UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO USO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

BRUNO LEMOS FERRARI
RAFAEL COELHO SILVA

VITÓRIA – ES
2021

BRUNO LEMOS FERRARI
RAFAEL COELHO SILVA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO USO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Projeto de graduação dos alunos Bruno Lemos Ferrari e Rafael Coelho Silva, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Pilar

VITÓRIA – ES
2021

BRUNO LEMOS FERRARI
RAFAEL COELHO SILVA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO USO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

COMISSÃO EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Orientador

_____
Prof.ª Dr.ª Rudiele Aparecida Schankoski
Examinadora

_____
Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Examinadora

Vitória – ES, 18 de outubro de 2021

RESUMO

O estado do Espírito Santo é destaque nacional no setor siderúrgico. Com isso, grandes volumes de aço e de coprodutos são gerados no estado, de tal forma que a o reaproveitamento desses coprodutos são ambiental e economicamente necessários. Esta pesquisa, de caráter bibliográfico, visa mostrar e relacionar importantes trabalhos desenvolvidos pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) no que tange a utilização de coprodutos siderúrgicos em concretos, argamassas, tijolos, bases, sub-bases e revestimentos rodoviários, além de estabilização de solos. Os coprodutos siderúrgicos estudados foram: escórias de aciaria, pó de aciaria elétrica, escórias de alto forno e escória de dessulfuração KR. Diante dos resultados apontados pelos autores, a escória de aciaria teve viabilidade técnica como fíler de concretos autoadensáveis e em concretos asfálticos; o pó de aciaria elétrica como agregado miúdo para argamassas; a escória KR como estabilizante de solos; e a escória de alto forno, também, como fíler para concreto autoadensável.

Palavras-chave: escória; produção de aço; coprodutos siderúrgicos; aciaria; alto forno; escória KR.

ABSTRACT

The state of Espírito Santo is a national highlight in the steel industry. Hence, great volumes of steel and co-products are generated in the state in order that the reutilization of those co-products are environmentally and economically necessary. This research has a bibliographical character and aims to show and list important papers developed by the Federal University of Espirito Santo (UFES) regarding the use of steel co-products in concrete, mortar, bricks, basecourse, subbase and surface course in asphalt concrete, in addition to soil stabilization. The steel slags, electric-arc funace dust, blast furnace slags, and KR slag were the co-produtcs studied. In view of the results indicated by the authors, the steel slag shown technical feasiility as self-consolidating concrete's filler and in asphalt concrete; eletric-arc furnace dust as fine aggregate in mortar; KR slag as soil stabilizers; and blast furnace slag also as self-consolidating concret's filler.

Key-words: slag; steel production; steel co-products; steel mill; blast furnace; KR slag.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos ao Deus por nossas vidas e pela vida daqueles que nos ajudaram nessa caminhada.

Nossos sinceros agradecimentos ao nosso orientador, Prof. Dr. Ronaldo Pilar, por ter nos acolhido em meio à pandemia com este projeto, que nos permitiu concluir o curso de engenharia civil mesmo com tantos impedimentos. Por ter sempre nos incentivado a continuar a pesquisar e escrever e se apresentado com soluções a todas as nossas dúvidas

Agradecemos também à Prof.ª Dr.ª Rudiele Aparecida Schankoski e ao Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires por aceitarem prontamente nosso convite para compor a banca deste trabalho.

À Prof.ª Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira e à Prof.ª Ph.D. Maristela Gomes da Silva por toda sua ajuda, nos dando dicas e fornecendo materiais de pesquisa nos momentos em que precisamos.

À Universidade Federal do Espírito Santo e todos os profissionais do Departamento de Engenharia Civil, por nos fornecerem todos os meios para que nos tornássemos engenheiros, e nos possibilitou conhecer tantas boas pessoas ao longo deste percurso.

Aos nossos amigos que sempre estiveram presentes nos momentos de necessidade. E às nossas famílias por nos moldarem em quem somos e nos apoiarem durante todo o curso, não teria sido possível sem seu incentivo.

Obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo da produção do aço. 21

Figura 2: Exemplo de dessulfuração em panela de transferência 27

Figura 3: Resultados de resistividade elétrica em envelhecimento acelerado dos concretos de classe: a) C20; b) C30; e c) C40 47

Figura 4: Resultado do potencial de corrosão em envelhecimento natural para o CP-II-E-32 de classe C20 48

Figura 5: Resultado do potencial de corrosão em envelhecimento acelerado para corpos de prova com cobrimento 30 mm 49

Figura 6: Relação entre a resistência à compressão e o teor de ar incorporado 58

Figura 7: Resultados gráficos para os ensaios de Compactação, ISC e Expansão ..74

Figura 8: Módulo de resiliência para tensão confinante e desviadora de 0,10 MPa..74

Figura 9: Resultados gráficos para os ensaios de Compactação, ISC e Expansão ..75

Figura 10: Gráfico do ganho de resistência a compressão axial. 79

Figura 11: Gráficos dos ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia 81

Figura 12: Resultado gráfico do ensaio de Viga Benkelman 81

Figura 13: Gráfico de resultados do ensaio de Treliça Metálica 82

Figura 14: Comparação gráfica entre os resultados para o ensaio de Viga Benkelman 83

Figura 15: Comparação dos valores ATR para avaliação em campo e no MeDiNa..84

Figura 16: Organograma das frações de misturas asfálticas 88

Figura 17: Valores de módulo cisalhamento e ângulo de fase para frequências de 0,1 1,0 e 10Hz a 40º após envelhecimento 89

Figura 18: Resultados gráficos do ensaio de Varredura de Frequência.....90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das partes do processo siderúrgico. 22

Tabela 2: Processo de resfriamento e características das escórias. 23

Tabela 3: Valores de referência na composição química das escórias de alto forno produzidas pela ArcelorMittal Tubarão. 25

Tabela 4: Reações principais na formação da escória de aciaria. 30

Tabela 5: Intervalo de composição das escórias LD. 31

Tabela 6. Reações principais na formação da escória FEA 34

Tabela 7. Intervalo de composiçao das escórias FEA 34

Tabela 8. Intervalo de composição de PEA.....35

Tabela 9: Características físicas do PAE 36

Tabela 10: Tipos de cimentos e suas composições 37

Tabela 11: Separação dos trabalhos utilizados como base 40

Tabela 12: Traços utilizados por Bourguignon (2004) na moldagem dos corpos de prova 42

Tabela 13: Resultados de resistência à compressão: média e desvio padrão 42

Tabela 14: Resultados de caracterização mecânica e física dos concretos.....45

Tabela 15: Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação e profundidade de penetração de cloretos 46

Tabela 16: Valores de βp e Ep e água da pasta de consistência normal. 52

Tabela 17: Pastas selecionadas.....53

Tabela 18: Resultados dos ensaios em ARG100EALD.....53

Tabela 19: Resultados dos ensaios em concreto autoadensável fresco.....54

Tabela 20: Propriedades reológicas do traço GBFS 55

Tabela 21: Valores de tensão de escoamento estático e dinâmico e Viscosidade aparente dos traços.....56

Tabela 22: Resultados dos concretos autoadensáveis selecionados 57

Tabela 23: Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....58

Tabela 24: Calor de hidratação e propriedades mecânicas dos concretos 59

Tabela 25: Traços confeccionados por Coitinho (2019) 62

Tabela 26: Resultados dos ensaios no estado fresco 63

Tabela 27: Resultados dos ensaios no estado endurecido 64

Tabela 28: Caracterização dos solos estudados.....65

Tabela 29: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall, e ganhos percentuais..66

Tabela 30: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall em diferentes idades....67

Tabela 31: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall em diferentes idades, e ensaio de adensamento 68

Tabela 32: Caracterização do solo utilizado.....70

Tabela 33: Resultado das avaliações mecânicas das misturas solo-escória e da composição teórica do muro de contenção 71

Tabela 34: Caracterização dos solos estudados.....73

Tabela 35: Resultados dos ensaios de Compactação, Expansão, ISC e Módulo de resiliência 76

Tabela 36: Resultados dos ensaios de Compactação, Expansão, ISC e Módulo de resiliência 77

Tabela 37: Valores de módulo de resiliência determinados em ensaio.....79

Tabela 38: Caracterização física dos materiais.....85

Tabela 39: Resultados dos ensaios de Fratura SCB e Varredura de Tempo.....90

Tabela 40: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração e Desgaste Cântabro.....91

Tabela 41: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração, Desgaste Cântabro e Dano por Umidade Induzida 93

Tabela 42: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração, e Módulo de Resiliência.....94

Tabela 43: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração Condicionada e Não-condicionada e de Dano por Umidade Induzida em amostras com envelhecidas por diferentes métodos.....95

Tabela 44: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração e Dano por Umidade Induzida 96

Tabela 45: Composição dos traços principais.....98

Tabela 46: Resultados das análises técnicas, econômicas e ambientais 99

GLOSSÁRIO

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil

AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

ATR - Afundamento de Trilho de Roda

BGTC - Brita Graduada Tratada com Cimento

CA - Concreto Armado

CAA - Concreto Autoadensável

CADAR - Concreto Autoadensável de Alta Resistência

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Betuminosos Usinado a Quente

CEN - *European Committee for Standardization*

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP - Cimento Portland

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAFRA - Escória de Alto Forno Resfriado ao Ar

EFNARC - *European Federation of National Associations Representing for Concrete*

EGAF - Escória Granulada de Alto Forno

EMA - Escória Moída de Aciaria

EP - Precipitador Eletrostático

f/c - Fíler/cimento

FEA - Forno a Arco Elétrico

FGD - *Flue Gas Dessulfurization*

IABr - Instituto Aço Brasil

ISC - Índice de Suporte Califórnia

ISO - *International Organization for Standardization*

KR - Reator Kambara

LD - Linz-Donawitz

MAF - Matrizes de Agregado Fino

MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional

MRAF - Microrrevestimento Asfáltico a Frio

NA - Agregado Natural

NBR - Norma Brasileira

OECD - *Organisation for Economic Co-operation & Development*

PAE - Pó de Aciaria Elétrica

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RBRO - Resíduo de Rocha Ornamental

RT - Resistência à Tração

SMA - *Stone Matrix Asphalt*

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

RESUMO iv
ABSTRACT v
AGRADECIMENTOS vi
LISTA DE FIGURAS vii
LISTA DE TABELAS ix
GLOSSÁRIO xii
SUMÁRIO xv
1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Objetivo Geral 17
1.1.1 Objetivos Específicos 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1 Resíduos Sólidos 19
2.2 A Metalurgia e Siderurgia na Sociedade 20
2.3 Processo Siderúrgico 21
2.3.1 Escória de Alto Forno 24
2.3.1.1 Escória de Alto Forno Resfriada ao Ar 25
2.3.1.2 Escória Granulada de Alto Forno 26
2.3.2 Escórias de Aciaria 26
2.3.2.1 Escórias de Dessulfuração 27
2.3.2.2 Escória de Aciaria LD 29
2.3.2.3 Escória de Arco Elétrico 32
2.3.2.4 Pó de Aciaria Elétrica 35
2.4 Cimento Portland com adição de Escória de Alto-forno 36
3 METODOLOGIA 39
4 CONCRETOS E ARGAMASSAS 41
4.1 Concreto Convencional 41
4.2 Concreto Autoadensável 49
4.2.1 Caracterização dos Traços Estudados 50
4.2.2 Propriedades Do Concreto Fresco 52
4.2.3 Propriedades do Concreto Endurecido 56

4.2.4 Análise de Impactos Ambientais 59
4.3 Argamassas 61
5 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA 65
5.1 Análise de Impacto Ambiental da Estabilização Química com Escória 69
5.2 Preenchimento em Muro de Contenção com Pneus 70
6 BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS 72
6.1 Caracterização de solos estabilizados com escória para utilização em bases e sub-bases.....72
6.2 Melhoramento de BGTC com escória KR para camada de base 78
6.3 Pistas experimentais confeccionadas com base e sub-base de solos estabilizados com escória.....80
6.4 Lastro Ferroviário 84
7 REVESTIMENTO ASFÁLTICO 87
7.1.1 Fíler.....87
7.1.2 Agregado 92
7.2 Microrrevestimento asfáltico com emulsão.....96
8 TIJOLOS SOLO-CIMENTO 98
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 100
REFERÊNCIAS.....102

1 INTRODUÇÃO

Na região metropolitana de Vitória, a indústria do aço se posiciona em um panorama importantíssimo na economia local. Responsável por empregos diretos e indiretos, o setor siderúrgico aquece a economia e, mesmo em tempos pandêmicos, apresenta crescimento.

Grandes empresas como a ArcelorMittal e Vale estão presentes na grande Vitória e fazem do Espírito Santo um estado relevante para a siderurgia e mineração brasileira. A ArcelorMittal é uma multinacional que carrega o título de maior produtora de aço do mundo, e sua unidade, em Vitória, é a terceira maior produtora de aço plano laminado do Brasil. Enquanto a Vale, uma multinacional brasileira, é a maior produtora de minério de ferro e pelotas do mundo. Logo, essa larga escala de produção de aço tende a gerar, também, elevadas quantidades de coprodutos.

A reutilização de coprodutos siderúrgicos pela construção civil é incentivada, em virtude do grande consumo de materiais na construção, que são bens muitas vezes finitos e de custo elevado, e pela produção em larga escala destes resíduos; além de contribuir para uma construção civil mais sustentável. Tal cenário, instiga a comunidade cientifica capixaba a pesquisar e estudar modos de reaproveitar os coprodutos siderúrgicos, pois uma vez aproveitados esses materiais se tornam ambiental e economicamente proveitosos.

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) vem, por anos, se empenhando em desenvolver pesquisas científicas e tecnológicas sobre os mais variados coprodutos siderúrgicos em projetos de graduação, iniciações científicas, artigos e dissertações, buscando difundir e fundamentar alternativas de emprego destes coprodutos na construção civil. Por conseguinte, pesquisa, ensino e extensão sobre o tema favorecem, tanto empresas siderúrgicas e construção civil, quanto a sociedade.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal

do Espírito Santo que tenham em sua proposta o reaproveitamento e a reutilização do coproduto escória, sendo este empregado em diferentes áreas da construção civil.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Reunir em um único documento, diversos trabalhos relevantes realizados por alunos e professores da UFES, para que este sirva como um guia para aqueles que pretendem utilizar a escória em seus projetos;
- Organizar de forma prática os trabalhos, de forma que o leitor possa facilmente identificá-los tanto por tipo de escória utilizado, quanto por sua finalidade, e assim consiga ir de encontro à referência utilizada caso deseje se aprofundar no assunto;
- Analisar e comparar os resultados laboratoriais, afim de discutir a viabilidade de cada uma das propostas, e mostrar ao leitor como os trabalhos de uma mesma vertente se relacionam, e o que a soma de seus resultados implica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos Sólidos

A capacidade e a necessidade do homem em se adaptar utilizando o meio ambiente fez com que os recursos da natureza fossem alterados com o tempo. Tal alteração, impulsionada pelas revoluções industriais, e consequentemente, atrelada a intensos níveis de produção, fez com que as sociedades procurassem modos de melhorar a cadeia produtiva sem prejudicar o meio ambiente (MOURÃO, *et al.*, 2007)

No Brasil, a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) presente na lei 12.305/10, princípios, objetivos e diretrizes são determinados para a gestão de resíduos sólidos, e é determinada a responsabilidade compartilhada dos resíduos gerados para os seus agentes geradores e distribuidores (BRASIL, 2010). É também vigente a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) que classifica os resíduos sólidos de acordo com seus potenciais riscos ao meio ambiente.

Além de regulamentos, é necessário na gestão de resíduos industriais, princípios de ecologia que procurem reduzir, reutilizar e reciclar, praticando, assim, os três R's da ecologia. Na siderurgia, conforme o Instituto Aço Brasil (IABr, 2018):

- A redução é dada a partir da diminuição da quantidade de matéria-prima e energia utilizadas na produção. Na qual, em 2017, a autogeração de energia elétrica foi responsável por suprir 57% do consumo de energia das usinas (49% em termelétrica e 8% em hidrelétrica).
- A reutilização, pelo fato de o aço ser um bem durável, permite desempenhar sua função por longo período de tempo.
- A reciclagem do aço é dada por esse não apresentar perda de qualidade, sendo considerado o material mais reciclável do mundo.

Visto que, segundo o Instituto Aço Brasil (IABr, 2018), 450 kg de resíduos são gerados a cada tonelada de aço produzido, é perceptível a importância que o setor siderúrgico atribui a gestão de resíduos. Na presente pesquisa, os resíduos estudados serão as escórias oriundas da indústria siderúrgica e seu emprego na construção civil.

2.2 A Metalurgia e Siderurgia na Sociedade

A metalurgia é a ciência e conjunto de técnicas que utilizam o minério como matéria prima no que tange a extração e o processamento industrial dos metais. O ramo da metalurgia responsável pela produção de aço é denominado de siderurgia.

O aço, por sua vez, é uma liga metálica formada a partir da descarbonatação do ferro gusa. Tal liga é constituída basicamente de ferro e carbono, sendo que o carbono deve variar em sua composição de 0,008% até aproximadamente 2,11% (FERRAZ, 2003).

