro e alumínio têm grande afinidade ao ligante (BERNUCCI et al., 2008). Corroborando com isso, os trabalhos de Little e Jones (2003) e Bhasin (2006) citam que terrel (1995) concluiu que os elementos supracitados estão relacionados a uma boa ligação agregado-ligante.

Além do aspecto químico, as características termodinâmicas dos agregados devem ser consideradas. As interações coesivas (dentro do próprio ligante asfáltico) e adesivas (na interface ligante-agregado) estão relacionadas à energia de superfície dos materiais componentes. Essa energia de superfície pode ser usada para medir o trabalho da força adesiva entre os materiais. As alterações termodinâmicas na energia superficial estão relacionadas com a desassociação dos materiais e, conseqüentemente, com as trincas na matriz (BHASIN, A.; LITTLE, 2009; CHENG et al., 2002).

Nos trabalhos de Zaidi et al. (2019) e Howson et al. (2011), os autores apresentam os valores das componentes de energias de superfície e seus valores totais para agregados de diferentes mineralogias. O primeiro traz essas informações para agregados granítico e calcário e o segundo para agregados granítico e basáltico. Em ambos os casos, a notória diferença dos valores entre as componentes ácida e básica e do valor total pode ser devida ao fato da considerável diferença na constituição química desses agregados. Isso é importante a partir da consideração de que agregados de origem granítica, em geral, possuem má adesividade, enquanto os calcários são mais facilmente recobertos.

Embora as propriedades físicas do agregado, tais como rugosidade e área superficial, influenciem na adesão do sistema ligante-agregado, segundo Yoon e Tarrer (1988), não há uma forte correlação entre esses parâmetros com a adesão do conjunto. Os autores concluem que são as propriedades químicas e eletroquímicas realmente determinantes para a

adesividade na matriz betuminosa. Isso porque a contribuição da rugosidade e da área superficial está vinculada aos aspectos químicos e termodinâmicos da superfície, visto que esses aspectos se manifestarão por meio da área superficial.

Assim, fica clara que a interação ligante-agregado está diretamente relacionada às características químicas e termodinâmicas de pequena escala. Portanto, a compreensão da inter-relação de propriedades microestruturais, mineralógicas e químicas de escórias é essencial para uma definição adequada de sua utilização.

Dessa forma, este trabalho visa a avaliar por meio de metodologias distintas de análise de superfície, as forças de adesão do sistema ligante-escória, de forma a compreender melhor os mecanismos de adesão entre estes materiais e verificar, dentre diferentes escórias do processo siderúrgico, as principais diferenças que podem afetar o desempenho destas em misturas asfálticas, levando em conta seus aspectos físicos, termodinâmicos e composição química.

No caso das misturas asfálticas, Teixeira et al. (2019) apresenta os resultados de propriedades mecânicas para uma substituição parcial de agregados naturais por LD de 25%. O presente trabalho procederá da mesma forma para a EFRA, além de realizar o ensaio de dano à umidade para ambas as escórias em misturas contendo 25% de coprodutos em substituição ao agregado natural. Por meio dos resultados, deseja-se elucidar as seguintes questões:

- Os agregados de EFRA e de LD cumprem os requisitos da norma DNIT 031/2006 que prevê critérios para agregados de pavimentos asfálticos flexíveis?
- Quais características da LD conferem a ela uma adesividade tão superior à da EFRA observada nos testes simples de adesividade?
- A EFRA pode ser considerada como agregado para produção de misturas asfálticas com o utilização de aditivos para melhoramento da adesividade tendo em vista o seu desempenho mecânico?
- O ensaio de dano à umidade é capaz de avaliar as diferenças de adesividade observadas nos ensaios preliminares entre EFRA e LD puros? As misturas com aditivos podem ter melhor desempenho nesse ensaio? Que aditivo seria recomendado neste caso?
- O teor de EFRA com 25% está adequado para conferir à mistura bom desempenho mecânico e de resistência à umidade?

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho e a viabilidade técnica da aplicação dos coprodutos EFRA e LD em concreto asfáltico denso usinado a quente quando substituindo parcialmente o agregado convencional.

1.2.2. Específicos

Para alcançar os objetivos gerais propostos, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Avaliar o efeito da forma da EFRA e LD na adesividade por meio do ensaio de *Aggregate Image Measurement System* (AIMS).
- Avaliar a adesividade ligante-EFRA e ligante-LD por meio de ensaio de superfície do Ângulo de Contato e Microscopia de Força Atômica.
- Avaliar o efeito das características mineralógicas e químicas da EFRA e LD na adesividade por meio de ensaios de Difração e Fluorescência de Raio-X.
- Avaliar as propriedades mecânicas das misturas com 25% de EFRA (contendo diferentes aditivos, a saber: cal hidratada, coprodutos FGD e EP e pó de agregado natural) e com 25% de LD, por meio dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Estabilidade e Fluência Marshall.
- Avaliar a adesividade de misturas asfálticas com substituição parcial de EFRA e de LD por meio dos ensaios tradicionais de adesividade para os grãos (adesividade conforme NBR 12583 (ABNT, 2017) e para misturas asfálticas (Dano por Umidade Induzida), inclusive com apreciação da ação dos aditivos nesses parâmetros avaliados para as misturas com EFRA.

1.3. Estrutura da Dissertação

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Contém Introdução, justificativa, objetivos geral 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 de propriedades 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 citadas no trabalho.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Produção de Resíduos e Coprodutos na Siderurgia

O Instituto Aço Brasil fornece dados sobre produção, exportações e importações dos produtos siderúrgicos. Segundo dados dessa instituição consultados em dezembro de 2019, no ano de 2018, o Brasil produziu 34,4 milhões de toneladas de aço bruto, com capacidade instalada para produzir 51,5 milhões de toneladas/ano, sendo os setores da construção civil, automotivo, de bens de capital, de máquinas e equipamentos e de utilidades domésticas e comerciais os principais consumidores. Na

Tabela 1, os diversos produtos finais da indústria siderúrgica no Brasil em dezembro de 2019 e o crescimento da produção em relação ao mesmo período para o ano anterior (a tabela está em 10^3 toneladas) (IAB, 2019). O Brasil ocupa uma posição de destaque quando se trata da produção de aço, sendo o 11º colocado no que diz respeito às exportações diretas no mundo, além de ser o maior produtor da América Latina.

Tabela 1 - Produtos da siderurgia brasileira nos anos de 2018 e 2019

Produtos	Jan/Nov		19/18 (%)	Set/19	Out/19	Novembro		19/18 (%)	Últimos 12 meses
	2019	2018				2019(*)	2018		
Aço bruto	29820	32698	(8,8)	2403	2597	2604	2911	(10,5)	32529
Laminados	20778	22040	(5,7)	1921	1832	1699	2054	(17,3)	22434
Planos	12152	13182	(7,8)	1116	1013	955	1233	(22,5)	13227
Longos	8626	8858	(2,6)	805	819	744	821	(9,4)	9207
Semiacabados para vendas	7965	9022	(11,7)	670	625	799	773	3,4	8860
Placas	7027	8003	(12,2)	561	558	727	693	4,9	7785
Lingotes, blocos e tarugos	938	1019	(7,9)	109	67	72	80	(10,0)	1075
Ferro gusa (usinas integradas)	23940	26216	(8,7)	1914	2118	2171	2345	(7,4)	26379

(*) Dados Preliminares

Fonte: IAB (2019)

26

Apesar dos benefícios econômicos oriundos do setor da siderurgia, deve-se ter atenção aos passivos ambientais gerados por esse setor. A supressão de gás carbônico e escórias dos processos siderúrgicos são alguns dos maiores desafios para a proteção do meio ambiente global e o crescimento sustentável da indústria siderúrgica (FUTATSUKA et al., 2004). A indústria siderúrgica processa enormes quantidades de matéria-prima e, por isso, possui um elevado potencial poluidor. Segundo Nascimento (2003), para cada tonelada de aço produzido, aproximadamente, 700 quilogramas de efluentes, emissões e resíduos são produzidos. Tuncel e Pekmezci (2018) comentam que reutilizar subprodutos como cinzas volantes e escórias fazem a diferença no que diz respeito à sustentabilidade e à eficiência energética.

A reutilização de resíduos e coprodutos siderúrgicos - como a escória, poeira e lama de alto forno; poeira, lama e escória de aciaria, resíduo de laminação, entre outros - é relevante, pois eles são compostos de materiais e metais de valor agregado (DAS et al., 2007). As escórias são maior parte, totalizando cerca de 60% do total de subprodutos produzidos (PEDROSA, 2010). Além desses, para a presente pesquisa, destacam-se ainda a produção de dois tipos coprodutos em forma de pó. O primeiro é o chamado FGD (*Flue Gas Desulfurization*), proveniente do processo de redução do teor de enxofre dos gases liberados devido à queima do

carvão mineral na coqueificação, um dos primeiros processos na siderurgia (VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2018). O segundo, o pó EP, proveniente do precipitador eletrostático, cuja função é retirar as impurezas das emissões para que sejam liberadas na atmosfera.

Estudos realizados no Brasil e em outros países mostram a viabilidade de uso de coprodutos na construção civil, pavimentação, indústria cerâmica, agricultura, fabricação de cimento e concreto (IAB, 2019).

2.2. Formação das Escórias no Processo Siderúrgico

27

Segundo Pedrosa (2010), muitos dos materiais que fazem parte do dia-a-dia das pessoas e que são conhecidos como metais, são, em sua maioria, ligas metálicas. Essas são produto da união entre dois ou mais elementos em que, pelo menos um seja metálico, e o produto resultante tenha propriedades metálicas. O aço é uma liga metálica formada, principalmente, por ferro e carbono (numa porcentagem 0,008% a 2,11%), além de outros elementos secundários, como cálcio, silício, manganês, enxofre, que são acrescentados durante o processo de produção, conforme a necessidade do cliente. As propriedades de um metal são facilmente reconhecidas por suas características próprias e marcantes, como brilho, boas condutividades elétrica e térmica, ductibilidade. Consequentemente, o aço tem valor comercial devido à demanda decorrente de vários setores e conta com matéria-prima encontrada em abundância.

A produção do aço pode acontecer por três grandes processos, conforme explicam Castelo Branco (2004) e Pedrosa (2010), dependendo do tipo de refino:

- LD (*Linz-Donawitz*) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*), que faz uso do conversor a oxigênio, dispensando a necessidade de fonte de calor externa;
- Elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*), que utiliza forno de arco elétrico;
- OH (*Open Heart*), que utiliza forno Siemens-Martin.

Segundo Geyer (2001), os dois processos mais utilizados para produção de aço no Brasil e no mundo são por meio do refino do ferro gusa líquido em convertedores a oxigênio (aciarias LD) e por meio da fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco (aciarias elétricas).

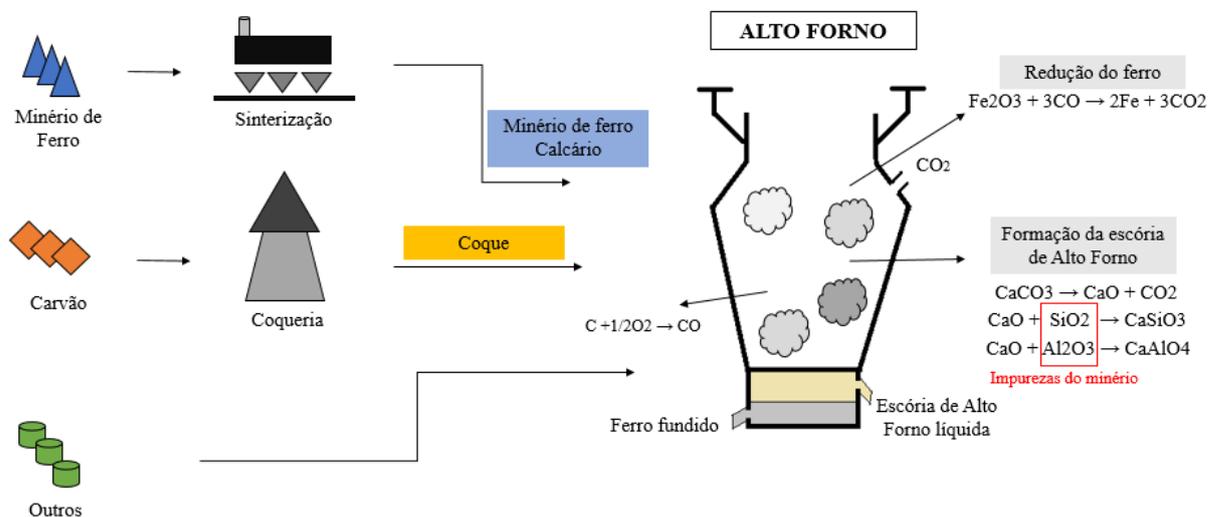
Dado o fato de que o presente trabalho visa ao estudo de escórias fornecidas pela Arcelor Mittal Tubarão, o processo em discussão será o LD (*Linz-Donawitz*), visto que o conversor de oxigênio é utilizado pela empresa. Nesse processo não se faz necessária fonte externa de calor.

Na coqueria é que se inicia o processo siderúrgico. É o local onde o carvão mineral é destilado para a produção do coque que será utilizado em duas funções: redutor de óxidos do ferro – no alto forno, deixando o ferro livre - e fonte térmica do processo, visto que, como

combustível, permite alcançar uma temperatura de cerca de 1500°C (OLIVEIRA, 2011 e IAB, 2019).

O alto forno é um reator metalúrgico do qual se obtém o ferro gusa, matéria-prima para a produção do aço por meio da retirada do oxigênio do ferro para que ele se ligue ao carbono. Para tanto, ele é abastecido de alguns materiais como pelotas de minério, minério de ferro puro, coque, sinter (que é um aglomerado a quente de minério fino com calcário e rejeitos internos do processo) e reguladores do processo (Figura 1). O carbono oxidado dá origem ao CO, responsável pela redução do óxido de ferro, formando ferro metálico e dióxido de carbono. Nessa etapa, além do ferro gusa, gera-se também a escória de alto forno (cerca de 200 a 400 kg por tonelada de ferro gusa produzido), produto da associação – principalmente - dos óxidos de cálcio, de silício (proveniente do minério de ferro), de alumínio e de magnésio com alto teores de impureza e carbono (OLIVEIRA, 2011; IAB, 2019; PEDROSA, 2010; ZETTERMANN, 2001; ROMEIRO, 1997; PREZOTTI e MARTINS, 2012; PROCTOR et al., 2000; DAS et al., 2007; JAMSHIDI et al., 2017).

Figura 1 - Produção da escória no Alto forno

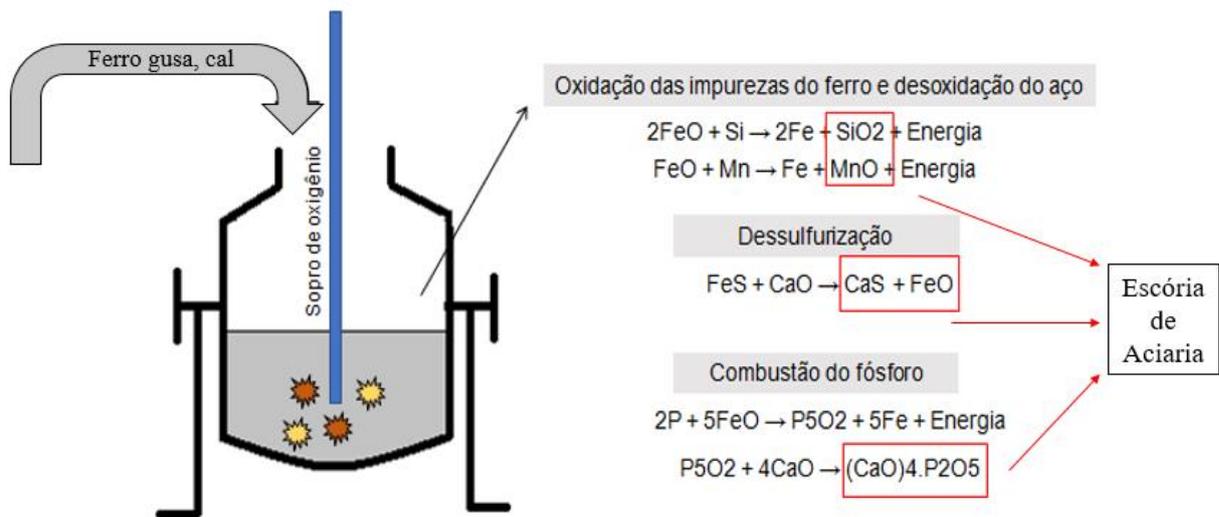


Fonte: Autora

Na aciaria LD (Figura 2), o ferro gusa líquido previamente tratado para retirada do enxofre é despejado no convertedor, juntamente com pequenas quantidades de sucata e, com o objetivo de reduzir os teores de carbono e impurezas, ele é submetido a um banho metálico por meio de um sopro de oxigênio a alta pressão para oxidação dos componentes do gusa, como silício, fósforo e ferro. Após a fusão do metal, cal é adicionada para, juntamente com o oxigênio, eliminar elementos indesejáveis no aço, como carbono, silício e fósforo. Um dos principais

objetivos no refino que acontece no convertedor é a formação rápida de uma escória rica em óxido de cálcio, de forma que evite o ataque do revestimento refratário e acelere as reações de desfosforação e dessulfuração. Óxidos de ferro, silício, fósforo e manganês associados ao óxido de cálcio formam a escória de aciaria - a uma taxa de 120 kg por tonelada de aço bruto -, que se separa do aço líquido no convertedor pela diferença de densidade (IAB, 2019; NASCIMENTO, 2003; POLESE et al., 2006; ROMEIRO, 1997; SHI, 2004).

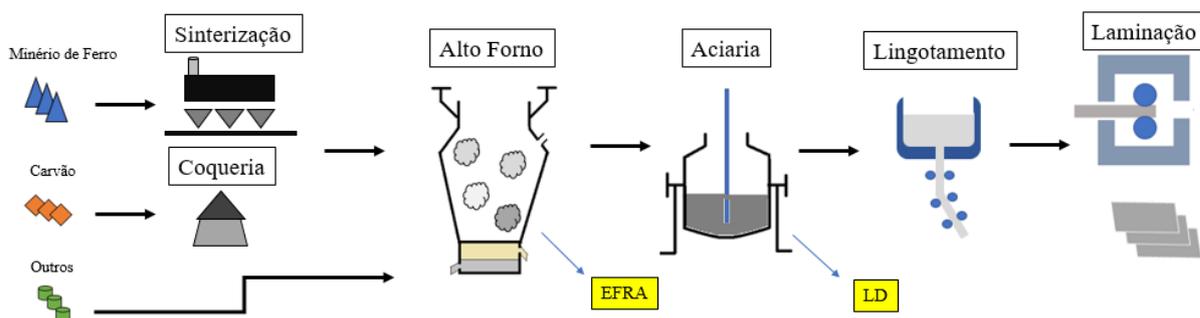
Figura 2 - Formação da escória na aciaria



Fonte: Autora

Posteriormente, tem-se o refino, onde é feito balanceamento das propriedades químicas e físicas do aço, conforme o especificado - inclusive com adequação da temperatura - e, por fim, o lingotamento contínuo, onde o aço líquido é transformado em barras por meio de um molde num processo de resfriamento controlado. Há a possibilidade de laminar a barra de aço no laminador de tiras a quente, onde ele é passado diversas vezes entre dois cilindros metálicos para redução de sua espessura. Um resumo do processo é apresentado na Figura 3, destacando os coprodutos EFRA e LD gerados no processo (CASTELO BRANCO, 2004; OLIVEIRA, 2011; IAB, 2019).

Figura 3 - Processo siderúrgico simplificado



Fonte: Autora, baseado em IAB (2019)

30

Os coprodutos siderúrgicos destacados (EFRA e LD) têm propriedades físicas semelhantes às de agregados naturais convencionais, sendo possível processá-los em tamanhos práticos para facilitar a aplicação como agregados em camadas de sub-base, base e revestimento de pavimentos (AIREY, THOM e COLLOP, 2004).

2.3. Influência dos Agregados na Adesividade Ligante-Agregado

O afastamento das áreas de consumo que a crescente urbanização gera aliado ao rígido controle ambiental têm levado ao encarecimento dos agregados naturais, devido a um processo de produção mais oneroso (SILVA, 2010).

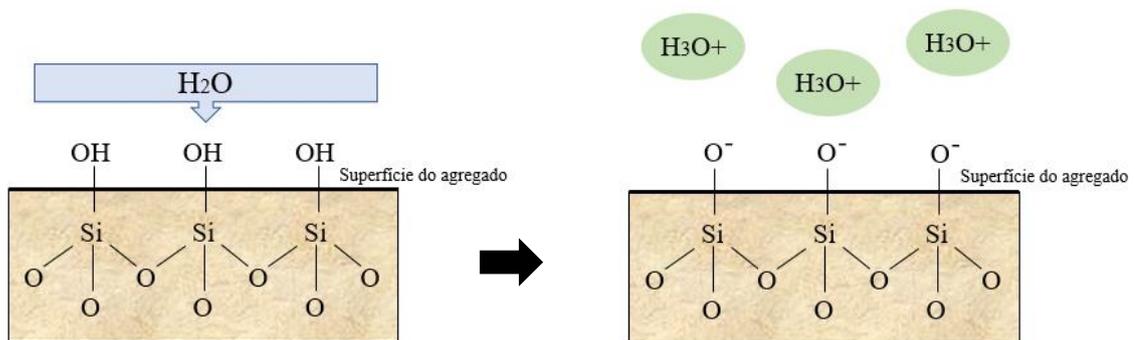
Segundo Bernucci et al. (2008), os agregados de origem natural são compostos por diversos minerais em uma rede cristalina. Ainda que a mineralogia de um certo agregado seja uniforme, fatores como oxidação, intemperismo e lixiviação podem alterar o seu comportamento. Ainda segundo os autores, os átomos da superfície dos agregados têm importância na adesividade, pois interagem com as substâncias do exterior pela adsorção química e ela é o principal fator de influência na adesividade.

Quando a adesividade é o parâmetro analisado, o efeito do ligante betuminoso é menos significativo que os efeitos dos agregados nessa interação, sobretudo graças aos minerais que os constituem. Isso foi concluído por Zhang et al. (2015) e corroborado por Curtis, Ensley e Epps (1993) e Aguiar-Moya et al. (2016), pois todos convergem para a ideia de que a interação ligante-agregado é mais influenciada pela composição química do agregado e mais: devido à variabilidade de constituição dos agregados, um mesmo tipo de material pode apresentar desempenhos diferentes quando em contato com o cimento asfáltico na avaliação da adesividade (diferenças entre os tipos de granitos e de basaltos, por exemplo).

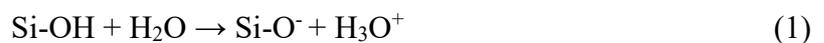
D'Angelo e Anderson (2003) apresentam algumas características do agregado que podem gerar uma baixa adesividade. Os autores afirmam que poeiras, mesmo que do processo de britagem, podem impedir que o ligante entre em contato direto com a superfície do agregado e que a água tenha facilidade de adentrar no espaço intermediário entre agregado e ligante. Além disso, os aspectos físicos da superfície, como rugosidade e porosidade contribuem, mas eles não são autossuficientes para garantir uma boa adesão. O trabalho chama atenção para o alto teor de óxido de silício, que torna o agregado ácido e com má interação com o ligante. Esses agregados, conforme Tarrer e Wagh (1991) possuem boa afinidade com a água e, de maneira geral, baixa resistência ao descolamento do ligante em sua superfície. Isso porque, conforme Figura 4, o grupo silanol polar (Si-OH), presente na superfície dos agregados silicosos, reage com a água e libera o cátion H^+ , tornando a superfície negativamente carregada (O^-) e, portanto, ácida; a Equação 1 mostra essa reação.

31

Figura 4 - Superfície do agregado silicoso em contato com a água



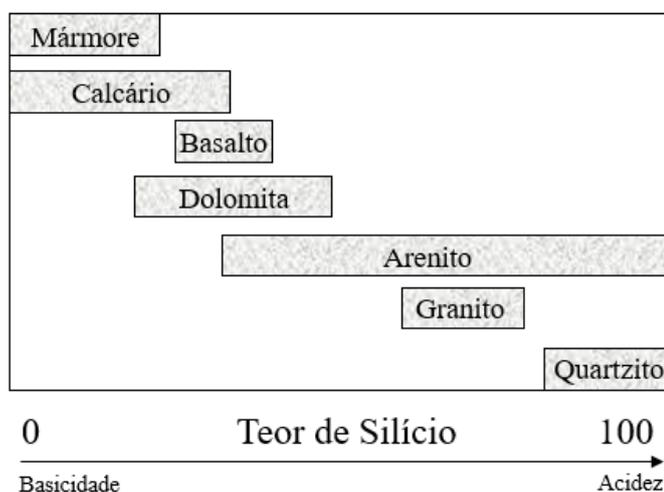
Fonte: Autora, baseado em HARNISH (2010) e HEFER (2004)



No ligante, a molécula de água captura o hidrogênio do ácido carboxílico, tornando o ligante também negativamente carregado e, portanto, com a mesma carga do agregado silicoso. O contrário é observado nos agregados que possuem baixo teor de silício; eles são bem aderidos ao filme ligante e possuem menor afinidade com a água (HARNISH, 2010).

Na Figura 5, está apresentado um comparativo no teor de silício em rochas de origem natural, sendo possível prever o comportamento dessa rocha em contato com o ligante asfáltico. Particularmente, no Estado do Espírito Santo, onde o presente trabalho foi desenvolvido, os agregados naturais são, predominantemente, de origem granítica, ou seja, de baixa qualidade na adesividade ligante-agregado.

Figura 5 - Teor de silício em alguns tipos de rocha



Fonte: Autora, baseado em D'angelo e Anderson (2003)

Tarrer e Wagh (1991) relacionam a mineralogia e composição química do agregado à sua energia de superfície e à sua reatividade química. A energia de superfície do conjunto agregado-ligante depende da energia de superfície de ambos (WEI et al., 2014), mas Peltonen (1992) comenta que a energia de superfície do ligante é 50% menor que a energia de superfície do agregado silicoso e que, conforme o teor de sílica aumenta, a polaridade também cresce e a adesividade diminui.

Os parágrafos acima apresentam justificativas para a atenção que será dada aos agregados siderúrgicos nessa pesquisa para o estudo da adesividade, apresentando as diversas teorias que tentam explicar esse fenômeno posteriormente.

2.4. Escória de Alto Forno

O material que dá origem à escória de alto forno é um líquido viscoso com temperatura aproximada de 1500°C e uma energia térmica de 1700kJ/kg. O processo de resfriamento deste material é fator determinante nas características posteriores. Caso ela seja resfriada ao ar, nas condições ambientais, com redução lenta da temperatura, os cristais têm tempo de se arranjar e formarem uma estrutura, tais como mervinita, melilita, silicato dicálcio, diopsídio etc. Trata-se da escória de alto forno resfriada ao ar (EFRA, como mencionado anteriormente). No resfriamento, ela é colocada em um pátio de resfriamento (*Dry pit* ou “poço seco”, nome comercial dado à EFRA) e em seguida esmagada e dimensionada para se adequar aos diversos

A escória de alto forno, EFRA, possui aplicabilidade como agregado grosso para base e concreto e como matéria-prima para clínquer Portland; até mesmo na agricultura, atuando como o calcário na correção de solo e até suprimindo necessidades minerais dos vegetais. Na Tabela 2, a composição química da escória de alto forno comparada à do cimento Portland e à do clínquer Portland (NIPPON SLAG ASSOCIATION, 1992; DAS et al., 2007).

Tabela 2 - Composição química comparativa entre EFRA, cimento e clínquer

Composição em massa (%)	Cimento Portland	Clínquer Portland	EFRA
SiO ₂	20,91	21,5	37,1
CaO	62,18	66,6	37,4
Al ₂ O ₃	5,82	5,2	9,15
Fe ₂ O ₃	3,4	2,8	1,05
MgO	2,36	1	11,7
SO ₃	2,78	1	0,37
Perda ao fogo	1,38	1,5	2,25
Resíduo insolúvel	1,18	0,5	-

Fonte: Autora, adaptada de DAS et al., 2007

Se o processo de resfriamento do coproduto for brusco, os cristais não têm tempo de se arranjar, e a estrutura resultante é vítrea, a qual apresenta um nível de energia superior quando comparada à cristalina. Para a produção de escória vítrea, há dois processos básicos: a granulação e a pelotização. O primeiro destes se dá quando a escória, ainda líquida, é alcançada por um jato de água – as características daquela dependerão do volume e da pressão de água utilizados. Resulta deste processo um agregado de distribuição granulométrica similar à uma areia de quartzo, utilizada principalmente na produção de cimento com escória. No caso da escória pelotizada, o processo consiste no resfriamento por *air quenching*. Um tambor dentado giratório refrigerado por água fria recebe a escória líquida e arremessa os grãos ao ar, gerando uma maior variação granulométrica e reduzindo o consumo de água em relação ao processo anterior. Este processo ainda não é utilizado no Brasil. Atualmente, a escória granulada de alto forno pode ser usada com segurança para produção de cimento juntamente com o clínquer e com o gesso, visto sua composição semelhante ao clínquer, com baixo teor de ferro e alto teor de óxido de cálcio (AHMED, 1993; DAS et al., 2007; JOHN, 1995; JOHN e AGOPYAN, 2014).

Williams (1977) apresenta algumas propriedades das escória de alto forno resfriada ao ar como a mineralogia, tendo como principal composto a melilita, grupo de minerais – ou soluções sólidas. A densidade é um parâmetro bastante relevante para os agregados e o autor comenta que fração de tamanho menor apresenta uma densidade ligeiramente maior que a fração de granulometria maior para este tipo de escória. Além disto, propriedades físicas podem variar conforme o teor de ferro na escória – quase sempre associado ao aumento da adição de sucata no alto forno. Isso pode ocasionar maiores valores de densidade. Quanto à textura, a EFRA pode apresentar de uma superfície lisa (vítreas com fraturas concoidais) à vesicular – e não porosa –, devido aos canais não-comunicantes que possui, resultantes do espaço ocupado por gases e vapores na ocasião do resfriamento. Geralmente, apresenta forma angular, aproximadamente cúbica, com o mínimo de partículas planas e, segundo o autor, submetida ao intemperismo normal, ela não seria comprometida. A absorção de água desta escória pode chegar a 6%, mas isto não representa o que, de fato, infiltra nos poros da escória, visto que boa parte é acumulada nos poços da superfície deste agregado (FHWA, 2019).

Segundo Rondón-Quintana, Ruge-Cárdenas e Farias (2019), ao submeter a escória de alto forno resfriada ao ar à fratura mecânica para obtenção de partículas mais finas, a densidade aumenta enquanto a absorção diminui e isso se dá devido à heterogeneidade do material e à eliminação parcial dos poros ao reduzir o tamanho da partícula.

Moreira (2006) aponta alguns fatores que afetam as composição química ou as propriedades físicas, geoquímicas e mecânicas da escória, que podem influenciar na sua posterior aplicação. É o caso da matéria-prima que abastece o alto forno, como o minério de ferro e os demais metais utilizados e os fundentes; a eficiência do alto forno; a qualidade do método de resfriamento empregado; o beneficiamento e a estocagem antes e depois do beneficiamento.

2.4.1. Escória de Alto Forno na Pavimentação

Ahmed (1993) afirma tratar-se do segundo material mais desejável em pavimentação de rodovias do ponto de vista técnico; quinto em relação à economia e em perspectiva ambiental naquele ano, em relação a outros materiais como entulho de construção, pneus de borracha e resíduos de vidro. Além disto, Ahmed (1993) também aponta a baixa densidade, a alta estabilidade, a capacidade de estabilização e boa resistência ao intemperismo e à erosão e não corrosivo ao aço e concreto.

Segundo Morian, Van Dam e Perera (2012) e John e Agopyan (2014), no Brasil, o uso de EFRA não é difundido; contrariamente ao que acontece em alguns países, como França, Holanda, Austrália e Estados Unidos, para aplicação principalmente como base para pavimentação, concreto e concreto asfáltico.

Algumas características das escórias de alto forno corroboram para sua aplicação em pavimentos e, destacam-se, as propriedades relevantes para a aplicação da EFRA em pavimentos. De acordo com a FHWA (2019), ela apresenta (i) boa resistência à abrasão Los Angeles, entre 35 e 45%; (ii) boas características de solidez; (iii) alta resistência ao rolamento; (iv) alto ângulo de fricção interna, 40-45°, o que contribui para estabilidade lateral; (v) perda de solidez do sulfato de sódio de cerca de 12%. Dessa forma, suas características são interessantes para inserção em pavimento.

Como vantagens para pavimento, a escória de alto forno possui alta resistência ao polimento e ao intemperismo; aliados ao baixo preço (por se tratar de um coproduto), fornece níveis adequados de atrito à mistura asfáltica, permitindo boa resistência à derrapagem e aquaplanagem; além de poder ser tão estável quanto a escória de aciaria. As desvantagens permeiam a variabilidade desse produto meio, visto que suas características podem ser alteradas pelo processo produtivo do aço e a baixa condutividade térmica em relação aos agregados convencionais, devido à porosidade. Em aplicações em concreto asfáltico usinado à quente, a EFRA é mais absorvente do que o agregado convencional e, portanto, tem uma maior demanda de cimento asfáltico. Porém possui menor peso unitário compactado quando comparado aos agregados naturais, resultando em um maior rendimento do pavimento asfáltico (maior volume para o mesmo peso). A prática orienta que a escória de alto forno seja usada juntamente com a de aciaria, para compensar a alta densidade dessa última (AL-QADI, SON e CARPENTER, 2013; WANG, 2016; AIREY e COLLOP, 2004).

Rondón-Quintana, Ruge-Cárdenas e Farias (2019) afirmam que a substituição parcial de agregado natural calcário por EFRA melhorou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Porém, o aumento do percentual de uso de escória de alto forno na mistura levou à redução de parâmetros de adesão, de abrasão e de resistência a danos por umidade.

Observa-se uma incipiência de trabalhos na área de infraestrutura de transportes que se referem à utilização de EFRA como agregado em pavimento asfáltico, diferentemente do que pode ser observado em relação a busca por trabalhos que tratam da escória de aciaria. Além disso, também não é comum a constatação de que a escória de alto forno não possui uma boa adesividade ao ligante asfáltico e pode-se creditar isso ao fato de que, em muitos países, a cal

já faz parte da mistura asfáltica convencionalmente para aprimoramento de propriedades mecânicas e esse aditivo pode mascarar o comportamento do agregado na adesão.

36

2.5. Escória de Aciaria

Produto das impurezas do ferro gusa combinadas com cal, os óxidos de silício, ferro, manganês e fósforo formam a escória de aciaria, que pode ser resfriada de várias maneiras ao deixar o convertedor. Segundo Shi (2004), resfriamento pode acontecer por ar natural, por borrifo de água, por resfriamento com água, por resfriamento a ar ou por resfriamento de caixa rasa. A escória LD utilizada nesse estudo é resfriada ao ar natural no pátio da usina.

A título de comparação, a composição da escória LD está apresentada na Tabela 3 juntamente com as composições de rochas graníticas e calcárias; o que permite notar a semelhança de constituição entre rochas calcárias e o coproduto em discussão.

Tabela 3 - Composição química LD, rochas granítica e calcária

Composição em massa (%)	LD	Granito	Calcário
SiO ₂	11,45	63,51	5,59
TiO ₂	0,37	0,59	-
Al ₂ O ₃	2,32	18,81	1,12
Fe ₂ O ₃	27,32	4,44	0,63
MnO	3,65	-	-
MgO	9,32	1,24	3,13
CaO	37,44	3,48	44,86
Na ₂ O	0,03	-	-
K ₂ O	0,01	-	-
P ₂ O ₅	1,26	-	-
SO ₃	0,28	-	-
Perda ao fogo	3,12	-	-

Fonte: Lizarazo-Marriaga, Claisse e Ganjian, 2011; Vieira, Soares e Monteiro, 2004; Silva, 2006.

A escória de aciaria já vem sendo objeto de estudo e análise em diversas pesquisas para diferentes aplicações. Rai et al. (2002) utilizou como aditivo em cimento para melhorar propriedades mecânicas do concreto; Monshi e Asgarani (1999) produziram cimento a partir de escórias de alto forno, de aciaria e cal e alcançaram valores de compressão acima do valor padrão para cimento tipo I e Maslehuddin et al. (2003) aplicou o coproduto siderúrgico em sua pesquisa como agregado de concreto, observando melhora da resistência à compressão.

A escória de aciaria é composta basicamente por CaO, MgO, SiO₂ e FeO, mas a proporção desses componentes pode variar com a matéria-prima, tipo de aço fabricado, condições do forno, entre outros. O processo de resfriamento determina as propriedades e composições minerais da escória de aço temperado; os mais comuns são olivina e merwinita e pode se aproximar à composição mineralógica do cimento. O CaO e o MgO livres são componentes cimentantes e, portanto, contribuem nessa propriedade da LD. A cal livre é a principal causa de expansão da escória de aciaria; ela reage com água e forma o hidróxido de cálcio, que possui menor densidade e gera um aumento de volume. Para que a expansão não seja um empecilho na utilização da LD em cimento de concreto, ela deve ser utilizada juntamente com material sem poder expansivo e com capacidade de consumir o cálcio livre. A estrutura desse material é porosa e, de acordo com as pesquisas acessadas, possui menor abrasão que agregado basáltico e melhor adesividade quando associada ao ligante asfáltico (SHI, 2004; WANG, WANG e GAO, 2010; WU et al., 2007).

2.5.1. Escória de Aciaria na Pavimentação

Como já comentado, a escória de aciaria LD possui tendência à expansão quando em contato com água devido ao cálcio e ao magnésio livres. Visto que essa pesquisa se propõe ao estudo da adesividade, os pormenores de expansão não serão comentados, apenas os trabalhos que tratam da LD na mistura asfáltica levando em consideração seu desempenho mecânico e na interação com o ligante.

De acordo com Airey e Collop (2004), as misturas de asfalto modificadas com escória de aço tendem a ter um excelente desempenho com boa durabilidade. Os materiais de revestimento com escória mostraram uma resistência melhor à derrapagem em comparação à mistura apenas com agregados naturais. Kim et al. (2018) também notou que a resistência ao afundamento e ao trincamento melhorou com o uso da escória de aciaria como agregado. O potencial de expansão não foi um problema para esse autor, pois o filme ligante que reveste as partículas as mantém fora do contato com água.

A substituição de 15% em massa de agregado natural por coproduto de aciaria satisfaz as especificações Marshall em relação à mistura sem substituição no trabalho de Maharaj et al. (2017). Além disso, melhorou a porosidade superficial em relação ao agregado natural e os autores concluem que essa substituição é benéfica dos pontos de vista técnicos, econômico e ambiental.

Para a adesividade, o trabalho de Chen et al. (2014) relata que o coproduto LD obteve melhor adesividade ao ligante asfáltico que agregados de granito e basalto. Esse resultado foi observado por meio de resultados de resistência à tração e de dano adesivo, nos quais a escória se saiu melhor que os agregados naturais. Além disso, o trabalho também contempla a avaliação da adesividade ligante-escória quando já há produtos da hidratação da escória em sua superfície e denota que, ainda assim, há uma boa adesividade no estágio inicial, porém, com o passar do tempo, a ligação entre o produto da hidratação e a superfície da escória não suportou danos de longa duração no teste da água fervente.

Nguyen, Lu e Le (2018) avaliaria a resistência à capacidade de carga em misturas com agregado graúdo de escória de aciaria e concluiu que a mistura modificada apresentou melhor capacidade de carga que misturas contendo apenas agregado natural e creditou isso à sua baixa abrasão Los Angeles (20,8%) e à textura de superfície dos agregados, permitindo melhor intertravamento entre partículas e melhor adesividade ao ligante. Além disso, os autores também concluíram que mistura com agregado de aciaria, apesar de mais pesada (devido à densidade da escória), é estável em presença de água; possui boa estabilidade Marshall – atendendo aos critérios de norma vietnamita -; boa resistência à derrapagem e que pode ser reciclado como material mineral.

Para Ziari e Khabiri (2007), a escória LD atendeu aos critérios de índice de força e estabilidade à temperatura e à água. Além disso, esse agregado deve ser utilizado em tamanho máximo de 4,75 mm e em até 10% de substituição. Diferentemente disso, Teixeira et al. (2019) aplicou a LD como 25% de substituição e obteve bons resultados de estabilidade e tração. A presente pesquisa dará continuação aos estudos desse último autor, adotando os parâmetros das misturas com LD por ele desenvolvidas.

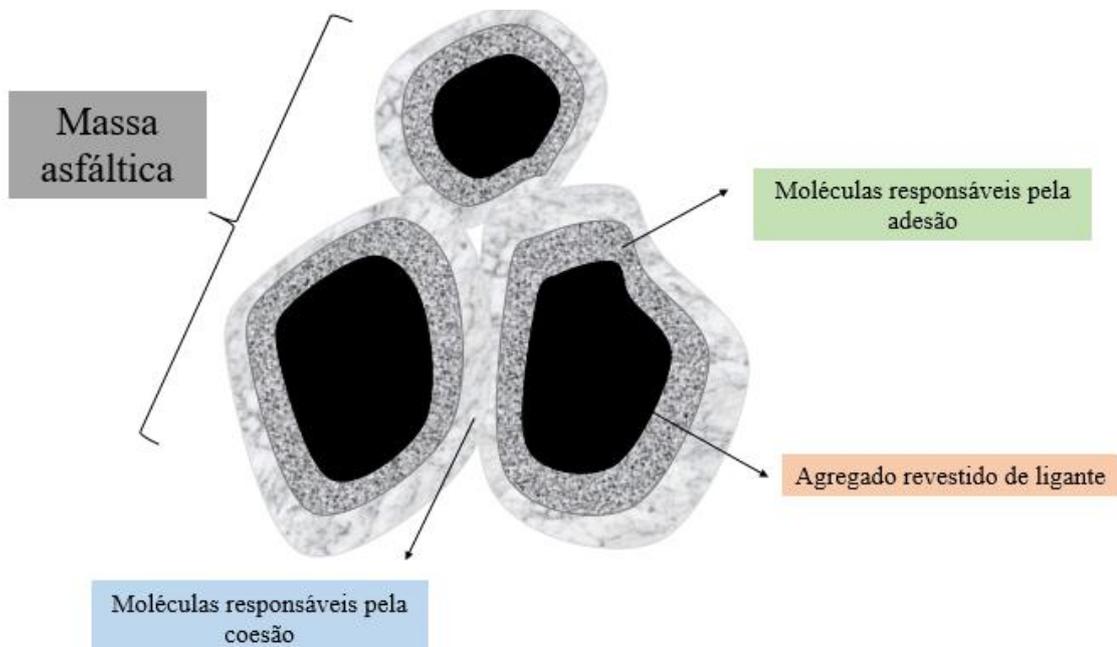
Outros trabalhos nacionais também avaliaram a reiteraram a viabilidade da escória de aciaria no pavimento asfáltico, como Castelo Branco (2004), com substituições de até 80% do agregado natural em seus ensaios, com ressalvas a respeito da heterogeneidade do material. Schumacher (2018) também obteve resultados satisfatórios para uma substituição de LD de 25% em relação ao agregado natural para três níveis de expansão do coproduto e, para as análises mecânicas (tração por compressão diametral, estabilidade Marshall e módulo de resiliência), as misturas com coprodutos tiveram um comportamento bastante similar às misturas sem esse material. Azeredo (2018) introduziu a escória LD na SMA (*Stone Matrix Asphalt*) e notou que, com 50% de substituição em LD nesse mástique, resultados físicos e mecânicos foram melhorados.

2.6. Adesividade

Adesividade é a ligação entre ligante e agregado e depende da capacidade do primeiro em envolver o segundo. Trata-se de um fator importante a fim de minimizar os riscos de danos por fadiga e por ação da água nos pavimentos. O desempenho do pavimento está estreitamente relacionado à qualidade da adesividade agregado-ligante e alguns estudos sobre a importância da adesividade já foram desenvolvidos visto que diversos problemas no pavimento são associados a este parâmetro; essa é umas das propriedades mais importantes para garantir a durabilidade do pavimento (KAKAR et al., 2016; CHEN et al., 2014; HOU et al., 2018; VASCONCELOS et al., 2008).

Problemas como trincas no pavimento podem ocorrer na interface entre agregado e ligante, sendo conhecida como fratura adesiva – e apresentando-se como uma fina camada de filme ligante. Contrariamente a isto, a fratura pode ocorrer no próprio aglutinante, a fratura coesiva, que é caracterizada pela espessa camada de película (BHASIN e LITTLE, 2009). A Figura 6 apresenta o agregado revestido de ligante asfáltico, mostrando que as moléculas mais próximas à interface são as responsáveis pela adesão e as mais externas são responsáveis pela coesão.

Figura 6 - Representação esquemática da massa asfáltica fora de escala



Fonte: Autora

Segundo Ebnesajjad e Landrock (2014), para uma boa adesão, é preciso ter atenção a alguns fatores, como a escolha o adesivo apropriado; planejar a junção desses materiais; limpeza da superfície de aderência e processo de cura. 40

Tendo em vista os agregados, os fatores de influência na sua interação com o betume são a composições química e mineralógica; a energia livre de superfície; os aspectos de forma, como textura e porosidade e a limpeza da superfície do agregado (ALVAREZ et al., 2019; CALA et al., 2019; HICKS, 1991; HORGNIES et al., 2011; PACKHAM, 2003).

Hefer (2004) comenta a respeito das forças fundamentais envolvidas na questão da adesividade e Pinto (2007) fornece dados a respeito da intensidade de cada ligação dessas. A primeira é a interação eletrostática entre íons, regidos pelas Lei de Coulomb, em que cargas opostas se atraem e há ganho de estabilização eletrostática; são relativamente fortes, da ordem de 600 a 1500 kJ/mol. Há também as interações eletrodinâmicas pelas forças de van der Waals, são mais fracas (± 10 kJ/mol). São elas: dipolo-dipolo; dipolo induzido e dipolo instantâneo-dipolo induzido. As interações dipolo-dipolo (ou força de interação Keesom) ocorrem quando um átomo da molécula é eletronegativa e atrai elétrons, levando a um carregamento diferencial por toda extensão da molécula – e formação de um momento dipolo -, que, por afinidade, se liga a outras moléculas posicionadas inversamente em relação à primeira. O Dipolo induzido (ou força de interação Debye) é a polarização de uma molécula ou átomo simétrico (não apresentando momento dipolo inicialmente) quando exposto a um campo magnético e passa a ter um momento induzido. As interações dipolo instantâneo-dipolo induzido (ou força de dispersão London) busca explicar por que átomos ou moléculas sem polaridade se atraem baseado na possibilidade de que, num momento qualquer, os elétrons se posicionam todos numa mesma região, tornando-a carregada negativamente, deixando o núcleo positivo exposto do outro lado. Esse processo gera um dipolo instantâneo em moléculas vizinhas e ocorre a atração.

Se, por um lado, as interações acima discutidas têm um cunho físico a elas atrelado, a ligação covalente ou por compartilhamento de elétrons – que é a última das forças fundamentais – é, constantemente, referida como ligação química. Trata-se do compartilhamento elétrons aos pares, cedidos por uma ou ambos espécimes, para alcançar a estabilidade. É considerada relativamente forte também, ocorrendo a uma energia de 60 a 800 kJ/mol.

2.6.1. Teorias da Adesão Agregado-Ligante

Para um parâmetro multifatorial como a adesividade, foram propostas diversas teorias com o intuito de elucidar o estudo desse mecanismo. Os nomes das teorias estão dados conforme Hefer, Little e Lytton (2005) e Hicks (1991).

41

a) Teoria da Camada mais Fraca

Essa teoria propõe que a adesividade de um sistema é prejudicada pela presença de uma região interfásica de baixa força coesiva. Essa região pode ser intrínseca ao agregado utilizado; pode ser gerada pela dissolução de complexos da superfície do agregado ou do próprio mineral na presença de água; além de poder se tratar também da poeira do próprio agregado ao ser triturado que fica depositada na sua superfície, impedindo o contato íntimo entre ligante-agregado ou uma poeira de origem alheia ao beneficiamento do agregado que tenha sido trazida pelo ar (BREWIS, 1993; HEFER, LITTLE e LYTTON, 2005).

b) Teoria Mecânica

A teoria mecânica realça a importância das características físicas do agregado, tais como textura superficial, porosidade, absorção, área superficial e tamanho da partícula pois considera que tais características promoverão um intertravamento mecânico do ligante na superfície do agregado e maior área de contato entre os materiais (PACKHAM, 2003; TERREL, 1994).

c) Teoria Eletrostática

Também chamada de Teoria da Reação Química, essa teoria está relacionada àquilo que foi comentado anteriormente: os agregados cuja composição é rica em silício são mais eletronegativos (possuem uma superfície negativamente carregada devido à interação de adsorção do grupo Si-OH com a água) e são, portanto, mais ácidos. O mesmo não ocorre para agregados com baixo teor de silício, que têm maior basicidade e melhor interação com o ligante asfáltico ácido. Espera-se que seja possível melhorar a ligação entre cimento asfáltico com agregados ácidos associando à essa mistura algum aditivo capaz de reduzir a acidez do meio (HEFER e LITTLE, 2005; HICKS, 1991).

d) Teoria Termodinâmica

O conceito de energia de superfície é o excesso de energia associado à uma superfície; são as forças as quais estão submetidas as partículas mais superficiais de um certo material; local onde as forças resultantes sobre as moléculas são máximas. Essa teoria é baseada no conceito de que um adesivo se adere a uma superfície a partir de um contato íntimo por meio

de forças intermoleculares. Na ciência de aderência, geralmente, o interesse é em superfícies sólidas, das quais não é possível uma medida precisa de energia de superfície. Por isso, a magnitude dessas forças pode ser relacionada a grandezas termodinâmicas, como a energia livre de Gibbs ou a tensão superficial que, nesse contexto, são encobertas pela formalidade da distinção e todos são chamados “energia livre de superfície”. Teorias termodinâmicas relacionadas à energia de superfície podem usadas para determinar o trabalho da adesão entre dois materiais se as componentes de energia de superfície são conhecidas (BHASIN, 2006; FRANKLIM, 2007; HEFER, a.; LITTLE; LYTTON, 2005; PACKHAM, 2003).

e) Teoria da Orientação Molecular

Essa teoria comenta que, ao entrar em contato com o agregado, as moléculas do ligante asfáltico se orientam para satisfazer a demanda de energia do agregado. Esse alinhamento pode ser resultado da orientação dos íons da superfície do agregado. A maior parte do ligante betuminoso é apolar, enquanto a água é polar; o que significa que ela pode satisfazer mais prontamente as demandas de energia da superfície agregada, o que pode ser fator que dificulta uma boa adesividade (HICKS, 1991).

2.6.2. *Mecanismos de perda de adesividade macroscópicos*

As teorias anteriormente apresentadas enquadram-se na gama de mecanismos microscópicos, mas a análise macroscópica da interação agregado-ligante também é importante. Cada um dos mecanismos apresentados é resultado de um ou da combinação fenômenos apresentados nas teorias (JOHNSON e FREEMAN, 2002).

a) Descolamento

É o descolamento de uma pequena área de filme ligante limpo que estava aderido. Esse descascamento pode ser devido à água nos agregados que não estavam completamente secos, à água intersticial dos poros que vaporizou e condensou na superfície, à água que permeava os poros da mistura ou mesmo à poeira da superfície do agregado (KIGGUNDU e ROBERTS, 1988).

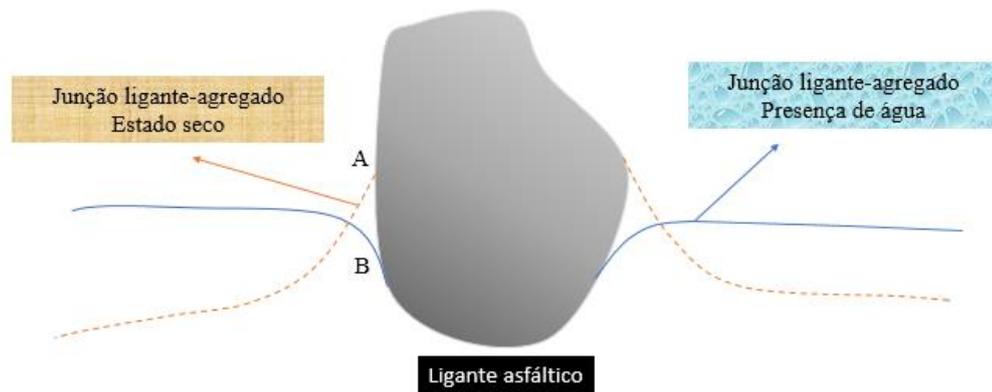
b) Deslocamento

Em presença de água, há deslocamento do filme ligante que recobria o agregado anteriormente. Isso porque a água tem mais chances de ser aderida pelo agregado que o ligante

betuminoso; sobretudo para agregados ácidos. A Figura 7 mostra o ponto A de equilíbrio entre agregado e ligante no estado seco. Na presença de água, no entanto, o agregado aglutinante e a junção não estão mais em equilíbrio e a interface se retrai sobre a superfície para chegar ao ponto B (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968).

43

Figura 7 - Representação esquemática do deslocamento filme ligante em agregado fora de escala



Fonte: Autora, adaptada de Majidzadeh e Brovold (1968)

c) Emulsificação espontânea

Ocorre quando uma emulsão acontece às avessas: gotas de água no ligante, ao invés de gotas de ligante em água (emulsão). Nessa situação, o aglutinante suporta menos carga (JOHNSON e FREEMAN, 2002).

d) Ruptura do filme ligante

A ruptura do filme ligante pode preceder o deslocamento dele. Agregados angulares podem aumentar a tendência à ruptura, que também é produto da carga de tráfego, isso porque o filme ligante é mais fino em arestas e quinas. Uma vez rompido o filme ligante, há um caminho livre para a água (TARRER e WAGH, 1991).

e) Poro-pressão

A ação da poro-pressão é sentida quando a água percola pelos vazios da mistura asfáltica compactada e, pela ação do tráfego, esses poros são reduzidos e há variação de pressão na água que fica retida ali. Esse fenômeno foi observado pela segregação dos materiais em suas interfaces e de baixo para cima nos pavimentos (KIGGUNDU e ROBERTS, 1988).

f) Polimento Hidráulico

Esse fenômeno é mais comum em camadas superficiais de pavimento. Trata-se da água que satura o pavimento e é empurrada para dentro dele pela ação da frente dos pneus que transitam e é sugada para fora do pavimento pela ação dos mesmos pneus, mas na sua parte de trás. A presença de abrasivos pode intensificar a separação do sistema ligante-agregado (JOHNSON e FREEMAN, 2002).

44

2.6.3. Avaliação de Adesividade e de Dano por Umidade

Segundo Furlan (2006), os ensaios de adesividade de avaliação visual (como o contemplado pela norma NBR 12583 (ABNT, 2017), realizado nessa pesquisa) verificam subjetiva e empiricamente se o agregado recoberto por ligante sofre descolamento da película por ação da água ou outra solução aquosa. De acordo com a autora, esses ensaios são criticáveis pois podem não ser fidedignos ao desempenho em campo das misturas, mas sua simplicidade de execução permite uma avaliação preliminar do recobrimento do ligante na superfície do agregado.

Jakarni et al. (2016) comenta que ensaios que analisam a mistura asfáltica ao dano por umidade a partir de um condicionamento imposto aos corpos de prova, como o proposto pela norma DNIT 180/2018-ME, similar à AASHTO T283 (2014), permitem medir quantitativamente os parâmetros em análise, o que reduz a variabilidade dos resultados quando comparada aos ensaios de simples visualização, apesar de serem mais custosos para realização, dados o tempo despendido e os equipamentos necessários à sua execução.

A respeito do teste acima, Birgisson et al. (2005) comentaram tratar-se de um teste criticado quanto à sua precisão, relatando que falsos positivos e negativos quanto ao desempenho das misturas foram relatados; embora seja um teste bastante utilizado. O estudo concluiu que os danos causados pela umidade não podem ser avaliados apenas por uma característica nas amostras condicionadas (no caso desse ensaio, a resistência à tração).

Conforme Little e Epps (2001), a maior parte dos testes de adesividade destina a sua realização durante o projeto de mistura asfáltica e não é adequada para controle e garantia de qualidade. Em geral, os dados obtidos não correlacionam os testes de laboratório ao desempenho em campo. No entanto, o teste de dano à umidade induzida ainda é o mais utilizado para apreciação dos danos causados pela água quanto à adesividade em pavimentos asfálticos.

2.6.4. Melhoradores de Adesividade

Carnin (2008) comenta que, apesar de alguns agregados não se aderirem bem ao ligante asfáltico, algumas soluções podem ser tomadas para reverter essa situação, como a adição de cal, pó calcário e agentes melhoradores de adesividade, os dopes. 45

Segundo Shell (2003), os melhoradores de adesividade agem de duas formas: modificando as condições interfaciais agregado-ligante, de forma que o agregado seja preferencialmente “molhado” pelo cimento asfáltico ou melhorando a ligação entre esses materiais, aumentando a resistência ao descolamento do ligante devido à ação da água.

Mikeska (1952) apresenta alguns exemplos de substâncias que são capazes de oferecer melhora ao recobrimento agregado-ligante. O autor comenta que aminas são mais conhecidas, mas também as bases livres, assim como sais de ácido sulfônico ou ácido carboxílico presentes nas bases, são capazes de produzir agentes de adição eficazes.

Em geral, aditivos melhoradores de adesividade comerciais são aminas ou possuem aminas em sua composição; elas são efetivas no tratamento de superfícies e, assim como a amônia, ela age sobre ácidos de Lewis fracos. A reação da amônia com água pode ser observada na Equação 2.



Além disso, fíler de cal hidratada ou cimento também podem ajudar no parâmetro da adesividade quando adicionados à porcentagem de 1 a 2% em relação à massa (MAJIDZADEH e BROVOLD, 1968; TARRER et al., 1989).

Little e Epps (2001) apresentam, por meio de diversos trabalhos, que a cal hidratada possui desempenho superior a líquidos com ação *antistripping* (reduzidor do dano à umidade) – tendo sido testada a mistura inclusive pelo método de dano à umidade descrito na AASHTO T283 (DNIT 180/2018-ME) -, mas também melhorando a resistência à fadiga e à deformação por trilho de roda. Tarrer e Wagh (1991) concluíram a respeito do uso de cal hidratada como fíler que ela cria ligações muito fortes entre agregado e o ligante betuminoso, evitando a remoção da película em qualquer nível de pH e oferece uma cura rápida, o que não acontece com os líquidos que melhoram a adesividade; eles são solúveis apenas em pH alto e precisam de um tempo maior de cura. Além disso, segundo os autores, a cal reage com os compostos de silício e alumínio dos agregados de maneira pozolânica, que adiciona força à mistura.

O fíler tem papel importante na mistura asfáltica, tanto para preencher os vazios entre os grãos maiores ou atuando como material ativo de maneira a melhorar o desempenho mecânico, durabilidade, trabalhabilidade, adesividade ligante-agregado, dispersão do ligante,

aumenta a rigidez e acelera a cura da mistura asfáltica. Os efeitos do fíler estão atribuídos à sua superfície ativa (ISHAI, 1984; REMISOVA, 2015).

46

A presente pesquisa trabalhará com misturas compostas parcialmente por agregados siderúrgicos e contendo quatro tipos de fíleres diferentes. A cal é usualmente utilizada, como já comentado e, por ser tão apreciada pela literatura nas misturas asfálticas, um coproduto siderúrgico, o pó FGD (*Flue Gas Dessulfurization*), também foi testada devido à sua composição química semelhante à da cal. Outro pó de origem siderúrgica, mais precisamente, do precipitador eletrostático, foi utilizado. Sua composição química rica em óxido de ferro tornou esse material oportuno para fins de melhoramento de adesividade. Por fim, o fíler de agregado natural foi aplicado no trabalho para que fosse analisada uma mistura com fíler que cumpra apenas o papel de preenchimento físico, sem que, teoricamente, contribua quimicamente para a melhora à resistência ao recobrimento do filme betuminoso.

CAPÍTULO 3

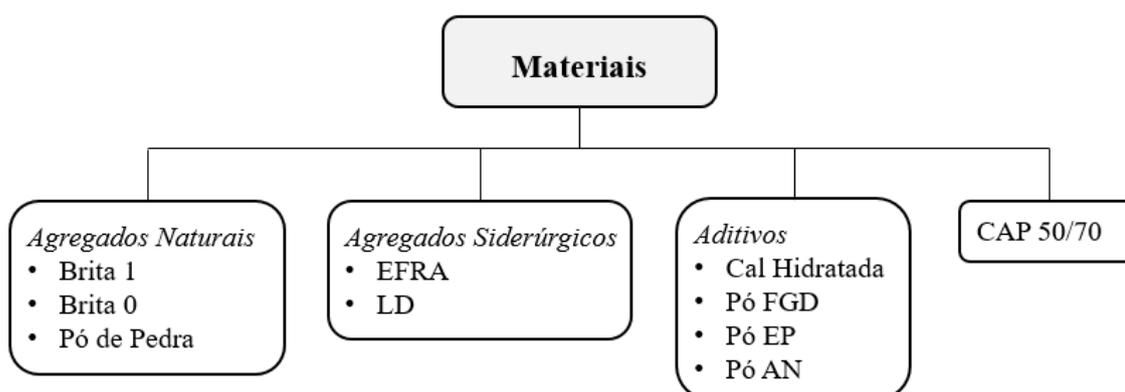
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nessa pesquisa bem como os procedimentos utilizados para caracterização física, química e termodinâmica destes, conforme o interesse deste estudo. Também são apresentadas as composições das misturas asfálticas a serem avaliadas na etapa posterior a caracterização individual dos materiais, o procedimento de dosagem das misturas e a metodologia empregada para realização de ensaios mecânicos selecionados para avaliar o desempenho das misturas.

As

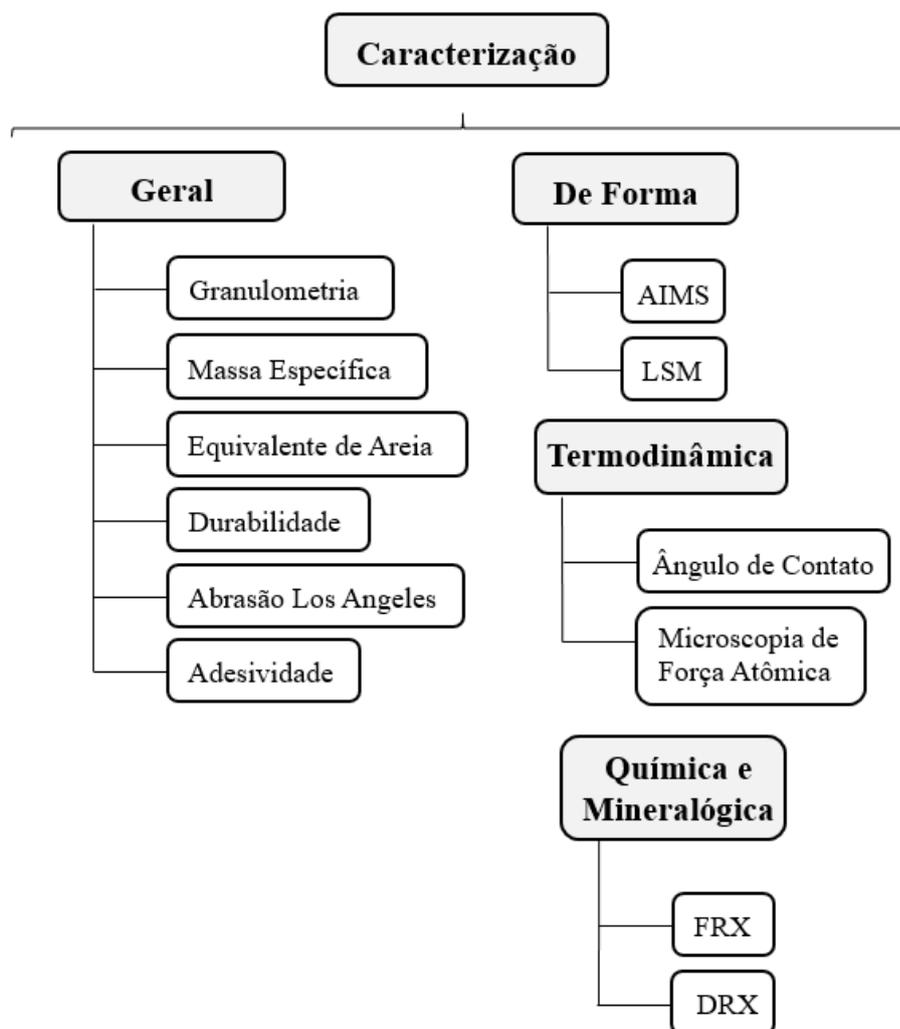
Figura 8, 9 e 10 ilustram o esquemas gerais detalhando os materiais e procedimentos experimentais selecionados para atingir os objetivos do estudo. Estes serão explanados em detalhes nas sessões subsequentes.

Figura 8 - Matriz dos materiais utilizados



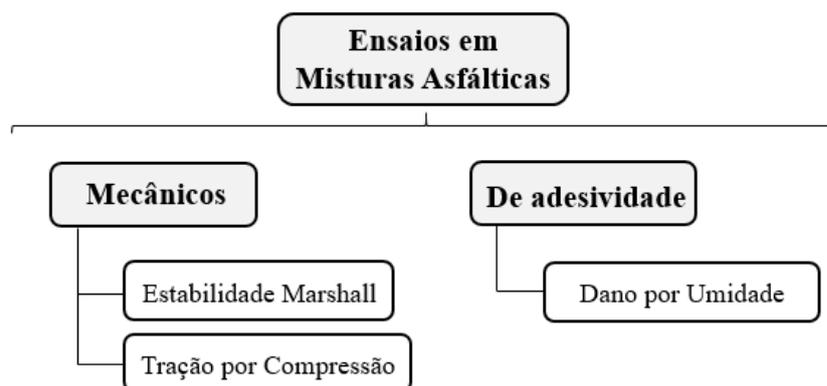
Fonte: Autora

Figura 9 - Matriz experimental de caracterização dos materiais



Fonte: Autora

Figura 10 - Matriz experimental em misturas asfálticas



Fonte: Autora

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento Asfáltico de Petróleo

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado nessa pesquisa provém da refinaria Petrobrás/REDUC e é classificado como CAP 50/70, obtido por meio da destilação a vácuo do petróleo. O CAP foi fornecido pela Vix Asfaltos, situada na Marca Ambiental, município de Cariacica-ES. Sua ficha de especificação está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do CAP 50/70 utilizado na pesquisa

CERTIFICADO DE ENSAIO (Cimento Asfáltico 50/70)				
Características	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	51	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 min	50,0	grau C
Viscosidade Brookfield 135 GC-SP21 20 RPM	D 4402	274 min	323	cP
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	D 4402	112 min	163	cP
Viscosidade Brookfield 177 GC-SP21	D 4402	57 a 285 min	61	cP
RTFOT Penetração Retida	D 5	55 min	61	%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 máx	5,0	grau C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,305	%
Ductilidade a 25 GC	D 133	60 min	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	344	grau C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5 a 1,7	-1,1	N/A

Densidade Relativa a 20/4 Graus Celsius	D 70	Anotar (1)	1,011	N/A
Aquecimento a 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A
Local: TQ 25096D	Data/hora amostragem: 27/05/2019 06:00			

Notas:

(1) Ensaio não faz parte da especificação

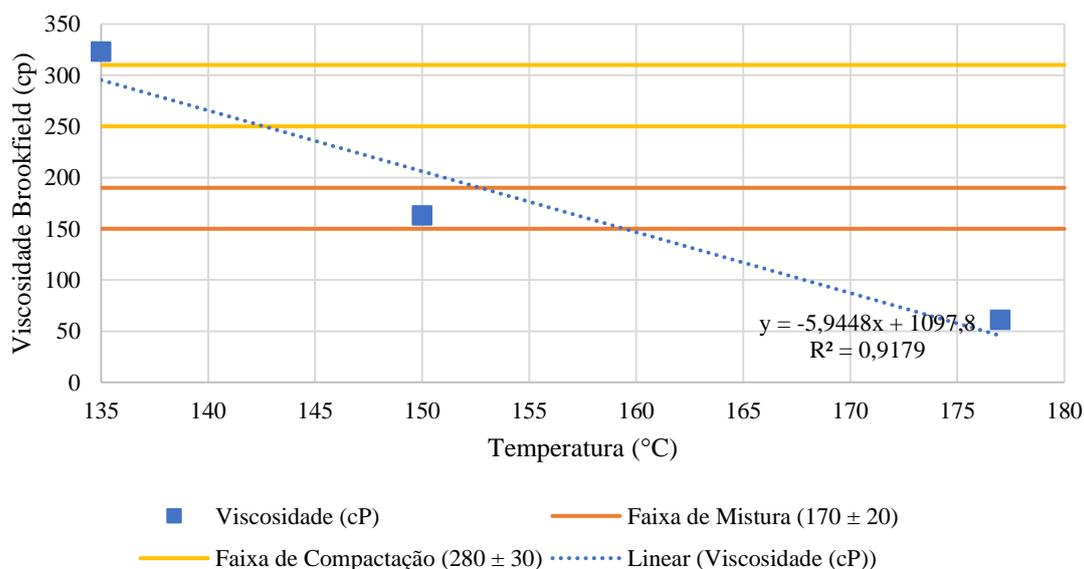
(2) NESP = Não Espuma

Fonte: Laboratório REDUC conforme ensaios da especificação ANP realizados na própria refinaria

De posse dos dados de caracterização, foi traçada a curva de viscosidade (Figura 11) para obtenção das temperaturas de usinagem e compactação a serem utilizadas nas etapas de dosagem e compactação dos corpos de prova (CP's) das misturas asfálticas estudadas.

50

Figura 11 - Curva de Viscosidade do CAP 50/70 utilizado



Fonte: Autora

Conforme Figura 11, a faixa de temperatura de mistura do ligante com os agregados foi de 153° a 159° C (tendo permanecido o ligante por 1 hora em estufa, conforme norma DNER-ME 043/95) e de 135° a 142° C para a compactação (2 horas em estufa previamente à compactação).

3.1.2. Agregados Naturais (AN)

Os agregados naturais utilizados nessa pesquisa foram de origem granítica, tipicamente utilizados no estado do Espírito Santo na construção de rodovias. Estes foram coletados na

empresa Brasitália, localizada no município de Cariacica-ES (Figura 12), sob as formas de brita 1 (B1), com diâmetro máximo de 19,0 mm; de brita 0 (B0), com diâmetro máximo de 12,5 mm e de pó-de-pedra (PP), com diâmetro máximo de 4,8 mm (Figura 13), conforme classificação da norma NBR 7211 (ABNT, 2005). 51

Figura 12 - Coleta dos agregados naturais na pedreira Brasitália



Fonte: Autora

Figura 13 - Tipos de agregados naturais utilizados



Fonte: Autora

Esses agregados naturais são os mesmos utilizados por Teixeira et al. (2019). Isso permite que as propriedades mecânicas das misturas encontradas por ele sejam comparáveis às que serão apresentadas ao longo dessa pesquisa, uma vez que a origem e faixa granulométrica dos agregados e misturas também foram equivalentes.

3.1.3. Escórias EFRA e LD

52

As escórias utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela siderurgia Arcelor Mittal Tubarão, localizada no município de Serra-ES. Foram coletadas amostras de dois tipos de agregados siderúrgicos, i.e., as escórias de alto-forno resfriada ao ar (EFRA) e de aciaria (LD), conforme Figura 14. A escória LD utilizada na caracterização foi obtida *in natura* no pátio da usina, sem passar pelo processo de cura, possuindo, portanto, um alto valor de expansibilidade volumétrica inicial. Apesar da expansão da escória de aciaria LD ser, por vezes, um obstáculo para sua aplicação em pavimentação, esse trabalho visa a avaliação das suas características em comparação ao outro tipo de escória (EFRA) com vistas a adesividade desse material ao ligante asfáltico.

As escórias foram caracterizadas, tendo em vista, principalmente, os fatores que contribuem para a adesividade agregado-ligante, o que possibilitou a comparação das duas escórias. Além disso, a possibilidade de aplicação da EFRA e da LD em misturas asfálticas em substituição a 25% do agregado natural foi avaliado, com e sem aditivos e seus desempenhos foram comparados.

Figura 14 - Escórias (a) EFRA e (b) LD.



a)

b)

Fonte: Autora

3.1.4. Aditivos

Aditivos com diferentes composições químicas foram avaliados como fíleres melhoradores de adesividade para as misturas contendo 25% de EFRA. Foram selecionados quatro aditivos, i.e., cal hidratada, pó de agregado natural, e dois resíduos provenientes da siderurgia (pó do precipitador eletrostático e pó *Flue Gas Desulfurization*). A cal hidratada foi fornecida pela concessionária RODOSOL; o pó FGD e o pó EP são coprodutos siderúrgicos e foram fornecidos também pela Arcelor Mittal Tubarão e, por fim, o pó de AN foi obtido peneirando-se o pó de pedra na peneira #200 (0,075 mm). A Figura 15 apresenta os aditivos e o critério de escolha de cada um é explanado em seguida.

Figura 15 - Aditivos



Fonte: Autora

3.1.4.1. Cal Hidratada

Agregados de diferentes composições mineralógicas se comportam de forma distinta quando misturados ao ligante asfáltico. Geralmente, o ligante é mais bem aderido ao agregado calcário frente ao agregado silicoso. Para melhorar a adesividade do ligante ao agregado, alguns aditivos podem ser empregados, tais como cal, pó calcário, cimento Portland, cinzas volantes e aditivos químicos como aminas, diaminas e polímeros (CARNIN, 2008; LEE et al., 2018; LITTLE, EPPS e SEBAALY, 2006).

O trabalho de Little, Epps e Sebaaly (2006) traz o número de ciclos com que amostras com melhoradores de adesividade - submetidas ao condicionamento Lottman- romperam e,

dentre elas, a amostra melhorada com cal apresenta valor de ciclo bastante superior aos demais melhoradores testados. Além disso, ele apresenta também outras vantagens para adição de cal, tais como a) ação de fíler para enrijecer a mistura asfáltica; b) melhora a resistência à fratura a baixas temperaturas; c) interage com produtos de oxidação, reduzindo seus efeitos prejudiciais e d) altera propriedades plásticas dos finos para melhoria da sensibilidade e durabilidade à umidade.