A produção de aço é de suma importância para outros setores da indústria, pois disponibiliza a matéria prima para desenvolvimento de suas atividades. Carros, panelas, trens, máquinas, parafusos, embalagens, estruturas metálicas e entre outros, só podem ser produzidos a partir do fornecimento de aço, que atrelado a suas propriedades como, dureza, soldabilidade, maleabilidade, tenacidade e ductilidade, fazem do aço um material de amplo emprego em diversas aplicações industriais (PINHO, 2001).

Por conta de suas propriedades, o aço, na construção civil, está sempre presente. É possível percebê-lo em vergalhões nos concretos armado, em estruturas metálicas, em treliças, em parafusos e em pregos. Além disso, sistemas de construção industrializados feitos com aço, como o *steel frame*, agiliza no processo construtivo e diminui resíduos. Outra utilização do aço na construção civil é com a sua escória que pode ser utilizada em argamassas, concretos, bases e sub-bases rodoviários e até para corretivo de acidez do solo.

Além de fornecer matéria prima para outros setores, a indústria siderúrgica é um bom indicador da economia de um país, de tal forma que a produção de aço esteja diretamente atrelada à economia. Conforme Oliveira (2014), as grandes economias do mundo foram ou ainda são grandes produtores siderúrgicos, logo, é de interesse dos países entender a dinâmica da geração e consumo deste material. No Brasil, o setor siderúrgico começou a se destacar na economia brasileira entre 1980 e 1990, quando as exportações cresceram 500%, mesmo com um consumo interno baixo.

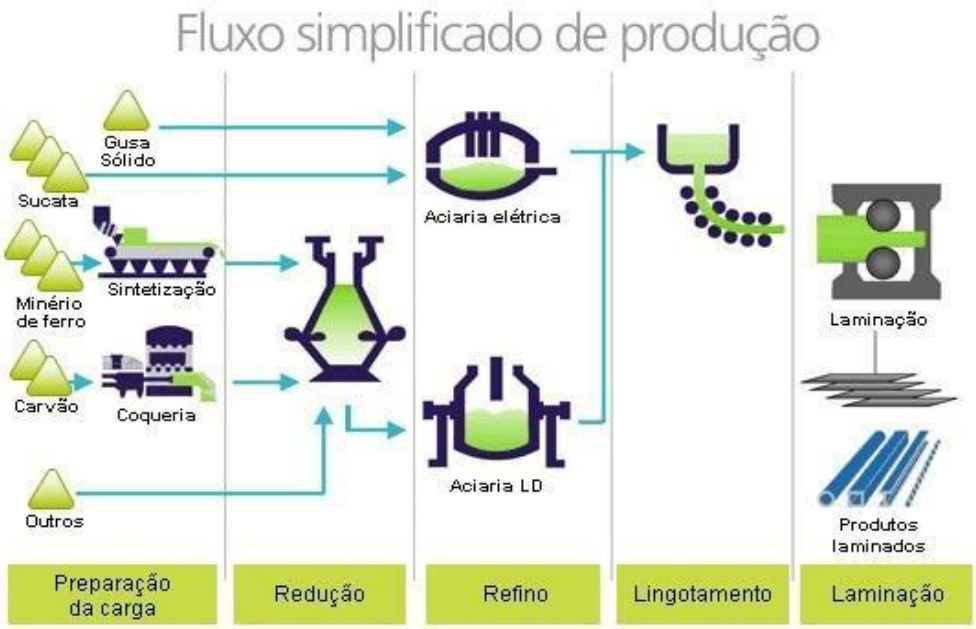
Atualmente, o Brasil ainda se caracteriza como um país exportador de aço, embora o consumo interno tenha se recuperado (OLIVEIRA e SOLLERO, 2014).

Segundo a *World Steel Association* (2020), o Brasil é o maior produtor de aço da América Latina e nono maior do mundo, com produção em 2019 de 32,2 milhões de toneladas, enquanto a China ocupa a 1ª posição no ranking. Visto isso, se tem a conjuntura da importância da atividade metalúrgica e siderúrgica no Brasil e no mundo.

2.3 Processo Siderúrgico

De acordo com Silva (2011), o processo siderúrgico consiste na redução dos seus óxidos por um meio redutor, geralmente um combustível carbonoso. Em geral, existem duas rotas para produção de aço adotadas pelas indústrias: a integrada e a semi-integrada. As usinas integradas apresentam três fases de produção: redução, refino e laminação, já as usinas semi-integradas apresentam apenas o refino e a laminação. Entre as etapas de refino e laminação, existe também o lingotamento, que permite o transporte e diferentes destinações para o aço refinado (IABr, 2018). Na Figura 1 é mostrado o fluxo simplificado de produção. Na Tabela 1 pode ser visto uma descrição detalhada dos processos.

Figura 1: Esquema representativo da produção do aço.



Fonte: https://betaeq.com.br/index.php/2019/05/03/producao-de-aco/

Tabela 1: Descrição das partes do processo siderúrgico.

Processo	Rotas	
	Integrada	Semi-integrada
Redução	O minério é levado ao alto forno que é abastecido por coque ou carvão mineral. O minério é aquecido gerando o ferro-gusa e a escória	Não ocorre
Refino	O ferro-gusa é levado a fornos a oxigênio nas aciarias, onde sofre ajuste no teor de carbono e remoção de impurezas, se tornando o aço	A carga metálica (ferro-gusa, ferro esponja e sucata) alimenta diretamente os fornos elétricos a arco para sua fusão
Lingotamento	O aço produzido vai para as lingoteiras, onde se solidifica em lingotes e é transportado para a laminação, ou vai para as máquinas de lingotamento contínuo, onde é moldado em produtos semi-acabados já para uso	
Laminação	Os lingotes são deformados mecanicamente para diminuir sua espessura e serem transformados em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação. São produzidas chapas, barras, entre outros	

Fonte: Adaptado de IABr (2018).

No processo de redução, como visto, tem-se a produção do ferro-gusa. Este, por sua vez, ocorre no chamado alto-forno, que é o equipamento de alta complexidade na siderurgia e responsável pelo processo de redução. O minério e o combustível são colocados no topo do alto forno e na descida são transformados em ferro-gusa e escória, devido ao efeito dos gases ascendentes provenientes da combustão dos combustíveis com oxigênio soprado pelas ventaneiras. Tal descida pode demorar de 6 a 8 horas (ARRIBAVENE, MACHADO e SOBRINHO, 2003; SILVA, 2011). Normalmente o ferro-gusa apresenta de 3,0 a 4,5% de carbono e um alto teor de impurezas, como o manganês, o silício, o enxofre, entre outros. Por conta disso, este material não é utilizado pela indústria sem antes ser purificado (SILVA, 2011).

Estas reações químicas de redução acontecem, pois a o minério utilizado na siderurgia é composto em grande maioria por óxidos de ferro. Após ocorrer a combustão do coque ou carvão, é gerado o gás dióxido de carbono. O carbono sólido incandescente, que advém de mais combustível sendo despejado no topo do alto-

forno, ao entrar em contato com o CO_2 se torna monóxido de carbono (CO) (SILVA, 2011).

O minério de ferro descendo por gravidade é aquecido pelos gases e entra em contato com o CO gasoso e o carbono incandescente. Neste momento, a sua fração de óxido ferroso sofre a redução até que se torne Fe puro. O ferro-gusa é tido quando o Fe puro absorve o carbono (SILVA, 2011).

Já a fração de minério que é formada por calcário, ao ser aquecida se decompõe em cal e CO_2. A cal então reage com a ganga, com uma parte de óxidos de ferro e manganês que não sofreram redução, e se transformam em escória. A ganga que é constituída de certos óxidos presentes no minério. (SILVA, 2011).

Após o processo de redução, o ferro gusa e a escória se encontram em um compartimento, denominado de cadinho, onde são depositados. Nele, o gusa, por apresentar maior densidade que a escória, se deposita na parte inferior e a escória na parte superior, logo, são separados. Depois o ferro gusa é transportado para a etapa de aciaria onde é este passa pelo processo de refino, que consiste em produzir o aço em forma de produtos semiacabados (SILVA, 2011; MOURÃO, *et al.*, 2007)

A partir do processo de produção de aço, tem-se as escórias de aciaria e de alto forno como as duas principais escórias da siderurgia. Na Tabela 2 é apresentado os tipos de resfriamento que as escórias sofrem e, consequentemente, suas características e propriedades.

Tabela 2: Processo de resfriamento e características das escórias.

Processo de resfriamento	Tipo de Escória	Características	
		Aciaria	Alto-Forno
Brusco com jato d'agua de alta pressão e imersão em tanque com água	Granulada	Textura áspera; Estrutura porosa; Granulometria semelhante aos das areias de rio	Densidade; Elevada porosidade; Fácil fragmentação; Endurece na presença de água.
Lento, naturalmente ao ar	Inerte	Agregado na construção civil; Granulometrias diferentes; Elevada massa específica; Estrutura cristalina; Elevada resistência mecânica	Óxidos se cristalizam; Textura superficial rugosa; Estrutura vesicular (grande número de cavidades).

Fonte: MARCHEZINI (2018)

2.3.1 Escória de Alto Forno

A escória de alto forno é um resíduo gerado na produção do ferro gusa em alto forno. Estima-se que a produção de escória de alto forno seja de 200 a 300 kg por tonelada de gusa. Ao término da produção do ferro gusa, a escória em forma de um líquido viscoso sai com temperatura entre 1350°C e 1500°C do alto forno. Tal temperatura confere a escória uma energia térmica de 1700 kJ/kg (JOHN e AGOPYAN, 2003; MOURÃO, *et al.*, 2007).

Uma propriedade física, de alta importância, que deve ser mencionada é a viscosidade da escória. A composição química e a temperatura também são importantes para viscosidade, onde uma análise na relação entre os teores de CaO + MgO/SiO_2 + AL_2O_3 deve minuciosamente ser feita (ALMEIDA, 2014; SILVA, 2011).

Silva (2011) acrescenta que a cal (CaO) é importante para a remoção do enxofre (ação dessulfurante), porém com altos teores de cal a escória se torna muito básica apresentando menos fluidez e mais viscosa, logo, uma boa dosagem entre cal e enxofre deve ser feita, para evitar problemas de escoamento. A relação de teores destes elementos indica que quando a relação for maior que 1 é considerada básica enquanto menor que 1, é ácida.

Uma escória muito viscosa e com baixa fluidez tende a dificultar a operação do alto-forno, pois pode se agarrar ao revestimento e, ocasionalmente, colar-se ao coque na rampa, ocasionando lentidão no escoamento. Isso prejudica a cadeia produtiva do aço e o resfriamento apropriado da escória (SILVA, 2011).

Para resfriar o material são empregados dois métodos de resfriamento que, consequentemente, geram dois subprodutos da escória, denominadas de escória de alto forno resfriada ao ar (EAFRA) e escória granulada de alto forno (EGAF).

A composição química entre EGAF e EAFRA são iguais diferenciando apenas na estrutura de seus grãos. Como exemplo, a Tabela 3 mostra a composição química (os valores podem ser alterados a depender da matéria prima e do tipo de gusa fabricado) das escórias de alto forno produzidas pela ArcelorMittal:

Tabela 3: Valores de referência na composição química das escórias de alto forno produzidas pela ArcelorMittal Tubarão.

Composição química Escória de Alto-Forno ArcelorMittal Tubarão (Valores de referência)	
FeO	0,45%
SiO_2	33,65%
Al_2O_3	12,42%
CaO	41,60%
MgO	7,95%
TiO	0,73%

Fonte: ArcelorMittal Brasil (acesso em 2 de outubro de 2020).

A escória de alto forno é bastante usada na construção civil. Atualmente, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) em cimento Portland, corresponde entre 35% e 75% da composição de um CP-III e entre 6% e 34% da composição de CP II-E.

2.3.1.1 Escória de Alto Forno Resfriada ao Ar

A escória de alto forno resfriada ao ar (EAFRA) ou escória bruta de alto forno, consiste em uma escória de resfriamento lento, em que o material perde sua energia térmica para a atmosfera e acontece a cristalização do líquido.

As propriedades físicas da EAFRA são determinadas a partir do seu modo de resfriar. Tal tipo de escória apresenta um formato anguloso, natureza vesicular e áspera, o que garante maior superfície especifica em relação aos outros agregados mais lisos. Sua cor geralmente varia de cinza claro a um cinza escuro (ALMEIDA, 2014; MORIAN, VAM DAM e PERERA, 2012).

A escória de alto forno resfriada ao ar é um material inerte, diferentemente da escória granulada de alto forno. Tal propriedade é apresentada, pois ao se cristalizar, os óxidos perdem energia interna ou calor latente, comprometendo, consequentemente, as suas propriedades aglomerantes. Além disso apresenta dureza e resistência à abrasão que são satisfatórios em diversas utilizações (ALMEIDA, 2014). Suas propriedades explicam a sua larga utilização na substituição de agregados naturais na construção civil como um agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas (JOHN e AGOPYAN, 2003).

2.3.1.2 Escória Granulada de Alto Forno

John e Agopyan (2000) explicam que a escória de alto forno pode ser resfriada de forma abrupta, quando esta, em queda livre entra em contato com jatos d'água a uma pressão de 0,6 MPa. São necessárias 8 toneladas de água para resfriar 1 tonelada de escória, o que gera uma queda instantânea de temperatura de 1500°C para menos de 100°C (ALDASORO, 1985; JOHN; CINCOTTO; SILVA, 1998 *apud* SILVA, 2005. p. 24).

Tal choque térmico, causado entre os materiais impede que a escória forme um arranjo cristalino produzindo um material vítreo (amorfo) de silicatos de Ca-Mg-Al e de distribuição granulométrica similar à de uma areia natural com densidade aparente próxima de 1,0 g/cm³ e, aproximadamente, 0,2 mm de diâmetro. Outras características a serem destacadas é o seu formato anguloso, textura superficial áspera e coloração esbranquiçada, acinzentada, amarelada ou acastanhada (DA SILVA, 2005; PIMENTEL, *et al.*, 2019)

Quanto mais rápido for o resfriamento, maior será o grau de vitrificação e, também, maiores potencialidades hidráulicas da escória. Tal hidraulicidade é necessária para produzir, por ativação ou combinação, com a cal liberada pela hidratação do clínquer, produtos aglomerantes. Isso implica em grande utilização da escória granulada de alto forno para a produção de cimento Portland (DA SILVA, 2005).

2.3.2 Escórias de Aciaria

A aciaria é o setor de uma siderúrgica responsável pela fabricação do aço em forma de produtos semiacabados. Esta unidade pode ser dividida em dois processos diferentes, sendo o primeiro a Aciaria LD, que utiliza um equipamento chamado Conversor LD, o qual é o método de fabricação do aço mais difundida mundialmente. Já o segundo método, utiliza um forno elétrico e pode ser denominado de Aciaria de Arco Elétrico. Há também as escórias provenientes da etapa de dessulfuração, que mesmo não sendo produzida em conversores LD ou elétrico, são consideradas coprodutos da etapa de refino.

2.3.2.1 Escórias de Dessulfuração

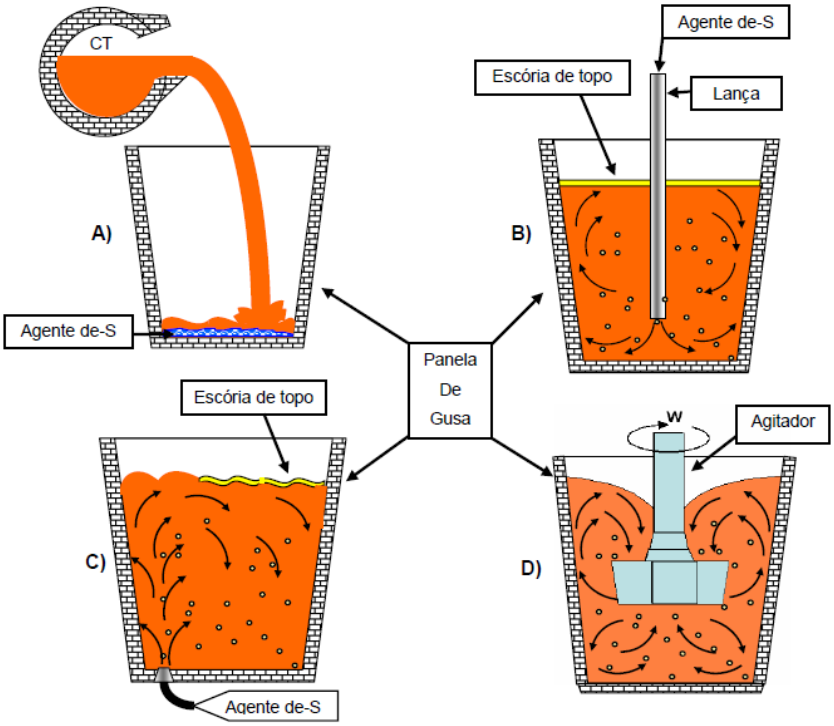
Após o processo de redução, o ferro gusa proveniente do alto forno apresenta altos teores de enxofre, que na grande maioria das vezes é indesejado nas ligas de aço, pois diminui a ductibilidade, resistência à fadiga e tenacidade. O enxofre presente no gusa pode ser proveniente do uso de minérios contaminados de Sulfeto de Ferro I e II (FeS, FeS_2) e Sulfeto de Manganês (MnS) dos carvões ou por práticas operacionais que acarreta um interior mais oxidante nos altos-fornos (KIRMSE, 2006; PINHO, 2018)

Técnicas de dessulfuração são indispensáveis para o controle do teor de enxofre. Para tanto, os mais comuns procedimentos são da dessulfuração pelo carro-torpedo ou por panelas de transferências (LEMOS, *et al.*, 2011).