54

3.1.4.2. Pó FGD

A queima de combustíveis fósseis como carvão mineral na área de produção de coque nas siderurgias implica na liberação de gases exaustos, dos quais deseja-se retirar a considerável quantidade de enxofre neles contido. Para minimizar a liberação destes gases no meio ambiente, as coquearias utilizam um processo semisseco de dessulfurização de gases (*Flue Gas Desulfurization FGD*). Uma solução de hidróxido de cálcio ou cal hidratada é adicionada para reagir com os gases liberados. Esses compostos são coletados como um subproduto para descarte (pó FGD) e o gás purificado é descarregado na atmosfera (VIEIRA, TEIXEIRA e TEIXEIRA, 2018; CASTRO, 2016; KOHL E NIELSEN; 1997).

A utilização do pó FGD como aditivo nessa pesquisa foi motivada por possuir composição química semelhante à da cal, apresentando diferentes compostos cálcicos, inclusive com propriedades cimentantes (YABING et al., 2013; VIEIRA, TEIXEIRA e TEIXEIRA, 2018; ZAREMBA et al., 2008).

3.1.4.3. Pó EP

Durante a etapa de sinterização da siderurgia, no sistema de exaustão, é gerado um resíduo denominado neste estudo de pó do precipitador eletrostático (EP). Esse material se tornou uma opção a ser estudada nessa pesquisa como aditivo melhorador de adesividade em mistura asfáltica devido ao seu alto teor de óxido de ferro. Este composto vem se tornando objeto de estudo do melhoramento da adesividade.

Cala et al. (2019a; 2019b) analisaram agregados de composições diversas e, segundo os autores, o SiO_2 é o principal óxido responsável por intensificar os danos à umidade e os demais óxidos, como Fe_2O_3 e MgO – típicos de rochas máficas –, são importantes para evitar esses mesmos danos.

Os trabalhos desenvolvidos por Romeiro (1997) e Porto et al. (2018) apresentaram melhorias das propriedades mecânicas avaliadas pela tração por compressão diametral e do

módulo de resiliência adicionando óxido de ferro numa mistura asfáltica. Os autores creditaram esse aumento ao enrijecimento do ligante, melhorando a adesividade pelo uso de aditivo de carga elétrica positiva.

3.1.4.4. Pó de AN

O pó de AN foi utilizado com a intenção de avaliar o desempenho de um fíler que, quimicamente, não deveria colaborar com a adesividade, dado o seu alto teor de silício. Dessa forma, observa-se na mistura com esse fíler apenas a atuação de um pó para preenchimento físico do corpo de prova. Isso permite a apreciação dos efeitos químicos dos demais aditivos.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização dos Materiais

3.2.1.1. Parâmetros Gerais

Para adequação dos agregados siderúrgicos à aplicação em pavimentos flexíveis, é preciso verificar os aspectos físicos desejáveis e normalizados pela DNIT 031/2006-ES Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Além disso, também devem ser observados os apontamentos da norma DNER-EM 260/94 - Escórias de alto-forno para pavimentos rodoviários e DNER-EM 262/94 - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Importante destacar que os parâmetros estabelecidos na norma para agregados gerais são menos criteriosos que os aconselháveis para agregados siderúrgicos.

a) Massas específicas real, aparente e absorção

Para os agregados graúdos (retidos na peneira n° 4) foi consultada a norma ABNT NBR 6458/2016 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água e, a partir da média de três determinações, obtiveram-se os valores de densidade real, aparente e absorção para os agregados graúdos.

Os grãos que possuem diâmetro entre as peneiras 4,75 mm e 0,075 mm, que abrangem os agregados miúdos e o material de enchimento, têm sua densidade real determinada pela

norma DNER-ME 084/95 (Agregado miúdo – determinação da densidade real), que é realizado com o emprego de picnômetro e de uma bomba à vácuo, a partir de três determinações. Por fim, para a obtenção da densidade real do fíler e dos aditivos, foi utilizada novamente a norma DNER-ME 084/95 novamente, em três determinações.

56

b) Equivalente de Areia

O ensaio de Equivalente de Areia foi executado pela norma DNER-ME 054/97, no qual se avalia a relação volumétrica revelada pela razão entre a altura do nível superior da areia (h2) e a altura do nível superior da suspensão argilosa (h1) – conforme Equação 3 - de uma determinada quantidade de agregado com solução em uma proveta, de acordo com o procedimento de ensaio.

$$EA = h2/h1 \times 100\% \quad (3)$$

A norma determina que seja ensaiada a amostra passante na peneira de 4,75 mm em uma proveta com solução formada por água destilada, cloreto de cálcio, glicerina e formaldeído. Por fim, o procedimento avalia a proporção de material que pode ser prejudicial à aplicação em pavimento, como argila e pó. A norma DNIT 031/2006 determina que o agregado miúdo para aplicação em pavimento tenha, no mínimo, EA igual a 55%.

c) Durabilidade

A durabilidade dos agregados de escória foi avaliada pela norma DNER-ME 089/94 Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Uma determinada massa de agregados é imersa em solução por um período de 16 a 18 horas a temperatura de 21°C ± 1°C. Após esse período, a amostra é drenada e colocada em estufa (105°C – 110°C) para secar até constância de massa. A amostra é resfriada e o processo repetido conforme o número de ciclos que se desejado. No caso deste trabalho, cinco ciclos foram feitos. Enfim, o material é peneirado conforme norma e é avaliada a percentagem de massa perdida. A durabilidade obtida por uma média ponderada e o limite estabelecido pela DNIT 031/2006 é de 12%.

d) Abrasão Los Angeles

A abrasão Los Angeles avalia o desgaste (nesse caso, por meio da perda de massa) sofrido pelo agregado quando colocado para girar numa máquina Los Angeles a uma certa

velocidade com carga abrasiva. No caso desta pesquisa, cuja norma utilizada foi a DNER-ME 035/98, a graduação ensaiada do material é a B (9,5 – 12,5 mm e 12,5 – 19,0 mm), cuja massa corresponde a m , é submetida à carga de 11 esferas pesando $4584 \pm 25\text{g}$. O material remanescente com diâmetro maior que 1,7 mm é lavado e pesado, m' . O valor da abrasão é obtido conforme Equação 4.

57

$$A = (m - m')/m \times 100\% \quad (4)$$

A Figura 16 ilustra o equipamento empregado para o ensaio de desgaste Los Angeles para o qual a norma DNIT 031/2006 estabelece que o agregado não deve ter abrasão superior a 50%.

Figura 16 - (a) Máquina Los Angeles; (b) Agregados com carga abrasiva e (c) Medição de massa de carga



a)

b)

c)

Fonte: Autora

e) *Potencial Hidrogeniônico*

Como já comentado, a basicidade dos agregados pode ser fator de contribuição para uma boa adesividade, dado o caráter ácido do ligante. Há também interesse em analisar o pH dos aditivos que serão incorporados à mistura e avaliar a relação entre o pH dos materiais e o desempenho deles quando submetidos a ensaios que requerem boa adesão. O potencial hidrogeniônico apresentado nessa pesquisa foi realizado em água destilada pelo Fullin – Laboratório de análise agrônômica e ambiental LTDA. Conforme os trabalhos de Hagen, Lee e Jones (1996) e Howson et al. (2011), esperam-se valores de pH para rochas de quartzo de 7,9 a 8,4; graníticas em torno de 8,8 e para rochas calcárias entre 9,6 e 9,9.

f) *Análise Granulométrica*

Os agregados são classificados em graúdos, miúdos, material de enchimento e fíler. De acordo com a norma DNIT 412/2019 – ME, acessada por essa pesquisa, agregado graúdo são os grãos de cujo diâmetro passam pela peneira de 75 mm e ficam retidos na n° 4 (4,75 mm). Agregados miúdos são os de diâmetro passante da peneira 4,75 mm e retidos na 0,15 mm; material de enchimento passa completamente na peneira n° 100 (0,15 mm) e, no mínimo, 65% dele passa pela peneira n° 200 (0,075 mm). Por fim, o fíler é o material que passa completamente na peneira n° 200.

3.2.1.2. Adesividade

Em geral, os ensaios para avaliação da adesividade de agregado a serem empregado em misturas asfálticas são qualitativos, cujo resultado se dá pela observação da película de ligante asfáltico que recobre os agregados e se houve ou não deslocamento dessa película.

Anteriormente, no trabalho conduzido por Teixeira et al. (2019) com esses mesmos materiais, procedeu-se com a avaliação da adesividade pela norma DNER-ME 078/94 que permite observar a adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso. O resultado encontrado pelos autores não foi satisfatório para EFRA, ao contrário do que aconteceu para a LD, revelando uma excelente adesividade entre o ligante asfáltico e essa última escória. No presente trabalho, procedeu-se com o ensaio abordado na NBR 12583 (ABNT, 2017) (mostrado na Figura 17) que é semelhante ao da norma DNER 078/94, mas restringe a massa de ligante que deve ser utilizada (5% em relação à massa de agregados). Em ambos, os agregados com diâmetro entre 12,5 e 19,0 mm são lavados, passam por imersão em água destilada e permanecem em estufa por 2 horas a temperatura de 120°C. Em seguida, uma massa de 500g dos agregados é aquecido a temperatura de 100°C, enquanto o cimento asfáltico é levado a 120°C também em estufa. O ligante é incorporado ao agregado em mistura e repousam em um béquer coberto por água destilada por 72 horas. A mistura solta é vertida em uma superfície lisa para observação da adesividade.

Para comparação apropriada, o mesmo ensaio foi feito para outras granulometrias de EFRA e LD, a saber 4,8 a 9,5 mm e 9,5 a 12,5 mm. Além disso, esse procedimento também foi utilizado como uma pré-análise para averiguação da possibilidade de cada um dos aditivos a ser aplicado à pesquisa. Assim, na hipótese do aditivo ser eficaz para a adesividade nessa verificação, corpos de prova contendo esse material como fíler são compactados e submetidos aos ensaios mecânicos posteriormente apresentados.

Figura 17 - Esquema do ensaio NBR 12583 (ABNT, 2017) (a) Peneiramento e secagem dos agregados, (b) Amostras secas, (c) Mistura entre ligante e agregados, (d) Submersão da mistura em água destilada e (e) Mistura vertida em cerâmica



Fonte: Autora

3.2.1.3. Módulo Elástico e Dureza por meio de ensaio de Nanoindentação

A nanoindentação é um teste de fundamento simples, em que um indentador rígido e de propriedades conhecidas é empurrado na superfície do material a uma escala nano de profundidade. A partir disso, os valores de módulo elástico e de dureza do objeto de estudo são derivados do perfil de carga e da profundidade alcançada.

O teste se dá sob algumas considerações: a amostra é um meio-espaço infinito; o indentador tem uma geometria ideal; o material é perfeitamente elástico e incompressível e não há atuação das forças de fricção.

Esse teste foi realizado na *University of Nebraska* e as amostras de agregados de EFRA, de LD e naturais possuíam diâmetro de 12,5 a 19,0 mm.

As Equações 5 e 6 trazem a dureza H e o módulo elástico E_s , respectivamente.

$$H = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (5)$$

Em que: $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima aplicada e A a área de contato no instante da carga máxima.

$$E_s = \frac{1-\nu_s^2}{\frac{1}{E_r} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}} \quad (6)$$

Em que: ν_s é a razão de Poisson do material da amostra; ν_i é a razão de Poisson do material do indentador e E_i o seu módulo de elasticidade e E_r um módulo efetivo calculado, cujo valor depende da rigidez do material e da área de contato na indentação (KARKI, 2010).

3.2.1.4. Caracterização da Forma das Escórias EFRA e LD

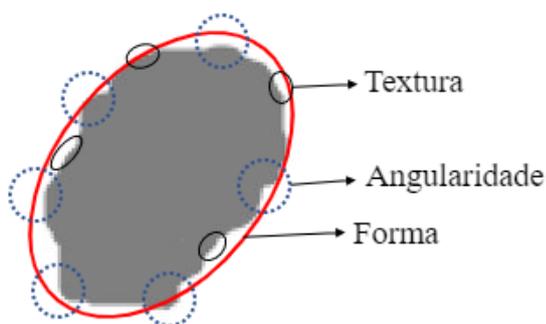
O intertravamento mecânico (adesividade mecânica) entre ligante e agregado é fator que é influenciado pela capacidade do substrato em ser recoberto pelo cimento asfáltico, sendo esta função da rugosidade dos agregados. Para análise de forma e aspectos físicos de superfície dos agregados, os grãos e partículas foram examinados por dois métodos: *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) e *Laser Scanning Microscopy* (LSM), a seguir comentados. O primeiro deles foi realizado na Universidade Federal do Ceará e o segundo na *University of Nebraska*.

a) AIMS – *Aggregate Image Measurement System*

As características de forma dos agregados influenciam no desempenho estrutural da mistura asfáltica e sua classificação precisa é essencial para o estudo das matrizes betuminosas. Por meio de tecnologia de imagem digital, ele captura imagens em diferentes resoluções e ângulos de vista, usando iluminações distintas para analisar a forma, angularidade e textura do agregado miúdo e graúdo (FLETCHER et al., 2003; GATES et al., 2011).

A verificação pelo AIMS é capaz de fornecer análise 3D de forma, angularidade e textura da superfície para agregados graúdos; análise 2D de forma e angularidade para agregados miúdos, conforme Figura 18 (BESSA et al., 2015).

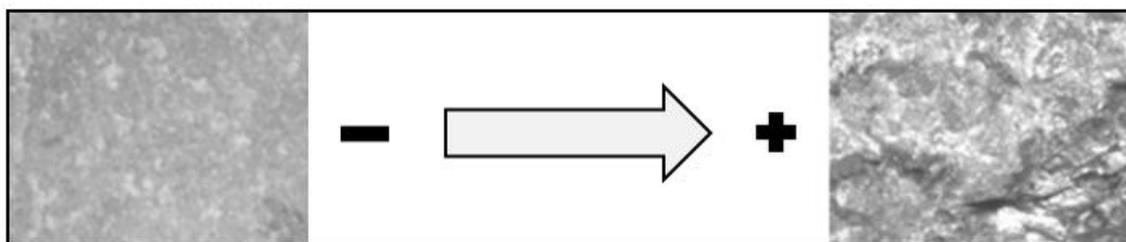
Figura 18 - Propriedades de forma do agregado



Fonte: Autora, adaptado de Masad (2005)

Para os agregados graúdos, a propriedade de forma trata da variação na proporção da partícula. A forma pode ser mensurada pela esfericidade – que representa a relação entre as dimensões do agregado –, fator que varia de 0 a 1 e, quanto maior, mais cúbica é a partícula. A textura é a irregularidade superficial quantificada pela variação no nível de cinza dos pixels da imagem da superfície e seu valor varia de 0 a 1000 (MASAD, 2005; IBIAPINA, 2018). A Figura 19 apresenta as texturas extremas que podem ser apreciadas pelo programa.

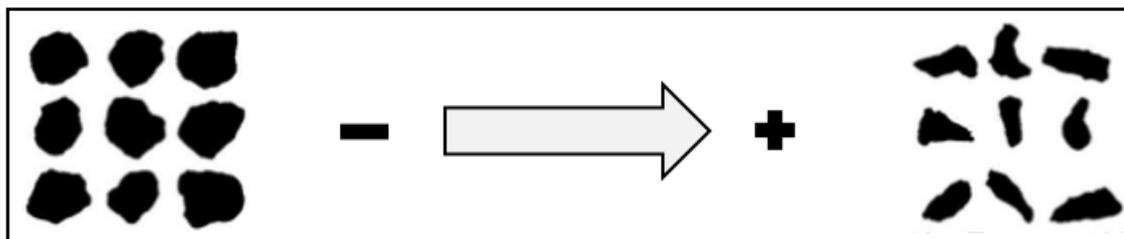
Figura 19 - Variação de textura superficial do agregado graúdo



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

Segundo Bessa et al. (2015), nos agregados miúdos, a propriedade de forma é quantificada pela forma relativa das imagens e seu valor varia de 0 a 20: quanto mais próxima de 0, mais se aproxima a forma 2D de um círculo perfeito. A Figura 20 contém forma 2D máxima e mínima para agregado miúdo.

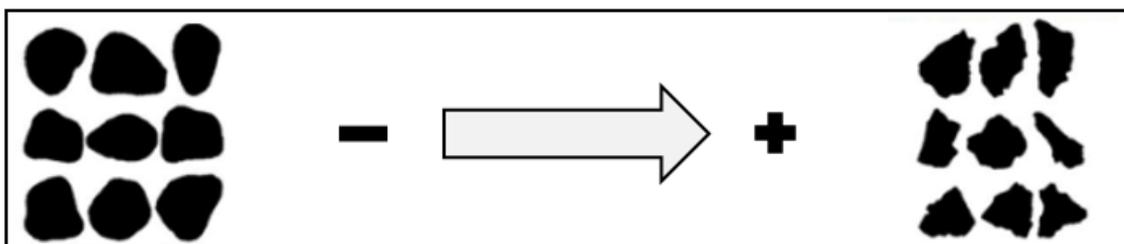
Figura 20 - Variação de forma do agregado miúdo



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

Angularidade (Figura 21), parâmetro comum aos agregados miúdos e graúdos, mede as variações de contorno da partícula, variando de 0 a 10000. A partícula é mais arredondada se mais próximo do 0 está a sua angularidade.

Figura 21 - Variação para angularidade dos agregados graúdos e miúdos



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

Para essa análise, um número definido de partículas e grãos foram avaliados em cada faixa granulométrica no equipamento Figura 22, conforme Tabelas Tabela 5 e Tabela 6.

Figura 22 - Equipamento AIMS com as amostras de agregados



Fonte: Autora

Tabela 5 - Número de partículas analisadas no AIMS para a EFRA

Diâmetro (mm)	Forma (2D)	Forma (Esfericidade)	Angularidade	Textura
12,5-19	-	18	18	18
9,5-12,5	-	49	50	50
4,75-9,5	-	50	50	50
2,36-4,75	-	49	50	49
1,18-2,36	150	-	150	-
0,60-1,18	150	-	150	-
0,30-0,60	151	-	151	-
0,15-0,30	149	-	150	-
0,075-0,15	153	-	155	-
Abaixo 0,075	116	-	116	-

Fonte: Autora

Tabela 6 - Número de partículas analisadas no AIMS para a LD

Diâmetro	Forma (2D)	Forma (Esfericidade)	Angularidade	Textura
12,5-19	-	-	-	-
9,5-12,5	-	48	48	48
4,75-9,5	-	50	50	49
2,36-4,75	-	49	50	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

A partir dos resultados pela análise do AIMS, foi possível classificar os agregados siderúrgicos conforme Al Rousan (2004), que propôs uma análise estatística para estabelecer valores limites para as propriedades físicas de forma, textura e angularidade - Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação proposta por Al Rousan (2004)

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

Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004)

O trabalho de Ibiapina (2018) também propôs uma classificação dos agregados, abordando as propriedades de forma a partir de um banco de dados de materiais brasileiros, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação proposta por Ibiapina (2018)

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

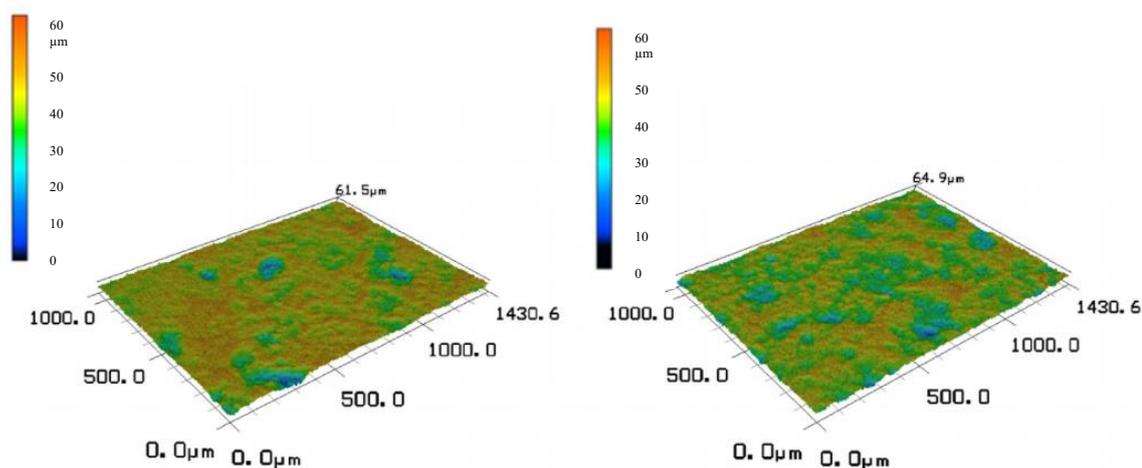
Fonte: Adaptado de Ibiapina (2018)

b) LSM – Laser Scanning Microscopy

Para enriquecer o estudo da superfície dos agregados siderúrgicos, amostras de EFRA e LD já britadas com diâmetro de 12,5 a 19 mm foram submetidas à varredura de microscopia à laser, que possibilitou a determinação da rugosidade em múltiplos locais da superfície das escórias. Esse microscópio coleta imagens óticas, mas também dados da superfície em alta resolução, a medida em que combina a luz do laser com luz branca. A imagem em alta resolução da superfície da amostra é obtida pela intensidade de reflexão dos feixes do laser; dessa forma, a topografia é traçada analisando a intensidade do retorno do feixe do laser à posição.

Na Figura 23, um exemplo de imagem da topografia superficial de um agregado obtido pelo mesmo método utilizado nessa pesquisa.

Figura 23 - Exemplo de imagem topográfica de agregado obtida pelo LSM



Fonte: Khedmati et al. (2018)

3.2.1.5. Caracterização Termodinâmica das Escórias EFRA e LD

A energia de superfície é uma propriedade fundamental e importante no estudo de adesividade de materiais. Assim, nesta pesquisa foi feito o estudo de propriedades termodinâmicas das escórias EFRA e LD por meio do ensaio de Ângulo de Contato (*Surface Free Energy*) para avaliação da energia de superfície – característica do material - e da Microscopia de Força Atômica (*Atomic Force Microscopy* AFM) para análise do trabalho da força de adesão entre as escórias estudadas a um outro material (neste estudo, estes eram uma ponta de silício do AFM ou o CAP 50/70 aderido a ponta de AFM), estabelecendo assim uma comparação entre as escórias nesses parâmetros.

As amostras de escórias EFRA e LD para ambos experimentos apresentados nessa subseção foram coletadas na Arcelor Mittal Tubarão em 21 de fevereiro de 2019, antes mesmo

de serem britadas, em grandes blocos. Em seguida, foram extraídas destes blocos amostras cilíndricas de 23 mm de diâmetro com o auxílio de uma furadeira de bancada e de uma serracopo de vídea ($\text{Ø}30\text{ mm}$). Das amostras obtidas para cada coproduto, metade foi polida e a outra metade não, mantendo sua rugosidade natural - Figura 24. Os ensaios dessa subseção foram realizados no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Figura 24 - Amostras de (a) EFRA e (b) LD sendo coletadas e (c) extraídas para os ensaios de análise de superfície



Fonte: Autora

Os ensaios de superfície desse tópico foram realizados nos Laboratórios de Superfícies Poliméricas e Asfálticas e de Caracterização de Superfície do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COOPE/UFRJ.

a) *Ângulo de Contato (Surface Free Energy)*

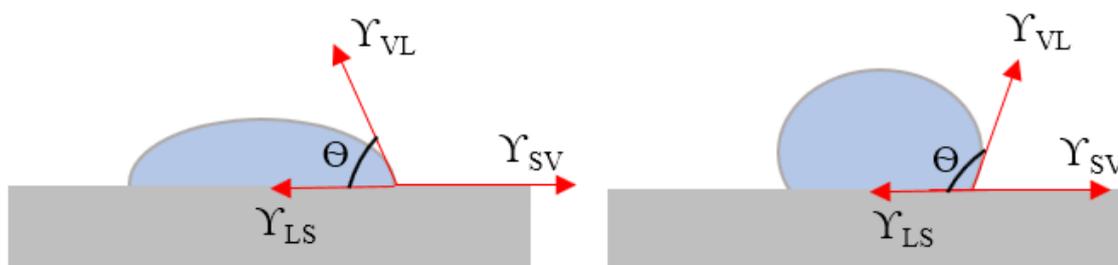
Energia de superfície ou energia livre de superfície de um material sólido ou líquido é definida como o trabalho necessário para produzir uma unidade de área de uma nova superfície do material no vácuo. Ocorre que as moléculas da superfície estão submetidas a forças diferentes das moléculas do interior, isso porque sobre elas agem forças que as direcionam ao centro do volume do material, a fim de manter o equilíbrio do sistema. O parâmetro da energia de superfície é função de forças moleculares pertencentes à superfície do material e fornece ferramentas de análise de adesividade entre agregado e ligante, uma vez que energia de superfície está relacionada à molhabilidade (TAN e GUO, 2013; HOSSAIN et al., 2019; KAKAR, HAMZAH e VALENTIN, 2015).

Molhabilidade é a capacidade de um líquido se espalhar sobre uma superfície. Quando uma gota de líquido repousa sobre uma superfície, elas interagem: quanto mais espalhada a gota estiver, maior será a energia de superfície da interface; portanto, menor o ângulo de contato (Θ) formado pela gota no substrato e, melhor a adesividade entre esses materiais.

Devido à dificuldade em se mensurar a energia de superfície de um sólido, algumas medidas indiretas são utilizadas e o ângulo de contato é uma opção. A Equação 7 de Young relaciona as componentes da energia de superfície do sólido-vapor (γ_{sv}); que seria a própria energia de superfície do sólido; do líquido-vapor (γ_{lv}) e da interface sólido-líquido (γ_{sl}) com o ângulo de contato Θ entre gota e substrato, conforme apresentado na Figura 25. Na parte esquerda da figura, o líquido apoiado sobre o sólido possui maior afinidade com ele e maior espalhamento; enquanto na da direita, há menos afinidade e, portanto, maior ângulo de contato.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos\Theta \quad (7)$$

Figura 25 - Componentes da Energia de Superfície de uma gota sobre um sólido



Fonte: Adaptada de Hefer (2004)

Contudo, para uma dada superfície sólida, os valores de $\gamma_{lv} \cdot \cos\Theta$ não poderiam depender apenas de γ_{lv} , mas também de várias forças intermoleculares dos líquidos. Além

disso, embora a Equação 7 satisfaça a definição mecânica, ela não atende à termodinâmica, visto que a Υ_{sv} não seria a energia de superfície do sólido e sim essa energia reduzida da adsorção do vapor. Por isso, algumas aproximações são consideradas. A mais comum delas é a das componentes de Lifshitz-van der Waals (ou apolar, Υ_i^{LW}) e componente ácido-básica (polar, Υ_i^{AB}), em que se considera a soma de componentes associada à natureza química das ligações existentes. Isso porque vem sendo discutido que as forças mais significantes no contexto da adesividade são as forças de van der Waals e as interações ácido-básicas. A partir do conceito de ácido e base de Lewis, tem-se que essa última componente se desmembra em componente ácida de Lewis (Υ_i^+) com capacidade de receber elétrons e em componente básica (Υ_i^-), capaz de doá-los, conforme Equação 8 (KWOK e NEUMANN, 1999; HEFER, 2004; PACKHAM, 2005).

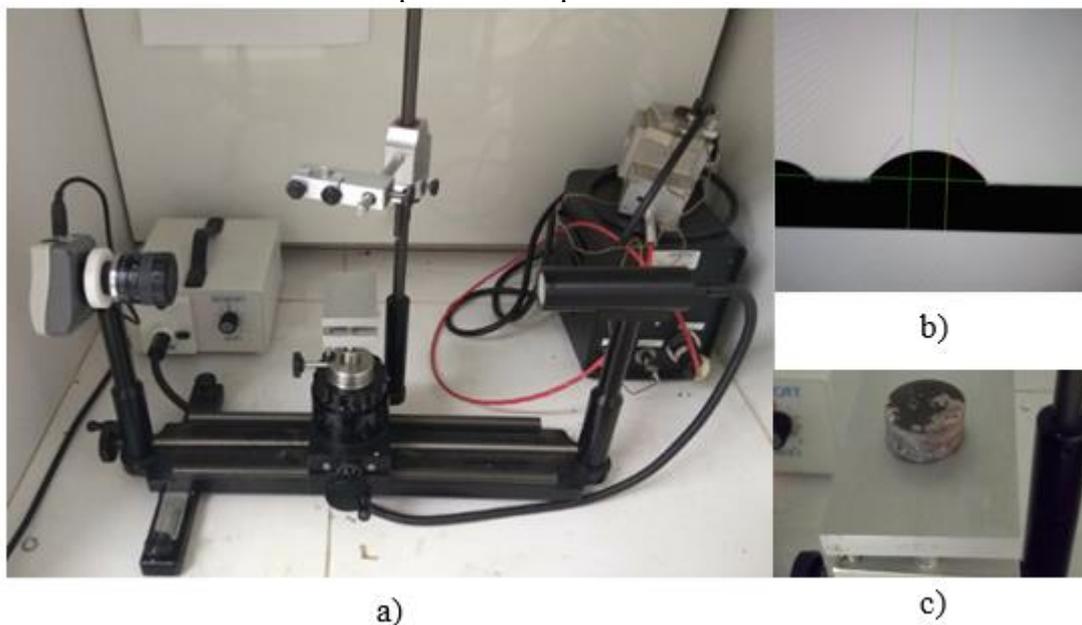
$$\Upsilon_i = \Upsilon_i^{LW} + \Upsilon_i^{AB} = \Upsilon_i^{LW} + \Upsilon_i^- \Upsilon_i^+ \quad (8)$$

Neste trabalho, os ensaios foram realizados em um goniômetro automatizado (Ramé-Hart, 100-50) da Figura 26. Com o auxílio de uma câmera CCD, a imagem da gota é capturada, tratada e, assim, é possível mensurar o ângulo de contato que a gota forma com a superfície, tanto nas extremidades direita quanto esquerda. A superfície do substrato de cada uma das escórias é caracterizada a partir da realização desse ensaio com três líquidos diferentes de energia de superfície conhecidas: água destilada, glicerol e diiodometano, sendo os dois primeiros polares e o último apolar. Segundo Hefer, Bhasin e Little (2006), o ângulo de contato formado a partir de cada líquido torna possível a resolução da Equação 9, pois fornece as três componentes Υ_L^{LW} , Υ_L^- e Υ_L^+ dos líquidos e possibilita encontrar x_1 , x_2 e x_3 , que são as componentes das energias de superfície do material ensaiado; no caso dessa pesquisa, os agregados siderúrgicos.

$$\Upsilon_L^{TOTAL} (1 + \cos\theta) = \left(2\sqrt{\Upsilon_L^{LW}}\right)x_1 + \left(2\sqrt{\Upsilon_L^-}\right)x_2 \left(2\sqrt{\Upsilon_L^+}\right)x_3 \quad (9)$$

A gota é depositada sobre o substrato e, num intervalo de 20 segundos, 100 medidas são feitas à direita e à esquerda; obtém-se os valores médios e os valores de energia de superfície por meio do programa de processamento dos dados utilizado.

Figura 26 - (a) Goniômetro Ramé-Hart; (b) Gota visto pelo programa; (c) Amostra posicionada para ensaio



Fonte: Autora

Com o objetivo de verificar a capacidade do substrato (escória) ser molhado pelo ligante asfáltico, uma pequena porção do CAP 50/70 foi aquecida e mantida dentro de um aplicador metálico (mantendo a temperatura de 80°C) até o ligante formasse uma gota sobre a amostra polida de escória, conforme Figura 27. Assim, obtiveram-se os ângulos formados entre o ligante asfáltico e cada escória, permitindo avaliar a molhabilidade entre esses materiais.

Figura 27 - Amostra ensaiada com CAP 50/710 sob aquecimento



Fonte: Autora

As amostras não polidas não puderam ser avaliadas, pois absorveram rapidamente os líquidos propostos. As análises que serão apresentadas nos resultados são relativas às amostras

polidas e, portanto, não há influência do travamento mecânico entre substrato e líquido, já que a rugosidade foi macroscopicamente reduzida.

b) Microscopia de Força Atômica (Atomic Force Microscopy AFM)

O ensaio de microscopia de força atômica permite avaliar o trabalho da força de adesão entre dois materiais por meio de uma quantificação de forças de atração e repulsão, sem o prévio cálculo da energia de superfície. O trabalho da força de adesão entre dois materiais é o trabalho necessário para separá-los de sua interface no vácuo. O trabalho de força de coesão e de adesão estão relacionados ao tipo de fratura que uma mistura asfáltica tende a sofrer. Assim, se o trabalho coesivo é inferior ao adesivo, é esperado que a ruptura eventual seja coesiva (AGUIAR-MOYA et al., 2016; LITTLE e BHASIN, 2007; CLINT, 2001). Essas duas grandezas estão relacionadas sob a forma da Equação 10.

$$W_{AB} = \left(2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_B^{LW}} \right) + \left(2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_B^-} \right) + \left(2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_B^+} \right) \quad (10)$$

Onde:

W_{AB} : o trabalho da força de adesão entre os materiais A e B;

γ_A^{LW} : componente apolar para material A;

γ_B^{LW} : componente apolar para material B;

γ_A^+ : componente ácida para material A;

γ_B^+ : componente ácida para material B;

γ_A^- : componente básica para material A;

γ_B^- : componente básica para material B;

A Microscopia de Força Atômica é um tipo de varredura microscópica de alta resolução que vem sendo utilizada pela comunidade acadêmica da área de materiais de infraestrutura de transportes para avaliar propriedades microrreológicas e microestruturais de ligantes, medir características da interface ligante-agregado, medir propriedades mecânicas simultaneamente à topografia da amostra, entre outros (MACEDO et al., 2018; DONG et al., 2017).

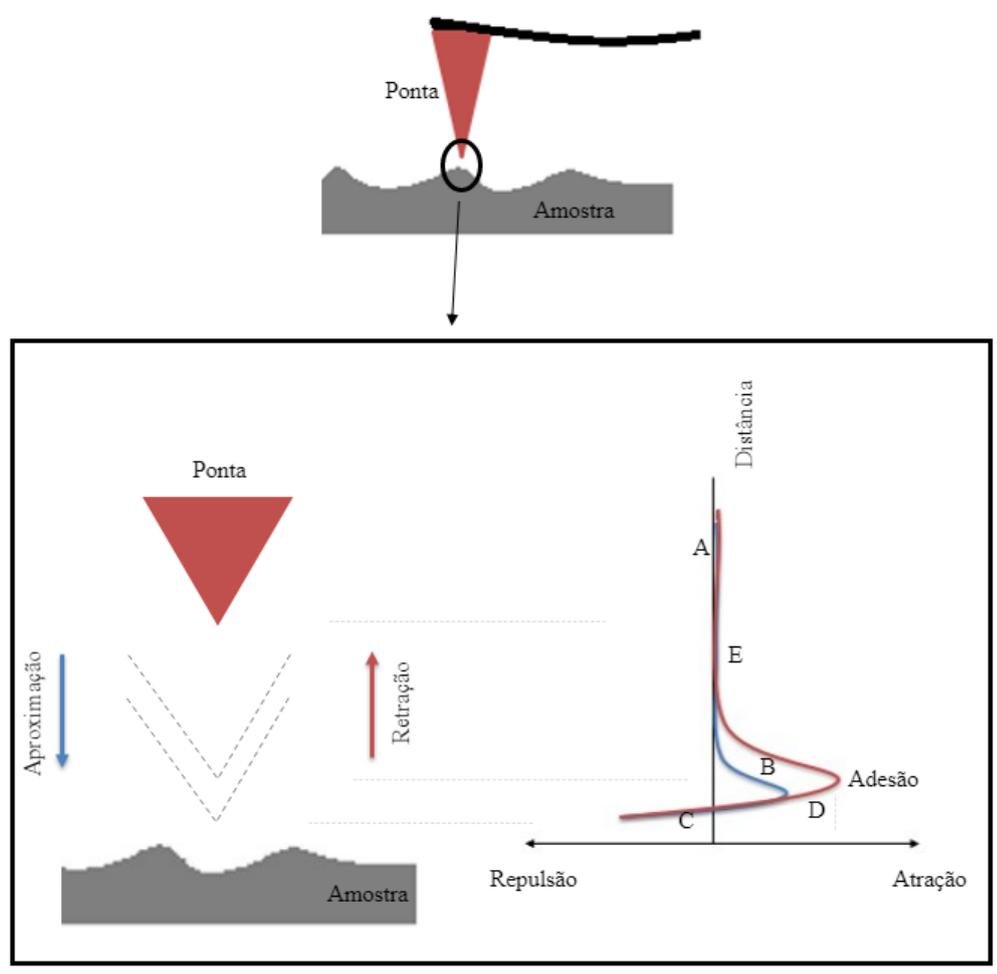
O AFM possibilita medidas de diversos tipos de força, tais como mecânica (topografia), elétrica e magnética. As curvas que relacionam grandezas de força e a distância de separação entre os objetos obtidas fornecem informações de força de adesão e trabalho da força de adesão. O princípio de funcionamento é o seguinte: uma ponta acoplada a uma haste (cantiléver) de certa constante de mola é colocada para varrer uma determinada área da amostra (substrato a

ser ensaiado), com deslocamento nos eixos x, y e z. A topografia é obtida pela variação das forças de interação (ora de atração, ora de repulsão) entre a superfície da amostra e da agulha, visto que se trata de um sistema piezoelétrico, suscetível a movimentações quando o controlador de realimentação (computador) aplica tensão variante nos terminais do equipamento. As medidas de força se dão pela deflexão do cantiléver que é captada por um sistema ótico (feixe de laser) (HERRMANN et al., 1997; FRANKLIM, 2007).

A Figura 28 exemplifica o princípio de funcionamento. Em cada área analisada, a ponta faz um ciclo sobre a amostra: de aproximação (caminho A-B-C) e de afastamento (caminho C-D-E). A ponta começa distante da amostra (em A), de maneira que o gráfico de força permanece em zero. A medida em que se aproxima, a ponta é submetida a forças atrativas até que o contato entre elas acontece (em B). Durante a retração, a ponta é puxada, mas a força de adesão entre a ponta e a amostra a mantém momentaneamente (D) e a ponta segue para sua posição inicial (E) (WANG e LIU, 2017; XU et al., 2016).

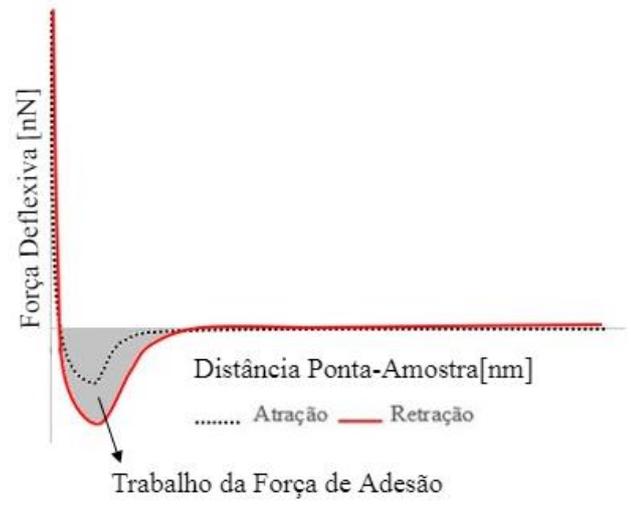
Pela análise gráfica, também é possível obter o valor do trabalho da força de adesão que equivale numericamente à área que o gráfico de retração forma com o eixo x (distância), conforme Figura 29.

Figura 28 - Esquema de varredura de uma amostra no AFM



Fonte: Autora

Figura 29 - Gráfico força x distância com destaque para o Trabalho da Adesão



Fonte: Autora

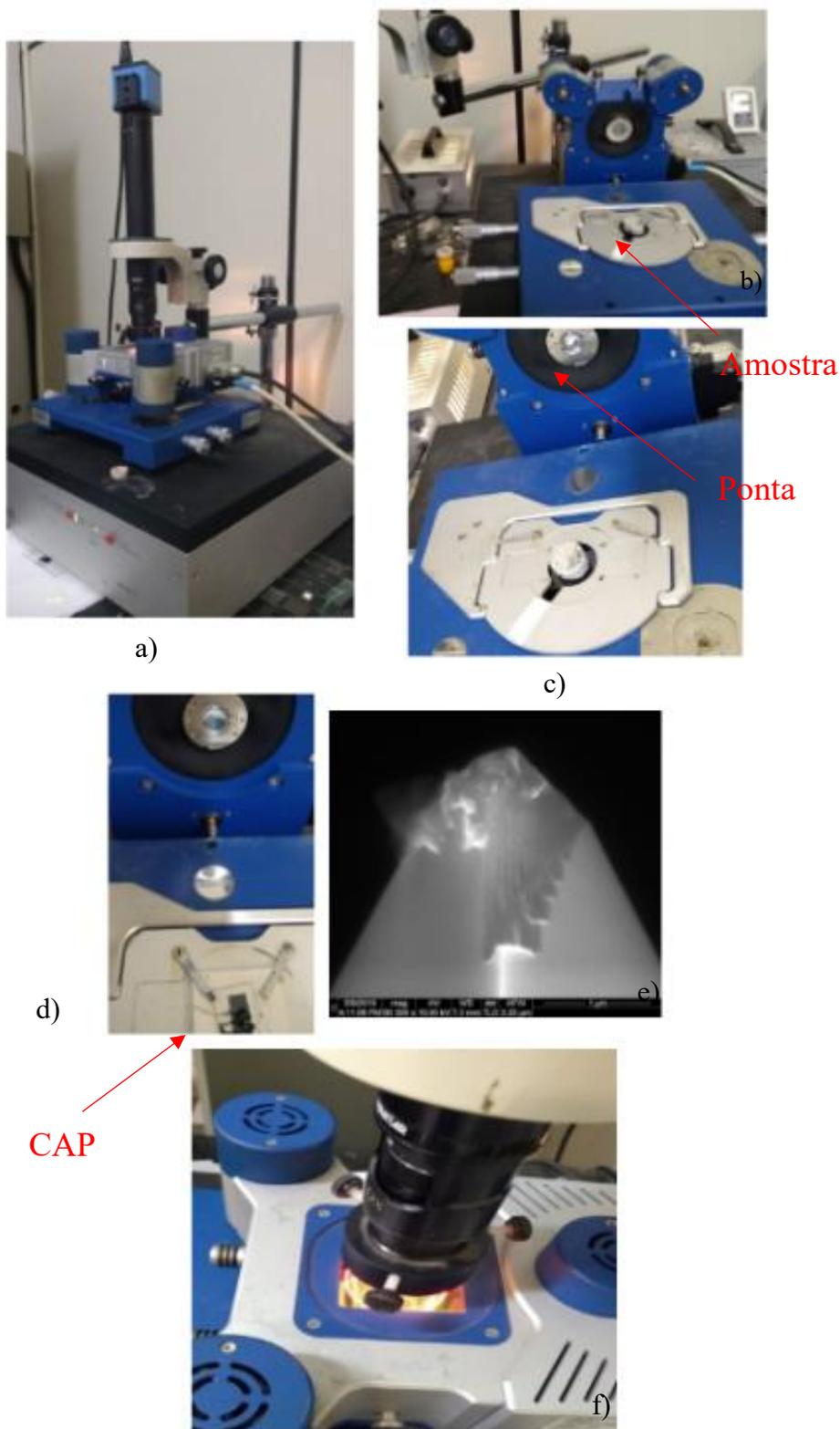
Para cada amostra – EFRA e LD – três mapas (regiões) distintos foram ensaiados. Cada mapa possui uma área equivalente a $100 \mu\text{m}^2$, na qual são feitas 64 determinações. Isso significa que para um quadrado de $10 \mu\text{m}$ de lado, 64 sub-regiões são avaliadas; fornecendo 64 gráficos força x distância e, portanto, 64 valores de trabalho da força de adesão, todos fornecidos pelo software acoplado ao equipamento para aquisição de dados. Os valores de trabalho da força de adesão apresentados para cada mapa são produto de um compilado dessas determinações, do qual se obteve a média, e os gráficos mostrados serão aqueles que representam com mais fidelidade o valor médio, devido à inviabilidade em se apresentar um número tão elevado de gráficos.

Normalmente, o uso de AFM por pesquisadores da área de pavimentação tem o intuito de caracterizar o ligante asfáltico, sendo ele mesmo a amostra a ser ensaiada, i.e., a ponta do AFM, tipicamente feita de silício, se aproxima do substrato ligante asfáltico. No entanto, na presente pesquisa, os substratos avaliados eram amostras polidas de EFRA e LD.

Neste estudo, foi utilizada uma ponta de silício de constante elástica entre 20 e 80 kN/m e de frequência entre 319 e 367 Hz. Uma amostra de CAP 50/70, que havia sido previamente aquecida, foi utilizada para revestir a ponta instalada no AFM. Essa ponta (coberta com ligante) foi utilizada para avaliar as forças de atração e retração entre o ligante e as amostras de EFRA e LD. Dessa forma, pôde-se quantificar o trabalho de adesão no sistema ligante-escória. Uma nova ponta de mesmas especificações, porém sem ser recoberta com ligante, foi usada para avaliar as amostras de EFRA e LD, com o objetivo de ser obter o valor de trabalho da força de adesão de referência que o equipamento forneceria e, assim, tornar evidente os efeitos de atração do ligante aos agregados neste ensaio. Os resultados da ponta sem o ligante medem a afinidade do agregado ao silício, enquanto os da ponta com ligante avaliam a interação do ligante com a escória.

Importante destacar que, em cada ensaio, o mapa corresponde a uma região qualquer da amostra; não havendo correspondência geográfica, por exemplo, entre os mapas 1 do ensaio da ponta sem e com ligante para EFRA ou para LD e isso se estende aos demais mapas. A Figura 30 apresenta imagens do procedimento.

Figura 30 - Equipamentos para ensaio AFM – (a) Microscópio de Força Atômica (b) Amostra de EFRA posicionada (c) Idem b (d) CAP sendo ensaiado para aderir à ponta (e) Ponta com ligante ao Microscópio Eletrônico (f) Amostra sendo ensaiada por varredura



Fonte: Autora

O modo de operação desenvolvido nas amostras de EFRA e LD foi intermitente – durante a oscilação vertical da agulha entra em contato com a amostra por um curtíssimo intervalo de tempo e salta para fora da amostra –, de varredura lenta à força constante. Novamente, as amostras utilizadas para ambos coprodutos nesse ensaio foram as polidas dada à grande variação na topografia das amostras não polidas.

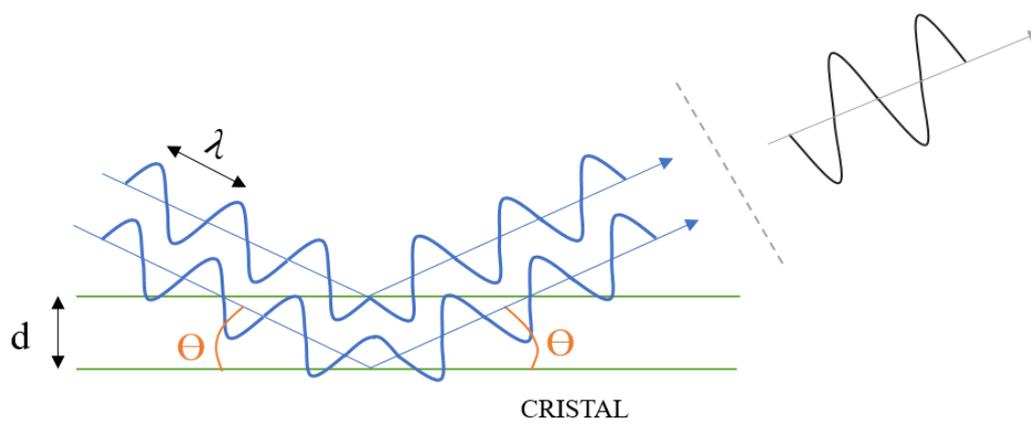
3.2.1.6. Caracterização Química e Mineralógica das Escórias EFRA e LD

a) Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-X apresentada das amostras de coproduto EFRA e LD foi realizada 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°.

A DRX é a técnica mais indicada para determinação das fases cristalinas dos sólidos, isso porque os átomos estão ordenados em planos cristalinos que se separam a distâncias de ordem de grandezas similar aos comprimentos de onda de raios-X. A amostra em pó é colocada sob a ação de raios-X e estes interagem com os átomos da amostra, provocando a difração dos fótons, que se relaciona com a distância entre os planos do cristal; os feixes difratados se formam quando as reflexões produzem interferências construtivas (Figura 31).

Figura 31 - Esquema de difração do feixe e interferência construtiva



Fonte: Autora, baseada em Queiroz, Kurosawa e Barreto (2013)

Em um material em que os átomos estejam sistematicamente arranjados (característica de uma estrutura cristalina), a distância d de espaçamento entre planos de uma estrutura

crystalina se relaciona às relações de fase por meio da Lei de Bragg - Equação 11 (ALBERS et al., 2001; GOBBO, 2003; QUEIROZ, KUROSAWA e BARRETO, 2013).

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta \quad (11)$$

Em que:

n: ordem de difração;

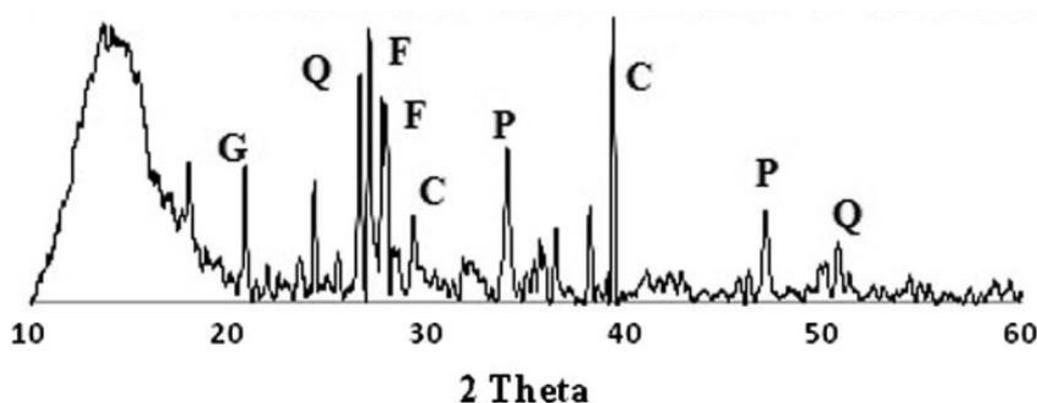
λ : comprimento de onda aplicado;

d: distância entre planos;

θ : ângulo de incidência.

O comprimento de onda aplicado e o valor de θ são sempre conhecidos. Os feixes difratados por um determinado conjunto de planos do cristal é apresentado em forma de picos, cuja intensidade depende dos tipos de átomos e suas posições. A análise dos resultados acontece por meio de um gráfico (difratograma) que relaciona o ângulo de espalhamento 2θ e a intensidade dos picos de incidência. A Figura 32 retirada do trabalho de Saravanakumar, Abhiram e Manoj (2016) apresenta o resultado da análise por DRX de um agregado natural de concreto, cujos minerais são: G, gipsita; Q, quartzo; F, feldspato; C, calcita e P, portlandita.

Figura 32 - Difratograma de um agregado natural de concreto



Fonte: Saravanakumar, Abhiram e Manoj (2016)

Para interpretação de resultados, é necessário consultar um banco de dados que contém informações acerca de estruturas conhecidas e catalogadas. Isso porque para os planos de difração, as distâncias entre esses planos, a intensidade dos picos e suas respectivas posições apresentadas no difratograma são características de cada material. Os difratogramas foram

obtidos para os agregados siderúrgicos, que haviam sido secos, destorroados e peneirados na #200.

b) Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raios-X para análise e determinação química dos compostos dos materiais tem especial importância nesse trabalho, visto que a interação química entre eles pode motivar o estudo e elucidar um ou outro resultado encontrado.

Segundo Nascimento (1999), o FRX é um análise quali-quantitativa baseada na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios-X excita esses elementos, os elétrons saltam e emitem uma energia (fóton) que é característica de cada elemento.

O FRX dessa pesquisa 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, destorroadas e peneiradas na peneira #200. São apresentados os resultados de análise dos coprodutos EFRA, LD, Pó FGD, Pó EP e agregado natural.

3.2.2. Caracterização das Misturas Asfálticas

3.2.2.1. Dosagem Marshall

Com o objetivo de dar continuidade à avaliação dos efeitos da adesividade ligante-escória, foram avaliadas segundo ensaios tradicionais de dano por umidade em misturas asfálticas dosadas em laboratório com substituição de 25% da massa do agregado natural (pó-de-pedra, brita 0 e brita 1) por agregados siderúrgicos (EFRA ou LD). Para a dosagem os agregados são colocados na granulometria da Faixa C para camadas de rolamento, conforme norma DNIT 031/2006 apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Granulometria conforme norma para camadas asfálticas

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando		
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C
2"	50,8	100	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100
1/2"	12,7	-	-	80 - 100
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90
n° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72
n° 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50
n° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26
n° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16
n° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10

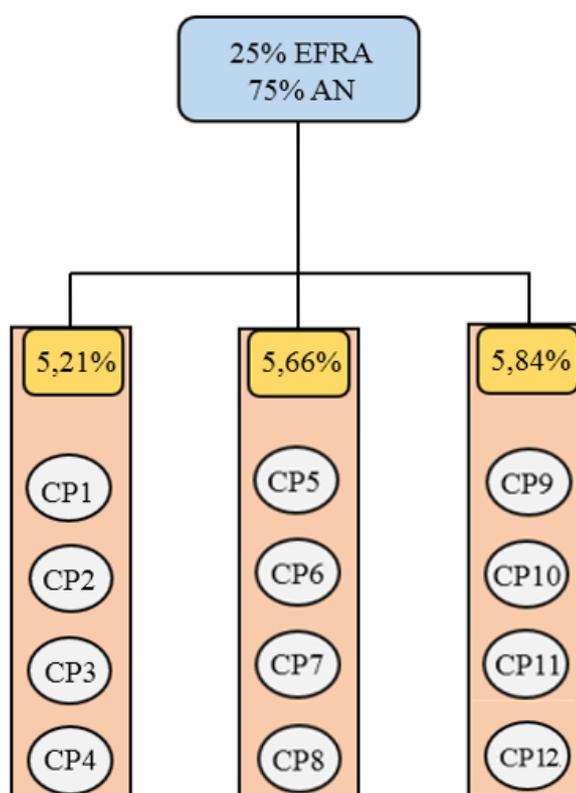
Fonte: Adaptada da DNIT 031/2006

A escória de aciaria LD utilizada neste estudo já foi estudada por Teixeira et al. (2019). Os autores realizaram dosagens Marshall também com substituição de 25% de AN por escória LD, e a faixa granulométrica da composição de AN e LD foi enquadrada na Faixa C do DNIT. Segundo os autores, o teor de ligante se manteve igual ao das misturas sem incorporação de escória LD (teor de projeto de 5,1%) mostrando que o acréscimo de escória não culminou em maior consumo do CAP para 25% de LD. Ao se aumentar o percentual de substituição para 50% de agregados de escória LD, houve um aumento de consumo de ligante, chegando a 5,9% em relação à massa de agregados.

Para possibilitar a comparação entre o desempenho dos coprodutos nesse trabalho, a EFRA também entrou num percentual de 25% na mistura, de maneira que a sua granulometria foi alterada para se aproximar da desenvolvida por Teixeira et al. (2019), bem como foi feito para os agregados naturais aqui utilizados. Isso quer dizer que para cada faixa granulométrica, 25% dos agregados são de EFRA e 75% de agregados naturais. Para o coproduto LD, a dosagem de Teixeira et al. (2019) foi reproduzida. A partir disso, procedeu-se com a dosagem Marshall para obtenção do teor ótimo de ligante para misturas com 25% de EFRA. Conforme norma DNER-ME 043/95, corpos de prova (CP's) com altura de $63,5 \pm 1,3$ mm e diâmetro de 101,6 mm foram compactados utilizando diferentes teores de ligante (5,21%, 5,66% e 5,84%), de

acordo com o mostrado na Figura 33. O teor ótimo de ligante foi estabelecido quando foi alcançando um volume de vazios (VV) entre 3 e 5% e relação betume-vazios (RBV) entre 75 e 82%. A partir da determinação do teor ótimo de ligante, CP's foram compactados no teor de projeto para posterior realização de ensaios mecânicos de Estabilidade e Fluência Marshall e Tração por Compressão Diametral. Esse mesmo teor foi utilizado para confecção dos corpos de prova destinados ao ensaio de dano à umidade (DNIT 180/2018), cujo volume de vazios requerido é de 6 a 8%. Etapas da dosagem são mostradas na Figura 34.

Figura 33 - Dosagem Marshall para mistura com 25% de EFRA



Fonte: Autora

Figura 34 - Etapas da Dosagem Marshall: (a) Aquecimento dos agregados, (b) Pesagem CAP, (c) Mistura, (d) Mistura pronta para ir à estufa, (e) Colocação mistura no molde, (f) Compactação Marshall, (g) Identificação dos CP's, (h) CP's aguardando desmolde e (i) CP's desmoldados



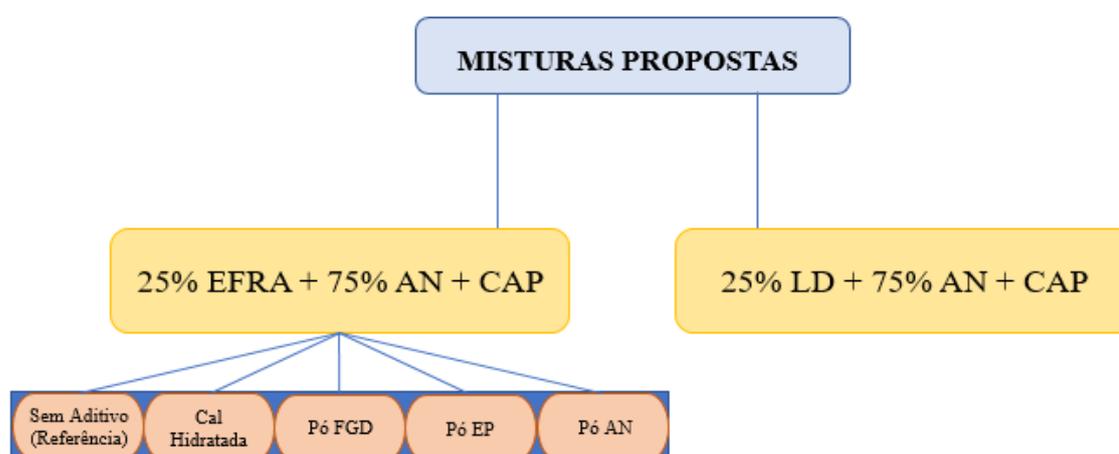
Fonte: Autora

3.2.2.2. Misturas asfálticas propostas

Nesse ponto, os agregados encontram-se obedecendo à composição granulométrica da faixa C e o teor utilizado é o de projeto, encontrado na dosagem. As misturas com LD são compostas pelo próprio coproduto de aciaria, agregados naturais e cimento asfáltico. No caso das misturas asfálticas contendo EFRA, elas são compostas pelo coproduto de alto forno, agregados naturais, cimento asfáltico, mas também recebem os aditivos propostos que, supostamente, melhoram a adesão ligante-agregado (um grupo servirá de referência e não terá aditivo). Os aditivos foram analisados no ensaio de adesividade NBR 12583 (ABNT, 2017) anteriormente comentado e, se por meio de observação o resultado fosse julgado satisfatório, o aditivo seguiria para aplicação na mistura asfáltica completa.

Antes do CAP ser incorporado aos agregados, estes recebem 3% de sua massa em água destilada e os aditivos – cal hidratada, pó FGD, pó EP e pó de agregado natural – foram incorporados em volumes iguais em cada corpo de prova a partir do volume estabelecido pela cal. Isso porque os CP's com cal receberam 1,5% de massa de agregados em cal e esse volume de fíler foi calculado e aplicado nos corpos de prova para os demais aditivos, haja vista que a massa específica de cada um deles era conhecida. Um resumo das misturas propostas está mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Misturas asfálticas propostas com aditivos



Fonte: Autora

3.2.2.3. Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Os aditivos que estão sugeridos podem não somente modificar a adesividade como também alterar, de alguma forma, as propriedades mecânicas dos concretos asfálticos resultantes. Assim, torna-se importante a avaliação desse critério por meio de ensaios que são requeridos pela especificação de serviço do DNIT 031/2006 em misturas asfálticas, tais como Estabilidade Marshall e Tração por Compressão Diametral. Além disso, foi realizado o ensaio de dano à umidade induzida, DNIT 180/2018 para aferir o desempenho das misturas propostas quando submetidas a um condicionamento a determinado grau de saturação.

Para cada análise de propriedade mecânica, foram compactados três CP's por mistura e, juntamente com os resultados individuais, serão apresentadas também as médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação para cada mistura tendo em vista avaliar a variação de resultados dentro de um mesmo grupo. Assim, para valores estabilidade ou tração iguais a X1,

X2 e X3 num grupo de CP's para uma mesma mistura, tem-se a média (X_m) do parâmetro em análise conforme Equação 12.

$$X_m = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (12)$$

De posse da média, é possível obter o desvio padrão DP para i elementos de um grupo, de acordo com a Equação 13.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{3}} \quad (13)$$

O coeficiente de variação é obtido pela Equação 14 e quanto menor o seu valor, mais homogêneos são os resultados. Idealmente, CV deve ser menor que 25%.

$$CV = \frac{DP}{X_m} \times 100\% \quad (14)$$

a) Estabilidade e Fluência Marshall

Estabilidade é a carga de compressão radial a qual o CP resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado, causando redução na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante. Fluência é o deslocamento vertical, expresso em mm, correspondente à carga máxima de estabilidade (BERNUCCI et al., 2008).

Os corpos de prova são conforme norma DNER-ME 043/95, considerando as temperaturas adequadas das etapas de mistura e compactação, revolver os agregados ao cimento asfáltico e compactar os corpos de provas de 101,6 mm de diâmetro e 6,35 cm de altura (quatro para cada determinação) desenvolvendo 75 golpes de cada lado; prosseguir para desmolde e deixá-los em estufa por 2 horas à temperatura de 60°C antes da inserção no molde de compressão. O CP é colocado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência é posicionado e ajustado para o ensaio.

A prensa operará a compressão radial numa velocidade de 5 cm por minuto e seguirá até o rompimento do CP, cuja carga representa a estabilidade lida e a fluência também será obtida durante a compressão, por meio do medidor de fluência. A estabilidade lida ainda deve

ser corrigida multiplicando-a por um fator de correção (f) que dependerá da espessura (h) do CP (Equação 15). A Figura 36 contém o aparelho para tal ensaio.

$$f = 927,23 \cdot h^{-1,64} \quad (15)$$

Figura 36 - Aparelho para determinação da Estabilidade e Fluência Marshall



Fonte: Autora

b) Resistência à Tração por Compressão Diametral RTCD

Segundo Paiva (2013), esse método de determinação da resistência à tração – elaborado por Lobo Carneiro – surgiu da necessidade em se verificar a resistência à tração de concretos na década de 1940. O inventor da metodologia observou que os corpos de prova rompiam segundo o plano diametral e que os resultados de resistência à compressão diametral eram equivalentes aos de tração. Esse método já é reconhecido internacionalmente desde 1947 e é adotado, inclusive, por organizações de padronização de ensaios mundiais.

Conforme a norma DNIT 136/2018-ME que rege esse ensaio, o corpo de prova para esse ensaio também foi obtido conforme DNER-ME 043/95. Tomadas as medidas de diâmetro e altura – 4 medidas para adotar a média –, os CP's são resguardados a uma temperatura de cerca de 25°C por 2 horas antes de posicioná-lo no dispositivo centralizador com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos, conforme Figura 37. A prensa (Figura 37) comprimirá o CP a uma velocidade normatizada de 4,8 cm por minuto e, com o auxílio de computador, serão obtidos os deslocamentos verticais e a carga de ruptura, F , a partir da qual se determina a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) – Equação 16.

Figura 37 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autora

$$RTCD = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (16)$$

Em que:

RTCD: Resistência à tração por compressão diametral em MPa;

F: Carga de ruptura em N;

D: diâmetro do CP em mm;

H: altura do CP em mm.

3.2.2.4. Dano por Umidade Induzida (DUI)

O ensaio de dano por umidade induzida, abordado pela norma brasileira DNIT 180/2018-ME e pela norma americana AASHTO T283, possibilita quantificar o quanto uma mistura asfáltica sofreu dano devido à umidade no interior do corpo de prova por meio da avaliação da resistência à tração retida (RRT) em CP's com e sem condicionamento prévio.

A razão de resistência à tração retida (RRT) é obtida pela Equação 17:

$$RRT = \frac{RTCDc}{RTCD} \quad (17)$$

Em que:

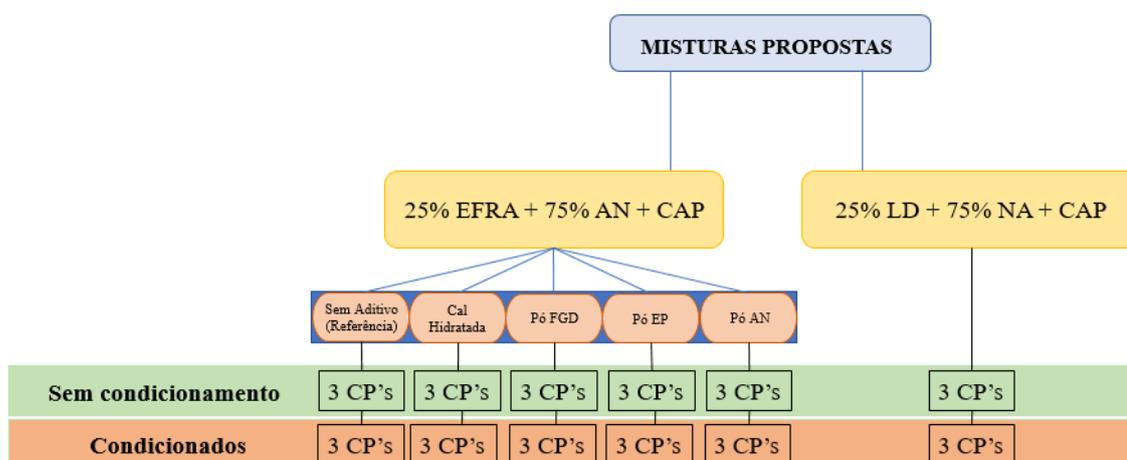
RTCDc é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que sofreram condicionamento, em MPa;

RTCD é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que não sofreram condicionamento, em MPa.

Segundo Ling, Hanz e Bahia (2016), esse é o ensaio mais comumente utilizado para avaliação da resistência à umidade em misturas asfálticas densas e sua realização é importante devido à estreita relação entre adesividade e dano à umidade. Isso porque, segundo Bhasin (2006), a durabilidade da adesão física e química em presença de água determina a tendência de desprendimento desses materiais.

Para o procedimento desse ensaio, corpos de prova são moldados conforme DNER-ME 043/95, mas o VV dos CP's deve ser de $7\pm 1\%$. Dessa forma, para atingir este VV, é necessário reduzir a massa de agregados e o número de golpes desferido em cada lado do CP para que o mesmo padrão de altura dos ensaios mecânicos seja mantido ($63,5\pm 1,3$ mm). Para cada mistura - Figura 38 -, dois grupos de CP's foram confeccionados: o grupo sem condicionamento e o grupo condicionado. As normas – tanto a brasileira quanto a americana – determinam que o condicionamento aconteça da seguinte forma: os CP's devem ser saturados com água destilada à faixa de 55 a 80%. Em seguida, eles são envolvidos por filme plástico e com sacola (com um pequeno volume de água no interior) para adentrarem o congelamento no freezer por 24 horas a temperatura de $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$ e, posteriormente, vão para o banho térmico a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$. Antes de serem rompidos no mesmo aparato da tração por compressão diametral, os CP's são colocados em banho a 25°C por 2 horas, conforme Figuras Figura 39 e Figura 40.

Figura 38 - CP's produzidos para ensaio de dano à umidade



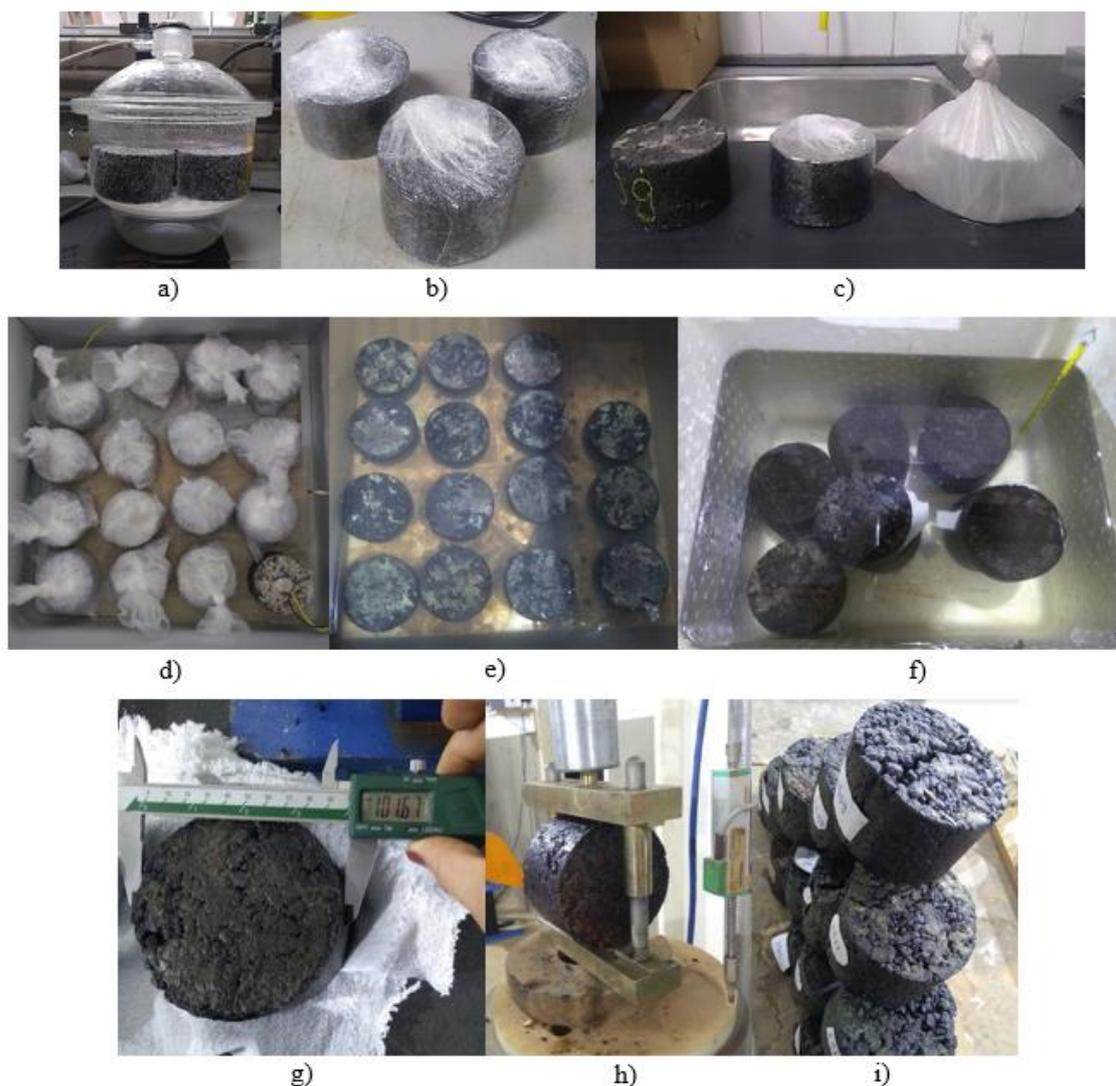
Fonte: Autora

Figura 39 - Esquema do condicionamento para o Dano à Umidade - Saturação, congelamento, banho térmico e rompimento por tração



Fonte: Autora

Figura 40 - Ensaio Dano à Umidade desenvolvido em laboratório: (a) Saturação dos CP's, (b) CP's embalados com plástico filme, (c) Processo de embalagem dos CP's, (d) CP's no freezer, (e) CP's no banho térmico, (f) Banho a 25°C antes do rompimento, (g) Medição de altura e diâmetro, (h) Rompimento no aparato de tração por compressão e (i) CP's rompidos



Fonte: Autora

Na confecção dos CP's para realização do ensaio de DUI, alguns experimentos para alcançar os parâmetros volumétricos das amostras foram feitos e os corpos de prova ficaram segundo informações da Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros CP's para DIU

Misturas	Massa de agregados	Teor de CAP na Mistura (Ag+CAP)	Aditivo	Massa Aditivo	% Adição em Relação à Massa de Agregados	Número de golpes	
I			-	-	-		
II			Cal	17,4 g	1,50%		
III	25% EFRA 75% AN	1160 g	5,84%	Pó FGD	19,14 g	1,65%	32
IV			Pó EP	26,56 g	2,29%		
V			Pó AN	20,07 g	1,73%		
VI	25% LD 75% AN	1100 g	5,14%	-	-	-	25

Fonte: Autora

Do mesmo modo que na apresentação dos resultados das propriedades mecânicas, também foram calculados média, desvio padrão e coeficiente de variação para o dano à umidade como mostrado nas Equações 12 e 13.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e discussões, sobretudo no que diz respeito aos ensaios de forma do agregado, termodinâmicos e químicos para EFRA e LD soltas. Além disso, as misturas asfálticas com substituição parcial de 25% de agregados naturais por escórias EFRA e LD são avaliadas e os resultados dos ensaios mecânicos e de dano à umidade propostos na metodologia são comparados, inclusive com apreciação da interferência dos fíleres melhoradores de adesividade estudados.

4.1. Caracterização de Parâmetros Gerais dos Agregados

A Tabela 11 apresenta os resultados de caracterização dos agregados segundo a norma DNIT 031/2006-ES, citando também as normas DNER-EM 260/94 e DNER-EM 262/94 que regulam aplicação de agregados siderúrgicos de alto-forno e de aciaria, respectivamente, em pavimentos.