Como visto em Kirmse (2006), os diferentes métodos na utilização das panelas de transferências são:

a) Dessulfuração pelo derramamento de gusa do carro-torpedo para a panela. Sendo o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e calcário os agentes dessulfurantes misturados, conforme mostrado na Figura 2 a.
b) Dessulfuração com injeção pneumática para misturar os agentes dessulfurantes ao gusa, conforme mostrado na Figura 2 b.
c) Dessulfuração com agentes dessulfurantes sendo misturados por campos magnéticos ou por agitação via injeção de gás no fundo ou lateral da panela, conforme mostrado na Figura 2 c.
d) Dessulfuração por agitação mecânica (reator kambara). Neste método, uma pá rotativa é responsável por misturar o material dessulfurante e o gusa, conforme mostrado na Figura 2 d.

Figura 2: Exemplo de dessulfuração em panela de transferência



Fonte: KIRMSE, 2006

O reator kambara, também conhecido por reator KR, é um reator que promove grandes taxas de dessulfuração a partir da agitação mecânica. O elemento do reator KR responsável pela agitação, denominado impeller, gira (em velocidade angular média entre 100-120rpm) enquanto é submerso no gusa e o mistura com o óxido de cálcio (CaO) que age como material dessulfurante (CHO e CHOI, 2016; PINHO, 2018; SCHRAMA, VAN HATTUM e VAN DEN BERG, 2015).

Sobre o reator kambara, Cho e Choi (2016) afirmam ainda que o sulfuro presente no ferro gusa reage com o óxido de cálcio e se transformam em CaS. O composto de CaS e o CaO que não sofreu reação, emergem para a superfície do ferro gusa, dado sua baixa densidade, e isso forma a escória. Tal escória é denominada de escória KR. Depois de separada do ferro gusa que parte para o processo de refino na aciaria, a escória passa por uma etapa de resfriamento rápido com jatos de água.

A escoria KR é composta entre 40 a 60% CaO e uma grande quantidade de ferro. Graças a isso, é interessante para a indústria siderúrgica remover o ferro presente na escória por meio de processos de esmagamento e separação magnética, para que o mesmo seja reciclado como minério de ferro. Já a escória remanescente,

sem a presença de ferro, apresenta grãos (de 2mm ou menos) em forma granular. (CHO e CHOI, 2016; TONG, *et al.*, 2016).

2.3.2.2 Escória de Aciaria LD

O conversor a oxigênio, ou conversor LD, é um processo que consiste na injeção de oxigênio gasoso a alta velocidade que é capaz de transformar ferro gusa e sucata em aço. Tal conversor tem geometria em forma cilíndrica que consegue girar em torno de um eixo horizontal movido por uma série de motores. Apresenta, também, uma base côncava e o topo em forma cônica que se estreita até a boca do recipiente. A sigla LD provém do nome das cidades austríacas, Linz e Donawitz, onde o processo foi descoberto (POLESE, *et al.*, 2006; SILVA, 2011).

Antes do transporte ao Conversor LD, o gusa produzido no alto-forno sofre tratamentos de dessulfuração, desfosforação e dessiliciação, que reduzem a presença de enxofre, fósforo e silício, respectivamente, com o intuito de facilitar o refinamento do ferro em aço além de melhorar sua qualidade (MOURÃO *et al*., 2007). O gusa sólido e a sucata são então transportados por um sistema de calhas para os conversores, e em seguida tem-se a adição do gusa líquido, transportado pelo carro torpedo, em que pode ocorrer também a dessulfuração, com o intuito de impedir ao máximo a perda de calor do material. Após o carregamento, o conversor assume a posição vertical a fim de receber em sua abertura um equipamento chamado lança de oxigênio.

A lança de oxigênio é constituída por três tubos concêntricos de aço que terminam em um bocal de cobre, de onde o oxigênio flui. Sua ponta possui de 3 a 5 dutos em forma de Venturi (dutos que reduzem gradativamente seu diâmetro, fazendo com que fluídos diminuam suas pressões, consequentemente aumentando suas velocidades), para que o oxigênio atinja velocidades supersônicas. O equipamento possui também uma coifa que coleta o gás e a água, instalada na boca do conversor. Após a instalação do equipamento na altura predeterminada, começa o processo de sopro juntamente com a adição dos fundentes (SILVA, 2011).

O oxigênio com 99,5% de pureza é injetado por aproximadamente 17 minutos e meio e é nesse período que ocorre a adição gradual de cal, fluorita e cal dolomítica, que atuam na formação da escória. A cal é adicionada no início do sopro e é responsável pela neutralização dos óxidos formados nas reações de oxidação, que são imprescindíveis no refino do aço, evitando a reação com o revestimento do conversor e garantindo a basicidade da escória. A fluorita garante uma redução no ponto de fusão da escória e aumenta sua viscosidade, facilitando também a impregnação da cal. Por fim, a cal dolomítica reduz o consumo de refratário e aumenta a dissolução da cal (SILVA, 2011).

Como a escória flutua sobre o aço líquido, a separação é feita no processo de vazamento. Nesta etapa, o conversor assume a posição horizontal e o aço líquido, que se encontra no fundo, flui por um orifício lateral para uma panela de aço enquanto a escória é retida por um dispositivo chamado de dardo. Após o vazamento, o conversor é rotacionado para o lado oposto, onde despeja a escória formada pelo seu bocal, e então volta à posição vertical para iniciar o próximo ciclo. Tendo cumprido seu papel no refinamento do aço, a escória é descartada no pote de escória, pois possui valor comercial quase nulo (MOURÃO, *et al.*, 2007).

As escórias de aciaria são classificadas de acordo com o método utilizado no processo de aciaria da produção do aço. As escórias provenientes do conversor Linz-Donawitz, são as chamadas escórias de aciaria LD (BALTAZAR, 2001). As reações que ocorrem na escória LD podem ser analisadas na Tabela 4.

Tabela 4: Reações principais na formação da escória de aciaria.

Escória LD	
Injeção de oxigênio	$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$
Reações com FeO devido à afinidade	$2FeO + Si \rightarrow SiO_2 + 2Fe$
	$FeO + Mn \rightarrow MnO + Fe$
Formação da escória (adição de cal e fundentes)	$2FeO + SiO_2 \rightarrow 2FeO.SiO_2$
	$CaO + SiO_2 \rightarrow CaO.SiO_2$
	$MnO + SiO_2 \rightarrow MnO.SiO_2$

Fonte: adaptado de Silva (2011) e Arribavene, *et al.* (2003)

Baltazar (2011) acrescenta que, as composições químicas das escórias de aciaria variam de acordo com o tipo de aço fabricado, da matéria prima utilizada, do

tipo de forno e das práticas de funcionamento. As escórias LD são formadas principalmente por ferro, silício e cálcio. As composições gerais da escórias LD formadas podem ser resumidas pela Tabela 5.

Tabela 5: Intervalo de composição das escórias LD.

Composição	Escória (% massa)
	LD
CaO	36-46
MgO	5-12
SiO_2	11-16
AL_2O_3	1-4
FeO	14-22
S	0,1-0,3
P_2O_5	1-2,5
Basicidade	>3

Fonte: Borges, 2020

As escórias de aciaria, se comparadas com as escórias de alto forno, contém mais ferro em sua composição. Essas partículas de aço e ou ferro metálico contribuem, em proporções menores, para a instabilidade volumétrica, sendo este um grande empecilho na utilização das escórias de aciaria (BURGOS *et al.*, 1999 *apud* ROHDE, 2012, p. 11).

A expansibilidade encontrada nas escórias de aciaria é explicada, na maioria das vezes, por seus compostos volumetricamente instáveis (CaO e o MgO). Reações expansivas ocorrem em tais compostos que causam tensões internas capazes de gerarem trincas, sendo este, um problema corriqueiro em pavimentações que utilizam as escórias de aciaria como agregado (RODRIGUES, 2007).

2.3.2.3 Escória de Arco Elétrico

A produção de aço através da aciaria elétrica foi implementada na década de 1940 e logo se tornou popular, perdendo espaço após a chegada dos conversores, que possibilitou a substituição da sucata de aço, que é a matéria prima utilizada neste tipo de produção, por ferro-gusa e ferro diretamente reduzido (MOURÃO, *et al.*, 2007). Silva (2007) apresenta três variações para os tipos de fornos elétricos que podem ser utilizados na metalurgia, sendo estes:

- Forno à indução: O calor para fundir o material é gerado através da indução por campo magnético, em consequência da passagem de corrente elétrica em uma bobina.
- Forno de resistência: Neste, a corrente elétrica é aplicada à uma resistência, que aquece devido ao efeito joule, que transforma a energia elétrica em térmica. Este é utilizado apenas em sinterização de pós, tratamentos térmicos e fusão de materiais não-ferrosos
- Forno a arco elétrico (FEA): Podendo ser a arco indireto ou direto, em que ambos ocorrem a formação de um arco elétrico para geração de calor. No forno a arco indireto, o arco elétrico é formado entre dois eletrodos

O forno mais utilizado devido a sua capacidade de abastecimento, menor emissão de CO2 e maior economia, inclusive sendo empregado pela aciaria da ArcelorMittal, é o Forno a Arco Elétrico Direto, e o processo de produção do aço neste método começa desde a preparação da carga a ser recebida. Estocada em pátios, a sucata deve ser previamente separada de acordo com sua composição, quanto maior for a variedade de aços a serem produzidos, mais será diversificada a sucata. Esta sucata também deve ser disposta no interior dos fornos de forma a garantir o menor tempo de fusão possível, assim como a formação rápida de um banho líquido que cubra a soleira, protegendo-a dos arcos. Também deve-se evitar pedaços de sucata que possam danificar os eletrodos, assim como a presença de qualquer corpo não condutor que possa entrar em contato com os eletrodos e eliminar o arco elétrico (SILVA, 2011).

O FEA apresenta em sua estrutura uma carcaça de forma cilíndrica com o fundo abaulado, que apresenta duas aberturas, uma para vazamento do aço líquido e a porta

de escória que, como o nome já diz, é por onde é despejada a escória, mas também serve para adições de matérias primas, verificação de temperatura, entre outros. O fechamento se dá pela abóbada que pode ser de tijolos refratários ou, para fornos mais potentes, de painéis refrigerados, e esta é aberta para que seja feito o carregamento da sucata no forno. Os eletrodos são levantados e a abóbada é retirada e para que então a sucata seja carregada pela abertura, começando pelos pedaços menores e mais leves para que estes amorteçam os impactos dos pedaços maiores à soleira, e por fim, deve ser colocada mais uma camada de sucata leve por cima, para que esta facilite a abertura do arco voltaico. Após ser concluído o carregamento, a abóbada é recolocada e as portas do forno são seladas, por fim, os eletrodos, que são inseridos verticalmente no forno através de aberturas na abóbada, são abaixados até tocarem a superfície das camadas de sucata (MOURÃO, *et al.*, 2007; SILVA, 2011).

Os eletrodos são alimentados por um transformador exterior ao forno, para que sejam formados os arcos voltaicos responsáveis pela fusão da sucata. Estes eletrodos feitos de grafita podem ter sua altura regulada de acordo com o processo, que, devido à instabilidade dos arcos primários e secundários, podem fazer com que o arco primário, aquele formado entre a sucata e o eletrodo, varie em comprimento decorrente das variações de corrente durante a fusão do material. Os eletrodos vão descendo gradualmente durante o processo de fusão até quase tocarem a soleira do forno, e antes da fusão completa da sucata, a voltagem é reduzida e são jogadas algumas pás de cal sobre a substância para a proteção da abóbada (MOURÃO, *et al.*, 2007).

A fusão se dá por terminada após a mistura presente no forno estar totalmente horizontal e são retiradas amostras para determinação de carbono, então se inicia a fase de refino oxidante. Este refino é feito através da introdução de minério de ferro, carepa de laminação e soprando oxigênio, que é responsável pela oxidação dos materiais indesejados como o fósforo, os transformando em escória. Esta escória é então retirada por escoamento, inclinando-se o forno, ou utilizando-se raspadores (SILVA, 2011).

A etapa seguinte é o refino redutor, responsável por desoxidar todos os óxidos formados no processo anterior, que não formaram a escória oxidante retirada. Este processo é conseguido através da adição de cal e carburante na mistura que, em conjunto com a alta temperatura, reagem entre si formando carbureto de cálcio, responsável pela desoxidação do óxido de ferro. Após este processo, o aço ainda não possui a composição necessária, portanto é comum uma nova adição de carbono e manganês que possam ter sido consumidos nesta etapa. A escória redutora é retirada assim como a oxidante, então o aço passa pelo processo de vazamento, onde é encaminhado ao lingotamento (SILVA, 2011).

As escórias de forno de arco elétrico, ou escórias FEA, são coprodutos provenientes dos arcos elétricos (BALTAZAR, 2001). As reações que ocorrem em cada processo podem ser analisadas na Tabela 6.

Tabela 6. Reações principais na formação da escória FEA

Escória FEA	
Injeção de oxigênio	$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$
Reações com FeO devido à afinidade	$2FeO + Si \rightarrow SiO_2 + 2Fe$
	$FeO + Mn \rightarrow MnO + Fe$
Formação das escórias oxidantes	$2FeO + SiO_2 \rightarrow 2FeO.SiO_2$
	$2MnO + SiO_2 \rightarrow 2MnO.SiO_2$
Formação de escórias redutoras (adição de cal e carbureto)	$CaO + 3C \rightarrow CaC_2 + CO$
	$FeO + CaC_2 \rightarrow Fe + CaO + CO$
	$CaO + SiO_2 \rightarrow CaO.SiO_2$

Fonte Fonte: adaptado de Silva (2011) e Arribavene, *et al.* (2003)

As escórias FEA apresentam uma composição mais homogênea que as escórias LD e menos expansibilidade, isto graças à menor quantidade de cal livre (BALTAZAR, 2011). As composições gerais da escórias FEA formadas podem ser resumidas pela Tabela 7.

Tabela 7. Intervalo de composiçao das escórias FEA

Composição	Escória (% massa)
	FEA
CaO	28-50

MgO	4-17
SiO_2	8-25
AL_2O_3	2-13
FeO	10-28
S	0,1-0,3
P_2O_5	0,2-0,7
Basicidade	~3

Fonte: Borges, 2020

2.3.2.4 Pó de Aciaria Elétrica

O pó de aciaria elétrica (PAE) é um resíduo sólido oriundo da formação do aço nos fornos de aciaria elétrica. Tal material é produzido a partir de uma série de fenômenos como: volatização dos metais não ferrosos; ejeção de gotas de aço líquido e de escória causadas pela expansão de bolhas de monóxido de carbono (CO); atomização; e arraste de materiais adicionados ao forno (RAMOS, 2013; VARGAS, MASUERO e VILELA, 2004)

O PAE apresenta em sua composição diferentes óxidos metálicos proveniente aos tipos de sucata e à composição do aço fabricado, como zinco (Zn), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cromo (Cr) e entre outros. Todavia, não somente a matéria prima (natureza e quantidade de sucata) é importante para descrever a composição do PAE. Variáveis como ciclo operacional e o forno também contribuem neste quesito. Graças a sua composição, o PAE é classificado como um resíduo sólido perigoso (não inerte) (VARGAS, MASUERO e VILELA, 2004). A composição do PEA é vista na Tabela 8.

Tabela 8. Intervalo de composição de PEA

Composição	Escória (% massa)	
	Pó de Aciaria Elétrica (aço carbono)	Pó de Aciaria Elétrica (aço inoxidável)
Fe (total)	25-47	22-36
Zn	11-27	1,8-6,2
Pb	1,0-3,8	0,2-0,8
Cd	0,03-0,15	0,006-1,790

Ni	<0,6	2-10
Cr	<0,1	0,2-3,3
Mo	<0,1	0,4-1,5
Mn	2,4-4,6	2,4-4,6
Mg	0,8-2,9	1,7-4,7
Ca	1,8-10,0	1,8-7,0
Si	1,3-2,5	1,4-4,8
Cl	0,5-2,5	0,5-1,2
K	<1,1	0,8-5,0
Na	0,3-2,3	0,5-4,6

Fonte: Lobatto, *et al*. (2014)

No que tange a propriedades físicas, o PAE se destaca pela granulometria de partícula, a área superficial específica, a densidade e a umidade. Os intervalos e desvantagens de cada propriedade são vistos na Tabela 9.

Tabela 9: Características físicas do PAE

Características	Intervalos normalmente relatados	Desvantagens
Granulometria	Menor que 10µm, em que a aglomeração ocorre em grande extensão;	Após a lixiviação, apresenta dificuldade na separação sólido/líquido.
Densidade Aparente	3,50 g/cm³ — 4,74 g/cm³	Volume considerável quando se visa o descarte ou armazenamento. Difícil de ser reintroduzido no processo de produção sem aglomeração ou técnicas de injeção.
Área Superficial Específica	0,40 m²/g — 5,60 m²/g medida pelo método BET.	Devido à área superficial relativamente alta, há necessidade de grande quantidade de reagente, no caso de processo hidrometalúrgico.
Umidade	0,1% — 0,3% de umidade para sistemas de captação a seco.	Pós úmidos apresentam aglomeração e pós secos ficam em suspensão, sendo difícil sua retirada de depósitos.

Fonte: adaptado de Ramos (2013)

2.4 Cimento Portland com adição de Escória de Alto-forno

O cimento Portland é definido pela NBR 16697 (ABNT, 2018) como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e

adições minerais em teores pré-estabelecidos. O clínquer é obtido por meio da queima de uma mistura, em determinadas proporções, de pedra calcária britada e argila moída. O clínquer moído, na forma de um pó tem como característica principal, ao entrar em contato com a água, reagir formando uma pasta que em seguida endurece, adquirindo resistência mecânica e durabilidade frente a ambientes diversos (ABCP, 2002).

As adições minerais são matérias-primas que podem ser adicionadas ao clínquer moído na fabricação do cimento Portland, sendo que cada tipo de adição mineral influi de forma distinta na produção do cimento e nas propriedades químicas, físicas e mecânicas das argamassas e concretos com ele produzido. Normalmente, os materiais que compõem as adições minerais são as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

Para a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis, conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Tipos de cimentos e suas composições

Designação	Sigla	Classe de Resistência	Limites de composição (em % de massa)			
			Clínquer + Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
Comum	CP I	25, 32 ou 40	95 – 100	0 - 5	Comum	CP I
	CP I-S	25, 32 ou 40	90 – 94	0	0	6 – 10
Composto	CP II-E	25, 32 ou 40	51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
	CP II-Z	25, 32 ou 40	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
	CP II-F	25, 32 ou 40	75 – 89	0	0	11 – 25
Alto-forno	CP III	25, 32 ou 40	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV	25, 32 ou 40	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial	CP V	ARI	90 – 100	0	0	0 – 10
Branco estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75 – 100	-	-	0 – 25
Branco não-estrutural		-	50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697 (2018).

A ArcellorMittal Tubarão define que, atualmente, a maior fração de sua geração de resíduos é de Escória Granulada de Alto-Forno, e, mesmo com todas as aplicações possíveis para este coproduto sendo pesquisadas e introduzidas na construção civil, grande parte desta escória vai para o mercado da fabricação de cimentos Portland dos tipos CP II-E e CP III.

A classe CP II é dividida em três tipos de cimento, o CP II-E possui adição de escória de alto-forno, o CP II-Z possui adição de materiais pozolânicos e o CP II-F possui a adição de fíler calcário. Nota-se que os CP II-Z e CP II-E também podem possuir adição de fíler, porém no CP II-F este é a única adição presente e obrigatória para sua classificação (BATTAGIN, 2011). Os cimentos Portland compostos dominaram o mercado em substituição ao cimento Portland comum, chegando a representar 75% da produção industrial de cimento no Brasil no início desse século (ABCP, 2002).

O CP III, também chamado de cimento Portland de alto-forno, possui composição igual ao CP II-E, porém, com uma porcentagem mais elevada da escória, incorporando mais as características desse material. Já o CP IV, ou cimento Portland pozolânico, é semelhante ao CP II-Z, assim também com porcentagens de materiais pozolânicos maiores.

A presença da escória tem influência direta nas propriedades do concreto, aumentando sua proteção à ação de sulfatos e reação álcali-agregado, diminuindo o calor de hidratação e aumentando a trabalhabilidade e resistência à compressão em idades avançadas. Porém, as reações de hidratação desta escória são lentas, o que pode retardar o ganho de resistência inicial em comparação aos cimentos tradicionais, porém, acima dos limites previstos na ABNT (ABCP, 2002).

3 METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho foi a pesquisa e seleção dos materiais a serem considerados, que ocorreu nos meses de julho e agosto de 2021. Para isso, se utilizou de métodos de pesquisa on-line, utilizando as ferramentas Google Acadêmico, Currículo Lattes de pesquisadores, Repositório Institucional da UFES (riUfes) e o site oficial do Departamento de Engenharia da UFES (civil.ufes.br), assim como entrando em contato direto com professores e pesquisadores

A fase de pesquisa dos trabalhos que serviram de base para este trabalho foi realizada partindo da produção científica dos professores que compõem atualmente o Departamento de Engenharia Civil da UFES, verificando-se todos os trabalhos orientados por eles enquanto docentes da UFES. Após selecionar os trabalhos que se encaixam no escopo desejado, foi realizada sua divisão em dois níveis, sendo o primeiro nível a forma como o coproduto foi incorporado, podendo este ser em concretos, argamassas, pavimentos, solos ou tijolos. O segundo nível corresponde ao tipo de escória, assim como visto nos itens 2.3.1 ao 2.3.3. A separação dos trabalhos pode ser observada na Tabela 11, que serve de base também para a estrutura deste trabalho.

Tabela 11: Separação dos trabalhos utilizados como base

Incorporação em	Tipo de escória	Trabalhos
Concretos	EAF	Avelar (2008); Bourguignon (2004); Coelho (2016); Matos, *et* al. (2020); Mello (2015); Moraes (2008);
	EAFRA	Matos, *et al.* (2020); Oliveira e Medina (2019);
	PEA	Coitinho (2019)
	LD	Avelar (2008);
Estabilização Química de Solos de Baixa Consistência	EAF	Da Cunha (2020);
	KR	Da Cunha (2020); Moratti e Scotá (2016); Ramos (2018); Tessari e Cobe (2015);
	LD	Da Cunha (2020); Pimenta (2019);
Bases e Sub-bases de Pavimentos	KR	Andrade (2018); Oliveira e Daniel (2018); Nepomuceno (2019); Oliveira (2018); Furieri (2019)
	LD	Azeredo (2018); Canal, *et al.* (2020); Oliveira (2006);
	FEA	Canal, *et al.* (2020);
Revestimento Asfáltico	EAF	Costa (2020); Do Nascimento (2020);
	EAFRA	Moura (2020);
	LD	Azeredo (2018); Costa (2020); Do Nascimento (2020); Izoton (2020); Moura (2020); Schumacher (2018);
	FEA	Cosme (2015); Fonseca (2016); Gottardi (2015);
Tijolos Solo-Cimento	EAF	Da Silva (2005); Souza Filho (2005);
	EAFRA	Souza Filho (2005)

Fonte: Autores

4 CONCRETOS E ARGAMASSAS

Nesta primeira etapa foram analisados os trabalhos que estudaram a adição das escórias no processo de fabricação de diferentes tipos de concreto e argamassas, podendo esta adição ser como fíler ou em substituição ao cimento ou ao agregado natural. Também foram realizados estudos de desempenho em concretos convencionais que utilizam os cimentos Portland com escória de alto-forno, CP II-E e CP III.

4.1 Concreto Convencional

Bourguignon (2004) analisou em seu estudo a influência causada pela carbonatação, natural e acelerada, na resistência a compressão dos concretos de classe C20, C30, C35 e C40. Os materiais utilizados foram:

- Cimento CP II E-32 como aglomerante que possui teor de 30% de escória granulada de alto forno como substituição ao clínquer.
- Cimento CP III 32-RS como aglomerante que possui teor de 66% de escória granulada de alto forno como substituição ao clínquer.
- Dosagem de 50% de escória granulada de alto forno moída e 50% de cimento CP III-32-RS como aglomerante, totalizando 83% de escória em massa (50% de escória como aglomerante + 33% de escória no cimento CP III-32-RS).

Inicialmente, o autor analisa a dosagem adequada de argamassa. Tal cautela com o teor adequado de argamassa, é explicada por Bourguignon (2004), pois a falta dessa leva o concreto a ser mais poroso e o excesso, aumenta o risco de fissuração por diferenciais térmicos ou por retração na secagem.

Após a definição do teor de argamassa, são traçados os diagramas de dosagem, cuja curvas auxiliaram a encontrar a dosagem para as classes de concreto C20, C30, C35 e C40. Na Tabela 12, são apresentados os proporcionamentos utilizados por Bourguignon (2004) para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão NBR 5738 (ABNT,1987), atual NBR 5738 (ABNT,2016), e da profundidade de carbonatação.

Tabela 12: Traços utilizados por Bourguignon (2004) na moldagem dos corpos de prova

Concreto	Material cimentante	Traço (materiais cimentícios: areia média: brita 0: brita 1: relação água/materiais cimentícios)
C20CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 2,99: 1,63: 1,63: 0,6328
C20CPIII	Cimento CPIII – 32 – RS	1: 3,57: 1,87: 1,87: 0,7504
C20CPIII+e	Cimento CPIII – 32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 3,07: 1,66: 1,66: 0,6307
C30CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 2,10: 1,27: 1,27: 0,4961
C30CPIII	Cimento CPIII– 32 – RS	1: 2,88: 1,59: 1,59: 0,6196
C30CPIII+e	Cimento CPIII – 32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 2,14: 1,28: 1,28: 0,4951
C35CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 1,74: 1,12: 1,12: 0,4412
C35CPIII	Cimento CPIII – 32 – RS	1: 2,6: 1,47: 1,47: 0,5671
C35CPIII+e	Cimento CPIII – 32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 1,76: 1,13: 1,13: 0,4407
C40CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3926
C40CPIII	Cimento CPIII– 32 – RS	1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,5205
C40CPIII+e	Cimento CPIII – 32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 1,43: 0,99: 0,99: 0,3925

Fonte: Bourguignon (2004)

Bourguignon (2004) estudou a resistência à compressão para as idades de 28 e 63 dias. Os resultados dos ensaios são vistos na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados de resistência à compressão: média e desvio padrão

Concreto	Resistência à compressão (média e desvio padrão em MPa)	
	28 dias	63 dias
C20CPIIE	26,15(0,74)	29,70(0,48)
C30CPIIE	39,50(0,62)	43,13(1,38)
C35CPIIE	41,88(4,52)	50,12(0,74)
C40CPIIE	44,74(1,81)	53,36(1,97)
C20CPIII	26,41(1,68)	32,01(2,18)
C30CPIII	36,84(1,27)	48,89(2,76)
C35CPIII	40,01(1,46)	50,07(1,92)
C40CPIII	43,38(1,31)	51,04(2,25)
C20CPIII + e*	25,16(1,12)	25,96(0,92)

C30CPIII + e*	38,08(1,04)	44,47(5,03)
C35CPIII + e*	40,77(2,06)	53,84(4,1)
C40CPIII + e*	43,16(2,07)	54,73(2,7)

Fonte: Adaptado de Bourguignon (2004)

Bourguignon (2004) aponta que uma maior relação água/materiais cimentícios tende para uma menor resistência à compressão, pois com um aumento da relação água/materiais cimentícios tem-se um aumento da porosidade, o que causa um enfraquecimento da matriz cimentícia. Ademais, para a idade de 63 dias, os concretos que contêm maior teor de escória granulada de alto forno moída apresentaram compressão axial média similares aos demais concretos de mesma idade.

Os ensaios de carbonatação natural foram realizados em câmara seca, com umidade relativa igual a 50% e temperatura entre 21°C e 27°C, cuja profundidade de carbonatação eram medidas nas idades de 63, 77, 91 e 365 dias para cada classe de resistência. Bourguignon (2004), a partir de comparações com a literatura adotada como referência, confirma a tendencia das diferenças nas profundidas de carbonatação diminuírem para menores relações água/cimento e maiores resistências. Além disso, aponta que as profundidades de carbonatação nas misturas com CP II E-32 são menores do que nas misturas com cimento CP III-32-RS e, ainda, que as misturas com CP III-32-RS apresentam profundidades de carbonatação igual das misturas da mesma classe de cimento com escória.

Já nos ensaios de carbonatação acelerada, os corpos de prova ficam em câmara úmida pelos primeiros 15 dias após a desmoldagem. Depois, ficaram por sete semanas na câmara seca nas mesmas condições de temperatura e umidade aplicadas na carbonatação natural. Ao fim, os corpos de prova foram depositados na câmara de carbonatação com umidade de (65±5)%, temperatura de (26±2)°C, pressão máxima de 1±0,1 atm, e teor de CO2 de 95±5% . O ensaio foi aplicado nas classes de concreto estudadas e com idades de 77 dias e 91 dias. Bourguignon (2004) atesta que há variação nas profundidades de carbonatação, na qual cresce com o teor de escória da mistura. Diferentemente da carbonatação natural, as misturas com CP III-32-RS com escória granulada de alto forno apresentam menor carbonatação do que as misturas com apenas CP III-32-RS.

Moraes (2008) buscou avaliar o comportamento de concretos fabricados com os cimentos que apresentam escória em sua composição, o CPII-E-RS-32 e o CPIII-RS-32, no que diz respeito a promover proteção contra corrosão às armaduras em seu interior. Para isso foram feitos estudos das características de resistência à compressão, relação água/cimento, espessura de cobrimento e teor de escória e de como elas impactam no potencial de corrosão das armaduras e na resistividade elétrica aparente do concreto.

Inicialmente, Moraes (2008) definiu duas classes de cobrimento a serem consideradas, que foram baseadas em normas vigentes na época em que os ensaios foram realizados, apesar disso, estes valores de cobrimento correspondem ao que é previsto atualmente na NBR 6118 (ABNT, 2014). Estes valores são 20 mm e 30 mm, que podem ser interpretados o valor de cobrimento para laje em classe de agressividade ambiental I e o valor de cobrimento para viga ou pilar em classe de agressividade ambiental II, respectivamente. Além disso, o estudo também foi realizado em três classes de concreto, sendo elas C20, C30 e C40, e para cada uma dessas classes foi avaliado, assim como Bourguignon (2004), três tipos de mistura diferentes, sendo uma com CPII-E-RS-32, uma com CPIII-RS-32 e uma com uma mistura de aglomerantes sendo 50% CPIII-RS-32 e 50% escória granulada de alto-forno moída, e essa composição é definida na dissertação como CPIII-RS-32+e.

A primeira etapa para Moraes (2008) foi a caracterização física e mecânica dos concretos confeccionados, para isso, foram moldados corpos de prova de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003), desmoldados e curados por 28 dias de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 1987); e submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), atual NBR 5739 (ABNT, 2018), aos ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987), e aos ensaios de determinação da absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar, conforme a NBR 9779 (ABNT, 1995), atual NBR 9779 (ABNT, 2012). Os resultados estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados de caracterização mecânica e física dos concretos

Traço	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Classe	C20			C30			C40		
Aglomerante	CPII	CPIII	CPIII+e	CPII	CPIII	CPIII+e	CPII	CPIII	CPIII+e
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	23,1	28,4	29,3	37,0	37,4	38,5	48,8	51,8	53,7
DP* (MPa)	0,90	1,02	0,82	0,58	2,08	1,25	1,06	2,44	2,02
Água/cimento	0,63	0,75	0,63	0,49	0,61	0,49	0,39	0,52	0,39
Massa específica (kg/dm³)	2,62	2,57	2,59	2,63	2,55	2,59	2,62	2,57	2,61
DP* (kg/dm³)	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
Absorção (%)	6,13	5,91	5,61	5,91	4,78	4,96	4,81	4,81	4,79
DP* (%)	0,09	0,47	0,40	0,17	0,44	0,30	0,63	0,42	0,29
Índice de Vazios (%)	13,82	13,17	12,70	13,46	10,88	11,37	11,16	11,00	11,09
DP* (%)	0,16	0,99	0,84	0,34	0,94	0,68	1,30	0,94	0,64
* Desvio padrão									

Fonte: Adaptado de Moraes (2008)

Nota-se que o traço contendo CP II teve desempenho significativamente inferior aos traços com CP III no que diz respeito a resistência à compressão. O traço com substituição de 50% de cimento pela escória de alto-forno obteve uma maior resistência à compressão que o contendo apenas CP III, porém sua relação água/cimento foi menor. Os valores de absorção e índice de vazios se mantiveram próximos para os traços, variando de acordo com a classe do concreto, indicando uma relação com a porosidade das misturas.

Em seguida, Moraes (2008) aborda as características do concreto de profundidade de carbonatação, profundidade de penetração de cloretos e resistividade elétrica aparente. Para estes ensaios foram estudadas duas formas de envelhecimento do concreto, a primeira com os corpos de prova envelhecidos naturalmente no laboratório sob cura ao ar por até 365 dias, e a segunda com os

corpos de prova envelhecidos aceleradamente por ciclos na câmara de névoa salina e na câmara de carbonatação. Uma abordagem semelhante foi utilizada para o ensaio de potencial de corrosão, porém, para este foram usados corpos de prova retangulares contendo em seu interior vigas de CA-50 de diâmetro 10 mm, simulando vigas e pilares. Estes corpos de prova armados foram divididos em dois grupos, o primeiro grupo possuindo cobrimento das armaduras de 20 mm e o segundo grupo possuindo 30 mm de cobrimento das armaduras.