Tabela 11 - Caracterização EFRA, LD e agregado natural

		Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Absorção (%)	Equivalente de Areia (%)	Durabilidade (%)	Abrasão Los Angeles (%)	Adesividade	pH
EFRA	>4,8mm	2,67	2,28	5,23					
	4,8 - 0,075	2,94	-	-	91	10,7	36,3	Não satisfatório	10,7
	<0,075mm	2,98	-	-					
DNER-EM 260/94		2-3	-	1-3	-	0-5	<35	-	-
LD	>4,8mm	3,52	3,3	1,95					
	4,8 - 0,075	3,47	-	-	70	2,4	19	Satisfatório	12,3
	<0,075mm	2,91	-	-					
DNER-EM 262/94		3-3,5	-	1-2	-	0-5	<25	-	-
Agregado Natural	B1	2,88	2,82	0,73	-				
	B0	2,88	2,78	1,22	-	0,6	41,7	Não satisfatório	9,8
	PP	2,88	-	-	71				
DNIT 031/06		-	-	-	55	<12	≤50	Satisfatória	-

Fonte: Autora

De maneira geral, o coproduto LD atende aos requisitos impostos pela norma vigente específica para escória de aciaria para pavimentos rodoviários DNER-EM 262/94. O mesmo não ocorre para a EFRA, sobretudo quanto à durabilidade, absorção e adesividade, embora ela

atenda aos critérios exigidos para agregados naturais para pavimentação, de acordo com a norma DNIT 031/2006. Essa norma também é amplamente cumprida pela LD.

O valor de massa específica bastante superior da LD em relação à EFRA e ao agregado natural não surpreendem devido à sua composição química densa, em que o ferro está presente. Aziz et al. (2014) comenta que a faixa de resultados em diversos trabalhos para densidade de escórias de aciaria é de 3-4 g/cm³ e que elas são, em geral, 20% mais densas que agregados de origem granítica. A EFRA é comentada em FHWA (2019) como um agregado de massa específica que varia de 2 a 2,5 g/cm³, apesar de poder apresentar valores superiores - dependendo de o processo siderúrgico possuir maior conteúdo metálico e ferroso -, como o encontrado por Akbarnejad, Houben e Molenaar (2014) igual a 2,65 g/cm³ e na presente pesquisa, conforme Tabela 11. Um ponto favorável da EFRA e do AN em relação à LD é a massa específica, pois, na aplicação em misturas asfálticas, um mesmo volume de material equivale a menos massa para os dois primeiros agregados.

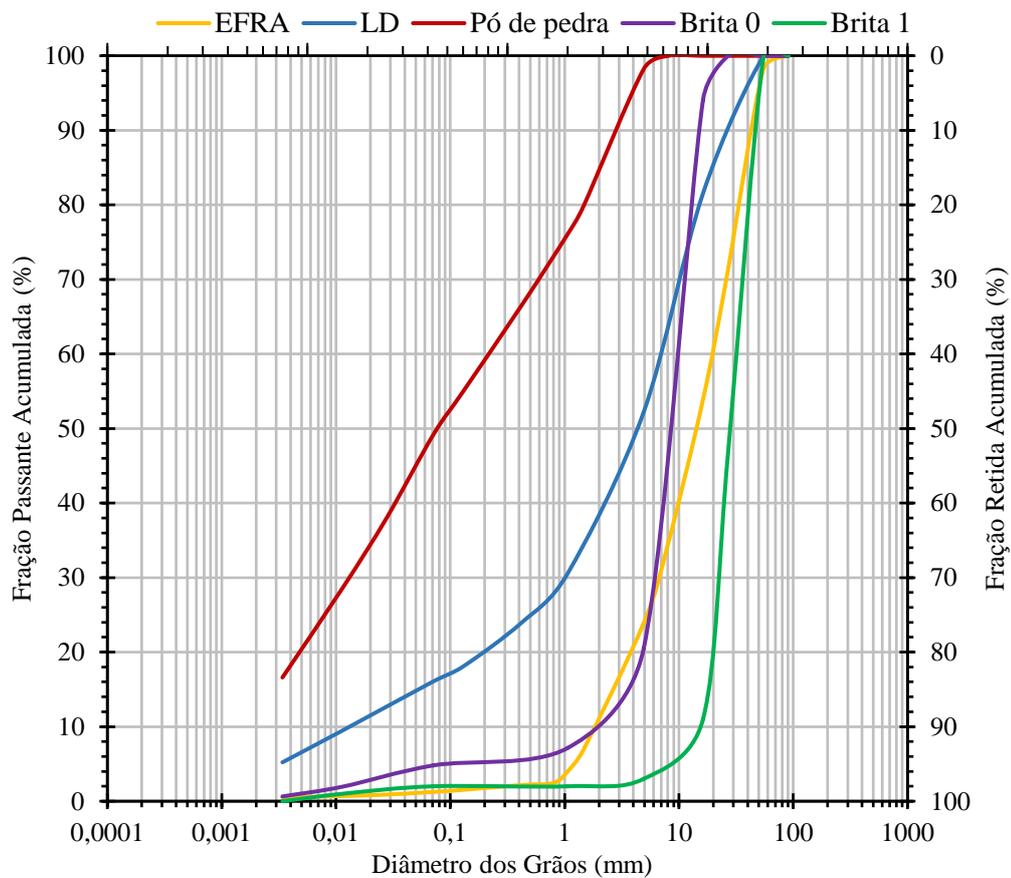
FHWA (2019) também comenta a respeito da alta absorção que a EFRA pode ter, podendo variar de 1 a 6% e esse valor está associado à sua estrutura vesicular; pouco líquido é, de fato, absorvido pelos poros do agregado; a maior parte permanece nos poços rasos da superfície da escória.

A resistência mecânica do coproduto LD comparada aos demais agregados chama a atenção por ser quase metade o desgasta sofrido pela carga abrasiva nesse material quando comparado à EFRA e ao AN. Kim et al. (2018) encontraram um valor de abrasão Los Angeles igual a 20,1%, bem próximo ao apresentado nessa pesquisa, enquanto Anastasiou e Papayianni (2007) encontraram 13,3% para essa mesma escória. Segundo Noureldin e Mcdaniel (1990), a escória de aciaria apresenta uma faixa de variação de 20 a 25%, enquanto abrasão da EFRA encontra-se entre 35 e 40%. Os resultados da literatura são coerentes com os encontrados da Tabela 11 e, apesar da EFRA sofrer maior desgaste, ela se apresenta menos abrasiva que o agregado natural e todos eles atendem ao requisito da norma DNIT 031/2006 (<50%).

Em relação à durabilidade e ao equivalente de areia, novamente, a norma é satisfeita pelos três agregados mostrados. Destaca-se a durabilidade da EFRA, que foi a mais desgastada pela solução durante o procedimento. Por fim, o pH revela mais uma vantagem da LD em relação aos dois outros agregados no que tange à adesividade: apresenta-se como um material mais básico. Apesar de todos terem pH superior à 7, o teor de silício em cada agregado pode torná-lo mais ou menos básico, mesmo que ele apresente basicidade binária (relação dos teores de CaO/SiO₂) superior a 1.

Figura 41 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas após a caracterização em laboratório de amostras de EFRA e da LD coletadas para este estudo. Também são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados naturais utilizadas na composição das misturas asfálticas.

Figura 41 - Curva granulométrica dos agregados naturais, EFRA e LD



Fonte: Autora

4.2. Caracterização das Escórias EFRA e LD

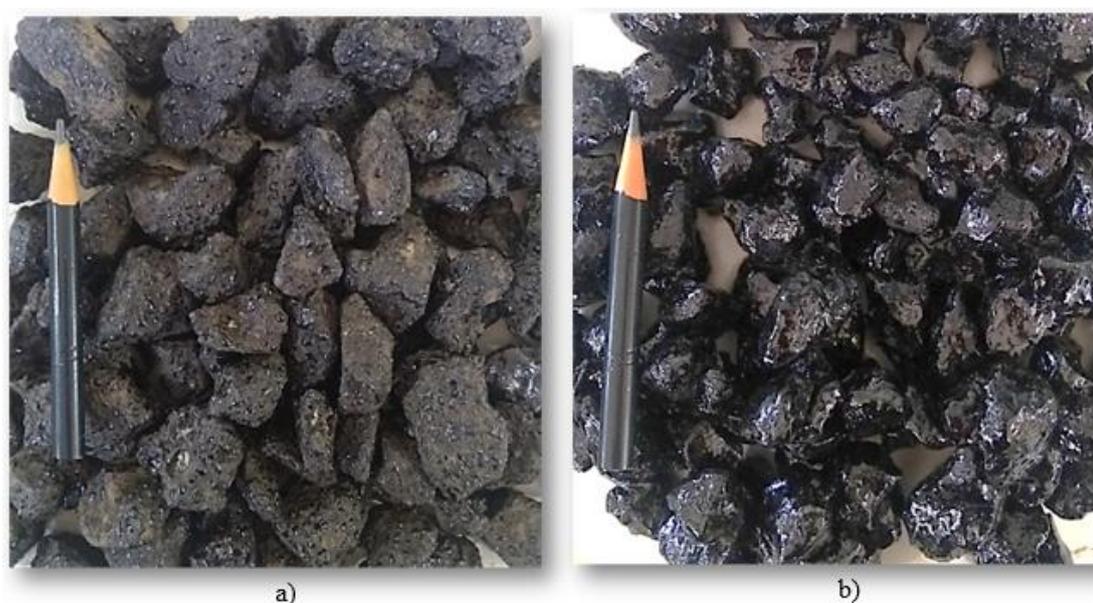
Uma das motivações deste estudo foi o resultado insatisfatório obtido para escória EFRA no ensaio de adesividade do agregado ao ligante de acordo com o procedimento normatizado pela NBR 12583 (ABNT, 2017). Acreditava-se que as duas escórias estudadas (EFRA e LD), por possuírem teores de óxido de cálcio similares e consideráveis (cerca de 40%), teriam desempenho satisfatório no ensaio de adesividade requerido pela especificação do DNIT

031/2006. No entanto, notoriamente a escória EFRA apresentou desempenho insatisfatório enquanto a escória LD apresentou uma excelente adesividade ao ligante. Dessa forma, buscou-se outros ensaios para que conclusões acerca dos mecanismos de adesividade pudessem ser obtidas para explicar as diferenças encontradas para estes dois agregados siderúrgico com relação a afinidade ao ligante asfáltico.

4.2.1. Adesividade do ligante ao agregado

Os resultados do ensaio de adesividade segundo a NBR 12583 (ABNT, 2017) utilizados para verificação inicial da adesividade das escórias EFRA e LD estudadas são apresentados na Figura 42.

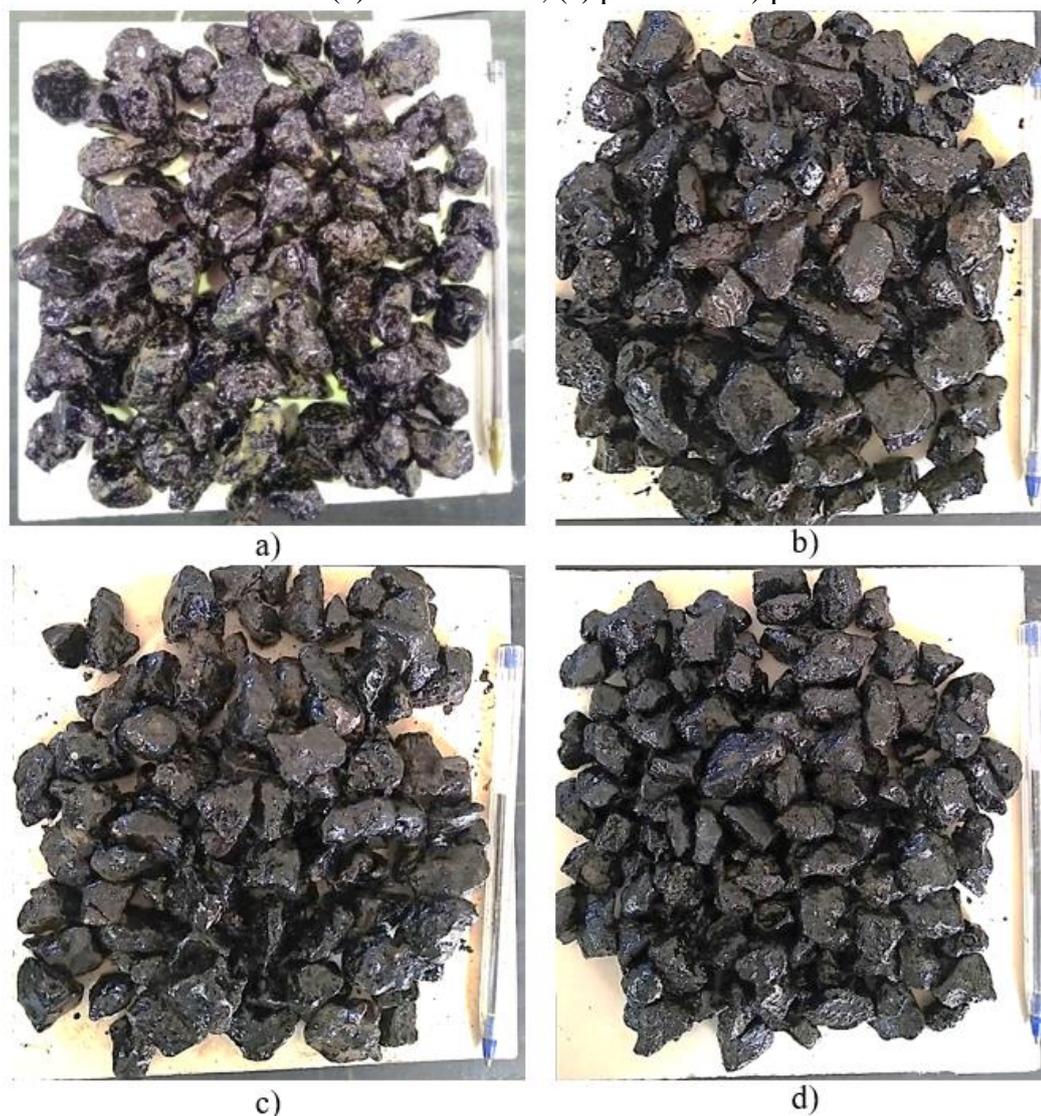
Figura 42 - Ensaio de adesividade nos agregados (a) EFRA e (b) LD



Fonte: Autora

Como pode ser observado, existe uma diferença visual considerável de recobrimento entre os coprodutos por ligante asfáltico. Este resultado motivou esse estudo na busca por aditivos que pudessem ser incorporados para melhoramento de adesividade da EFRA para viabilizar seu uso em misturas asfálticas. O ensaio de adesividade foi repetido, porém agora com os aditivos empregados na EFRA para validar o emprego destes nas misturas asfálticas posteriormente realizadas (Figura 43).

Figura 43 - Ensaio de adesividade de EFRA (a) sem fíler e recoberta preliminarmente com 1.5% de (b) cal hidratada, (c) pó FGD e d) pó EP



Fonte: Autora

Tendo em vista os resultados da Figura 43, vê-se claramente que a adição dos três fíleres influenciou no recobrimento dos agregados pelo CAP. O que se discute, a partir desses resultados, é de que maneira cada fíler agiu na contribuição da melhora da adesividade, dada a multiplicidade de fatores que culminam em uma boa aderência.

Além do ensaio de adesividade, foi feita a caracterização da massa específica e o pH (Tabela 12) dos fíleres utilizados como aditivos, para se calcular as substituições em volume equivalentes de cada um deles para incorporação nas misturas asfálticas e, dessa forma, analisar a contribuição que o caráter ácido/básico poderia ter mistura asfáltica.

Tabela 12 - Massa específica e pH dos aditivos

	Massa Específica Real (g/cm ³)	pH
Cal	2,50	12,4
Pó FGD	2,75	12,1
Pó EP	3,83	9,8
Pó AN	2,88	8,9

Fonte: Autora

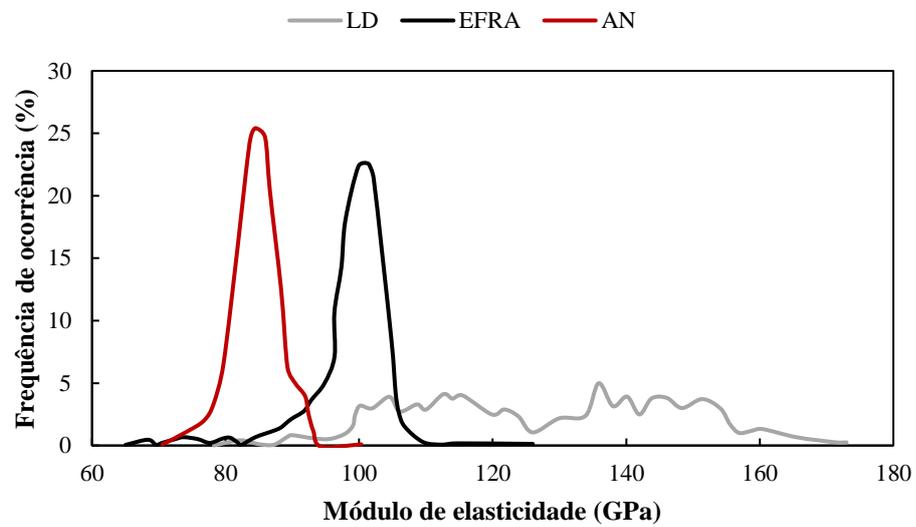
Embora todos os aditivos previstos tenham pH superior a 7, a cal e o pó FGD apresentam valores que revelam uma natureza mais básica nesses materiais em relação aos demais aditivos.

A cal registrou pH mais alto, o que está conforme esperado, dada à sua constituição química - predominantemente com óxido de cálcio – e à sua natureza básica. O pó FGD, graças à sua similaridade de composição com a cal, alcançou uma pH bastante próximo ao dela, corroborando para a aplicação desse material nesse estudo. O pó de agregado natural apresentou-se como o mais ácido dentre as opções, o que também era previsível, haja vista a rocha granítica que lhe deu origem, em cuja constituição há dominância de óxido de silício. Finalmente, o pó EP não se apresenta como um material fortemente básico, estando na posição intermediária em relação à basicidade dos aditivos.

4.2.2. Caracterização do Módulo de Elasticidade e Dureza

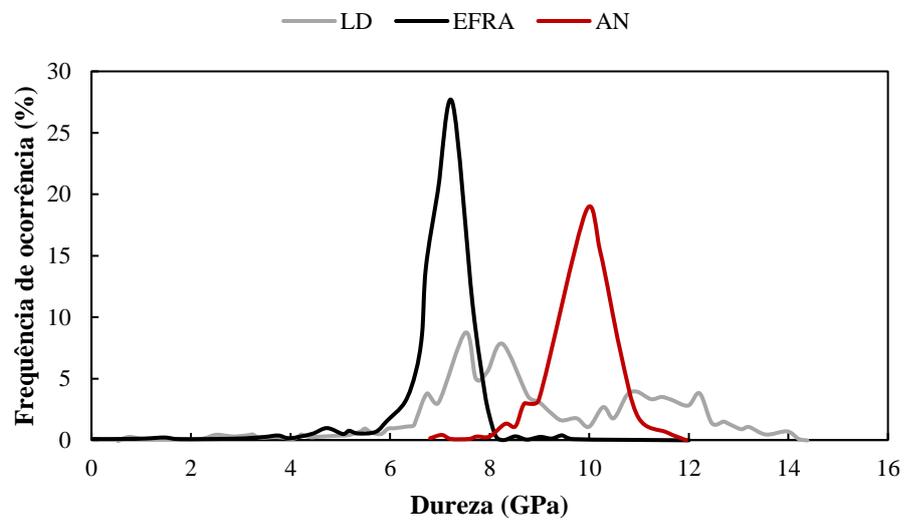
Os resultados dos ensaios de nanoindentação permitiram a obtenção dos módulos de elasticidade e de dureza dos materiais. Os resultados são apresentados nas Figuras Figura 44 e Figura 45.

Figura 44 - Módulo de elasticidade x frequência



Fonte: Autora

Figura 45 - Gráfico dureza x frequência



Fonte: Autora

Os valores de módulo de elasticidade com os picos de ocorrência estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores dos picos para módulo de elasticidade dos coprodutos

	LD		EFRA			AN		
	Pico 1	Pico 2	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 1	Pico 2	Pico 3
E (GPa)	110,64 ± 14,79	143,92 ± 13,93	76,73 ± 5,98	93,87 ± 5,63	100,65 ± 4,14	76,29 ± 3,35	84,82 ± 3,74	91,70 ± 1,93
Freq. (%)	47,15	52,85	3,37	18,73	77,91	3,54	91,97	4,48

Fonte: Autora

Pela Figura 44 e Tabela 13, o módulo de elasticidade para as duas escórias foi superior ao do agregado natural. Entre os coprodutos, a LD possui maior ocorrência em valores superiores à ocorrência da EFRA; isso pode ser explicado, visto que a LD é um agregado mais denso que a EFRA, o que remonta a uma relação entre composição química rica em óxido de ferro desse coproduto ao seu módulo de elasticidade. Além do fator densidade, a EFRA possui alta porosidade, conforme verificado no ensaio de absorção, o que pode afetar seu desempenho elástico. Apesar da alta porosidade, seu módulo de elasticidade ainda é superior ao do agregado natural, possivelmente prejudicado por suas composições química e mineralógica, haja vista sua porosidade reduzida quando observado seu resultado de absorção.

O resultado de dureza vai ao encontro do resultado de abrasão, tendo em vista as duas escórias. Na abrasão, assim como nesses resultados, pode-se observar que a LD possui uma superfície mais rígida que a EFRA, tornando-se mais resistente à quebra e ao desgaste da superfície. Esse parâmetro está estreitamente relacionado às composições química e mineralógica dos materiais, assim como ocorre no módulo de elasticidade. Os minerais que constituem a LD conferem-na uma superfície mais resistente e podem ser fator determinante para uma boa estabilidade da mistura asfáltica com esse agregado. Diferentemente da coerência observada nos resultados de abrasão e dureza para os dois coprodutos, o agregado natural assume um valor intermediário de dureza entre as duas escórias, o que não era esperado, visto que ele apresentou maior abrasão entre os três materiais.

4.2.3. Caracterização das Propriedades de Forma

Nesse item são apresentados os resultados de rugosidade, angularidade e forma dos grãos e partículas obtidas no AIMS, uma vez que estes parâmetros contribuem para adesividade mecânica ligante-agregado.

4.2.3.1. AIMS – *Aggregate Image Measurement System*

O AIMS forneceu valores para classificar a forma 2D e a angularidade dos agregados miúdos e a esfericidade, a angularidade e a textura dos agregados graúdos para os dois agregados de siderurgia. Foi feita a classificação segundo a metodologia de Al Rousan (2004) bem como a classificação proposta por Ibiapina (2018) para agregados brasileiros. Os resultados de classificação são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Classificação dos agregados de EFRA e LD

		EFRA		LD	
		Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)	Al Rousan (2004)	Ibiapina (2018)
Forma 2D	Circular	45,7%	2,8%	45,5%	3,6%
	Semicircular	27,6%	92,2%	26,2%	93,5%
	Semialongado	20,4%	5,1%	24,6%	2,9%
	Alongado	6,3%	0,0%	3,7%	0,0%
Angularidade	Arredondado	16,9%	11,0%	22,0%	4,3%
	Subarredondado	58,4%	73,7%	56,3%	75,0%
	Subangular	19,2%	15,4%	16,9%	20,7%
	Angular	5,5%	0,0%	4,6%	0%
Esfericidade	Achatado/ Alongado	10,2%	2,2%	9,0%	3,0%
	Baixa esfericidade	33,1%	41,1%	23,6%	29,6%
	Esfericidade moderada	34,4%	54,8%	37,1%	66,7%
	Alta esfericidade	22,3%	1,8%	30,2%	0,7%
Textura Superficial	Polido	5,4%	22,5%	8,8%	25%
	Macio	24,9%	52,3%	21,9%	47%
	Baixa Rugosidade	22,7%	21,7%	17,2%	16%
	Rugosidade moderada	23,6%	3,6%	27,3%	8%
	Alta Rugosidade	23,4%	0,0%	24,7%	4%

Fonte: Autora

A partir dos valores apresentados na Tabela 14, infere-se a tendência de características de forma de cada um dos agregados segundo os autores. Na forma 2D, para Al Rousan (2004), ambas as escórias são bem distribuídas entre circular e semialongado, enquanto para Ibiapina (2018) elas possuem semelhanças entre si, mas com predominância do tipo semicircular. Na segunda característica analisada, angularidade, novamente o primeiro autor suaviza a distribuição para os dois coprodutos, apresentando grãos e partículas que vão de arredondadas a subangulares; ao passo que, pela classificação do segundo autor, esse intervalo também é abrangido, mas há uma superior presença de material subarredondado. Para a esfericidade, os grãos graúdos ficam muito bem distribuídos entre três – de baixa esfericidade a alta esfericidade para Al Rousan (2004); o que não ocorre para Ibiapina (2018), em que há uma concentração de grãos de baixa esfericidade e de esfericidade moderada. Por fim, para a textura superficial, o primeiro autor apresenta uma distribuição homogênea para as duas escórias entre os graus de texturas a partir do macio, a saber: macio, baixa, moderada e alta rugosidade; enquanto o segundo autor restringe os grãos como de polidos a baixa rugosidade, sendo eles predominantemente macios.

Essas análises permitiram observar que, apesar da classificação de cada autor e de elas poderem se distinguir entre si, os agregados siderúrgicos se apresentam muito similares, praticamente não se diferenciando dentro de cada classificação. Segundo Souza et al. (2012) e Liu et al. (2017), a angularidade dos agregados tem influência na resistência à tração das misturas asfálticas. Assim, isso não será uma variável nos estudos do comportamento mecânicos das misturas desenvolvidas nesse trabalho devido à similar angularidade e demais parâmetros analisados dos dois agregados. Vale comentar os trabalhos de Teixeira et al. (2019) e Kong et al. (2019) que caracterizaram escórias de aciaria pela mesma metodologia. Teixeira et al. (2019) observou que os agregados graúdos de LD eram mais angulosos que os de agregado natural (não por acaso, o mesmo agregado natural granítico utilizado nessa pesquisa); e contrário ocorreu considerando os agregados miúdos. Com relação à esfericidade, os AN obtiveram menores valores que o coproduto LD e, para a textura, os menores resultados foram para LD. Kong et al. (2019) analisaram LD e agregados naturais de calcário e basalto, encontrando valores maiores de angularidade e de esfericidade para LD do que para os agregados naturais e menor textura para o coproduto. Infelizmente, é escassa informação em estudos que comentem a respeito das características de forma da escória de alto-forno.

Diante disso, foi feita a apreciação da adesividade pelo método da NBR 12583 (ABNT, 2017) de maneira a comparar os agregados graúdos (nas frações 4,8-9,5 mm, 9,5-12,5 mm e 12,5-19 mm), pois possuem textura superficial muito semelhante para os dois coprodutos

(Figura 46). Assim, dentre os mecanismos que contribuem para a adesão ligante-agregado, a adesão física (ligada aos parâmetros de forma) pode ter sua influência avaliada para diferentes diâmetros dos agregados. Caso o recobrimento observado para EFRA e LD não se equivalham, infere-se que outros mecanismos além dos aspectos físicos da superfície agregada são preponderantes para o recobrimento do ligante nos coprodutos em análise e não apenas o intertravamento mecânico do ligante na superfície.



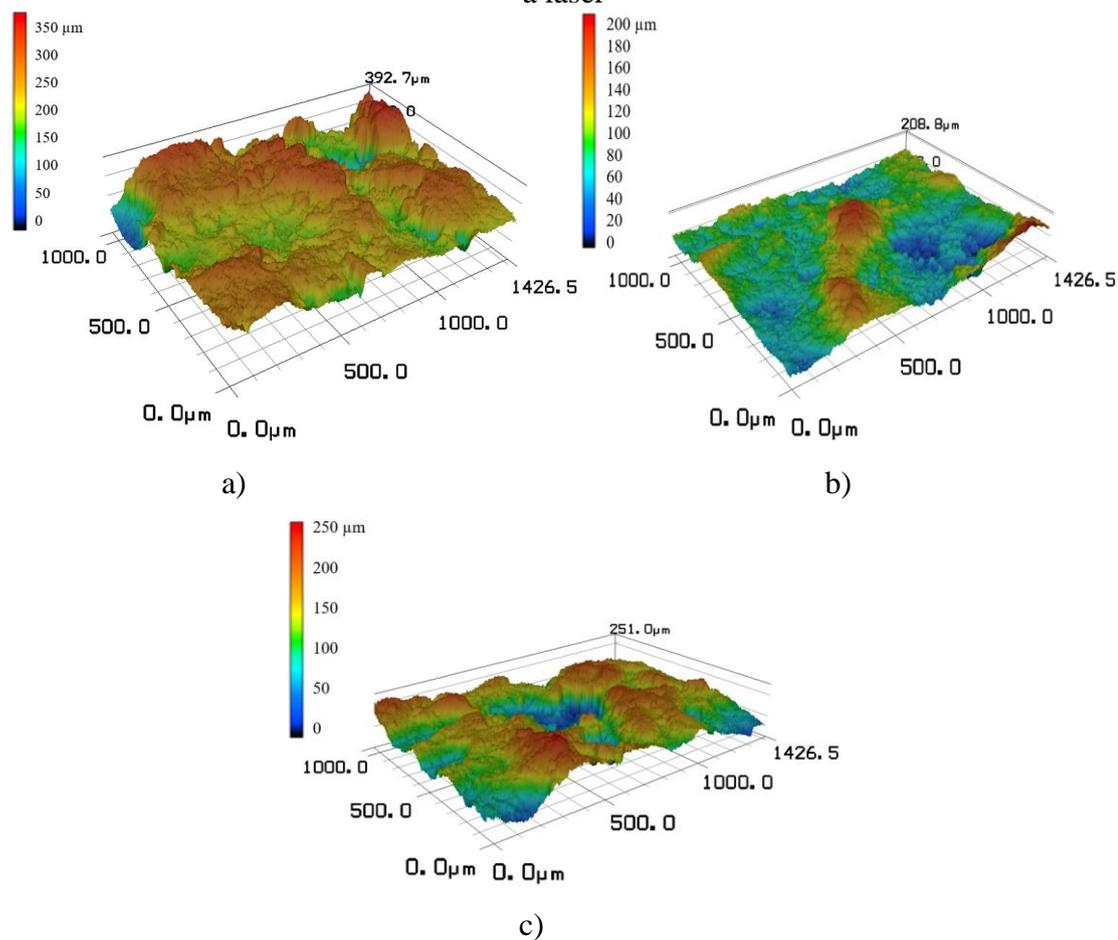
Fonte: Autora

Pela observação visual, conforme prevê esse teste de adesividade, torna-se clara que a rugosidade dos agregados não age sozinha no que diz respeito ao recobrimento nos dois coprodutos apresentados, visto que a LD ainda apresenta melhor adesividade para as três faixas apresentadas. Apesar de rugosidades semelhantes, eles mostraram comportamentos diferentes quando um mesmo volume de agregado é misturado a uma mesma massa de ligante (conforme prevê a norma), evidenciando atuação de outros fatores contribuintes da interação ligante-agregado. A diferença de recobrimento fica ainda mais evidente quando o diâmetro dos agregados aumenta.

4.2.3.2. LSM - Laser Scanning Microscopy

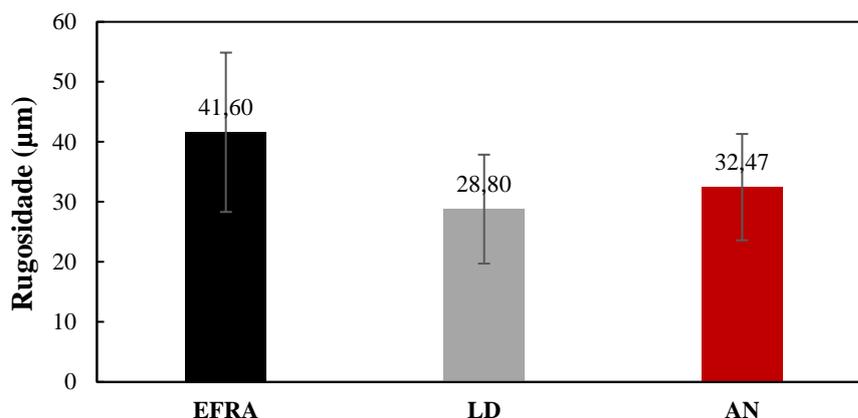
As Figuras Figura 47 e Figura 48 mostram as imagens da superfície das escórias e os valores de rugosidade média e os seus respectivos desvios padrão.

Figura 47 - Imagem de (a) EFRA, (b) LD e (c) Agregado natural no microscópio de varredura a laser



Fonte: Autora

Figura 48 - Resultado de microscopia de varredura a laser para EFRA, LD e agregado natural



Fonte: Autora

Claramente, esse resultado destoa do que foi encontrado no AIMS, isso porque mostra a EFRA com uma textura superficial muito superior à da LD. Essa diferença pode ser devida à heterogeneidade das escórias aliada ao fato de que, nesse experimento, as medidas e imagens mostradas dizem respeito a apenas uma amostra de cada coproduto. Esse ensaio é, sem dúvidas, rico em informações e permite uma análise profunda da superfície do agregado, mas pode levar a resultados equivocados quando aplicados em uma análise global. É necessária uma análise estatística com uma amostragem maior para que conclusões mais definitivas possam ser produzidas. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Nano-caracterização da *University of Nebraska*, e devido a limitação de uso do equipamento, apenas uma amostra de cada agregado pôde ser ensaiada.

4.2.4. Caracterização Termodinâmica

A caracterização dos agregados em grandezas termodinâmicas foi realizada por meio de dois experimentos: o primeiro, Ângulo de Contato, que permite avaliar a interação de diferentes líquidos com a superfície da amostra por meio dos valores de ângulo que a gota de cada um dos líquidos fornece e permite a obtenção do valor de energia de superfície livre, que é bastante relevante no estudo da adesividade. O segundo procedimento apresentado é o Microscópio de Força Atômica, que torna possível observar a interação entre a ponta ora de silício, ora de ligante e as amostras de agregados, mensurando, inclusive o trabalho da força de adesão entre eles.

4.2.4.1. Ângulo de Contato – Energia Livre de Superfície

Como comentado no item Métodos, o ensaio de Ângulo de Contato se iniciou com a caracterização da superfície dos agregados pelos três líquidos: água destilada, glicerol e diiodometano, apresentando gotas conforme a Figura 49.

Figura 49 - Gotas sobre as amostras de EFRA e LD



Fonte: Autora

Os ângulos encontrados estão mostrados na Tabela 15.

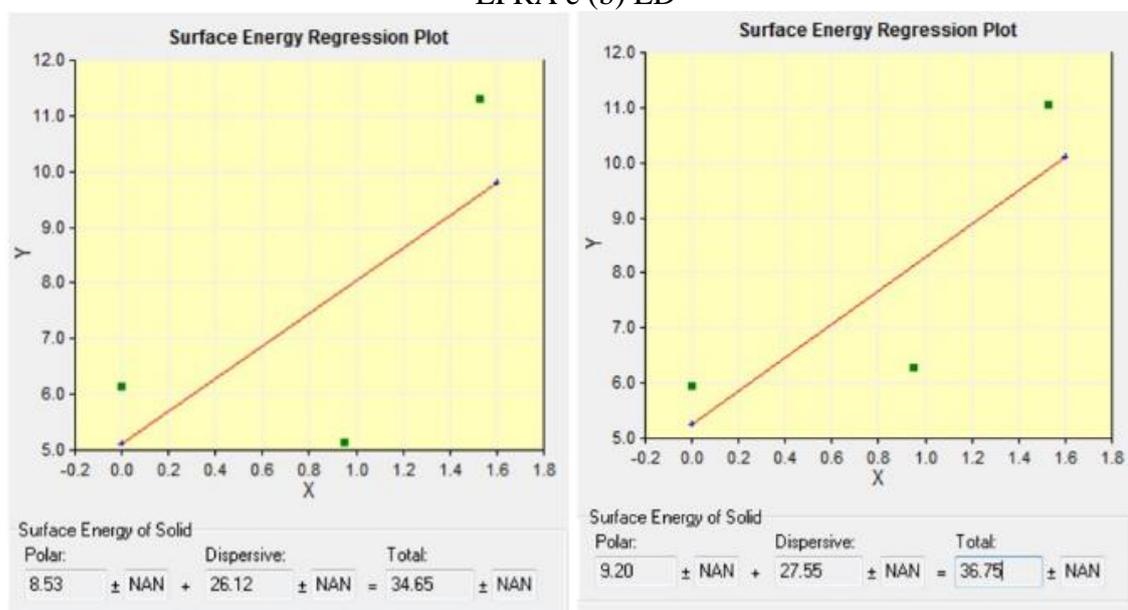
Tabela 15 - Valores de Ângulo de Contato

	Água destilada	Glicerol	Diiodometano
EFRA	63,38°	93,59°	43,48°
LD	65,41°	81,55°	48,04°

Fonte: Autora

É possível observar que os valores de ângulo de contato não se diferenciaram entre si para os líquidos utilizados como era esperado, o que implica em uma energia de superfície resultante também bastante similar entre as duas escórias, o que pode ser observado na Figura 50 e Tabela 16.

Figura 50 - Imagem do cálculo da energia de superfície pelo DROPImage software para (a) EFRA e (b) LD



a)

b)

Fonte: Autora

Tabela 16 - Energia de superfície das escórias em ergs/cm²

	Polar γ^{+-}	Dispersiva γ^{LW}	Total γ
EFRA	8,53	26,12	34,7
LD	9,2	27,55	36,8

Fonte: Autora

Para enriquecer a análise desses valores, alguns outros trabalhos em que a energia de superfície de agregados diferentes foram analisadas pelo método do Ângulo de Contato e os seus valores são apresentados na Tabela 17.