Para os testes de profundidade de penetração de cloretos e de profundidade de carbonatação, podemos observar na Tabela 15 que os resultados implicam a influência da classe de resistência do concreto nessas características. À medida que ocorre um acréscimo na resistência do concreto, ocorre uma redução nas profundidades de penetração de cloretos e carbonatação, o que indica que uma maior resistência do concreto confere uma maior proteção às armaduras em seu interior, devido à redução da relação água/cimento e índice de vazios. É possível observar que o envelhecimento natural, o cobrimento de 20 mm seria suficiente para proteger as armaduras, mas após o envelhecimento acelerado, os concretos classe C20 tiveram profundidades muito próximas à 30 mm, indicando a necessidade de um cobrimento ainda maior que o máximo de 30 mm, analisado para proteger as armaduras.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de profundidade de carbonatação e profundidade de penetração de cloretos

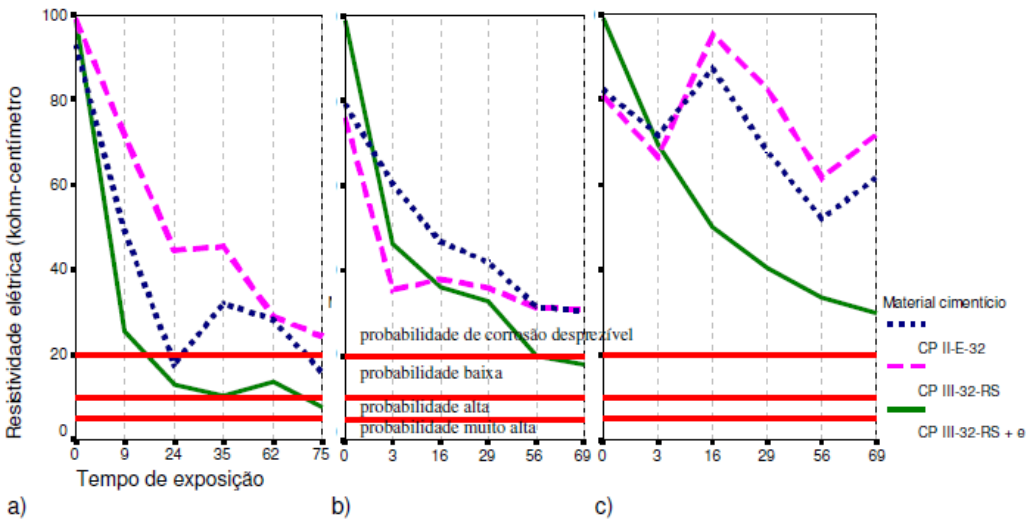
Traço	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Profundidade de carbonatação na condição natural (mm)	6,3	5,4	6,3	2,2	3,0	3,9	0,8	1,2	1,3
DP* (mm)	1,7	1,0	1,1	0,8	1,1	1,1	1,1	1,2	0,7
Profundidade de carbonatação na condição acelerada, último ciclo (mm)	27,1	18,8	24,0	14,3	10,5	16,7	7,3	6,9	9,9
DP* (mm)	4,9	2,3	3,2	2,2	1,9	1,6	1,6	1,4	1,2

Profundidade de penetração de cloretos na condição natural (mm)	5,6	5,6	5,5	1,4	2,3	3,0	0,4	0,5	0,9
DP* (mm)	2,1	1,9	1,1	0,8	0,8	1,1	0,5	0,3	0,4
Profundidade de penetração de cloretos na condição acelerada, último ciclo (mm)	29,6	16,3	20,4	16,7	10,8	13,3	10,3	6,4	8,7
DP* (mm)	4,5	4,2	1,8	2,0	1,5	1,8	1,8	1,5	1,5
* Desvio padrão									

Fonte: Adaptado de Moraes (2008)

Para o ensaio de resistividade elétrica aparente, os resultados obtidos por Moraes (2008) no que diz respeito aos corpos de prova envelhecidos naturalmente, mostraram que para esta característica, a probabilidade de corrosão foi desprezível para todos os traços, e por este motivo, analisou-se apenas os resultados em envelhecimento acelerado, conforme pode ser visto na Figura 3. Pode-se observar também como os concretos de classe C20 estão mais sujeitos à perda de resistividade elétrica com o tempo, indicando alta probabilidade de corrosão para as armaduras. Considerando apenas as demais classes, que apresentaram um desempenho aceitável, é visível que a presença da escória moída na composição do concreto possa ter contribuído para queda da resistividade.

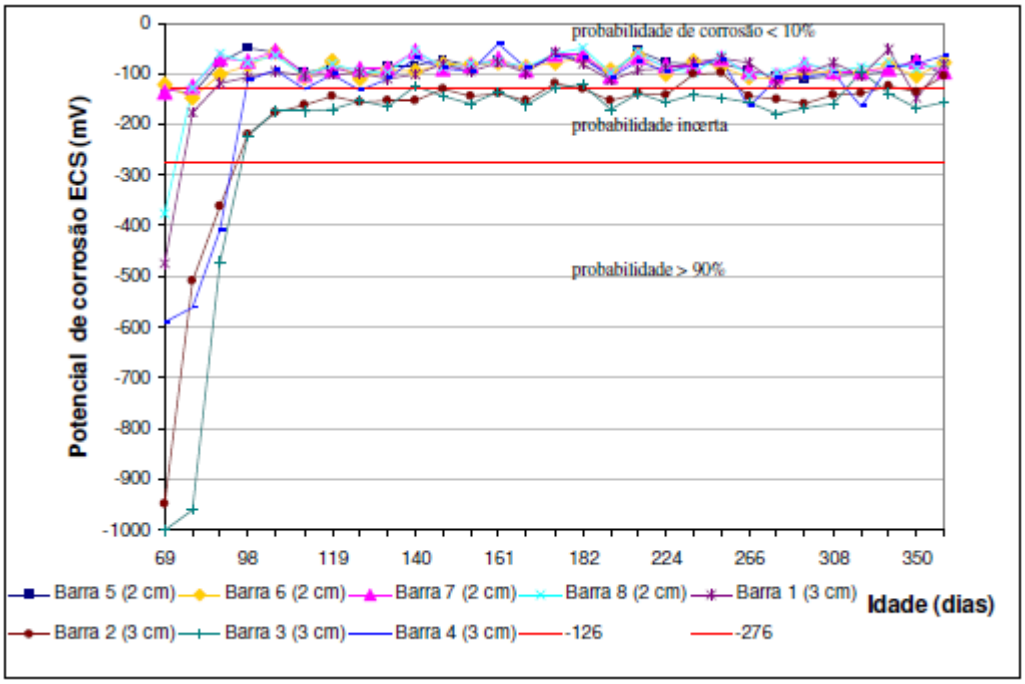
Figura 3: Resultados de resistividade elétrica em envelhecimento acelerado dos concretos de classe: a) C20; b) C30; e c) C40



Fonte: Moraes (2008)

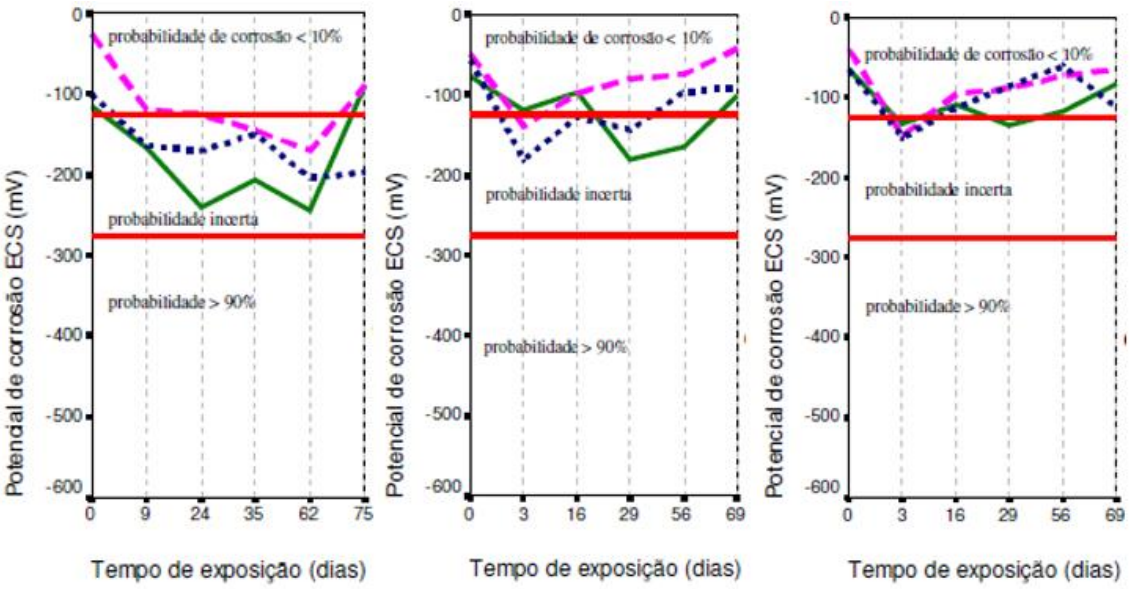
Em se tratando do potencial de corrosão de armadura, pode-se observar na Figura 4 que o concreto que apresentou o pior desempenho, ainda se manteve próximo ao limite de probabilidade de corrosão <10%, e que a espessura do cobrimento não mostrou influenciar neste ensaio. Porém, ao se avaliar o potencial de corrosão com envelhecimento acelerado, observa-se um aumento brusco desses valores, sendo que o cobrimento de 20 mm apresentou resultados muito superiores aos de cobrimento 30 mm, sendo que, para as classes C20 e C30, o cobrimento de 20 mm apresentou probabilidade de corrosão maior que 90% para todos os traços. Os concretos com cobrimento de 30 mm obtiveram resultados mais favoráveis, sendo que, podemos observar na Figura 5 que este fator também é influenciado pela classe de resistência do concreto e que maiores teores de escória tendem a aumentar o potencial de corrosão ao longo do tempo.

Figura 4: Resultado do potencial de corrosão em envelhecimento natural para o CP-II-E-32 de classe C20



Fonte: Moraes (2008)

Figura 5: Resultado do potencial de corrosão em envelhecimento acelerado para corpos de prova com cobrimento 30 mm



Fonte: Adaptado de Moraes (2008)

Por fim, Moraes (2008) conclui que, para concretos de classe de resistência de 30 MPa ou mais, altos teores de escória apresentam um bom desempenho na proteção de armaduras quando utilizadas em cobrimento igual ou superior a 30 mm. Os resultados em envelhecimento acelerado também mostram que é possível utilizar altos teores de escória para confeccionar concretos que resistam a uma classe de agressividade III que, conforme a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), seria resistente a uma agressividade forte, podendo ser utilizada em ambientes marinhos e industriais.

4.2 Concreto Autoadensável

Este tópico foi estruturado dando ênfase aos trabalhos de Avelar (2008) e Oliveira e Medina (2019), que se propõem a confeccionar misturas contendo substituição por escória e ensaiar suas propriedades físicas e mecânicas, comparando-as com concretos autoadensáveis confeccionados de forma tradicional. Por este motivo, nos tópicos seguintes serão apresentados os traços realizados nestes trabalhos, os resultados de seus ensaios no estado fresco e os resultados de seus ensaios em estado endurecido. Após, serão apresentados os trabalhos de Coelho (2016) e Mello (2015) que avaliam o impacto ambiental de traços de CAA contendo escória utilizando valores de referências externas, comparando-os com concretos autoadensáveis sem escória.

4.2.1 Caracterização dos Traços Estudados

Avelar (2008) em sua dissertação propõe o estudo sobre concreto autoadensável de alta resistência (CADAR), com a utilização de escória de aciaria LD como fíler, de forma isolada, ou em composição com a cinza volante e escória granulada de alto forno, além de adições com fíler calcário. As adições foram dosadas da seguinte forma:

- 100% de escória de aciaria LD moída (100EALD);
- 100% de fíler calcário (100CAL);
- 70% de escória de aciaria LD moída e 30% de escória granulada de alto forno (70EALD30EGAF);
- 85% de escória LD moída e 15% de cinza volante (85EALD15CV).

Além disso, vale ressaltar que Avelar (2008) utilizou, também, cimento Portland CPV-ARI, agregado graúdo com DMC ≤ 12,5mm, agregado miúdo com DMC ≤ 2,4mm e superplastificante de última geração à base policarboxilato.

Similar ao trabalho de Avelar (2008), tem-se o trabalho de Oliveira e Medina (2019), que também propõe a utilização de escória como fíler para concreto autoadensável, porém utilizando a escória de alto forno resfriada ao ar, ou escória dry-pit, como objeto de seu estudo.

Assim como o anterior, se utilizou o cimento Portland CPV-ARI e o superplastificante de terceira geração à base de policarboxilato. Os agregados naturais miúdo e graúdo utilizados foram, respectivamente, a areia, que apresentou DMC ≤ 2,36 mm, e a brita gnaisse, com DMC ≤ 9,5 mm, para realização dos traços de referência e com substituição parcial, foi utilizado o fíler calcário, que já é comumente utilizado para produzir o CAA. Com esses materiais foram confeccionados 5 traços de concreto distintos, sendo eles:

- EAFRA-F: 210,88 kg de fíler de escória de alto-forno resfriada ao ar de granulometria fina por m³ de concreto;
- EAFRA-M: traço com 210,88 kg de fíler de escória de alto-forno resfriada ao ar de granulometria média por m³ de concreto;

- EAFRA-G traço com 210,88 kg de fíler de escória de alto-forno resfriada ao ar de granulometria grossa por m³ de concreto;
- COMPOSIÇÃO: traço com 105,44 kg de fíler de escória de alto-forno resfriada ao ar de granulometria média e 95,50 kg de fíler calcário por m³ de concreto;
- REF: traço de referência com 191,00 kg de fíler calcário por m³ de concreto.

Para todos os traços estudados por Oliveira e Medina (2019), tem-se estabelecidos: consumo de cimento de 395,83 kg/m³, consumo de água de 190 kg/m³, consumo de areia de 818,40 kg/m³ e consumo de brita de 804,00 kg/m³.

Oliveira e Medina (2019) definiram as granulometrias da escória por meio da moagem em um moinho de bolas, determinadas pelas rotações realizadas pela máquina. Desta forma, a escória de alto-forno resfriada ao ar de granulometria grossa passou por 7,2 mil rotações, a de granulometria média por aproximadamente 10 mil rotações e a de granulometria fina por aproximadamente 30 mil rotações do moinho de bolas. Estes valores foram determinados utilizando como parâmetro o trabalho de Rodrigues (2018) que tinha como objeto de estudo o resíduo de rochas ornamentais moído. Já a dosagem do concreto foi realizada com base no método da EFNARC (2005) e o aditivo superplastificante foi dosado em etapas, afim de obter uma fluidez que correspondesse à categoria SF2 descrita na NBR 15823 (ABNT, 2017), porém este parâmetro não pôde ser atingido para o EAFRA-F.

A caracterização das escórias utilizadas por Oliveira e Medina (2019) foi feita utilizando os métodos de granulometria a laser, permeabilímetro de Blaine, ensaio de massa específica, difração dos raios-x e microscopia eletrônica de varredura. Já os métodos de avaliação dos traços de concreto serão discutidos nos itens seguintes, assim como os resultados exibidos.

Em continuidade ao trabalho de Oliveira e Medina (2019), Matos, *et al.* (2020) avaliou o uso de EAFRA como fíler em CAA, utilizando as mesmas proporções entre os materiais que os traços EAFRA-F, EAFRA-G, COMPOSIÇÃO e REF vistos anteriormente. Em adição, é acrescentado também um novo traço GBFS, que possui as mesmas proporções de água, cimento CP V ARI e agregados, porém a sua fração fíler é formada por 145 kg de escória granulada de alto-forno para cada m³ de concreto produzido.

4.2.2 Propriedades Do Concreto Fresco

Os ensaios com o concreto fresco têm como objetivo demonstrar as propriedades da trabalhabilidade do concreto autoadensável: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem e resistência a segregação.

Avelar (2008) analisou a dosagem do concreto fazendo, primeiramente, um estudo em finos, pastas e argamassas, e, inicialmente, para o estudo de finos foi analisado o comportamento das adições com a água. A partir dos ensaios de espalhamento e de funil V foram coletados os dados de diâmetro final de espalhamento e espalhamento relativo. Com tais resultados, por meio de regressão linear obteve-se os valores de quantidade de água para início do espalhamento (βp) e sensibilidade do fino à adição de água (Ep), segundo a Tabela 16.

Tabela 16: Valores de βp e Ep e água da pasta de consistência normal.

Adição	B_p	E_p	Água da pasta da consistência normal (%)
100CIM	1,35	$6,28 \times 10^{-2}$	30%
100EALD	0,95	$4,70 \times 10^{-2}$	27%
70LD30AF	0,99	$4,84 \times 10^{-2}$	29%
85LD15CV	1,01	$5,11 \times 10^{-2}$	29%
100CAL	0,96	$4,59 \times 10^{-2}$	31%

Fonte: Adaptado de Avelar (2008)

Avelar (2008) aponta que o fino que apresenta menor βp é o com a adição de 100% escória de aciaria LD, enquanto a adição com cimento apresentou maior quantidade de água para início do espalhamento. Isso resulta em dizer, que a adição 100EALD é a mais sensível a água.

Para o estudo de pasta foi analisado a relação de fíler/cimento (f/c). Em cada pasta foi realizada os ensaios de cone de Marsh e *mini-slump* e analisada o comportamento das pastas variando a relações f/c entre 0,10 e 0,60. Foram tomadas como referência, para a escolha do f/c ideal, o espalhamento no *mini-slump* de 180±10 mm e T115=3±1 seg. As pastas que atenderam as referências estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Pastas selecionadas.

Adição	f/c	%SP	D_{FMC} (mm)	T_{115} (s)
P100EALD	0,5	1,10	181	3,37
P85LD15CV	0,4	0,85	176	3,37
P70EALD30EF	0,5	1,15	181	3,77
P100CAL	0,5	1,00	182	2,88

Fonte: Adaptado de Avelar (2008)

Avelar (2008) correlaciona a menor fluidez da pasta de fíler de calcário nas relações 0,10 e 0,20, pois esta adição apresenta, como na Tabela 17, a menor sensibilidade do fino a adição de água (Ep).

O estudo de argamassa de Avelar (2008) serviu para que algumas variáveis fossem modificadas. Embora atendesse o espalhamento e T_{115} necessários, as pastas tiveram as relações f/c substituídas, uma vez que apresentavam coesão e viscosidade em excesso. A solução adotada por Avelar (2008) foi reduzir de 0,5 para 0,4 e recalcular os traços de concreto para essa relação. Também foi verificada a dosagem de saturação do aditivo superplastificante para cada pasta. Além disso, a dosagem de aditivo superplastificante foi aumentado até que os valores de fluidez e espalhamento fossem atendidos.

Avelar (2008) aponta que para os teores de pasta variando entre 38% e 44%, com adição de 100% de escória de aciaria LD, com relação f/c=0,40:

Tabela 18: Resultados dos ensaios em ARG100EALD.

%Pasta	%SP=0,85		%SP=1,20	
	Espalhamento (mm)	Tesc (s)	Espalhamento (mm)	Tesc (s)
38	145	>30s	236	12.9
40	168	>30s	260	10.9
42	187	>30s	273	8.3
44	201	>30s	298	7.1

Fonte: Adaptado de Avelar (2008)

Utilizando os teores de pasta descritos na Tabela 18, relação f/c=0,40 e teores de superplastificantes de 1,15 e 1,20, Avelar (2008) pôde-se concluir que:

Os concretos com 100% de escória de aciaria LD com f/c=0,40, o teor de superplastificante de 1,20 e teor de pasta de 44% foram os melhores avaliados nos ensaios reológicos, apresentando resultados satisfatórios, principalmente no que diz respeito a capacidade de preenchimento. Concretos com 100% escoria de aciaria LD com f/c=0,40, teor de superplastificante de 1,20 e com teor de pasta de 42%, apresentaram resultados similares, porém apresentava tempo de fluxo maior obtidos na caixa L.

Concretos com 100% de escoria de aciaria LD com 42% de pasta tem características reológicas similares ao concreto com 70% de escória de aciaria LD e 30% de escória de alto forno e ao concreto com 85% de escoria de aciaria LD e 15% de cinza volante. O concreto com 100% de fíler calcário foi o que apresentou o menor tempo de fluidez no funil V, porém quando foi necessário reduzir a relação f/c o autor observou aumento no consumo de cimento em média 10%.

A verificação das propriedades reológicas dos traços de CAA obtidos por Oliveira e Medina (2019) foi feita utilizando o método do Cone de Abrams, de acordo com a ABNT NBR 15823-2 (2017), o método do Anel J, previsto na ABNT NBR 15823-3 (2017) e o método do Funil V, de acordo com a ABNT NBR 15823-5 (2017). Os resultados obtidos por Oliveira e Medina (2019) podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19: Resultados dos ensaios em concreto autoadensável fresco

Ensaio	EAFRA-F	EAFRA-M	EAFRA-G	COMPOSIÇÃO	REF
Cone de Abrams					
t_{500} (s)	4	2	3	3	3
Classe	VS 2	VS 1	VS 2	VS 2	VS 2
SF (mm)	625,0	710,0	685,0	702,5	680,0
Classe	SF 1	SF 2	SF 2	SF 2	SF 2
Anel J					
JF (mm)	482,5	657,5	612,5	510,0	607,5
PJ (mm)	142,5	52,5	72,5	192,5	72,5
Funil V					
VF (s)	4,14	5,31	4,76	5,47	5,70
Classe	VF 1	VF 1	VF 1	VF 1	VF 1

Fonte: adaptado de Oliveira e Medina (2019)

Estes resultados mostram um bom desempenho nos traços realizados com EAFRA, com exceção do EAFRA-F que obteve baixa performance atingindo a classificação SF 1, que indica ser um concreto a ser utilizado apenas com taxa de armadura baixa ou nula. Já os demais, atenderam as classificações SF 2 e VF 1, indicado para usos quando se tem alta taxa de armadura, para os métodos de Espalhamento e Funil V, respectivamente. O EAFRA-M apresentou um ótimo desempenho alcançando a classificação VS 1, também indicada para altas taxas de armadura pelo método do espalhamento, já as demais composições receberam a classificação VS 2, indica para lajes e vigas. Uma observação deve ser feita quanto ao traço com fíler composto por EGAF e calcário que, apesar de bons desempenhos para o Cone de Abrams e o Funil V, apresentou muita perda de espalhamento no ensaio do anel J, o que pode ser observado pelo seu pior desempenho nesse ensaio em relação aos demais traços.

No trabalho de Matos, *et al*. (2020), os ensaios de *Slump-flow*, Anel J e Funil V foram mantidos os mesmos para os traços já ensaiados por Oliveira e Medina (2019), e os resultados obtidos pelo traço GBFS podem ser vistos na Tabela 20. Vale ressaltar também que o novo traço foi o que menos consumiu aditivo plastificante para atingir as propriedades desejadas. Além destes ensaios já apresentados, foram realizadas outras avaliações a respeito das características reológicas e propriedades a fresco dos traços confeccionados. Utilizando o modelo de Herschel-Bulkley foram calculadas as tensões de escoamento estático e dinâmico (*static yield stress* e *dynamic yield stress*) que representam as tensões mínimas que necessitam ser aplicadas às misturas frescas para que comecem a fluir. Foi possível determinar também a viscosidade aparente de cada traço. Os resultados destes ensaios podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 20: Propriedades reológicas do traço GBFS

Traço	Slump-flow (mm)	Funil V (s)	Anel J (mm)	Teor de Ar Incorporado (%)
GBFS	695	5,6	27,5	5,2

Fonte: adaptado de Matos, *et al.* (2020)

Tabela 21: Valores de tensão de escoamento estático e dinâmico e Viscosidade aparente dos traços

Ensaio	GBFS	EAFRA-F	EAFRA-G	COMPOSIÇÃO	REF
Tensão de Escoamento Estático (Pa)	130	391	299	263	208
Tensão de Escoamento Dinâmico (Pa)	60	148	112	87	69
Viscosidade Aparente (Pa.s)	8,7	16,1	13,8	12,6	10,8

Fonte: adaptado de Matos, *et al.* (2020)

Pelos resultados obtidos por Matos, *et al.* (2020) pode-se concluir que as misturas com escória de alto-forno resfriada ao ar obtiveram uma maior viscosidade em comparação às demais, e este efeito pode ser balanceado aplicando um maior teor de aditivo superplastificante aos traços, como é observado na dissertação de Oliveira e Medina (2019). Também pode-se observar que o desempenho para as misturas contendo EAFRA ganharam maior viscosidade à medida que se diminuiu a granulometria, o que pode ser justificado pelo aumento da área de superfície de contato que gera uma maior absorção de água, reduzindo a trabalhabilidade do traço.

4.2.3 Propriedades do Concreto Endurecido

Para essa etapa de ensaios, foram selecionados os CAA cujo os parâmetros mais se adequavam as necessidades do estudo, ou seja, os concretos que mais atendessem as propriedades de um CAA. A partir disso, Avelar (2008) realizou o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias, pois de acordo com a metodologia de Gomes (2002) adotada pelo autor, um concreto autoadensável de alta resistência deve apresentar resistência à compressão igual ou superior a 50 MPa aos 7 dias. A partir disso, a Tabela 22 mostra os resultados do ensaio.

Tabela 22: Resultados dos concretos autoadensáveis selecionados

Proporções da mistura (kg/m³)					
		100EALD	70EALD30EGAF	85EALD15CV	100CAL
Volume de pasta (%)		44	42	42	42
Relação f/c		0,40	0,40	0,40	0,30
Teor de aditivo		1,20	1,35	1,35	0,95
Cimento		545	518	519	
EALD		218	145	176	-
EGAF		-	62	-	-
Cinza Volante		-	-	31	-
Filer Calcário		-	-	-	163
Água adicionada		186	176	177	186
Aditivo superplastificante		6,54	6,99	7	5,15
Areia		729	756	756	756
Brita		729	756	756	756
Resultados dos ensaios					
Diâmetro de espalhamento (mm)		760	790	820	840
Tempo de espalhamento T_{50} (s)		4,17	4,59	4,51	3,6
Tempo de fluidez do funil V (s)		16,9	14,8	16,5	15,22
Anel J com espalhamento	Df (mm)	760	760	820	800
	h_{ext} - h_{int} (mm)	5,75	0,50	0,4	3,0
Caixa L	T_{L20} (s)	1,5	2	2	1
	T_{L40} (s)	2,5	3	4	3
	RB=h_2/h_1	1	0,97	0,96	0,98
Caixa U	h_2-h_1(mm)	14	7,5	0	2
Tubo U	RS	1,20	0,82	0,92	0,81
Caixa de preenchimento (%)		92,6	99,62	100	99,8
Massa específica (kg/m³)		2425	2435	2402	2387
Ar incorporado (%)		1,75	0,4	2,35	0,80
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) Cilindros de 100 mm x 200 mm					
Média dos três cilindros		-	82,3	76,9	70,5
Desvio padrão		-	0,4	1,2	1,2

Fonte: Avelar (2008)

Ao fim, segundo Avelar (2008), todos os concretos alcançaram a resistência superior a 50 MPa, aos 7 dias, portanto todas as composições foram classificadas como concreto autoadensável de alta resistência, e o concreto autoadensável com escória LD apresentou características comparáveis ao concreto com 100CAL e aos demais desenvolvidos em pesquisa.

Para verificação dos diferentes traços de concreto preparados no experimento de Oliveira e Medina (2019), foi realizado o ensaio de compressão simples de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2018). Para isso foram preparados seis corpos de prova a serem rompidos após 3 dias e outros seis para serem rompidos após 28 dias, para cada traço. Os resultados médios e os desvios padrão estão na Tabela 23.

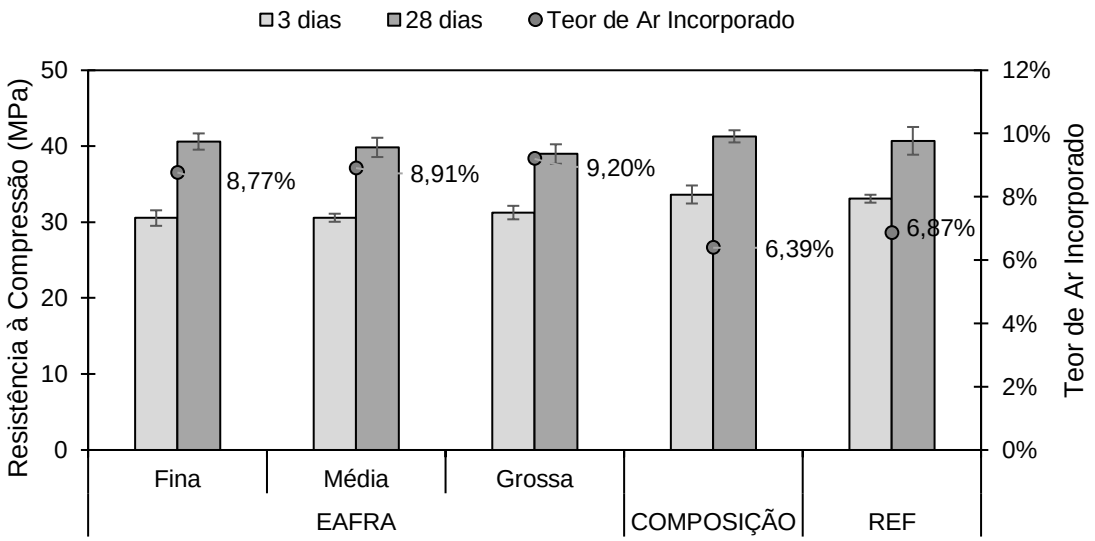
Tabela 23: Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Traço	EAFRA-F	EAFRA-M	EAFRA-G	COMPOSIÇÃO	REF
Resistência aos 3 dias	30,54	30,58	31,26	33,64	33,09
Desvio Padrão aos 3 dias	1,022	0,531	0,889	1,187	0,522
Resistência aos 28 dias	40,61	39,84	38,97	41,3	40,71
Desvio Padrão aos 28 dias	1,072	1,269	1,281	0,802	1,827

Fonte: Adaptado de Oliveira e Medina (2019)

E no gráfico da Figura 6, apesar de todos os traços apresentarem valores de teor de ar incorporado maiores do que o esperado, tem-se um indicativo de como a adição da escória possa ter interferido nesta característica, impactando diretamente na resistência à compressão. Este impacto já era esperado, como diz Kosmatka, *et al.* (2002; *apud* OLIVEIRA E MEDINA, 2019), que previam um decréscimo de 2% a 6% na resistência à compressão do concreto para cada 1% de acréscimo em seu teor de ar incorporado. Este aspecto mostra como a escória pode estar atuando negativamente nesta característica do concreto, mas apesar disso, os valores de resistência ainda se mostraram muito próximos ao valor de referência.

Figura 6: Relação entre a resistência à compressão e o teor de ar incorporado



Fonte: Oliveira e Medina (2019)

Além disso, os resultados de caracterização da escória de alto-forno resfriada ao ar mostraram que se trata de um material com alta cristalinidade, consequentemente inerte, portanto, já era esperado pouca interferência na resistência

à compressão do concreto. Isso confirma a proposta de Oliveira e Medina (2019) que, assim como o fíler calcário, a EAFRA é uma adição inerte. Por fim, comparando os resultados de resistência e do concreto fresco, observou que a dosagem de concreto com EAFRA é possível, se mostrando uma boa forma de reutilizar este resíduo.

Matos, *et al.* (2020) avaliou as propriedades dos concretos endurecidos confeccionados por seus traços, através da mensuração do calor emitido pela hidratação de cimento utilizando um calorímetro. Para suas propriedades mecânicas, assim como os demais trabalhos, se realizou o ensaio de resistência à compressão previsto na norma ABNT NBR 5739 (2018), para as idades de 3, 28 e 91 dias. Os resultados obtidos para estes testes podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24: Calor de hidratação e propriedades mecânicas dos concretos

Ensaio	GBFS	EAFRA-F	EAFRA-G	COMPOSIÇÃO	REF
Calor acumulado após 72h (J/g de cimento)	460	433	431	449	444
Resistência à Compressão aos 3 Dias (MPa)	38,9	31,3	30,2	33,6	33,1
Resistência à Compressão aos 28 Dias (MPa)	52,0	39,0	40,6	41,3	40,7
Resistência à Compressão aos 91 Dias (MPa)	54,1	39,6	41,9	43,3	41,9

Fonte: adaptado de Matos, *et al.* (2020)

Os valores obtidos por Matos, *et al.* (2020) para o calor de hidratação após 72h foram ligeiramente inferiores para as misturas com EAFRA, o que foi refletido em menores valores para resistência à compressão, porém não foram reduções significativas que inutilizem o material para este fim. Portanto, o artigo de Matos, *et al.* (2020) corrobora o que foi verificado na dissertação de Oliveira e Medina (2019) que viabiliza a utilização da escória de alto-forno resfriada ao ar como fíler para concretos autoadensáveis. Outro ponto positivo deste trabalho foi o traço composto por escória granulada de alto-forno que obteve os melhores resultados em todos os ensaios, confirmando o bom desempenho deste material para aplicação em CAA.