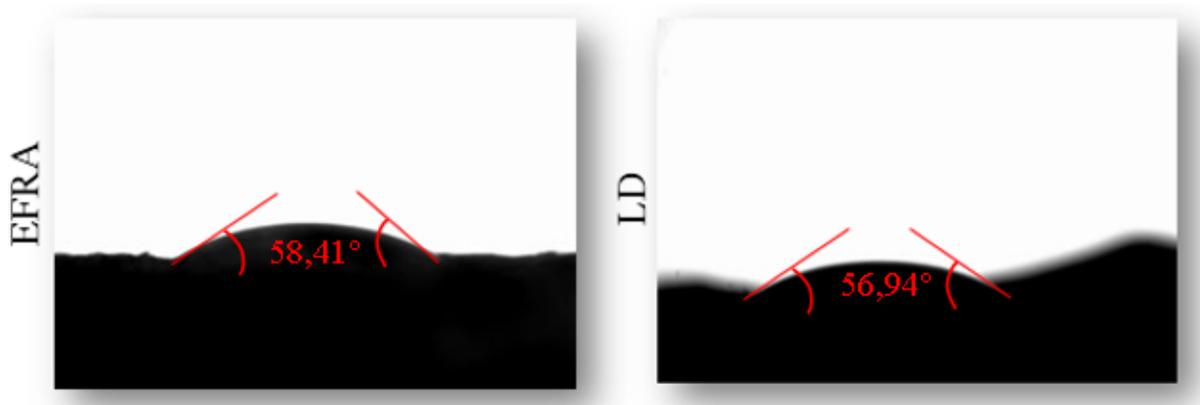
Tabela 17 - Valores de referência de ângulo de contato (°)

Agregado calcário	48,4	Agregado calcário	107,9	Agregado calcário	31,3
Pedregulho de rio	47,65	Areia (3ACR)	86,4	Agregado granítico	19,3
Aguiar-Moya, Leiva-Villacorta e Salazar-Delgado (2014)		Kim e Lutif (2006)		Moraes, Velasquez e Bahia (2017)	

Fonte: Autora

Os valores encontrados em outras pesquisas mostram valores coerentes de energias de superfície quando são comparados dois agregados, um silicífico ou granítico e outro calcário, apresentando esse último energia superior em todas as pesquisas consultadas. O mesmo acontece na presente pesquisa, quando a LD mostra um valor superior à da EFRA, embora muito próximo a ele. Num segundo momento, o líquido depositado sobre as amostras de EFRA e LD foi o próprio CAP 50/70 suficientemente aquecido (80°C) para formar uma gota - Figura 51. Os valores de ângulo em análise foram: $58,41$ para EFRA e $56,94^{\circ}$ para LD.

Figura 51 - Gotas de CAP depositados sobre EFRA e LD



Fonte: Autora

Mais uma vez, os valores encontrados não foram com a ampla diferença esperada; especialmente porque o CAP é um produto com o qual as escórias têm comportamentos distintos, como já observado no ensaio de adesividade. Dessa forma, seria natural que a gota de cimento asfáltico tivesse uma molhabilidade diferente em cada uma delas. Apesar disso, o valor de ângulo de contato para LD é menor que o da EFRA, o que converge para a lógica de que quanto mais aderido a uma superfície, menor deve ser o ângulo.

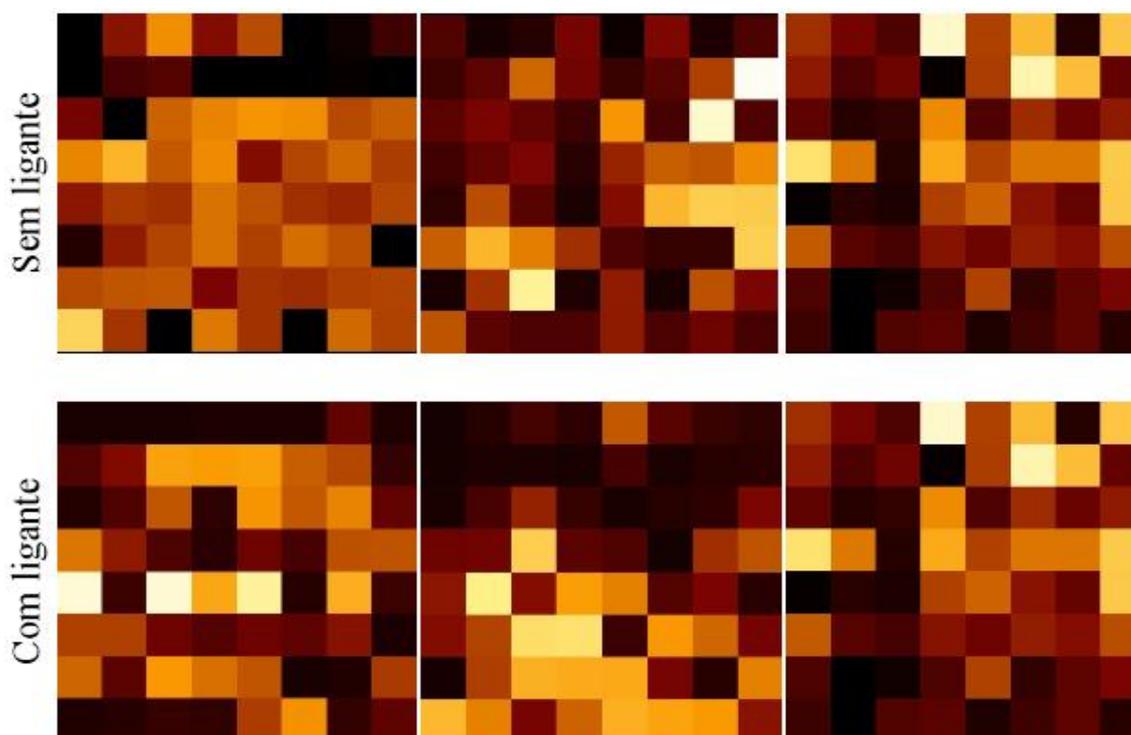
Em linhas gerais, esse ensaio demonstrou, em todas as determinações, tanto nas encontradas nessa pesquisa como nas presentes em referências, que pode apresentar resultados que levam a uma análise qualitativa coerente (sempre agregados calcários com energia de superfície superior aos graníticos e LD superior à EFRA); embora os valores não tenham se distanciado como era esperado, em especial, na presente pesquisa. Além disso, se todos esses valores mostrados forem analisados em conjunto, pode-se perceber que uma análise global não converge para uma conclusão clara a respeito da eficácia dessa metodologia para determinação de energia de superfície em agregados.

Essa dificuldade pode ser explicada porque a obtenção de parâmetros termodinâmicos por meio do ângulo do contato em agregados não é considerado adequado, visto que os agregados possuem altos valores de energia livre de superfície, quando comparados ao ligante asfáltico, que é normalmente o objeto de estudo desse ensaio. Há dificuldade, sobretudo, pela heterogeneidade da composição do material e da distribuição dos poros na superfície (BHASIN, 2006; MORAES, VELASQUEZ e BAHIA, 2017).

4.2.4.2. Microscopia de Força Atômica – Trabalho da Força de Adesão

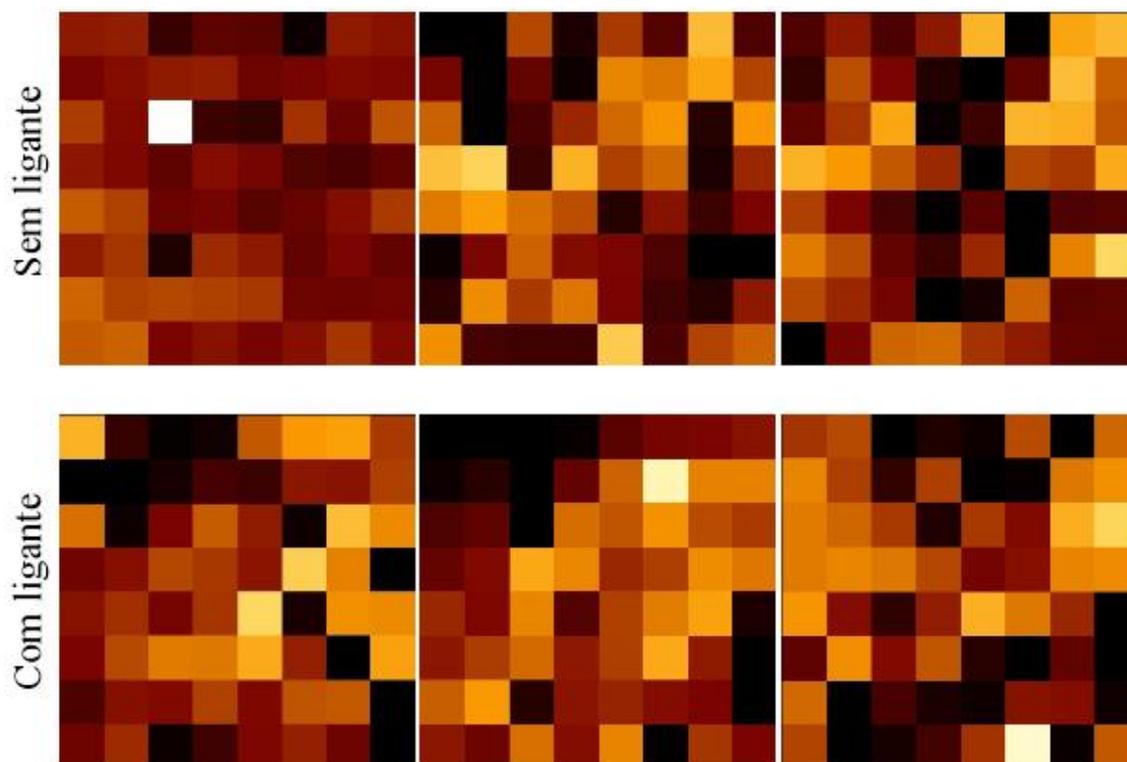
Como apresentado na metodologia, duas pontas de mesma especificação foram utilizadas no ensaio de AFM em ambas as amostras de agregados siderúrgicos, sendo uma delas sem ligante e outra revestida por ligante asfáltico. Nas Figuras Figura 52 e Figura 53, estão mostrados os mapas de varredura em cada tipo de escória estudada com 64 determinações obtidas para cada amostra; as cores se referem à intensidade: quanto mais escuro, mais intensa a força.

Figura 52 - Mapas de varredura para EFRA



Fonte: Autora

Figura 53 - Mapas de varredura para LD

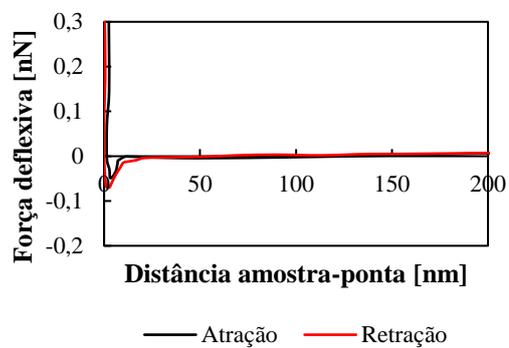


Fonte: Autora

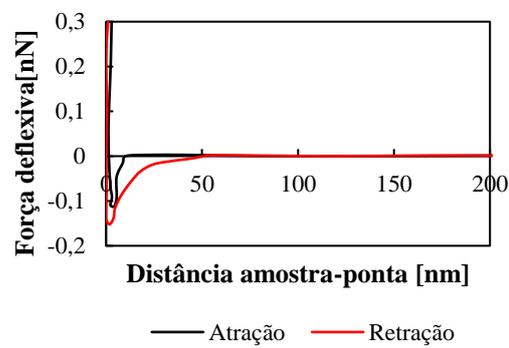
Nas Figuras

Figura 54 e *Figura 55* apresentam-se os valores médios dos mapas 1, 2 e 3 para a EFRA e a LD, sem e com o ligante, para avaliação da variação da área do gráfico de retração (em vermelho) abaixo do eixo horizontal, que equivale numericamente ao trabalho da força de adesão, nos gráficos da esquerda (a, c, e), entre ponta de silício e amostras e, nos gráficos da direita (b, d, f), entre o ligante e as amostras.

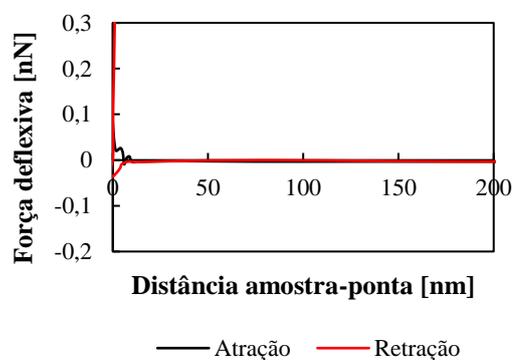
Figura 54 - Representação dos Mapas 1 – (a) EFRA sem ligante, (b) EFRA com ligante; Mapas 2 – (c) EFRA sem ligante, (d) EFRA com ligante; Mapas 3 – (e) EFRA sem ligante, (f) EFRA com ligante



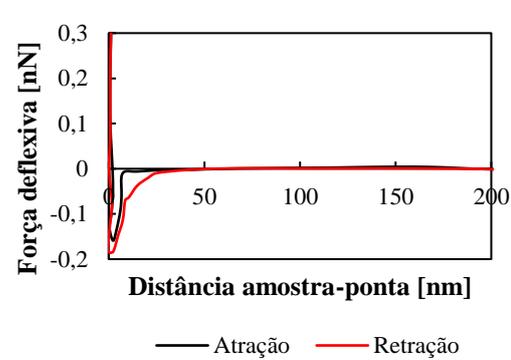
a)



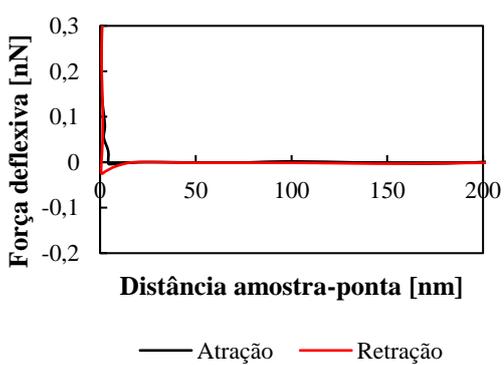
b)



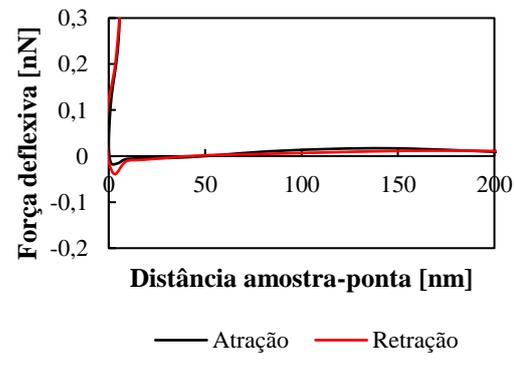
c)



d)



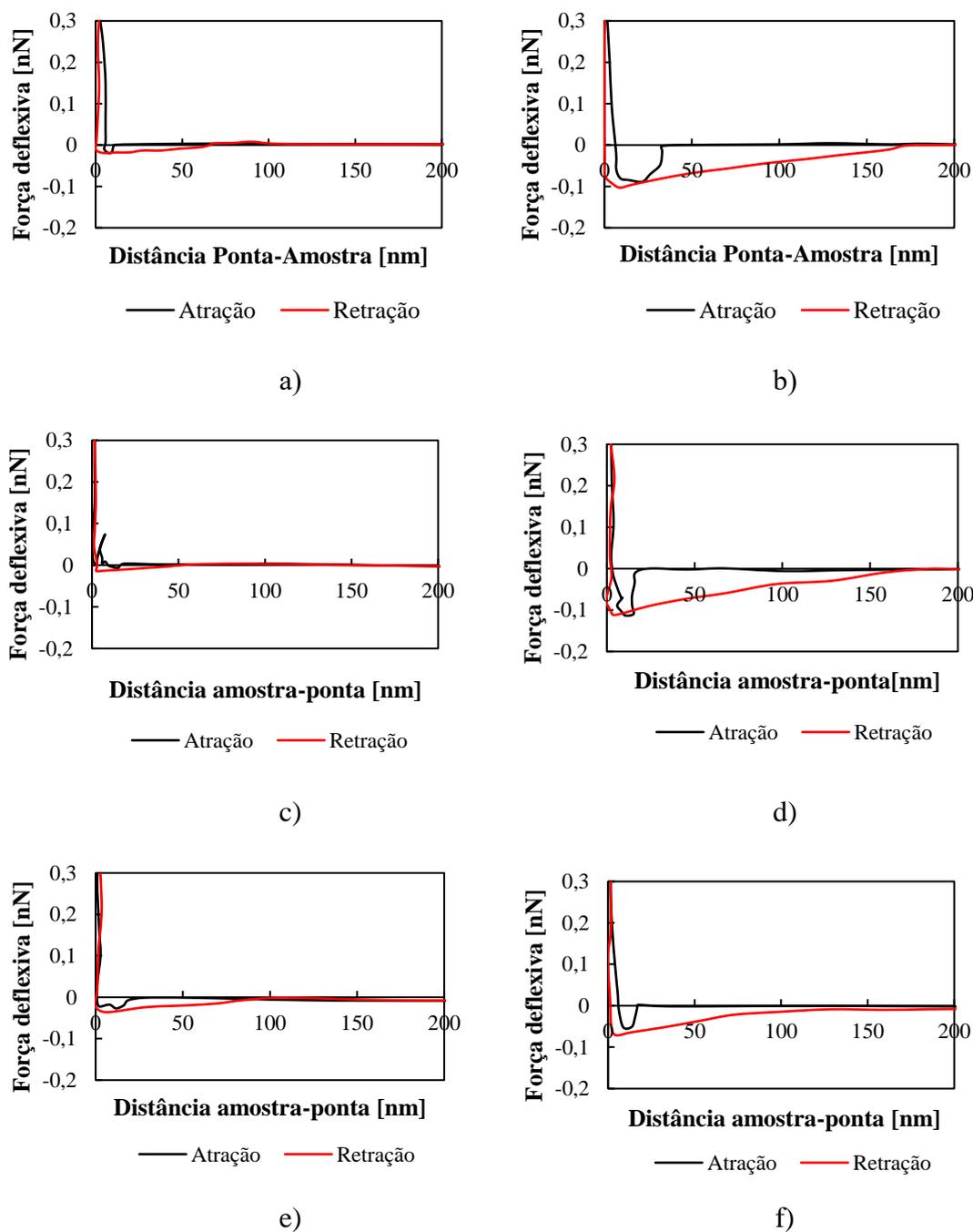
e)



f)

Fonte: Autora

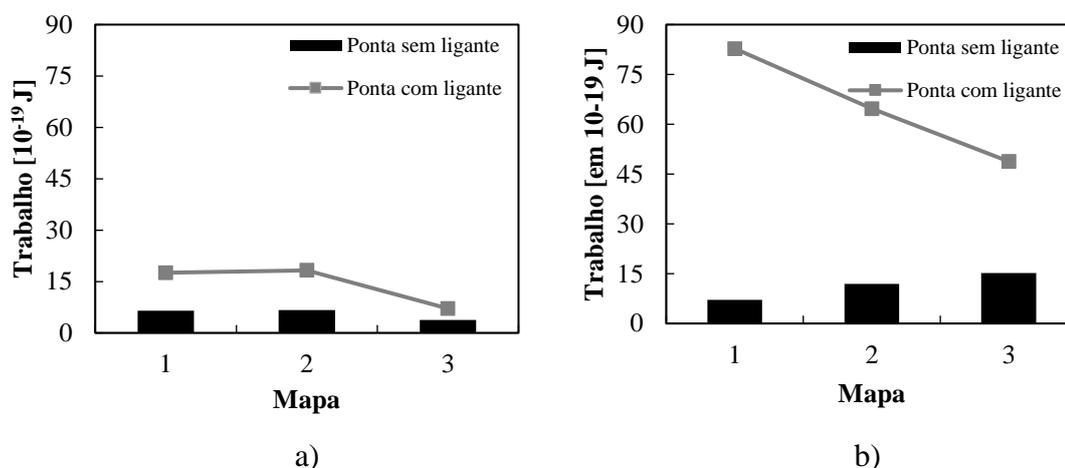
Figura 55 - Representação dos Mapas 1 – (a) LD sem ligante, (b) LD com ligante; Mapas 2 – (c) LD sem ligante, (d) LD com ligante; Mapas 3 – (e) LD sem ligante, (f) LD com ligante



Fonte: Autora

A Figura 56 mostra o comparativo para as três regiões ensaiadas das amostra, sem e com o ligante asfáltico.

Figura 56 - Trabalho da força de adesão nas três regiões: (a) EFRA e (b) LD

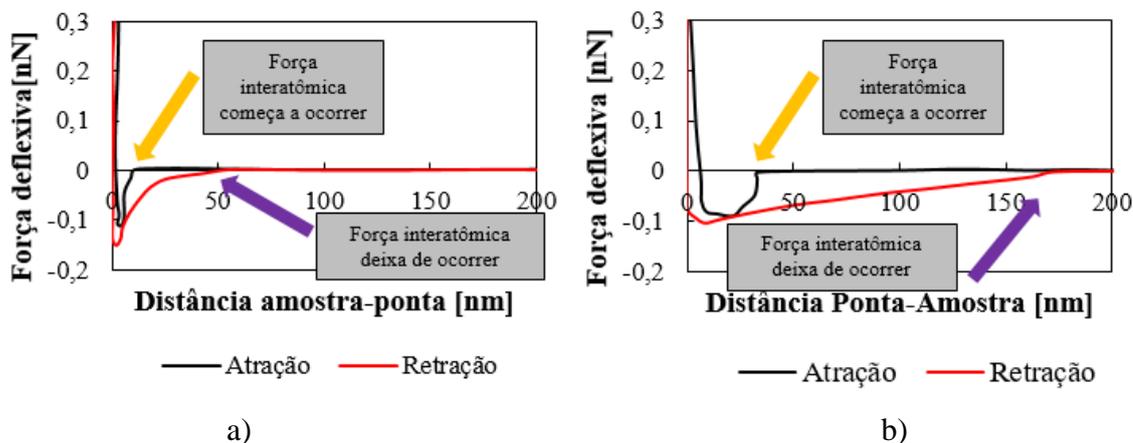


Fonte: Autora

A análise da Figura 56 permite observar que o trabalho da força de adesão entre ponta sem ligante e as amostras não mostraram uma grande variação entre os dois coprodutos, embora para as três regiões da LD, os valores sejam superiores aos da EFRA. Mas, quando a análise passa a ser entre os valores obtidos para as pontas com ligante para as duas amostras, vê-se um crescimento bastante relevante em relação à interação ligante-LD. Essa forte interação torna-se ainda mais evidente quando, para cada tipo de agregado, é observado o aumento quando se trata da ponta com ligante e a LD evidencia um aumento ainda mais relevante que a EFRA. Essas conclusões podem ser observadas também nos gráficos das

Figura 54 e 55, reproduzidos na Figura 57, em que a área do gráfico de retração com o eixo x para LD-ligante tornam-se bem maiores. Além disso, destaca-se que, a longas distâncias, a LD passa a exercer forças sobre a ponta com ligante e deixa de atraí-la também a longas distâncias. O mesmo não ocorre para a EFRA, visto que, a curtas distâncias, ela atrai e deixa de atrair a ponta-ligante.

Figura 57 - Gráfico força x distância para mapa 1 com ligante (destaque para as distâncias) – (a) EFRA e (b) LD



Fonte: Autora

A partir dessas análises, tem-se que a microscopia de força atômica na determinação do trabalho da força de adesão entre dois materiais forneceu resultados bastante coerentes com o que se vê na prática em relação à adesividade das escórias aqui discutidas. Devido à relação entre trabalho da força adesiva e energia de superfície, é possível inferir desse experimento que há uma diferença nas energias de superfície dos dois materiais que não foi percebida no ensaio do Ângulo de Contato. Isso porque, apesar da energia de superfície ser uma característica do material e o trabalho da força de adesão ser resultante de uma junção de materiais, a ponta com ligante asfáltico foi comum a ambos os agregados e, portanto, a única variável da análise passa a ser a energia livre de superfície dos coprodutos. Com isso, tem-se que a LD apresenta uma energia de superfície superior à EFRA tendo em vista os resultados do AFM.

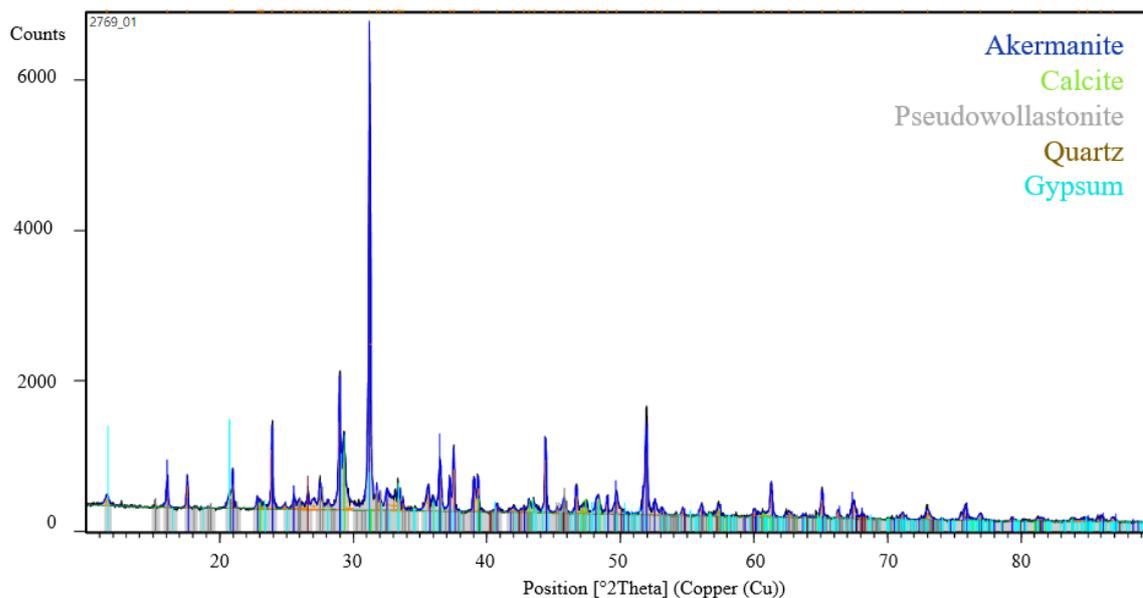
4.2.5. Caracterização Química e Mineralógica

Os resultados de difração e fluorescência de raios-X dos agregados podem ser bastante elucidativos para análise de sua adesividade ao ligante asfáltico, isso porque a interação química entre os materiais é um dos fatores que podem contribuir para qualidade do contato entre eles. A DRX verifica os minerais da estrutura cristalina e o FRX a composição química dos agregados em questão.

4.2.5.1. Difração de Raios-X (DRX)

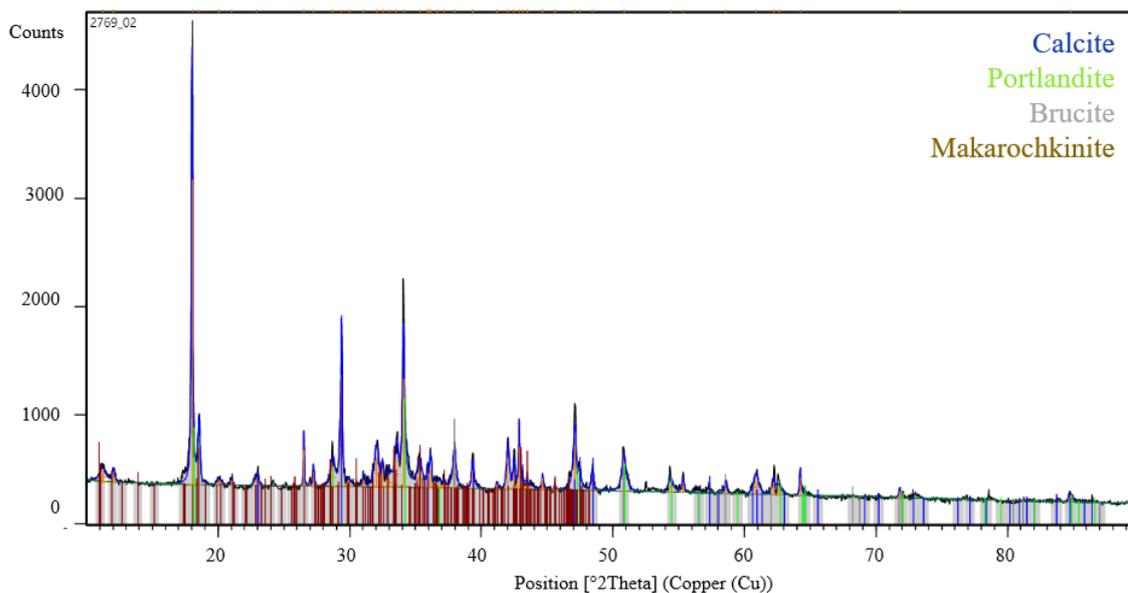
A DRX fornece a composição mineralógica dos materiais de estrutura cristalina. Nas Figuras Figura 58 e Figura 59 estão os difratogramas obtidos pelo DRX.

Figura 58 - Difratoograma EFRA



Fonte: Relatório 2769 Nanobusiness

Figura 59 - Difratoograma LD



Fonte: Relatório 2769 Nanobusiness

Por meio de análise dos difratogramas, são extraídos os minerais componentes dos agregados siderúrgicos estudados. A fim de elucidar essas informações, a composição mineralógica – com os minerais predominantes - de agregados graníticos e calcários presentes em outras pesquisas também estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Composição mineralógica dos agregados

EFRA	LD	Granito	Calcário	Granito	Calcário
<i>Akermanite</i>	Calcita	Quartzo	Calcita	Clorita	Calcita
Calcita	Portlandita	Albita	Dolomita	Albita	Dolomita
<i>Pseudowollastonite</i>	Brucita	Feldspato	Argilomineral	Anortita	Argilomineral
Quartzo	<i>Makarochkinite</i>	Clorita	Outros	Quartzo	Outros
Gipsita		Muscovita		Feldspato	
		Anortita		Muscovita	
		Outros		Outros	
		Apeageyi, Grenfell e Airey (2014)		Zhang et al. (2015)	

Fonte: Autora

Diante desses resultados, nota-se que a EFRA possui em comum com a rocha calcária o mineral calcita e se assemelha a uma rocha de origem granítica, devido a presença de quartzo; enquanto a LD se aproxima de uma rocha calcária graças à calcita e não apresenta minerais comuns às rochas graníticas. O trabalho de Apeageyi, Grenfell e Airey (2014) comenta que a resistência à umidade em rochas graníticas é inferior à de rochas calcárias, devido, em parte, à sua composição mineralógica, a saber: albita, feldspato e quartzo, que estão associados à baixa adesividade e ruptura na interface agregado-betume. Isso também foi concluído por Horgnies et al. (2011), que atestou que as falhas na mistura asfáltica para agregados de dolomita eram de natureza coesiva, ao passo que, no sistema agregado de granito-ligante, havia falha parcialmente nessa interface. Por fim, Zhang et al. (2015) associa a baixa resistência à umidade para os argilominerais e anortita, enquanto a calcita está ligada à boa resistência no mesmo parâmetro.

Percebe-se certa coerência de resultados e conclusões de trabalhos anteriores para essa pesquisa quando se observa que a EFRA não se comporta como uma rocha calcária - apesar da calcita ser comum a ambas - porque possui o quartzo que constitui rochas de cunho ácido, como as graníticas que, sabidamente, possuem má adesividade; estabelecendo uma relação lógica ao que a prática com esse coproduto mostrou. Assim, principalmente, os minerais de quartzo podem estar, sim, contribuindo para uma deficiência no recobrimento desse agregado ao ligante asfáltico. Paralelamente a isso, o bom comportamento adesivo do agregado de LD pode ser em virtude da calcita em sua mineralogia, que conspira para uma forte ligação ligante-agregado e que chega o seu desempenho ao das rochas calcárias.

4.2.5.2. Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os resultados de FRX são apresentados na Tabela 19. É possível observar que as escórias utilizadas como agregados nessa pesquisa possuem teores de óxido de cálcio bastante similares (em torno de 40%). No entanto, houve diferenças significativas para silício e ferro, em que, para o primeiro desses a EFRA apresenta quase três vezes a concentração nas suas determinações e, para o óxido de ferro ocorre o contrário: a LD possui maior concentração média em relação à EFRA. Nos demais óxidos como os de magnésio, manganês e alumínio, elas não variaram muito significativamente entre si.

Tabela 19 - Resultados FRX da EFRA e LD (em massa)

	EFRA			LD - Alta expansão		
	1ª determinação	2ª determinação	Média	1ª determinação	2ª determinação	Média
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Al ₂ O ₃	9,3	6,02	7,66	4,9	7,14	6,02
CaO	41,2	33,01	37,105	43,4	38,16	40,78
Cr ₂ O ₃	-	<0,01	-	-	0,19	0,19
Fe ₂ O ₃	2,7	12,3	7,5	26,4	17,1	21,75
K ₂ O	-	0,19	0,19	<0,1	0,11	-
MgO	5,2	4,54	4,87	5	9,99	7,495
MnO	0,55	0,5	0,525	3,2	2,25	2,725
Na ₂ O	-	<0,1	-	0,17	<0,1	0,17
P ₂ O ₅	0,1	0,07	0,085	1,3	0,76	1,03
SiO ₂	32,4	21,32	26,86	12,7	8	10,35
TiO ₂	-	0,36	0,36	0,36	0,33	0,345
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-
SO ₃	4,5	3,87	4,185	0,16	0,24	0,2
ZnO	-	0,13	0,13	-	<0,01	-

Fonte: Autora

Relacionando o comportamento na mistura asfáltica às composições de ambos os agregados, tem-se resultados diferentes dos encontrados por Bagampadde, Isacson e Kiggundu (2005), visto que o autor não observou boa correlação entre a sensibilidade à umidade e os compostos de silício e de ferro; diferentemente do que foi observado por Júnior (2018) e Cala et al. (2019; 2019b) e nesta pesquisa. Nesses últimos trabalhos, observou-se forte correlação desses elementos ao recobrimento do ligante ao agregado. No caso do presente trabalho, haja visto que o silício e o ferro são as substâncias que essencialmente diferenciam os dois materiais

estudados no âmbito da composição química, podem estar agindo - no caso do ferro - em favor da adesividade e, no caso do silício, dificultando-a. Para os mesmos trabalhos supracitados, Júnior (2018) foi o único que encontrou correlação entre cálcio e o desempenho dos agregados na adesividade; enquanto nos demais, inclusive no presente trabalho, o cálcio não propiciou forte correlação de incremento nesse parâmetro.

Também são apresentados os resultados de FRX na Tabela 20 para os quatro fíleres utilizados para inferir sobre os mecanismos de melhora de adesividade da EFRA em misturas asfálticas.

Tabela 20 - Resultados FRX dos aditivos (em massa)

Óxido (%)	Aditivos			
	Cal	Pó FGD	Pó EP	Pó AN
Al ₂ O ₃	0,41	<0,1	1,76	14,52
CaO	66,83	56,4	12,14	7,46
Cr ₂ O ₃	<0,01	<0,01	0,03	<0,01
Fe ₂ O ₃	0,16	0,12	62,94	8,82
K ₂ O	0,19	0,04	0,33	3,56
MgO	1,35	0,55	1,95	2,61
MnO	<0,01	<0,01	0,53	0,12
Na ₂ O	<0,1	<0,1	<0,1	2,86
P ₂ O ₅	0,17	0,17	0,08	2,35
SiO ₂	1,28	0,38	5,55	54,65
TiO ₂	0,02	<0,01	0,15	1,63
ZrO ₂	<0,01	-	-	0,13
SO ₃	-	25,09	1,11	-
ZnO	-	0,02	0,08	-

Fonte: Autora

Como já comentado, a cal foi estudada por ser um aditivo de uso consagrado em misturas asfálticas. Os pós FGD e EP se tornaram opções por serem resíduos, cujas melhorias, se comprovadas, seriam interessantes alternativas para a indústria siderúrgica e para a de pavimentação. O pó FGD tem composição química bem próxima à da cal (rica em óxido de cálcio) e alcançou um pH próximo ao dela, como já apresentado na Tabela 12. Apesar disso, o pó FGD possui 25% de SO₃ em sua constituição, que se trata de um óxido ácido e seus efeitos em contato com ligante e agregado devem ser mais bem avaliados nos ensaios das misturas asfálticas. O pó EP apresenta mais de 60% de sua constituição em óxido férrico e, como

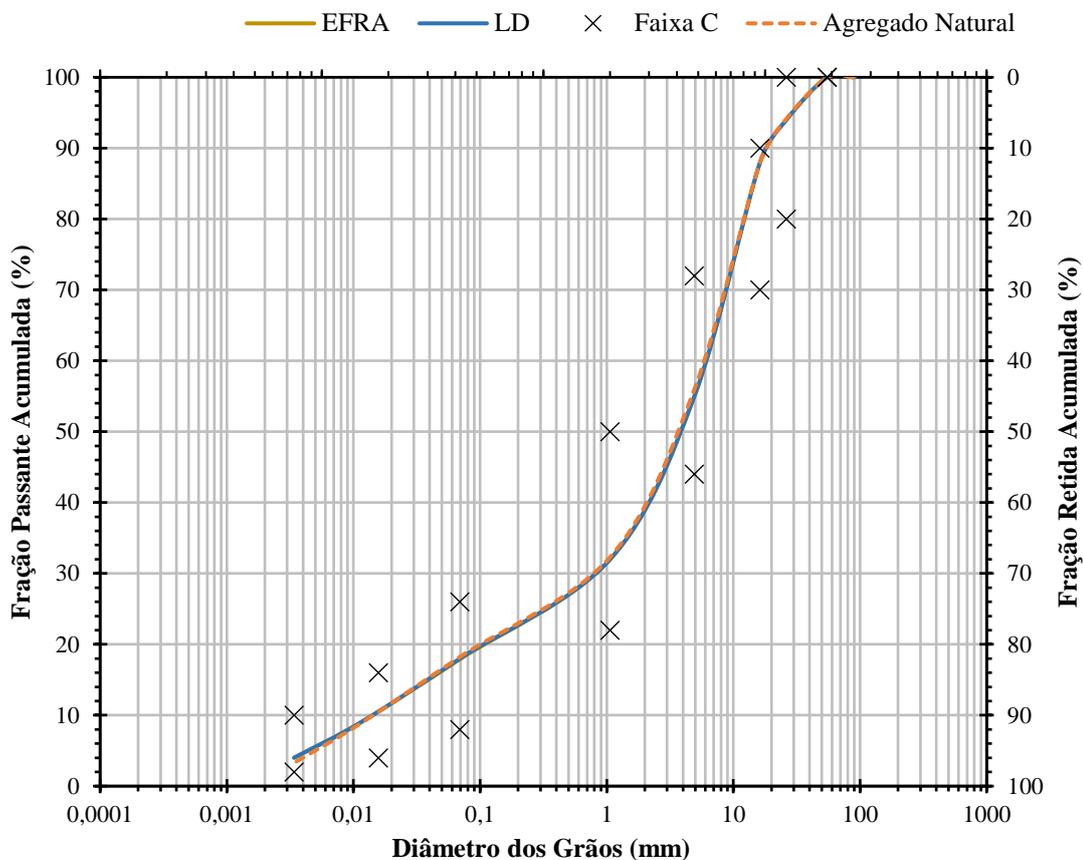
discutido anteriormente, a presença de ferro nos agregados está associada a uma boa adesividade e em resultados promissores de misturas asfálticas. Por fim, o pó de agregado natural é majoritariamente constituído pelos óxidos de silício e alumínio; o primeiro destes confere a ele certa acidez, o que é indesejável em misturas asfálticas devido à dificuldade com que o ligante se adere a agregados que contêm esse óxido. Por outro lado, o óxido de alumínio pode estar associado a uma contribuição positiva na adesividade, mas sua concentração pode não ser suficiente para apreciação de seus efeitos.

4.3. Caracterização de Misturas Asfálticas

4.3.1. Dosagem Marshall das Misturas Asfálticas

O primeiro procedimento para seleção das misturas asfálticas a serem estudadas foi a determinação do teor ótimo de ligante segundo a metodologia de Dosagem Marshall. Primeiramente, foi feita a adequação dos agregados siderúrgicos e naturais na faixa C do DNIT por meio de peneiramento. Conforme Figura 60, os materiais foram peneirados e agrupados posteriormente de forma que a composição individual se encaixasse dentro dos limites estabelecidos e, especialmente a EFRA e a LD, ficaram sobrepostas, para que a distribuição granulométrica não fosse uma variável nesta pesquisa.

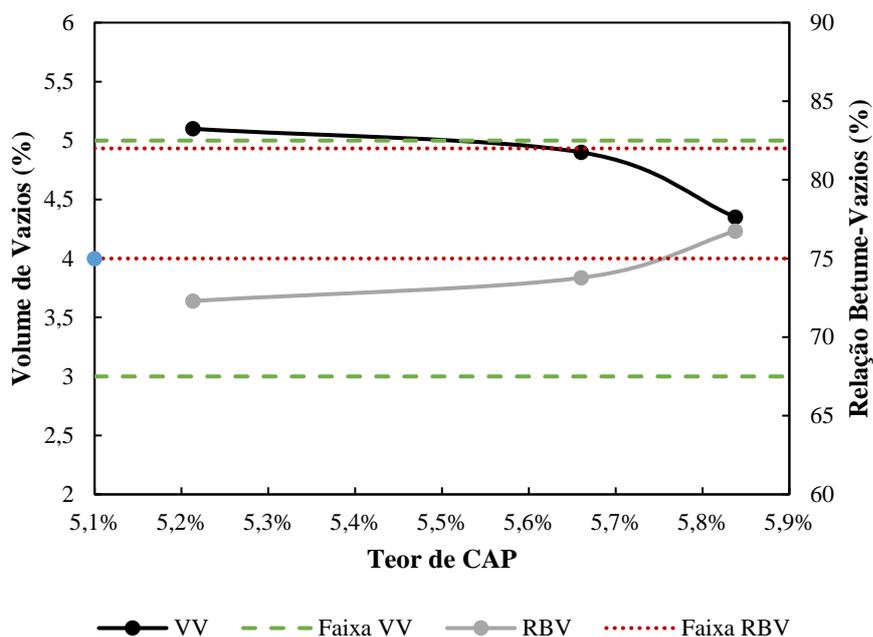
Figura 60 - Curva granulométrica da composição na Faixa C



Fonte: Autora

Para a mistura asfáltica com 25% de substituição de AN por LD, em massa, foi reproduzida a mistura já dosada por Teixeira et al. (2019), sendo utilizado um teor de ligante de 5,1%, também em massa em relação à massa de agregados. Para EFRA, foi obtida a curva da Figura 61 mostrando a variação dos parâmetros volumétricos com o teor de ligante médios obtidos para uma amostragem de 4 CP's, além dos intervalos de limites mínimo e máximo de VV (3 a 5%) e RBV (75 a 82%) normatizados pela norma DNER-ME 043/95.

Figura 61 - Curva VV x RBV para dosagem da EFRA



Fonte: Autora

Dessa forma, foi encontrado o teor ótimo de 5,84%, que atende aos requisitos para VV e RBV estabelecidos em norma. Há um aumento do teor ótimo de ligante para a EFRA quando comparado ao encontrado para a LD. Esse resultado está de acordo com os valores de absorção encontrados para as duas escórias, tendo em vista que a EFRA apresentou absorção superior a 5%, enquanto a LD, 1,95%. Apesar do aumento do consumo de ligante, 5,84% de teor de projeto em uma mistura asfáltica ainda se mostra um valor economicamente viável para a o nível de substituição de coproduto proposto.

4.3.2. Preparação de CP's para Ensaio Mecânicos

A partir dos teores ótimos de ligante estabelecidos para a EFRA e a LD, CP's das misturas estudadas foram compactados. No caso da mistura com LD, os resultados para as propriedades mecânicas são os obtidos por Teixeira et al. (2019). As misturas com EFRA, com e sem aditivos, possuem a mesma massa de agregados e de CAP. Isso quer dizer que os fíleres não influenciaram os parâmetros volumétricos dos CP's a ponto de o VV e o RBV estarem fora dos intervalos previstos em norma. Na Tabela 21, estão descritos os materiais e as massas utilizadas nas amostras dos ensaios mecânicos.

Tabela 21 - Parâmetros para misturas dos ensaios mecânicos

Misturas	Massa de agregados	Teor de CAP na Mistura (Ag+CAP)	Aditivo	Massa Aditivo	% Adição em Relação à Massa de Agregados
I			-	-	-
II			Cal	18 g	1,50%
III	25% EFRA 75% AN	1200 g	5,84%	Pó FGD	19,76 g 1,65%
IV			Pó EP	27,48 g	2,29%
V			Pó AN	20,71 g	1,73%
VI	25% LD 75% AN <i>Teixeira et al.</i> (2019)	1240 g	5,14%	-	- -

Fonte: Autora

As dimensões e os parâmetros volumétricos para os CP's ensaiados pelas propriedades mecânicas estão nas Tabelas Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - CP's para Estabilidade e Fluência Marshall

Mistura	CP	H (mm)	D (mm)	VV(%)	Média (%)	RBV (%)	Média (%)
	51	62,8	101,5	3,6		80,2	
EFRA + AN	55	63,6	102	4,1	4,1	77,8	77,83
	138	63,7	101,8	4,6		75,5	
EFRA + AN + Cal	82	64,5	101,7	4,2		76,9	
	102	64,4	102,1	4,5	4,3	75,8	76,63
	140	64,3	101,7	4,2		77,2	
EFRA + AN + Pó FGD	92	63,4	102	4,7		75,1	
	104	64,3	101,6	4,9	4,7	75,0	75,37
	141	63,6	102,2	4,4		76,0	
EFRA + AN + Pó EP	134	63,7	101,8	4,9		75,1	
	135	64,1	101,8	4,6	4,7	75,3	75,20
	136	64,2	101,7	4,7		75,2	
EFRA + AN + Pó AN	1704	63,5	101,9	4,3		76,4	
	1705	64	102,3	4,9	4,6	75,0	75,77
	1706	63,8	101,6	4,5		75,9	
LD + AN	1	62,8	102,3	3,12		80,4	
<i>Teixeira et al.</i> (2019)	2	63,1	102,3	3,23	3,2	79,8	79,7
	3	63,3	102,1	3,28		79,1	

Fonte: Autora

Tabela 23 - CP's para Tração por Compressão Diametral

Mistura	CP	H (mm)	D (mm)	VV(%)	Média (%)	RBV (%)	Média (%)
EFRA + AN	52	62,7	101,8	4,4		76,63	
	61	62,6	101,7	4,1	4,4	77,8	76,6
	137	63,1	102,1	4,7		75,3	
EFRA + AN + Cal	81	64,1	102,2	3,9		78,4	
	101	64,5	102,1	4,8	4,4	75,3	76,3
	139	64,3	101,9	4,6		75,3	
EFRA + AN + Pó FGD	91	63,6	101,8	4,8		75,2	
	103	64,4	101,9	4,6	4,8	75,5	75,3
	142	63,8	102,2	4,9		75,2	
EFRA + AN + Pó EP	131	64,3	102,2	4,8		75,1	
	132	64,2	102	4,7	4,8	75	75,2
	133	64,3	102,4	4,8		75,4	
EFRA + AN + Pó AN	1701	63,8	102,3	4,4		76,1	
	1702	63	102,2	4,5	4,6	75,9	75,8
	1703	64,4	101,4	4,8		75,5	
LD + AN Teixeira et al. (2019)	4	62,7	102,2	3,84		76,72	
	5	63,0	102,3	3,52	3,6	78,09	77,6
	6	63,5	102,2	3,50		78,0	

Fonte: Autora

4.3.3. Estabilidade e Fluência Marshall

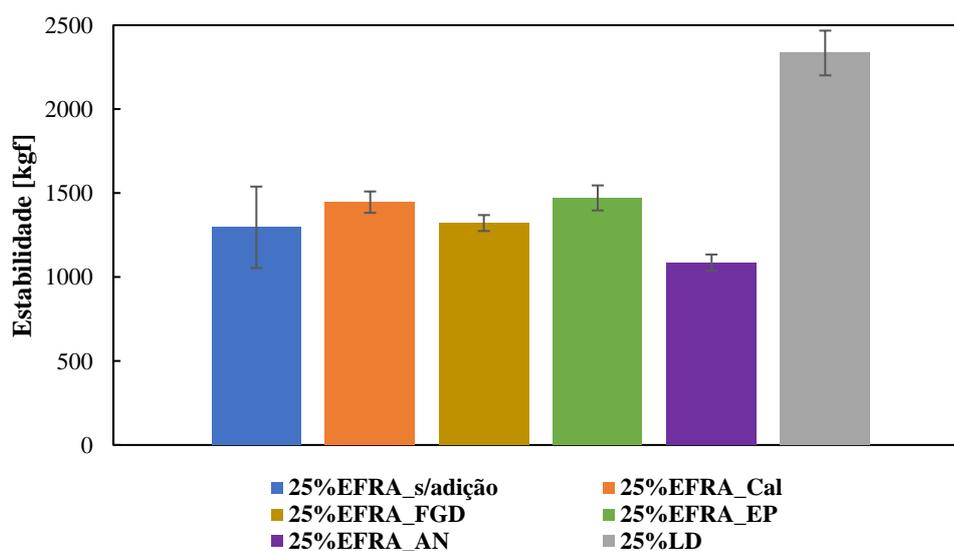
Os resultados para Estabilidade e Fluência Marshall da EFRA (com e sem aditivos), juntamente com os resultados desse ensaio de Teixeira et al. (2019) para LD com seus respectivos desvios estão apresentados na Tabela 24 e na Figura 62.

Tabela 24 - Resultados para Estabilidade e Fluência Marshall

Mistura	Estabilidade (kgf)	Média (kgf)	Desvio (kgf)	CV (%)	Fluência (mm)
EFRA + AN	1105,17	1296,19	236,63	18,3%	6,56
	1222,50				5,74
	1560,90				5,71
EFRA + AN + Cal	1397,42	1446,15	67,3662	4,7%	5,22
	1418,01				5,46
	1523,03				5,48
EFRA + AN + Pó FGD	1326,44	1321,88	35,9836	2,7%	4,53
	1355,36				6,69
	1283,83				5,75
EFRA + AN + Pó EP	1448,75	1471,53	69,9803	4,8%	5,88
	1415,79				6,25
	1550,07				5,41
EFRA + AN + Pó AN	1138,55	1086,1	53,2105	4,9%	5,21
	1087,58				4,9
	1032,16				3,31
LD + AN <i>Teixeira et al. (2019)</i>	2405,00	2334,67	133,238	5,7%	5,42
	2418,00				4,17
	2181,00				3,75

Fonte: Autora

Figura 62 - Gráfico de Estabilidade Marshall



Fonte: Autora

Os valores atingidos por todas as misturas foram superiores ao mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2006 que é de 500 kgf para corpos de prova compactados no Marshall com 75 golpes. Segundo Gouveia, Júnior e Soares (2007), a estabilidade pode ser impactada positivamente pelo aumento da energia de compactação da mistura e da rugosidade e angularidade dos agregados que, permitem arranjos mais densos e reduzem os vazios. No caso das misturas apresentadas, com constituições granulométricas semelhantes, cujos agregados possuem forma e angularidade bastante similares - conforme já comentado -, os corpos de prova com substituição de LD alcançaram uma média superior às demais misturas. Isso pode ser devido a um conjunto de fatores, tais como a diferença nas massas específicas dos agregados siderúrgicos, culminando em amostras menos densas de EFRA em relação às de LD; diferentes valores de dureza e de abrasão Los Angeles, em que a LD tem 19% e a EFRA 36%, como apresentado anteriormente e, por fim, os volumes de vazios dos CP's. Os volumes de vazios alcançados por Teixeira et al. (2019) com as misturas de agregado natural e LD variaram entre 3,12 e 3,28%, ao passo que, dos 15 corpos de prova com EFRA (com e sem aditivo), apenas um obteve vazio inferior a 4,1%.

Ressalta-se que embora o fíler tenha papel de preenchimento dos vazios do CP, não se notou pelo gráfico da Figura 62, alteração para misturas de EFRA com fíleres em relação à mistura sem aditivo. Por outro lado, dando-se atenção à Tabela 24, tem-se que, das três amostras de EFRA sem aditivo (CP's 51, 55 e 138), as duas primeiras obteriam uma média de 1163 kgf e o conjunto teve uma média final alta graças ao CP 138, que alcançou 1560 kgf; resultando em um alto coeficiente de variação para esse grupo. Teixeira et al. (2019) também encontrou a estabilidade de uma mistura composta apenas por agregados naturais do mesmo tipo utilizado nessa pesquisa o valor de 2165 kgf, superando todos os valores de estabilidade para as misturas encontradas, exceto para a LD.

Descartando-se o CP 138 e aumentando a confiabilidade do resultado para esse conjunto (resultando em um novo $CV = 7,13\%$), tem-se que a mistura com EFRA sem aditivo se aproximaria muito do grupo cujo fíler é o próprio agregado natural (com estabilidade igual a 1086 kgf). Como todos os aditivos foram utilizados em volumes iguais, pode-se perceber que o efeito apenas físico de preenchimento que o fíler de agregado natural proporciona às amostras com EFRA (devido à sua composição química rica em sílica) não gerou aumento para estabilidade Marshall, já que os grupos com os demais fíleres foram superiores ao com pó AN, na seguinte ordem: pó EP, seguido de perto pela cal e, por fim, o pó FGD. Isso revela que esses últimos foram responsáveis por agir quimicamente na estabilidade das misturas.

A cal é citada pelos trabalhos de Jitsanigam, Biswas e Compton (2018) e Lesueur, Petit e Ritter (2012) como um material que atua modificando tanto o ligante quanto o agregado: no primeiro, pela neutralização das porções ácidas do betume e oferecendo um efeito físico devido a sua alta porosidade. No agregado, modificando a sua superfície com a formação de íons de cálcio. Desempenhando especificamente essas melhorias, a atuação da cal não seria fator de contribuição para alcançar altos valores na avaliação por estabilidade Marshall, mas, ainda assim, ela obteve um bom desempenho. O pó FGD também melhorou o desempenho da mistura em relação à referência, devido à similaridade de sua composição química à da cal.

Vale ressaltar que essas misturas (com aditivos) tiveram uma baixa variação do volume de vazios (o que poderia ser uma variável) entre si, apresentando valores médios entre 4,1% e 4,7 (inclusive o pó EP, com maior valor de estabilidade entre elas, possui o maior VV, igual a 4,7%). Resultado similar a esse foi obtido por Cosme, Teixeira e Calmon (2016), quando associou o aumento de rigidez do ligante asfáltico ao alto teor de óxido de ferro nos agregados de escória de aço que o autor utilizou. Giuffrè et al. (2018) avaliou as propriedades reológicas do ligante contendo óxido de ferro e observou um aumento de temperatura para ponto de amolecimento; que, segundo o autor, pode ser um indicativo de melhoria de resistência à deformação plástica, mas entendeu ser necessária corroboração por ensaios mecânicos.

4.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral RTCD

Os resultados de RTCD da LD oriundos de Teixeira et al. (2019) e da EFRA (com e sem aditivos) obtidos nessa pesquisa com seus respectivos desvios são mostradas na Tabela 25.

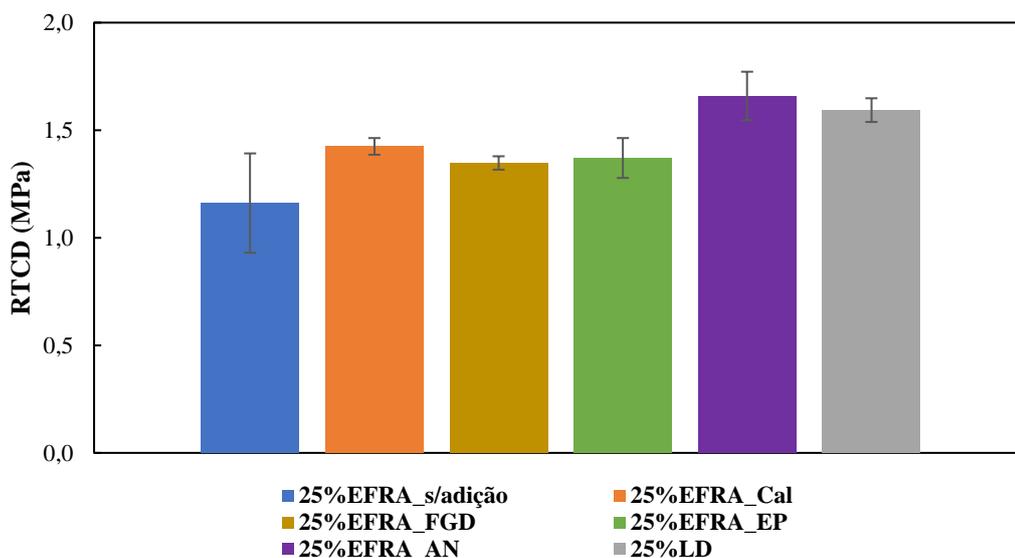
Tabela 25 - Resultados para Tração por Compressão Diametral

Mistura	RTCD [MPa]	Média RTCD [MPa]	Desvio [MPa]	CV (%)
EFRA + AN	1,01	1,16	0,230	19,9%
	1,05			
	1,43			
EFRA + AN + Cal	1,43	1,42	0,038	2,7%
	1,38			
	1,46			
EFRA + AN + Pó FGD	1,32	1,35	0,031	2,3%
	1,34			
	1,38			
EFRA + AN + Pó EP	1,39	1,37	0,092	6,8%
	1,27			
	1,45			
EFRA + AN + Pó AN	1,79	1,66	0,112	6,8%
	1,58			
	1,61			
LD + AN <i>Teixeira et al. (2019)</i>	1,65	1,59	0,055	3,5%
	1,54			
	1,59			

Fonte: Autora

A Figura 63 contém os dados da Tabela 25 e permite uma melhor análise. Assim como na Estabilidade Marshall, uma das amostras do grupo da EFRA sem aditivo apresentou um valor mais alto que as demais para resistência à tração (1,43 MPa), que culminou em um CV quase de 20%. Retirando-se essa amostra dos resultados e passando a análise a ser feita com RTCD média igual a 1,03 MPa e coeficiente de variação igual a 2,75%, vê-se que a EFRA sem aditivo possui menor RTCD entre as misturas testadas. Aquelas que contêm os aditivos cal, pó FGD e pó EP obtiveram melhores desempenhos, alcançando aumentos de 38%, 31% e 33% em relação à referência, respectivamente.

Figura 63 - Gráfico para Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autora

Como discutido no item anterior, estudos mostram que a cal é responsável pela melhora das características viscoelásticas do ligante betuminoso e isso pode ser visto nos seus resultados de RTCD. Conforme Cosme, Teixeira e Calmon (2016), ela confere uma boa elasticidade e recuperação das propriedades do asfalto. Da mesma forma, Little e Petersen (2005) comentam que há melhora da resistência à tração da mistura asfáltica com cal e aumento do alongamento do material à ruptura. Dessa forma, a cal se posiciona a favor de um melhor desempenho na tração, mas, apesar de alterar as propriedades viscoelásticas do material, ela não atrapalha a prática da estabilidade. Da mesma forma, o pó EP, apesar de ter fornecido à mistura uma melhor estabilidade – o que se credits a um enrijecimento do ligante –, não teve sua atuação na resistência à tração das misturas prejudicada, apresentando valores similares ao das misturas com cal. Assim como no item anterior, o pó FGD teve uma atuação similar à da cal com relação à resistência à tração das misturas.

O que surpreende nesses resultados é a RTCD resultante da mistura com pó AN ter aumentado em 61% a mistura sem aditivo (referência). Pela mesma linha de análise da estabilidade Marshall, entende-se que o pó de AN não agiu quimicamente na mistura, mantendo a flexibilidade do ligante e não enrijecendo-o; atuando apenas como material de preenchimento no corpo de prova. Acontece que, para a análise anterior (de estabilidade), a ação química tinha mais valor que para a análise de resistência à tração, que avalia a flexibilidade da mistura asfáltica. Cosme, Teixeira e Calmon (2016) encontrou uma boa correlação entre baixo teor de silício e aumento da rigidez da mistura, por meio do módulo de cisalhamento dinâmico, o que

vai ao encontro dos resultados dessa pesquisa. Segundo resultados do autor, mástiques produzidos com fíleres que apresentam um percentual significativo de silício tendem a ter menor rigidez se comparados a misturas com fíleres ricos em ferro.

Para as misturas com coproduto LD, os resultados de resistência à tração são superiores aos valores encontrados para as demais misturas, sendo apenas inferior a mistura asfáltica contendo pó AN. A mistura apenas com agregado natural de Teixeira et al. (2019) mostrou uma RT igual 1,62 MPa, ocupando posição intermediária entre a mistura com LD e a com pó AN. Aqui, tem-se que o óxido de ferro presente no agregado LD pode ter contribuído para um sutil enrijecimento do ligante, visto que, a sua excelente adesividade com o cimento asfáltico poderia lhe acarretar um desempenho ainda mais satisfatório, como o alcançado pela mistura com pó de agregado natural. Ademais, todas se mostraram com resultados superiores aos exigidos pela norma DNIT 031/2006, que é de 0,65 MPa.

4.3.5. *Dano Devido à Umidade Induzida (DUI)*

As amostras condicionadas e não condicionadas de EFRA, com e sem os aditivos, e de LD foram rompidas por RTCD e os resultados obtidos estão na Tabela 26 e plotados na Figura 64.

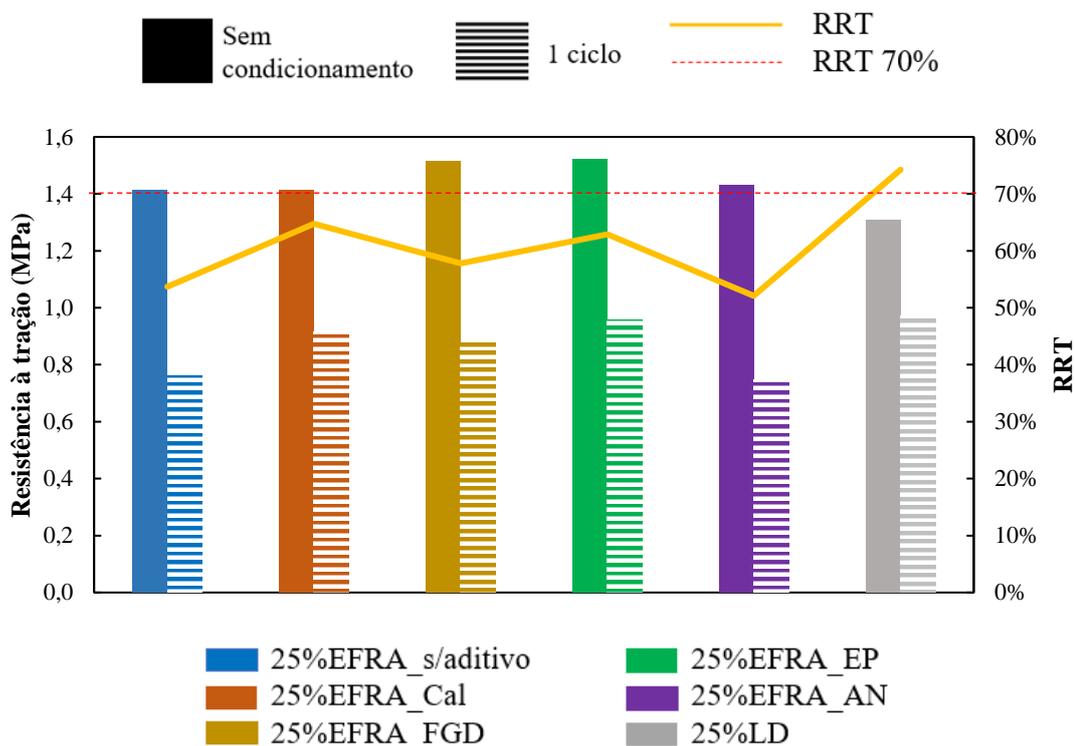
Tabela 26 - Valores de RTCD para CP's do DUI

	Sem condicionamento				1 ciclo				RRT (%)
	VV (%)	RTCD [MPa]	RTCD Médio [Mpa]	CV (%)	VV (%)	RTCD [MPa]	RTCD Médio [Mpa]	CV (%)	
EFRA + AN	6,7	1,46			7,7	0,73			54
	6,3	1,44	1,41	4,5	7,0	0,82	0,76	6,8	
	7,2	1,34			7,7	0,73			
EFRA + AN + Cal	7,1	1,43			6,9	0,94			65
	6,9	1,38	1,41	2,0	7,1	0,88	0,92	3,5	
	6,7	1,43			7,5	0,93			
EFRA + AN + Pó FGD	6,7	1,63			7,4	0,83			58
	7,1	1,47	1,51	6,7	7,8	0,87	0,88	5,7	
	6,6	1,44			6,7	0,93			
EFRA + AN + Pó EP	7,3	1,47			6,3	1,01			63
	7,1	1,52	1,52	3,6	7,4	0,97	0,96	6,4	
	7,6	1,58			6,8	0,89			
EFRA + AN + Pó AN	6,3	1,52			7,8	0,79			52
	6,6	1,45	1,43	7,1	7,0	0,70	0,75	6,0	
	6,3	1,32			6,6	0,75			
LD + AN	7,07	1,41			7,2	0,89			74
	7,21	1,31	1,31	8,0	7,1	0,94	0,88	8,1	
	6,81	1,20			7,4	0,80			

Fonte: Autora

Todos os coeficientes de variação estão razoáveis, fornecendo confiabilidade aos resultados a serem analisados.

Figura 64 - Resultado de RTCD e RRT no DUI



Fonte: Autora

O dano por umidade é um parâmetro importante para a avaliação da adesividade. Segundo Bernucci et al. (2008), para misturas asfálticas contínuas, o valor de RRT mínimo para que a mistura seja aprovada é de 70%, sendo RRT a razão entre a tração da amostra condicionada sobre a amostra sem condicionamento. Também segundo os autores, ainda que pelo ensaio de umidade DNER-ME 078/94 o agregado apresente boa adesividade, a mistura composta por esse agregado pode não ser resistente à ação da água. Pela Figura 64, apenas a mistura com LD alcançou um RRT satisfatório, sendo a única a ultrapassar os 70%. Esse resultado corrobora com os ensaios de adesividade do agregado ao ligante, em que a escória EFRA se apresentou resultado insatisfatório. Nota-se que apenas considerar os parâmetros de estabilidade e fluência e RTCD das misturas, requeridos pelo DNIT 031/2006, não é suficiente para julgar o desempenho das misturas com relação a possíveis danos devido à umidade.

Com relação à ação dos fíleres melhoradores de adesividade, a mistura com pó de agregado natural se comportou de forma muito semelhante à mistura de referência, o que permite considerar que a adição de um fíler rico em silício não contribuiu na resistência à umidade. Mais ainda, nota-se que a adição de um fíler qualquer, apenas com o intuito de preencher fisicamente a mistura asfáltica, não garante um bom desempenho frente à resistência

ao dano devido à umidade. Assim, esse resultado passa a ser a referência para comparação com a ação dos demais fíleres.

Jitsanigam, Biswas e Compton (2018) e Little, Epps e Sebaaly (2006) e diversos outros creditam à cal melhoria na ação de recobrimento do agregado pelo ligante e no dano à umidade. Embora ela tenha um RRT de 65% e melhorado o da referência (52%), ela não conseguiu chegar ao mínimo desejado quando incorporada à mistura contendo EFRA como agregado. O mesmo ocorre para o pó EP que alcançou 63%. A cal e o pó EP são os fíleres que mais contribuíram para o aumento na resistência ao dano à umidade, aumentando em 23% e 28% a tração pós-condicionamento em relação à referência, respectivamente. O fíler de ação química menos relevante para esse método de ensaio foi o pó FGD, com um RRT de 58%. Este não promoveu uma melhora determinante para a mistura asfáltica, mas também se nota que seu efeito não se limitou ao preenchimento físico do CP.

Bahia e Wen (2007) e D'angelo e Anderson (2003) e outros autores criticam o ensaio por ser muito simplista para explicar os vários mecanismos de decapagem que afetam o pavimento, sendo assim, os procedimentos de condicionamento não simulam efetivamente as condições de campo e apenas a tração não pode medir o desempenho que a mistura teria em campo. Além disso, comentam que a indústria de pavimentação não tem entendimento claro dos mecanismos de dano por umidade das misturas asfálticas usinadas a quente. No entanto, ainda assim é recomendado neste estudo a realização deste ensaio para complementar a caracterização das misturas asfálticas, uma vez que apenas considerar os ensaios requeridos pelo DNIT 031/2006 não são capazes de diferenciar os efeitos de adesividade distintos entre materiais.

As imagens das Figura 65 e 66 mostram os corpos de prova após rompimento. É possível observar os agregados mais expostos na ocasião de condicionamento do que quando ele não acontece. Com algum cuidado, é possível observar também que a mistura com cal está mais bem recoberta dentre as misturas com EFRA, enquanto a mistura com pó AN apresenta menos recobrimento. A melhor resistência ao dano por umidade fica clara na figura da mistura com LD, quando, mesmo após o condicionamento, pouco agregado da amostra está exposto.

Figura 65 - CP's DUI rompidos. (a) 25%ACBFS_s/aditivo; (b) 25%ACBFS_Cal e (c) 25%ACBFS_FGD

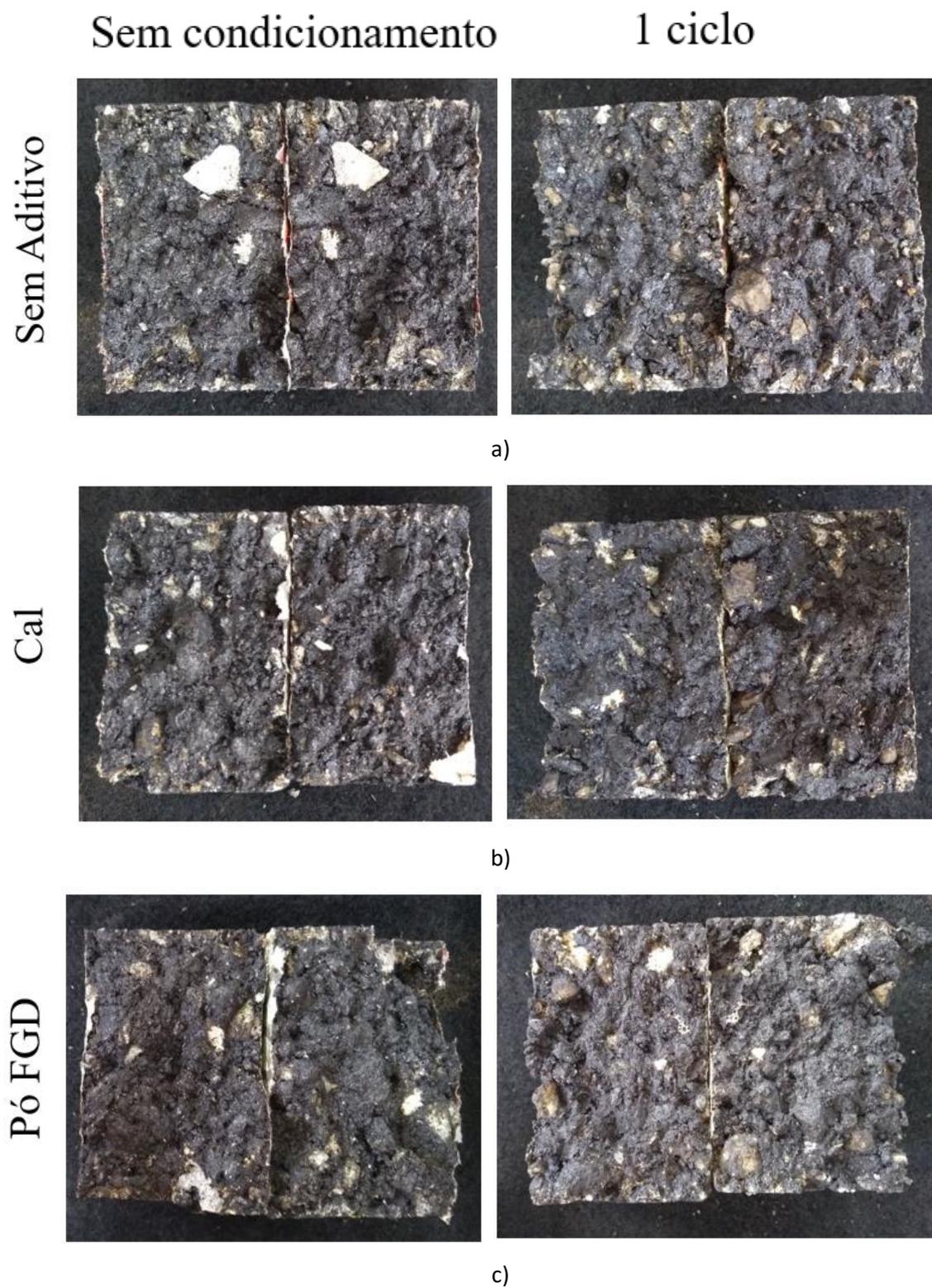
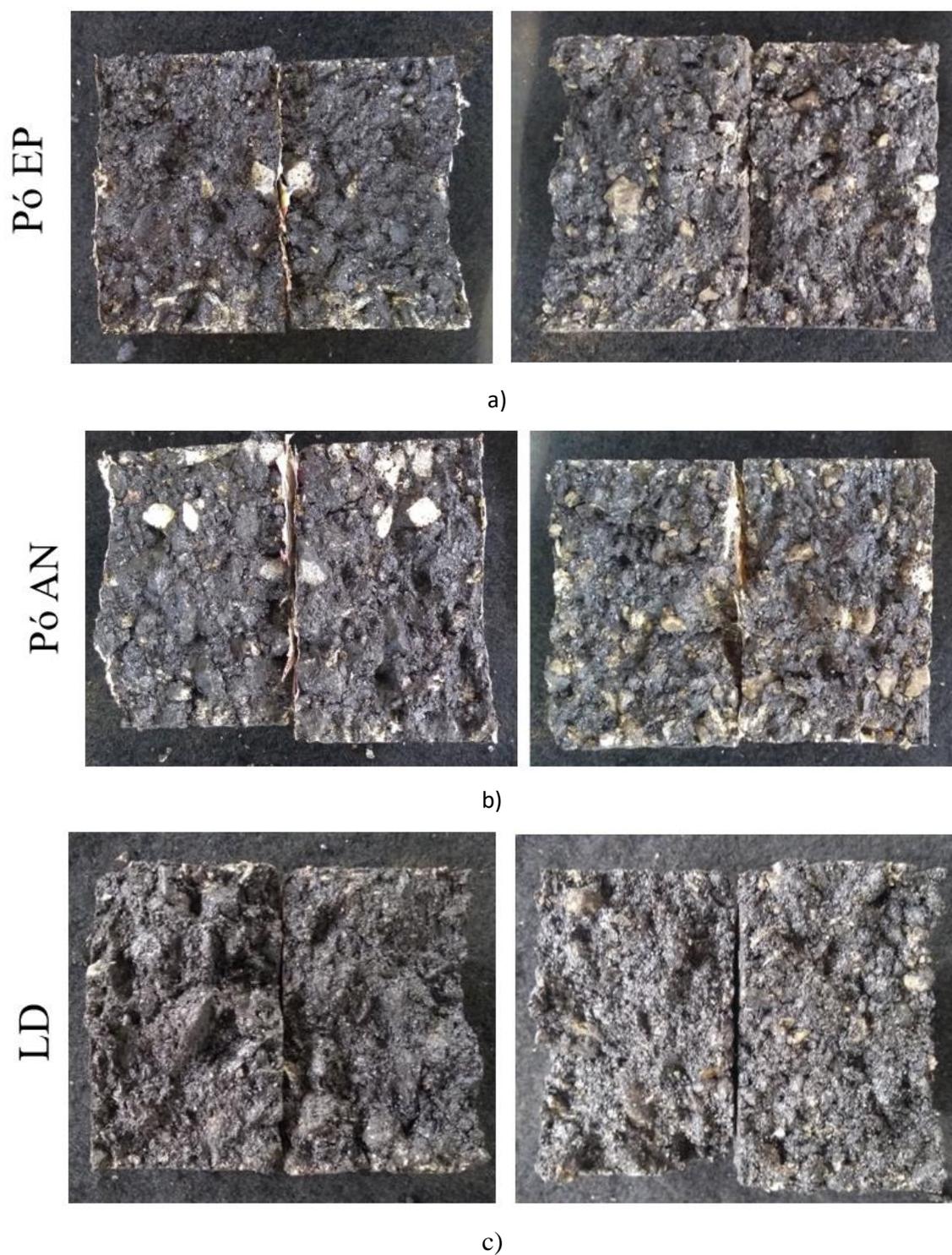


Figura 66 - CP's DUI rompidos. (a) 25%ACBFS_EP; (b) 25%ACBFS_AN e (c) 25%LD



Fonte: Autora

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

Os efeitos das características físicas, químicas, mineralógicas e termoquímicas (energia de superfície e trabalho de adesão) dos agregados siderúrgicos na adesividade destes ao ligante asfáltico foi estudado neste trabalho por meio de uso de técnicas avançadas de análise de superfície. Diante dos resultados apresentados é possível concluir que:

- O efeito de intertravamento mecânico alcançado pela rugosidade do agregado não foi preponderante para o aumento da adesividade escória-ligante no presente estudo, visto que os agregados siderúrgicos foram classificados com textura, angularidade e forma semelhantes entre si e apresentaram desempenhos bastante distintos ao ensaio tradicional de adesividade.
- A composição química e os estudos sobre as energias de superfície foram mais esclarecedores e tenderam ao resultado que a prática já havia indicado (EFRA tem má adesividade e LD tem boa adesividade);
- Por meio da análise da composição química da atual pesquisa, juntamente com a de outros trabalhos, é possível inferir que o alto teor de dióxido de silício assemelha o comportamento do agregado siderúrgico ao de uma rocha félsica, que apresenta baixa adesividade ao ligante. Conjuntamente a isso, o óxido de ferro é preponderante para a boa adesividade da escória de aciaria LD, a qual compõe em cerca de 1/3. O óxido de cálcio, cuja composição em ambos os agregados está em torno de 40%, é responsável pelo o caráter básico para as escórias, mas não prepondera sobre a questão da adesividade.
- A análise de energia livre de superfície por meio do ângulo de contato apresentou valores muito próximos para EFRA e LD nesse parâmetro. Além disso, o mesmo ocorreu quando o líquido utilizado foi o cimento asfáltico, não mostrando uma diferença significativa nos ângulos para os dois coprodutos. Assim, esse ensaio não se apresenta como uma opção adequada para a avaliação da energia livre de superfície para os agregados em estudo.
- O ensaio de AFM apresentou resultados de trabalho da força de adesão coerentes com a prática, i.e., o trabalho de adesão para LD foi superior ao apresentado para EFRA. A adaptação do ensaio de AFM utilizando ponta “com ligante” mostrou-se promissora para avaliar a adesão agregado-ligante, visto que a escória de aciaria LD apresentou valores superiores de trabalho de adesão em relação a EFRA.