4.2.4 Análise de Impactos Ambientais

Inicialmente, tem-se a dissertação de Mello (2015), que se propôs a analisar o ciclo de vida de concretos autoadensáveis com diferentes teores de escória de alto-

forno utilizando o método ACV baseado na ISO 14040 (2006), que é composta por quatro etapas, sendo elas: Definição de objetivo e escopo, responsável por definir e justificar a escolha do objeto de estudo em questão; Análise de Inventário, responsável por identificar e quantificar os fluxos dos insumos e as emissões produzidas por cada produto utilizado desde o início da produção; Avaliação de impacto, responsável por traduzir as informações do inventário para o real impacto que elas implicam ao meio-ambiente; e Interpretação, que é a etapa onde se faz uma conclusão com base na justificativa utilizada.

Nesta dissertação, Mello (2015) optou por uma análise *cradle-to-gate* do concreto autoadensável usinado, que avalia o ciclo de vida desde a extração dos materiais base ("*cradle*"), até o concreto chegar ao "portão" da obra em que será aplicado ("*gate*"), comparando o impacto de diferentes traços. Para isso, se utilizou de softwares computacionais como o Life-365 v2.2.1, para o cálculo da estimativa da vida útil de cada traço; o *Ecoinvent* 3.1 que possui uma base de dados para os fluxos de insumos de diferentes materiais utilizados; o *SimaPro* que utiliza os dados do *Ecoinvent* para determinar as correlações entre os materiais genéricos, seus dados de produção, transporte, consumo de energia, geração de resíduos; e o *GoogleMaps* para determinar as distâncias de transporte utilizando concreteiras conhecidas em Vitória e seus locais de fornecimento de materiais. Para a avaliação de impacto ambiental, se optou pelo método *Impact* 2002+.

Mello (2015) fez a comparação de três traços de CAA distintos, produzidos com CPV-ARI, que foram obtidos de uma de suas referências, e que já possuíam suas características de resistência determinadas. Esses traços são GGBFS40, GGBFS30 e GGBSF20 que apresentam 40%, 30% e 20% de substituição do cimento por EGAF, respectivamente. Posteriormente, se fez uma comparação dos impactos fazendo a substituição do CPV-ARI por CPI, e por fim, se fez uma análise dos pontos críticos da produção do concreto utilizando apenas o GGBFS40.

Em paralelo ao estudo de Mello (2015), tem-se a dissertação de Coelho (2016) que também faz uma análise *cradle-to-gate* de concretos autoadensáveis, utilizando 162 traços distintos, presentes em 15 artigos diferentes, apresentando diversos materiais tipos de resíduos industriais em substituição aos materiais tradicionalmente

utilizados na produção de concreto, dentre estes, a EGAF. Similarmente a Mello (2015), utilizou-se dos softwares *Ecoinvent* 3.2, *SimaPro* e *GoogleMaps* para as etapas de Análise de inventário e Avaliação de impacto, assim como o método *Impact* 2002+.

Os resultados obtidos por Mello (2015) no *SimaPro* não apresentaram surpresas, mostrando que concretos com maior substituição de cimento por EGAF, observa-se uma queda na resistência e um aumento na vida útil, e este acréscimo de vida útil ocorre devido à presença da escória no concreto aumentar sua resistência ao ataque por cloretos, aumentando sua durabilidade. Em relação ao impacto ambiental, Mello (2015) conclui que foi considerado um impacto significativamente menor nos concretos com maior teor de EGAF, apesar de que, se não fosse levada em consideração sua vida útil, este desempenho não seria satisfatório. Para a comparação do CPI com o CPV-ARI, apesar do melhor desempenho do CPV-ARI, não foi fator decisivo em relação ao impacto ambiental. E em relação à análise dos pontos críticos da fabricação do CAA, Mello (2015) observou que os maiores impactos ambientais são provenientes da produção do cimento e, inferior a este, da escória. Já Coelho (2016) separou os traços analisados por classe de resistência, não levando em conta sua vida útil, promovendo uma análise mais centrada nos impactos ambientais. Este corrobora as conclusões de Mello (2015) indicando que uma maior substituição de cimento indica um menor impacto ambiental, porém, em comparação a outros resíduos industriais estudados por Coelho (2016), a EGAF apresenta um desempenho inferior no que diz respeito ao impacto ambiental de sua produção.

4.3 Argamassas

O estudo realizado por Coitinho (2019) analisa os efeitos da substituição de agregado miúdo por PAE na confecção de argamassas para concretos autoadensáveis, avaliando a influência deste coproduto nas propriedades reológicas e mecânicas e no consumo de aditivo, para diferentes teores de incorporação na mistura. Além do PAE, se utilizou uma areia natural como agregado miúdo, o aditivo superplastificante *Tecflow* 8000 e cimentos dos tipos CP III 40 RS e CP V ARI como diferentes alternativas para o aglomerante. A definição dos traços foi realizada

baseando-se em um traço de referência presente em literatura, que apresenta proporções semelhantes às utilizadas comumente em concretos autoadensáveis.

Coitinho (2019) definiu quatro traços diferentes para cada tipo de cimento empregado, o primeiro sendo a referência, e os demais com teores de 3,50%, 5,25% e 7,00% de PAE em substituição parcial ao agregado miúdo. E esses teores foram definidos de forma que a massa de pó de aciaria elétrica adicionada correspondesse à 10%, 15% e 20% da massa de cimento da mistura, respectivamente. A adição de superplastificante em cada traço foi definida durante a mistura, avaliando-se visualmente a consistência das argamassas até atingirem o ponto desejado. Desta forma, o consumo dos materiais em gramas utilizados para produzir 1 litro de cada mistura de argamassa são observados na Tabela 25.

Tabela 25: Traços confeccionados por Coitinho (2019)

Misturas	CPIII	CPV	Areia	PAE	Água	Aditivo
CPIII_REF	745,67	-	1215,44	-	288,57	0,56
CPIII_3.50	745,67	-	1172,95	74,57	288,57	0,70
CPIII_5.25	745,67	-	1151,63	111,97	288,57	0,82
CPIII_7.00	745,67	-	1130,36	149,29	288,57	0,92
CPV_REF	-	754,31	1229,52	-	291,92	1,30
CPV_3.50	-	754,31	1186,53	75,43	291,92	1,44
CPV_5.25	-	754,31	1164,97	113,27	291,92	1,55
CPV_7.00	-	754,31	1143,46	151,02	291,92	1,73

Fonte: Adaptado de Coitinho (2019)

Coitinho (2019) realizou a avaliação das misturas em estado fresco pelos métodos de ensaio de *flow-table* e ensaio de mini funil-V, realizados conforme estudos experimentais de Yaseri *et al.* (2018), e ensaio de determinação da massa específica e teor de ar incorporado, conforme a norma ABNT NBR 13278 (2005). Também foi realizado o ensaio de calorímetro semi-adiabático pela empresa fornecedora do superplastificante, GCP *Applied Tecnologies*, que mede o acréscimo de temperatura causado pelas reações de hidratação nas primeiras horas após a mistura, e posteriormente, utilizou-se o método gráfico de Betioli *et al*. (2009) para determinação do período de indução de cada traço. Os resultados destes ensaios são observados na Tabela 26**.**

Tabela 26: Resultados dos ensaios no estado fresco

Argamassas	Teor de aditivo (%)	Leitura média do flow table (cm)	Leitura do funil (seg)	Massa específica (kg/dm³)	Teor de ar incorporado (%)	Período de Indução (h)
CPIII_REF	0,07	25,9	6,44	2,10	7,8	5
CPIII_3.50	0,09	24,8	5,23	2,10	9,0	61
CPIII_5.25	0,11	25,3	4,26	2,13	8,3	72
CPIII_7.00	0,12	26,0	5,13	2,12	9,5	72
CPV_REF	0,17	24,9	5,86	2,08	8,4	4
CPV_3.50	0,19	27,9	6,16	2,09	9,3	19
CPV_5.25	0,21	25,1	7,36	2,17	6,8	29
CPV_7.00	0,23	24,3	6,16	2,17	7,2	29

Fonte: Adaptado de Coitinho (2019)

O primeiro fator observado por Coitinho (2019) é o aumento do consumo de aditivo à medida que se aumenta o teor de PAE em ambos grupos, o que poderia ser justificado pelo fato do pó de aciaria possuir um diâmetro médio de grãos menor que o da areia. Em relação a fluidez das misturas foi notado um aumento dessa característica para a adição de PEA no CP III em comparação à mistura de referência, porém esse efeito foi inverso no que diz respeito ao CP V, no qual ocorreu um aumento da viscosidade dos traços com PEA. A avaliação dos tempos de pega das misturas foi realizada por inspeção visual da superfície dos corpos de prova, e através dela se notou que os corpos de prova que possuíam PEA tiveram tempos de pega expressivamente superiores, tornando evidente a influência do resíduo neste aspecto, como era esperado devido à presença do zinco na composição do PEA. Este retardo no tempo de pega é corroborado pelo calorímetro semi-abático, que mostra tempos de indução muito superiores para as misturas com o pó de aciaria.

Coitinho (2019) avaliou as propriedades das argamassas endurecidas por meio do ensaio de resistência à compressão axial, previsto na NBR 5739 (ABNT, 2018), e do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, previsto na NBR 8802 (ABNT, 2019). Na Tabela 27, tem-se os resultados desses ensaios, sendo que os primeiros ensaios de compressão foram realizados em corpos de prova com 7 dias de idade, e a segunda bateria de ensaios de compressão, assim como os ensaios de ultrassom, foram realizados em corpos de prova com 28 e 29 dias

de idade para argamassas confeccionadas com CP V e CP III, respectivamente, devido à agenda do laboratório.

Tabela 27: Resultados dos ensaios no estado endurecido

Argamassas	Compressão axial (MPa)				Ultrassom (km/s)		Teor de ar incorporado (%)
	7 dias		29 dias para família CPIII 28 dias para família CPV				
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
CPIII_REF	40,96	2,11	58,47	0,82	4,34	0,03	7,78
CPIII_3.50	44,87	0,56	64,97	2,11	4,22	0,05	9,02
CPIII_5.25	45,66	3,66	63,38	1,47	4,32	0,02	8,25
CPIII_7.00	44,87	0,77	63,25	2,28	4,22	0,02	9,52
CPV_REF	46,00	2,64	58,22	0,50	4,256	0,02	8,42
CPV_3.50	50,07	1,77	63,10	3,27	4,341	0,02	9,34
CPV_5.25	55,95	1,73	65,39	1,27	4,336	0,03	6,78
CPV_7.00	56,34	0,87	64,25	1,45	4,455	0,08	7,16

Fonte: Adaptado de Coitinho (2019)

Pelos resultados obtidos por Coitinho (2019), pode-se afirmar que a incorporação de PEA teve influência positiva na resistência à compressão das argamassas confeccionadas com ambos os tipos de cimento, porém, apresentando pouca variação para os diferentes teores ensaiados. Para os valores de velocidade de ultrassom, foi perceptível que não houve influência significativa da adição de PEA, e sim que estes valores tiveram relação com o índice de vazios, o que já era esperado pois os vazios ocupados com ar tendem a diminuir a velocidade da onda propagada.

Por fim, é possível avaliar que a dissertação de Coitinho (2019) mostra o PEA como boa alternativa ao agregado miúdo nos teores avaliados, pois este apresentou pouca variação na fluidez da mistura e um ganho de resistência para todos os traços avaliados. Porém, é imprescindível levar em consideração a proposta de utilização, pois também foi observado que a substituição por PEA aumenta o consumo de aditivo superplastificante e, mais de forma mais agravante, aumenta o tempo de pega, podendo levar até cerca de 72 horas para desforma.

5 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS DE BAIXA CONSISTÊNCIA

Neste capítulo serão discutidos os trabalhos que propõem a estabilização química de solos utilizando coprodutos siderúrgicos. Para esta análise, as dissertações buscam a avaliação física e mecânica de diferentes tipos de escória, quando adicionados a solos de baixa consistência de diversas fontes e características físicas, químicas e mineralógicas.

Para discussão deste tópico, analisou-se o trabalho de Tessari e Cobe (2015), que utilizou um solo argiloso comercial, o trabalho de Moratti e Scotá (2016) que utilizou um solo natural não identificado, e o trabalho de Ramos (2018), que utilizou um solo natural, retirado de uma jazida no Espírito Santo.

Em adição, temos o trabalho de Da Cunha (2020), que avalia os impactos ambientais causados por esta estabilização química com escória. Já o trabalho de Pimenta (2019) afere a viabilidade de se construir muros de contenção com pneus preenchidos com escória em substituição ao solo.

Naturalmente, a primeira etapa destes trabalhos é a caracterização dos solos estudados. Para isso se utilizou dos ensaios de: análise granulométrica, previsto na NBR 7181 (ABNT, 2016); limites de Attenberg, previstos nas NBR 7180 (ABNT, 2016) e NBR 6459 (ABNT, 2016); massa específica real dos grãos, de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016); e teor de matéria orgânica, de acordo com a NBR 13600 (ABNT, 1996). O método de classificação utilizado nas dissertações foi o SUCS. Os resultados para cada solo analisado nos diferentes trabalhos foram organizados na Tabela 28.

Tabela 28: Caracterização dos solos estudados

Ensaios	Tessari e Cobe	Moratti e Scotá	Ramos
Fração Passante na #200 (%)	≈100	98	80
Limite de liquidez (%)	40,40	62	86
Índice de plasticidade (%)	508,02	25	38
Massa específica real dos grãos (g/cm³)	2,57	2,49	2,61
Classificação SUCS	CH	OH	OH

Teor de matéria orgânica (%)	-	17,80	51,57

Fonte: Adaptado de Tessari e Cobe (2015), Moratti e Scotá (2016) e Ramos (2018)

Tessari e Cobe (2015) em sua dissertação avaliam o comportamento da escória KR e da EAFRA como agentes estabilizantes em uma bentonita sódica ativada comercial extraída em uma jazida da Paraíba. Para esta avaliação foram confeccionadas diversas misturas contendo de 10% de escória, quando utilizado somente o coproduto, e 5%, quando combinada com mais 5% de cimento. Além disso, para efeito de comparação de resultados, foram confeccionados corpos de prova com o solo puro e com o solo com substituição 10% de cimento Portland, que é um agente estabilizante utilizado na construção civil e conhecido por um bom desempenho.

Além dos ensaios de caracterização, já citados, para avaliação mecânica das misturas, Tessari e Cobe (2015) optaram por realizar a avaliação das resistências de cisalhamento não drenadas das misturas através dos ensaios de cone e de palheta. Estes métodos de ensaio não são padronizados por normas brasileiras, portanto, para o ensaio do cone, ou *Cone Fall*, segue-se a norma europeia CEN ISO/TS 17892-6 (2004), e para o ensaio de palheta, ou *Vane Test,* baseia-se na norma americana ASTM D4648-16 (2016). As composições das misturas e os resultados de resistência máxima, considerando as médias das máximas de corpos de prova com a mesma composição, obtidos nos ensaios podem ser observados na Tabela 29, onde o ganho percentual se baseia na composição do solo puro.

Tabela 29: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall, e ganhos percentuais

Mistura	Vane Test		Cone Fall	
	$Su_{máx}$ (KPa)	Ganho (%)	$Su_{máx}$ (KPa)	Ganho (%)
100% Solo	3,30	0	2,50	0
90% Solo + 10% Cimento	10,50	318	9,00	360
90% Solo + 10% KR	5,80	176	4,70	188
90% Solo + 5% Cimento + 5% KR	7,40	224	5,50	220
90% Solo + 10% EAFRA	4,40	133	5,50	220
90% Solo + 5% Cimento + 5% EAFRA	6,40	194	5,20	208

Fonte: Adaptado de Tessari e Cobe (2015)

Analisando os resultados obtidos por Tessari e Cobe (2015), pode-se dizer que ambas as escórias apresentaram um bom desempenho geral no ganho de resistência ao solo, mesmo não tendo atingido os valores para a substituição em 10% de cimento. Apesar disso, é notável que as composições compostas por escória e cimento obtiveram valores bem maiores do que as com escória pura, que não tiveram ganhos muito significativos.

Partindo para os solos naturais, temos o trabalho de Moratti e Scotá (2016), que confeccionaram três misturas de solo estabilizado, sendo uma de referência utilizando 10% de substituição do solo por cimento e as demais utilizando 10% e 15% de escória do tipo KR. Neste estudo, também foi feita a avaliação comparativa das resistências ao cisalhamento não drenadas das misturas, utilizando os métodos de ensaio de *Cone Fall* e ensaio *Vane Test.* Estes testes foram realizados em amostras com idades de 1, 14, 28 e 56 dias, e seus resultados podem ser vistos na Tabela 30.