A avaliação das propriedades mecânicas e do dano à umidade das misturas asfálticas de EFRA, com e sem aditivos, e de LD permitem as seguintes observações:

- A mistura asfáltica contendo apenas escória de alto forno resfriada ao ar e agregados naturais obteve os piores desempenhos segundo os resultados de estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados do ensaio de dano à umidade induzida corroboraram com os testes preliminares de adesividade do agregado ao ligante realizados na EFRA, em que a mistura com EFRA sem aditivo, juntamente com a mistura com EFRA e adição de pó AN obtiveram os piores resultados.
- A adição de cal hidratada resultou em desempenho positivo nos dois ensaios de propriedades mecânicas apresentados. A sua ação no ligante e nos agregados, tendem que ela contribua mais para o incremento na resistência à tração do que para aumento na estabilidade – pois melhora as propriedades viscoelásticas do material betuminoso -, mas ela não prejudicou o desempenho da mistura na estabilidade. No DUI, a cal teve o melhor resultado com RRT, reiterando o que diz a literatura sobre a sua ação antidecapagem.
- O pó FGD não teve destaque positivo nem negativo nos resultados mecânicos em comparação com as outras misturas. Em todos os ensaios, os resultados das misturas de EFRA com FGD foram superiores à mistura referência. Também superou as misturas com pó de agregado natural na estabilidade e no dano à umidade. Em relação aos demais aditivos e análises, misturas com pó FGD apresentaram desempenho inferior.
- Para estabilidade Marshall, a mistura com pó EP obteve um bom aumento dentre as misturas de EFRA. A hipótese levantada foi o provável enrijecimento do ligante asfáltico pela ação do óxido de ferro contido nesse pó (outro fator de contribuição também para o sucesso da LD). Apesar dessa possibilidade de ação química do pó EP no ligante contribuir para a estabilidade, ela não prejudicou seu desempenho na resistência à tração das misturas estudadas, de maneira que misturas de EFRA com pó de EP apresentaram desempenho superiores às aquelas com pó FGD e bem próximos aos das misturas com cal. Observa-se neste estudo que o pó de EP e a cal agem de maneira contrária: enquanto teoricamente a cal hidratada contribui mais para melhores resultados na resistência à tração, sua ação não interfere na estabilidade das misturas. O contrário aconteceu para o pó EP, que auxilia nas propriedades para melhorar a estabilidade e não interfere prejudicando a tração. Já no dano à umidade, eles têm traços em comum: melhoraram a resistência das misturas com ele contidas e obtiveram RRT bem próximos (65% para a cal e 63% para o pó EP).

- Destaca-se a ação do pó de agregado natural na resistência à tração, com o maior valor alcançado dentre as misturas. Acredita-se que o preenchimento físico desse fíler e o fato de ele não alterar o meio químico onde foi adicionado, conferiram à massa asfáltica boa flexibilidade e baixa rigidez (o que é coerente com o seu resultado na estabilidade: a pior dentre todas). No entanto, quando se avalia o DUI, o pó de agregado natural não manifestou nem efeito físico na mistura, equivalendo o seu RRT ao da mistura sem aditivos. Acredita-se que, como o AN é silicoso, não possibilitou a alteração da superfície ácida da EFRA, diferentemente do que ocorreu com os demais aditivos, que como consequência, mostraram melhores desempenhos nos ensaios de DUI.
- Na estabilidade Marshall, o coproduto LD alcançou o maior desempenho entre as misturas. Apontam-se como razões alguns fatores, como boas abrasão e dureza da LD em relação à EFRA; maior densidade dos grãos e partículas do coproduto de aciaria, tornando a mistura mais densa e menores vazios das misturas com LD. Para a tração, a LD também foi muito bem, sendo inferior apenas à mistura com pó AN. Esse resultado sugere que o óxido de ferro da LD não foi suficiente para tornar a mistura contendo esse agregado rígida o suficiente de tal sorte que a tração estaria prejudicada. Enquanto de um lado a LD proporciona uma mistura asfáltica coesa e densa; por outro lado, ela possui excelente adesividade ao ligante e não altera as suas propriedades a ponto de ter também bons resultados na tração. Aliado a isso, a mistura com LD foi a única das estudadas que obteve RRT superior a 70%, evidenciando sua forte ligação com o ligante asfáltico.

De uma maneira geral, tendo em vista a análise dos agregados, conclui-se que a escória LD possuiu uma melhor adesividade ao ligante betuminoso de acordo com os resultados obtidos pelas técnicas avançadas de análise de superfície empregadas. Não apenas a LD apresentou um trabalho de força de adesão com o ligante asfáltico bem superior à EFRA, mas também sua composição química e mineralógica confere a ela diversas características favoráveis à aplicação em pavimento, como boa abrasão, dureza, módulo de elasticidade. No entanto, ressalta-se que ambos os coprodutos têm potencial para aplicação em pavimentos asfálticos. Os efeitos da diferença encontrada na adesão escória-ligante nos parâmetros mecânicos de misturas asfálticas devem ser avaliados. Embora a LD possua maior potencial de adesão de acordo com a avaliação desse trabalho, a possível introdução da EFRA em misturas asfálticas não pode ser desprezada e pode ser viabilizada com o uso de melhoradores de adesividade. Os aditivos aqui apresentados são opções razoáveis, sobretudo, por se tratar de coprodutos industriais. O pó EP e o FGD tiveram um bom desempenho nos ensaios, não prejudicando os resultados das misturas ensaiadas em nenhum deles. A ação da cal não foi

superada por nenhum dos aditivos, mas o pó EP se mostrou tão eficiente quanto e ele pode ser uma boa opção, mas são necessários mais estudos e entendimento de sua ação.

5.1. Sugestões para estudos futuros

Diante do avaliado nas conclusões, sugerem-se as seguintes pesquisas futuras:

- Avaliar as propriedades mecânicas e de dano por umidade em misturas asfálticas contendo teores de EFRA inferiores a 25%.
- Analisar os efeitos de fíler pó EP e outros contendo óxido de ferro em misturas com outros agregados de má adesividade para melhor compreensão dos efeitos dessa substância em misturas asfálticas.
- Analisar as propriedades de misturas contendo escórias de aciaria e de alto forno em conjunto.
- Avaliar misturas envelhecidas de EFRA com melhoradores de adesividade.

REFERÊNCIAS

AASHTO T 283. American Association of State and Highway Transportation Officials - **Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6458. **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12583. **Agregado graúdo - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso**, 2017.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**, 2005.

AGUIAR-MOYA, J. P.; BALDI-SEVILLA, A.; SALAZAR-DELGADO, J.; PACHECO-FALLAS, J.; LORIA-SALAZAR, L.; REYES-LIZCANO, F.; CELY-LEAL, N. Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 8, p. 738–747, 2016.

AGUIAR-MOYA, J. P.; LEIVA-VILLACORTA, F.; SALAZAR-DELGADO, J. Aggregate / Asphalt Adhesion Properties for Modified and Aged Binders. 2014.

AHMED, I. **Use of Waste Materials in Highway Construction**. Project No. C-36-50K Report No. FHWA 6-19-11, 1993.

AIREY, G. D.; THOM, N.; COLLOP, A. C. **Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Slag and Glass Secondary Aggregates**. In: 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, n. October 2016, p. 1–15, 2004.

AKBARNEJAD, S.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A. Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials.

Road Materials and Pavement Design, v. 15, n. 3, p. 488–506, 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.

AL-QADI, I. L.; SON, S.; CARPENTER, S. H. **Volume 1: Mix Design and Lab Performance Testing. Development of an Economical, Thin, Quiet, Long-lasting, and High Friction Surface Layer**. Report FHWA-ICT-13-001. Illinois, 2013.

ALBERS, A. P. F. et al. **Um Método Simples de Caracterização de Argilo Minerais por Difração de Raios-X**. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis - SC, 2001.

ALVAREZ, A. E. et al. Adhesion Quality of Chip Seals : Comparing and Correlating the Plate-Stripping Test , Boiling-Water Test , and Energy Parameters from Surface Free Energy. **Journal of Materials Civil Engineering** ,v. 5, n. 3, 2019.

ANASTASIOU, E.; PAPAYIANNI, I. Criteria for the Use of Steel Slag Aggregates in Concrete. **Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties**, p. 419–426, 2007.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **Mercado - Perspectivas para o Setor de Agregados**, 2019. Disponível em:<<https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>>. Acesso em 23/12/2020 às 11:47h.

APEAGYEI, A. K.; GRENFELL, J. R. A.; AIREY, G. D. Moisture-induced strength degradation of aggregate – asphalt mastic bonds. **Journal Road Materials and Pavement Design**, p. 37–41, 2014.

AZIZ, M. M. A.; HAININ, M. R.; YAACOB, H.; ALI, Z.; CHANG, F.-L.; ADNAN, A. M. Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways. **Materials Research Innovations**, v. 18, n. sup6, p. 255-259, 2014.

BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **International**

Journal of Pavement Engineering, p. 229–239, 2005.

BAHIA, H.; WEN, H. **Test Method to Determine Aggregate / Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage**. Report No. WHRP 07-02. Madison, 2007.

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

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B.; NETO, J. A. N. Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. **Journal of Materials Civil Engineering**, v. 27, n. 2001, 2015.

BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Application of microcalorimeter to characterize adhesion between asphalt binders and aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 6, p. 235–243, 2009.

BHASIN, A. **Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due To Water**. Doctor of Philosophy degree. Texas A&M University, Texas, 158p, 2006.

BIRGISSON, B.; ROQUE, R.; TIA, M.; MASAD, E. **Development and evaluation of test methods to evaluate water damage and effectiveness of antistripping agents**, Gainesville: University of Florida. Florida Department of Transportation, Project Number 4910-4504-722-12, 2005.

BOCCI, E. Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, n. 161, p. 156-164, 2018.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 135p, 2004.

BREWIS, D. M. Adhesion to polymers: how important are weak boundary layers? **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 13, n. 4, p. 251–256, 1993.

CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 661–672, 2019a.

CALA, A.; CARO, S.; LLERAS, M.; ROJAS-AGRAMONTE, Y. Understanding the role of the chemical composition of aggregates on the moisture susceptibility of asphalt mixtures. **Transportation Research Board**, p. 1–7, 2019b.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento Do Resíduo De Areia Verde De**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 152p, 2008.

CASTRO, R. D. P. V. DE. **Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfurização de gases exaustos de termoelétric a carvão**. 2016. 115 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

CHEN, Z.; XIE, J.; XIAO, Y.; CHEN, J.; WU, S. Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 60–66, 2014.

CHENG, D.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L.; HOLSTE, J. C. Surface Energy Measurement of Asphalt and Its Application to Predicting Fatigue and Healing in Asphalt Mixtures. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 1810, n. 02, p. 44–53, 2002.

CLINT, J. H. Adhesion and components of solid surface energies. **Journal Current Opinion in Colloid & Interface Science**. v. 6 p. 28–33, 2001.

COSME, R. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; CALMON, J. L. Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag. **Construction and Building Materials**. v. 122, p. 556–566, 2016.

CURTIS, C. W.; ENSLEY, K.; EPPS, J. Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption. **Strategic Highway Research Program**,

1993.

D'ANGELO, J., ANDERSON, R.M. **Material Production, Mix Design, and Pavement Design Effects on Moisture Damage**. Proceedings of Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar, February 4-6, 2003. Transportation Research Board 2003.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P. S. R.; MISRA, V. N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 40–57, 2007.

DAVID JOHNSON, B. R.; FREEMAN, R. B. **Rehabilitation Techniques for Stripped Asphalt Pavements**. Final Report No. FHWA/MT-002-003/8123. Montana, 2002.

DNER 195. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo** – Método de ensaio, Rio de Janeiro, IRP, 1997.

DNER-ME 043. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

DNER - EM 260. **Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários** – Especificação de Material, Rio de Janeiro, 1994.

DNER - EM 262. **Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários** – Especificação de Material, Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 084. **Agregado miúdo – determinação da densidade real** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 054. **Equivalente de Areia** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

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

DNER-ME 035. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 078. **Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 195. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo** – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

DNIT 031. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico** – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, IPR, 2006.

DNIT 180. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida** – Método de ensaio, Rio de Janeiro, IPR, 2018.

DNIT 412. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento** – Método de ensaio, Rio de Janeiro, IPR, 2019.

DNIT 136. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral** – Método de ensaio, Rio de Janeiro, IPR, 2018.

DNIT 412. **Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento** – Método de ensaio, Rio de Janeiro, IRP, 2019.

DONG, Z.; LIU, Z.; WANG, P.; GONG, X. Nanostructure characterization of asphalt-aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. **Fuel**, v. 189, p. 155–163, 2017.

EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, A. H. **Adhesives technology handbook**. 3. ed. William Andrew, 2014. 432p.

EL-BADAWY, A.; GABR, A.; EL-HAKIM, R. Recycled materials and by-products for

pavement construction. **Springer Nature Switzerland AG**, p. 2177-2198, 2019.

FHWA - Federal Highway Administration, US Department of Transportation. User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction. 2019. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/bfs1.cfm>>. Acessado em 07/01/2019 às 10:33h.

FLETCHER, T.; CHANDAN, C.; MASAD, E.; SIVAKUMAR, K. Aggregate Imaging System for Characterizing the Shape of Fine and Coarse Aggregates. **Transportation Research Record**, n. 03, p. 67–77, 2003.

FRANKLIM, T. N. **Avaliação da Adesividade Ligante-Agregado e Misturas Asfálticas Por Técnicas de Análise de Superfícies**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 108p, 2007.

FURLAN, A. P. **Considerações Acerca da Adesão e da Suscetibilidade à Umidade de Misturas Asfálticas Densas à Luz de Algumas Propriedades Mecânicas**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 202p, 2006.

FUTATSUKA, T.; SHITOGIDEN, K.; MIKI, T.; NAGASAKA, T.; HINO, M. Dissolution behavior of nutrition elements from steelmaking slag into seawater. **ISIJ International**, v. 44, n. 4, p. 753–761, 2004.

GATES, L.; MASAD, E.; PYLE, R.; BUSHSS, D. **Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS2)**. Final Report No. FHWA-HIF-11-030, 2011.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto** **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 188p, 2001.

GIUFFRÈ, T.; MORREALE, M.; TESORIERE, G.; TRUBIA, S. Rheological Behaviour of a Bitumen Modified with Metal Oxides Obtained by Regeneration Processes. **Sustainability**, 2018.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 157 f, 2003.

GOUVEIA, L. T.; JÚNIOR, J. L. F.; SOARES, J. B. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Transportes**, **XV**, p. 34–41, 2007.

HAGEN, A. P.; LEE, W. D.; JONES, T. M. Asphalt-aggregate interactions characterized by zeta potential and retained strength measurements for natural and organosilane-treated aggregates. **Transportation Research Record**, n. 1535, p. 111–116, 1996.

HARNISH, I. C. **Liquid Anti-Strip Technology & Best Practices**. Technical Manager Asphalt Additives. rrMaz Custom Chemicals, Overland Park, USA, 2010.

HEFER, a.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. A Synthesis of Theories and Mechanisms of Bitumen-Aggregate Adhesion Including Recent Advances in Quantifying the Effects of Water. **Proc. Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 74, p. 139–196, 2005.

HEFER, A.; LITTLE, D. Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. **International Center for Aggregates Research**, 2005.

HEFER, A. W.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 759–767, 2006.

HEFER, A. W. Adhesion in Bitumen-aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. Doctor of philosophy degree, Texas A&M University, Texas, 2004.

HERRMANN, P. S. P.; SILVA, M. A. P.; Fº, R. B.; JOB, A. E.; COLNAGO, L. A.; FROMMER, J. E. e MATTOSO, L. H. C. Microscopia de Varredura por Força: uma Ferramenta Poderosa no Estudo de Polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 51-61,

1997.

HICKS, R. G. **Moisture Damage in Asphalt Concrete**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991.

HORGNIES, M.; DARQUE-CERETTI, E.; FEZAI, H.; FELDER, E. Influence of the interfacial composition on the adhesion between aggregates and bitumen: Investigations by EDX, XPS and peel tests. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 4, p. 238–247, 2011.

HOSSAIN, K.; KARAKAS, A. e HOSSAIN, Z. Effects of Aging and Rejuvenation on Surface-Free Energy Measurements and Adhesion of Asphalt Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 7, 2019.

HOU, Y.; JI, X.; LI, J. e LI, X. Adhesion between Asphalt and Recycled Concrete Aggregate and Its Impact on the Properties of Asphalt Mixture. **Materials**, v. 11, n. 12, p. 2528, 2018.

HOWSON, J.; MASAD, E.; BHASIN, A.; LITTLE, D. e LYTTON, R. Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in pH. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2554–2564, 2011.

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.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Produção Siderúrgica Brasileira**, 2019. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>>. Acessado em: 22 de dezembro de 2019 às 14:40h.

INYIM, P.; PEREYRA, J.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 128–138, 2016.

ISHAI, I. Selected aggregate properties significantly affect the behaviour of bituminous paving mixtures. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 30, n. 1, p. 77–82, 1984.

IZOTON, S.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SCHUMACHER, A. G. **Envelhecimento a Longo Prazo de Misturas Asfálticas Densas Contendo Escória de Aciaria LD em Diferentes Níveis de Expansão**. In: 33º ANPET, Balneário Camboriú-SC, 2019.

JAKARNI, F. M.; ROSLI, M. F.; YUSOFF, N. I. M.; AZIZ, M. M. A.; MUNIANDY, R.; HASSIM, S. An Overview of Moisture Damage Performance Tests on Asphalt Mixtures. **Jurnal Teknologi**, v. 2, p. 91–98, 2016.

JAMIESON, I.L.; MOULTHROP, J.S.; JONES, D.R. SHRP Results on Binder- Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping. **Asphalt Yearbook**, p 17-21 1995.

JAMSHIDI, A.; KURUMISAWA, K.; NAWA, T.; JIZE, M.; WHITE, G. Performance of pavements incorporating industrial byproducts: A state-of-the-art study. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 367–388, 2017.

JITSANIGAM, P.; BISWAS, W. K.; COMPTON, M. Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 17, p. e00071, 2018.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil**, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/267250940%0ARECICLAGEM>>. Acesso em 15 de janeiro de 2018.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 199p, 1995.

JÚNIOR, J. L. O. L. **Influência da Adesividade Agregado-ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 134p, 2018.

KAKAR, M. R.; HAMZAH, M. O.; AKHTAR, M. N.; WOODWARD, D. Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2342–2353, 2016.

KAKAR, M. R.; HAMZAH, M. O.; VALENTIN, J. A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. **Journal of Cleaner Production** v. 99, 2015.

KARKI, P. **Computational and Experimental Characterization of Bituminous Composites Based on Experimentally Determined**. Master of Science degree, University of Nebraska, 145p, 2010.

KHEDMATI, M.; ALANAZI, H.; KIM, Y.-R.; NSEGIYUMVA, G.; MOUSSAVI, S. Effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio on properties of aggregate-paste interphase in fly ash-based geopolymer mixtures through multiscale measurements. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 564–574, 2018.

KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. **Stripping in Hma Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods**. Auburn University: National Center for Asphalt Technology, 1988.

KIM, K.; JO, S. H.; KIM, N.; KIM, H. Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 1128–1136, 2018.

KIM, Y.; TEIXEIRA, J. E. S. L. **Material Selection and Design Consideration for Moisture Damage of Asphalt Pavement**. Master of Science degree, University of Nebraska, 68p, 2006.

KOHL, A.L.; NIELSEN, R. Chapter 7: Sulfur Dioxide Removal. In: **Gas Purification**. 5.ed, Houston/Texas: Gulf Publishing Company, 1997.

KONG, D.; CHEN, M.; XIE, J.; ZHAO, M.; YANG, C. Geometric Characteristics of BOF Slag Coarse Aggregate and its Influence on Asphalt Concrete. **Materials**, 12-741, 2019.

KWOK, D. Y.; NEUMANN, A. W. U. Contact angle measurement & contact angle interpretation. **Advances in Colloid and Interface Science**, 88, p.167-249, 1999.

LEE, K. H.; KOOK, M.; HA, D.; KWON, S.; LEE, M. Evaluation of Moisture Resistance of Hot-Mix Asphalt Mixture Containing Refined Air-Cooled Slag for Road Pavements. **Key Engineering Materials**, v. 773, p. 271–277, 2018.

LESUEUR, D.; PETIT, J.; RITTER, H. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures : a state-of-the-art review. **Road Materials and Pavement Design**, p. 37–41, 2012.

LING, C.; HANZ, A.; BAHIA, H. Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 391–399, 2016.

LITTLE, D. N.; BHASIN, A. Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavement. **The Academies of Sciences, Engineering and Medicine**. Report No. NCHRP RRD 316, 2007.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. a. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt**. National Lime Association, 54p, 2001.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. a; SEBAALY, P. E. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt**. National Lime Association, 80p, 2006.

LITTLE, D. N.; JONES, I. V. **Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements**. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar: California Department of Transportation; Federal Highway Administration; National Asphalt Pavement Association; California Asphalt Pavement Alliance; and Transportation Research Board, 39p, 2003.

LITTLE, D. N.; PETERSEN, J. C. Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements : Physical and Chemical Interactions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 207–218, 2005.

LIU, P.; HU, J.; WANG, D.; OESER, M.; ALBER, S.; RESSEL, W.; FALLA, G. C. Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 196–208, 2017.

LIZARAZO-MARRIAGA, J.; CLAISSE, P.; GANJIAN, E. Effect of Steel Slag and Portland Cement in the Rate of Hydration and Strength of Blast Furnace Slag Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, p. 153–160, 2011.

LOURES, R. C. B. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; SILVA, B.-H. A. e CASTRO, C. D. Pré-misturado a frio contendo escória de aciaria: Uma alternativa viável para construção de pavimentos. **Transportes**, v. 26, n. 1, p. 54–67, 2018.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.

MACEDO, T. F.; OSMARI, P. H.; LEITE, L. F. M.; SIMÃO, R. A.; ARAGÃO, F. T. S. **Procedimento Experimental para Obtenção de Propriedades Viscoelásticas do Ligante com o Uso do AFM**. 32º ANPET, Gramado-RS, 2018.

MAHARAJ, C.; WHITE, D.; MAHARAJ, R. e MORIN, C. Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface. **Cogent Engineering**, v. 4, n. 1, 2017.

MAJIDZADEH, K.; BROVOLD, F. N. **State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures**. National Research Council, Highway Research Board, Special Report n. 98, 77p, 1968.

MASAD, E. A. **Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications**. Report No. FHWA/TX-05/5-1707-01-1, 2005.

MASLEHUDDIN, M.; SHARIF, A. M.; SHAMEEM, M; IBRAHIM, M, BARRY, M. S. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 105–112, 2003.

MIKESKA, L. A. **Antistripping agents for asphalts**. United States Patent Office, n. 2,628,831 6. 1952.

MONSHI, A.; ASGARANI, M. K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1373–1377, 1999.

MORAES, R.; VELASQUEZ, R.; BAHIA, H. Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 156–170, 2017.

MORANDI, A. M.; BRASIL, G. H.; ALLOCHIO, S. B.; FELIPE, C. H.; GRILLO, F. S. **Arcelor Mittal Tubarão no Espírito Santo**. Relatório da Arcelor Mittal Tubarão, 2017.

MOREIRA, C. C. **Características e Desempenho da Escória de Alto Forno como Agregado para Utilização em Camadas Granulares de Pavimentos**. 37ª RAPv/11º ENACOR, Goiânia - GO, 2006.

MORIAN, D. A.; VAN DAM, T.; PERERA, R. **Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements**. Report No. FHWA-HIF-12-008, 2012.

MOURA, B. L. R.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; PIRES, P. J. M.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y.-R. **Avaliação da Adesividade Ligante-Escória de Alto-Forno Resfriada Ao Ar (ACBFS) e de Aciaria (LD) Usando Técnicas de Análise de Superfícies**. 33º ANPET, Balneário Camboriú-SC, 2019.

NASCIMENTO, J. F. **Estudo da Expansibilidade em Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 177p, 2003.

NASCIMENTO FILHO, V. **Técnicas Analíticas de Fluorescência de Raios-X por dispersão de eenergia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF)**, 1999.

NGUYEN, H. Q.; LU, D. X.; LE, S. D. **Investigation of using steel slag in hot mix asphalt**

for the surface course of flexible pavements. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018.

NIPPON SLAG ASSOCIATION. **Properties and effective uses of iron and steel slag**, 1992.

NOURELDIN, A. S.; MCDANIEL, R. S. Evaluation of steel slag asphalt surface mixtures. **Transportation Research Board 69th Annual Meeting, Washington, DC**, v. 152, 1990.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade Metrológica na Determinação de Espécies Químicas em Materiais Siderúrgicos por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, p. 115, 2011.

PACKHAM, D. E. **Handbook of adhesion**. John Wiley & Sons, 2 ed. Bath - UK, 2005.

PACKHAM, D. E. Surface energy, surface topography and adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 23, n. 6, p. 437–448, 2003.

PAIVA, E. N. A trajetória sociotécnica de Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro: O Engenheiro Civil do “Ensaio Brasileiro”. **Revista Ator-Rede**, 2013.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Agregados de Escória de Aciaria em Concreto Betuminoso Usinado a Quente**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 113p, 2010.

PELTONEN, P. Road aggregate choice based on silicate quality and bitumen adhesion. **Journal of Transportation Engineering**, v. 118, n. 1, p. 50–61, 1992.

PINTO, A. M. G. **Ligações Adesivas entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 172f, 2007.

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. Caracterização microestrutural da escória de aciaria. **Revista Matéria**, v. 11, n. 4, p. 442–452, 2006.

PORTO, T. R.; LUCENA, A. E. F. L.; GUERRA, T. D.; PORTO, T. M. R.; SILVA, R. L.; ZIEGLER, C. R. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Adição de Óxido de Ferro**. 32º ANPET, Gramado - RS, 2018.

PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G. Efeito da escória de siderurgia na química do solo e na absorção de nutrientes e metais pesados pela cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 59, n. 4, p. 530–536, 2012.

PROCTOR, D.; FEHLING, K.; SHAY, E.; WITTENBORN, J. L.; GREEN, J. J.; AVENT, C.; BIGHAM, R. D.; CONNOLY, M.; LEE, B.; SHEPKER, T. O.; ZAK, M. A. Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags. **Environmental Science & Technology**, v. 34. p. 1576–1582, 2000.

QUEIROZ, A.; KUROSAWA, R.; BARRETO, R. **Difração de Raios X**. Laboratório Avançado de Física Computacional. Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2013.

RAI, A.; PRABAKAR, J.; RAJU, C. B.; MORCHALLE, R. K. Metallurgical slag as a component in blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 489–494, 2002.

RELATÓRIO 2769 NANOBUSINESS. Nanobusiness Informação e Inovação. **Relatório de análise de DRX**, nº 2769 - Rev. 00, 2019.

REMISOVA, E. **Study of Mineral Filler Effect on Asphalt Mixtures Properties**. Bituminous Mixtures and Pavements VI - Proceedings of the 6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, ICONFBMP 2015, p. 49–54, 2015.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na Siderurgia**. Apostila, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 39p, 1997.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; RUGE-CÁRDENAS, J. C.; FARIAS, M. M. Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 04018364, 2019.

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of treated recycled

aggregates and its influence on concrete strength characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 611–617, 2016.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos Efeitos da Expansão de Agregados Siderúrgicos nas Características do Material e no Desempenho de Misturas Asfálticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2018.

SHELL. Chapter 9 Adhesion of bitumens. **Shell Bitumen Handbook**. London ed., p. 171–187, 2003.

SHI, C. Steel Slag — Its Production , Processing , Characteristics , and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering** , v. 16, p. 230–236, 2004.

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2006.

SILVA, R. G. O. da. **Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 151p, 2010.

SOUZA, E. B. O. **Escórias De Aciaria E Resíduos De Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 128p, 2007.

SOUZA, L. T.; KIM, Y.-R.; SOUZA, F. V.; CASTRO, L. S. Experimental Testing and Finite-Element Modeling to Evaluate the Effects of Aggregate Angularity on Bituminous Mixture Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. March, p. 249–258, 2012.

TAN, Y.; GUO, M. Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic. **Construction & Building Materials**, v. 47, p. 254–260, 2013.

TARBAY, E. W.; AZAM, A. M.; EL-BADAWY, S. M. Waste materials and by - products as mineral fillers in asphalt mixtures. **Innovative Infrastructure Solutions**, 13p, 2019.

TARRER, A. R.; YOON, H. H.; KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. e WAGH, V. P. Detection of amine-based antistripping additives in asphalt cement. **Transportation Research Record**, n. 1228, p. 128–137, 1989.

TARRER, A. R.; WAGH, V. **The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding**. Report No. SHRP-A/UWP-91-510. Washington, D. C., 1991.

TEIXEIRA, J. E. S. L.; SCHUMACHER, A. G.; PIRES, P. J. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MARTINS, H. B. Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material Properties and Asphalt Mixture Performance. **Transportation Research Record**, 2019.

TERREL, R. **Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. Globalization and Governance in the International Political Economy**. Report No. SHRP-A-403, Washington, D. C., 1994.

TUNCEL, E. Y.; PEKMEZCI, B. Y. A sustainable cold bonded lightweight PCM aggregate production: Its effects on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 199–216, 2018.

VASCONCELOS, K. L.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B. Medidas de adesão entre agregado e ligante asfáltico. **Transportes**, p. 17–24, 2008.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Utilização de Granito em Massa Cerâmica para Telhas. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 1, p. 28–32, 2004.

VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; TEIXEIRA, R. A. **Reaproveitamento do resíduo proveniente do sistema de dessulfuração de gases (FGD) como aplicação em concretos especiais avaliando características físicas e mecânicas**. Relatório Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC, 2018.

WANG, G. C. **Slag use in asphalt paving**. In: *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, 2016.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material : Volume expansion

prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, n. 1–3, p. 555–560, 2010.

WANG, M.; LIU, L. Investigation of microscale aging behavior of asphalt binders using atomic force microscopy. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 411–419, 2017.

WEI, J.; DONG, F.; LI, Y.; ZHANG, Y. Relationship analysis between surface free energy and chemical composition of asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 116–123, 2014.

WHITTAKER, C. W. **Blast furnace slag in agriculture**. National Slag Association, Austrália, 1955.

WILLIAMS, R. **The properties and uses of Kembla blast furnace slag**. National Slag Association, Austrália, 1977.

WU, S.; XUE, Y.; YE, Q.; CHEN, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. **Building and Environment**, v. 42, p. 2580–2585, 2007.

WU, M. C. M.; JIANG, Y.; SU, Q.; ROBL, T.; JEWELL, R.; BUTALIA, T. S.; ZHANG, W.; WOLFE, W. **Dry FGD by-product characteristics and utilization – International Perspective**. In: World of Coal Ash Conference, Lexington/Kentucky: University of Kentucky, 13 p, 2013.

XU, M.; YI, J.; FENG, D.; HUANG, Y.; WANG, D. Analysis of Adhesive Characteristics of Asphalt Based on Atomic Force Microscopy and Molecular Dynamics Simulation. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 8, 12393–12403, 2016.

YABING, M. M. W.; JIANG, Y.; SU, Q.; ROBI, T.; JEWELL, R.; BUTALIA, T. S.; ZHANG, W.; WOLFE, W. **Dry FGD By-Product Characteristics and Utilization - International Perspective**. Lexington/Kentucky: University of Kentucky: World of Coal Ash Conference, 2013.

YOON, H. H.; TARRER, A. R. Effect of Aggregate Properties on Stripping. **Transportation**

Research Record, p. 37–43, 1988.

ZAIDI, S. B. A.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J.; ALFAQAWI, R. M.; AHMED, I.; AHMAD, N.; HAYNES, M. Moisture susceptibility of hydrated lime modified mastics using adhesion test methods and surface free energy techniques. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2019.

ZAREMBA, T.; MOKROSZ, W.; HEHLMANN, J.; SZWALIKOWSKA, A.; STAPINSKI, G. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 93, n. 2, p. 439–443, 2008.

ZETTERMANN, L. F. **Caracterização da Escória de Aço Inoxidável com Vistas a Seu Reaproveitamento no Processo de Produção do Aço**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 81p, 2001.

ZHANG, J.; APEAGYEI, A. K.; AIREY, G. D.; GRENFELL, J. R. A. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 62, p. 45–54, 2015.

ZHOU, F. NEWCOMB, D; GURGANUS, C.; BANIHASHEMRAD, S., PARK, E. S.; SAKHAEIFAR, M.; LYTTON, R. L. Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures: An Experimental Design. **Transportation Research Board**, n. 9, 2016.

ZIARI, H.; KHABIRI, M. M. Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 15, n. 3, p. 188–192, 2007.