Tabela 30: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall em diferentes idades

Mistura	Vane Test				Cone Fall			
	Idade (dias)							
	1	14	28	56	1	14	28	56
100% Solo	4,70	5,89	7,15	9,89	5,32	11,28	14,15	27,79
90% Solo + 10% Cimento	4,49	8,07	9,19	12,10	8,21	16,13	17,53	31,81
90% Solo + 10% KR	7,29	12,06	13,38	18,70	10,88	24,34	33,85	54,46
85% Solo + 15% KR	11,50	18,73	25,94	31,01	22,11	48,56	54,33	82,79

Fonte: Adaptado de Moratti e Scotá (2016)

Pelos valores da Tabela 30, podemos observar um ganho de resistência na substituição de 10% por escória KR, que supera o ganho obtido pela substituição da mesma fração por Cimento Portland, que é um estabilizante largamente utilizado. Além disso, observou-se valores de resistência ainda maiores na substituição de 15% de solo por escória KR, sendo até 3 vezes superior ao cimento. Portanto, pela dissertação de Moratti e Scotá (2016), pode-se concluir que a escória KR apresentou um bom desempenho como estabilizante químico de solos argilosos orgânicos e de baixa consistência.

O trabalho de Ramos (2018) faz uma análise semelhante à de Moratti e Scotá (2016), porém, avaliando o comportamento de diferentes granulometrias de escória na estabilização do solo e incluindo misturas com adições parciais de escória KR e cimento combinados. Além dos ensaios *Vane Test* e *Cone Fall*, também é feito o ensaio de adensamento unidimensional, que é previsto na norma NBR 12007 (ABNT, 1990). Na Tabela 31, temos os resultados mais expressivos, assim como as referências de solo puro e solo com cimento Portland como estabilizante.

Tabela 31: Resultados dos ensaios Vane Test e Cone Fall em diferentes idades, e ensaio de adensamento

Mistura	Vane Test			Cone Fall			Adensamento	
	Idade (dias)						Cc	Cv ($x10^{-4}$ cm^2/s)
	7	14	28	7	14	28		
100% Solo	2,75	3,07	3,23	2,8	3,9	4,7	0,4190	30,62
90% Solo + 10% Cimento	5,01	9,22	21,14	11,3	15,6	27,3	0,1445	12,23
70% Solo + 30% KR in natura	2,42	2,91	2,91	2,7	2,7	1,9	0,1841	83,80
70% Solo + 30% KR moído fino	3,21	9,19	16,17	18	30,1	39,8	0,2072	51,19
70% Solo + 30% KR #2,0	3,28	17,41	-	11,6	18,04	-	0,0518	65,00
70% Solo + 27,5% KR #2,0 + 2,5% Cimento	-	11,82	16,17	-	10,87	18,04	0,1842	18,63

Fonte: Adaptado de Ramos (2018)

Em conclusão aos resultados obtidos por Ramos (2018), vemos mais uma vez a escória KR se apresentando como um estabilizante competitivo em comparação ao cimento. Apesar de não ter ultrapassado os valores de resistência ao cisalhamento, mostrou valores bem próximos aos da mistura com cimento para escória KR de granulometria fina e passante na peneira #2,0. Estas misturas também apresentaram resultados aceitáveis para o coeficiente de compressibilidade, porém, apresentaram valores elevados para taxa de recalque. O destaque negativo foi a escória KR *in natura* que obteve valores completamente inviáveis, se mostrando uma mistura pior que o solo puro, e o destaque positivo foi a mistura contendo 27,5% de escória KR e 2,5% de cimento, que se saiu bem em todos os ensaios analisados.

5.1 Análise de Impacto Ambiental da Estabilização Química com Escória

O objetivo do trabalho realizado por Da Cunha (2020) foi avaliar diferentes coprodutos siderúrgicos quando adicionados ao solo, no que diz respeito à melhoria das propriedades hidráulicas e impactos ambientais gerados. Neste estudo foi avaliado o comportamento dos coprodutos escória bruta de alto forno, escória granulada de alto forno, escória KR, Revsol®, que é uma escória LD beneficiada comercializada, e Revsol Plus II®, que é uma composição em proporções iguais das escórias LD, KR e EGAF beneficiadas. Todos estes coprodutos foram adicionados em um teor de 30% ao solo e analisados ambientalmente através das normas ambientais brasileiras e em comparação com uma mistura de solo contendo um teor de 6% de cimento Porltand, que é um estabilizante largamente utilizado na construção civil.

Da Cunha (2020) utilizou-se de diversos ensaios normatizados pela ABNT, ISO, CONAMA e OECD para as avaliações toxicológicas, ecotoxicológicas e genotoxicológicas de cada coproduto. Nas misturas confeccionadas com o solo, foi realizado o ensaio de coluna, utilizando a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), que avalia a condutividade hidráulica das amostras. E por fim, foi feita a análise ambiental comparando os resultados encontrados aos valores permitidos pelas Resoluções CONAMA Nº420 (2009) e Nº430 (2011), assim como pelo Ministério da Saúde, na Portaria de Consolidação nº 5 (2004).

Através da interpretação dos resultados obtidos, Da Cunha (2020) pôde concluir que, apesar do pH ter aumentado com a adição das escórias, ultrapassando os limites impostos pelo CONAMA, ainda apresentaram valores menores do que a mistura utilizando cimento Portland, que é a difundida na construção atualmente. Todas as misturas com escória analisadas garantiram a qualidade do solo quanto aos limites de norma para a presença de substâncias químicas. As propriedades de efluente do solo também foram alteradas, porém, não o suficiente ao ponto de ultrapassar os limites de norma, exceto para o coproduto Revsol Plus II®, que apresentou valores de Nitrito acima dos recomentados pela norma de potabilidade.

5.2 Preenchimento em Muro de Contenção com Pneus

A dissertação de Pimenta (2019) propõe a confecção de um muro de contenção, fazendo a reutilização de dois tipos de resíduos diferentes, a escória de aciaria LD e pneus descartados, este último já largamente discutido em trabalhos como os de Long (1996) e O'Shaughnessy (1997). O muro de contenção com pneus utiliza a disposição e geometria dos pneus como uma forma de "esqueleto" de sua estrutura, fazendo o preenchimento de seus espaços com o solo, e a pesquisa realizada por Pimenta (2019) busca experimentar a substituição deste solo por diferentes teores do coproduto LD.

A fração solo do muro é composta por um solo argiloso natural proveniente de uma jazida do Espírito-Santo, e este foi caracterizado em laboratório pelos ensaios de análise granulométrica, limites de Attenberg e massa específica real dos grãos, e classificado pelo método SUCS. Pimenta (2018), confecciona quatro misturas distintas com o solo, sendo uma apenas de solo puro utilizada como referência, e as demais contendo 20%, 40% e 60% de substituição deste por escória de aciaria LD. Para estas misturas se faz uma avaliação mecânica pelos métodos de compactação, índice de suporte Califórnia e expansão. Para o dimensionamento dos muros de contenção teóricos, foram analisados os resultados do ensaio de cisalhamento direto, previsto na norma americana ASTM D3080/D3080 M (2004), tanto nas misturas quanto nas composições mistura-pneus, e com estes e outros parâmetros calculados, foi possível aferir se os Fatores de Segurança atendem os limites da norma NBR 11682 (ABNT, 2009) para dimensionamento de muros de gravidade. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 32 e na Tabela 33.

Tabela 32: Caracterização do solo utilizado

Fração Passante na #200 (%)	Limite de liquidez (%)	Índice de plasticidade (%)	Massa específica real dos grãos (g/cm³)	Classificação SUCS
52,7	27,4	28,0	2,67	CH

Fonte: Adaptado de Pimenta (2019)

Tabela 33: Resultado das avaliações mecânicas das misturas solo-escória e da composição teórica do muro de contenção

Parâmetro	100% Solo	80% Solo + 20% Escória LD	60% Solo + 40% Escória LD	40% Solo + 60% Escória LD
Caracterização Mecânica das misturas				
Massa Específica Máx. Seca (g/cm³)	1,88	1,93	2,02	2,21
Expansão (%)	0,40	0,21	0,09	0,03
ISC (%)	21,00	46,00	54,60	48,50
Parâmetros de Cálculo para Dimensionamento				
Densidade do muro com pneus (kN/m³)	17,35	17,67	18,50	19,59
Coeficiente de empuxo ativo	0,2004	0,1994	0,1996	0,1999
Empuxo Ativo (kN/m)	34,33	34,16	31,19	43,74
Ângulo de Atrito de Interface (°)	32,57	29,33	30,16	34,24
Direção Horizontal do Empuxo (°)	27,57	24,33	25,16	26,09
Fatores de Segurança Calculados				
FS Mínimo de Deslizamento	3,97	3,46	3,77	4,18
FS de Tombamento	7,65	7,62	8,02	8,55
FS de Capacidade de Carga	26,17	24,91	24,23	23,37

Fonte: Adaptado de Pimenta (2019)

Do trabalho de Pimenta (2018), podemos concluir que a incorporação de escória de aciaria LD em substituição ao solo aumenta expressivamente as propriedades do solo puro, se mostrando uma alternativa viável para confecção de muro de contenção com pneus. Quanto aos fatores de segurança avaliados, apesar de observadas reduções em algumas misturas se comparadas ao solo puro, todos os parâmetros encontrados foram significativamente superiores aos limites mínimos estabelecidos por norma.

6 BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS

Neste item serão discutidos os trabalhos que propõem a incorporação de escórias em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, em substituição à brita graduada ou como estabilizante químico de solos. Em adição, temos o trabalho de Canal, *et al.* (2020), que avalia a possibilidade do uso de escória como lastro ferroviário.

Inicialmente, em 2006, Oliveira fez um estudo preliminar sobre como as características físico-químicas das escórias de aciaria LD e EAF influenciariam na viabilidade destes materiais para uso em bases e sub-bases de pavimento, tendo como maior preocupação a expansibilidade alta destes materiais. Como este trabalho antecede à norma DNIT 113 2009-ME, foi utilizado o método canadense PTM 130 (1984) que foi adaptado para o Brasil como DMA-1/DER-MG/92, que serviu de base para a norma atual do DNIT.

Nesta dissertação de Oliveira (2006) foi verificado uma alta expansibilidade das escórias do tipo LD o que prejudicaria o desempenho do pavimento, podendo causar trincamentos caso a escória não seja tratada adequadamente antes da utilização, o que tornaria este método oneroso. Já a escória EAF apresentou baixa expansividade, necessitando de estudos mais aprofundados para verificar sua aplicabilidade.

Com o avanço dos anos e a necessidade de aços de melhor qualidade, o reator kambara foi implementado no Brasil (KIRMSE, 2006). Com estudos já realizados em outros países, as pesquisas da UFES tenderam a experimentar com a escória KR na estabilização de solos, como visto no capítulo 5, e nas camadas de base e sub-base.

6.1 Caracterização de solos estabilizados com escória para utilização em bases e sub-bases

Os trabalhos de Oliveira (2018) e Furieri (2019) tem como proposta a utilização da escória KR como agente estabilizante de solos naturais retirados de diferentes jazidas do Espírito Santo para que possam ser utilizados nas camadas de base e sub-base de pavimentos, e para este fim, são realizadas séries de testes laboratoriais que caracterizem o desempenho dos traços em comparação aos limites impostos por

norma e aos estabilizantes tradicionais. Inicialmente, foi realizado a caracterização dos solos estudados. Para isso se utilizou dos ensaios de: análise granulométrica, limites de Attenberg, massa específica real dos grãos e o método de classificação utilizado nas dissertações foi o SUCS. Os resultados para cada solo analisado nos diferentes trabalhos podem ser observados na Tabela 34.

Tabela 34: Caracterização dos solos estudados

Ensaios	Oliveira		Furieri	
	S1*	S2*	AE*	JP6*
Fração Passante na #200 (%)	52,7	36,8	60	23,1
Limite de liquidez (%)	55,4	52	49	26
Índice de plasticidade (%)	28	22,6	24,2	11
Massa específica real dos grãos (g/cm³)	2,67	2,73	2,65	2,65
Classificação SUCS	CH	SC	CL	SC
* Denominação utilizada para o solo dentro das dissertações, visto que estes trabalhos analisam diferentes solos de características distintas				

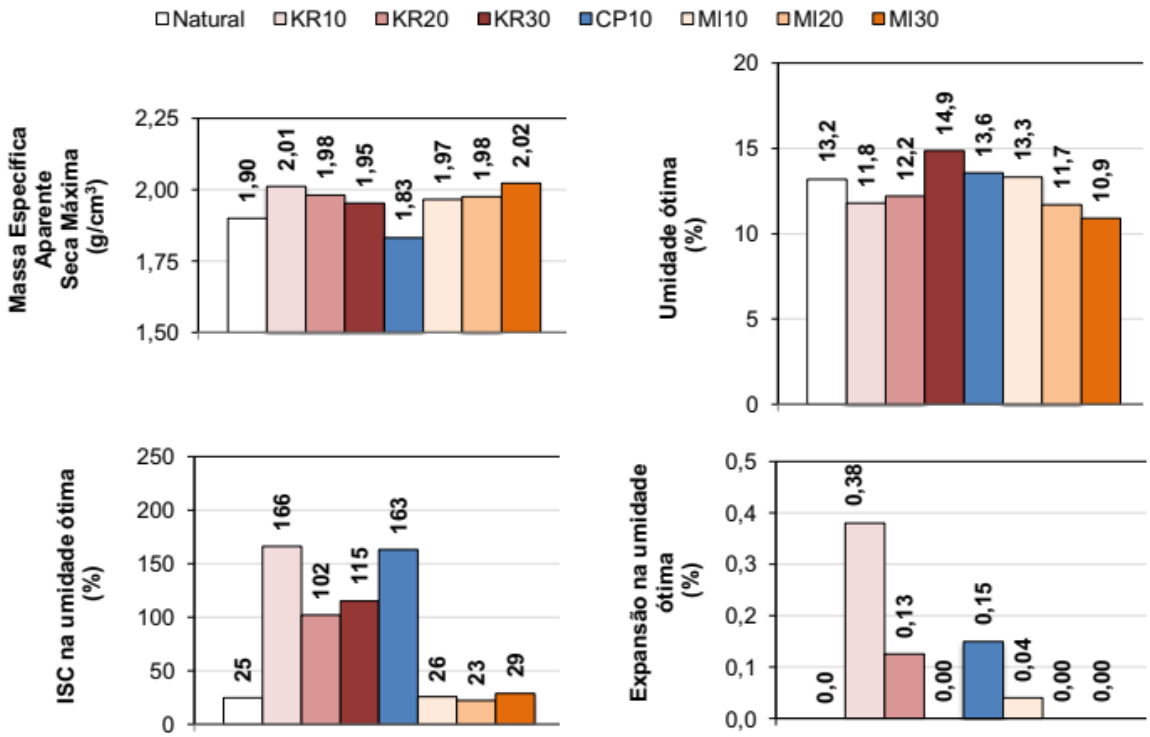
Fonte: Adaptado de Oliveira (2018) e Furieri (2019)

Na análise realizada no solo “S1”, classificado pelo método SUCS como uma argila de baixa consistência, Oliveira (2018), confeccionou também uma mistura de referência com 10% de substituição por cimento Portland. O coproduto avaliado neste trabalho foi a escória KR, que foi avaliada em substituição a 10%, 20% e 30% do solo natural, e para efeito de comparação, se confeccionou três misturas nestas mesmas proporções, porém contendo no lugar da escória, um material inerte (MI) composto por brita 0, pó de pedra e pedrisco e com granulometria próxima à do coproduto.

Para a avaliação mecânica das misturas, Oliveira (2018) optou por utilizar os ensaios de compactação de solos, previsto na NBR 7182 (ABNT, 2016), e índice suporte Califórnia, previsto na NBR 9895 (ABNT, 2016). Em adição, foram realizadas avaliações do potencial de expansão, pela norma DNIT 113 2009-ME, e do módulo de resiliência, pela norma DNIT 134 2010-ME, ambas publicadas pelo DNIT, porém, a avaliação do módulo de resiliência se trata de um teste com custo elevado, portanto só foi realizado em amostras de solo puro, solo com 10% de cimento e solo com 30%

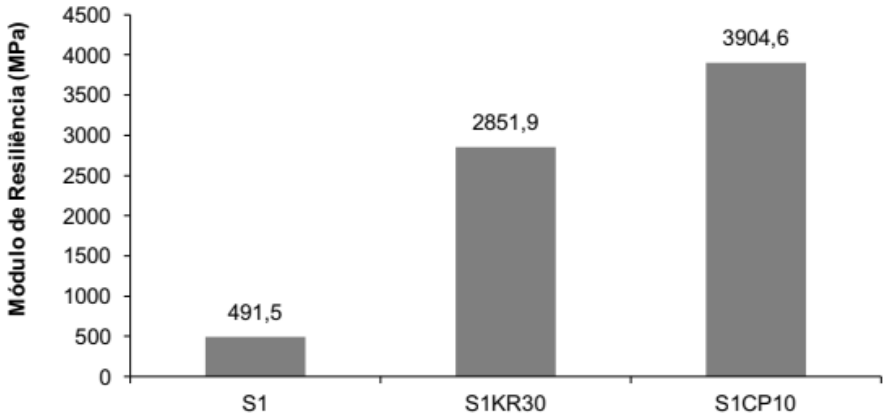
de escória KR. Os resultados destes ensaios podem ser observados de forma gráfica na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7: Resultados gráficos para os ensaios de Compactação, ISC e Expansão



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018)

Figura 8: Módulo de resiliência para tensão confinante e desviadora de 0,10 MPa

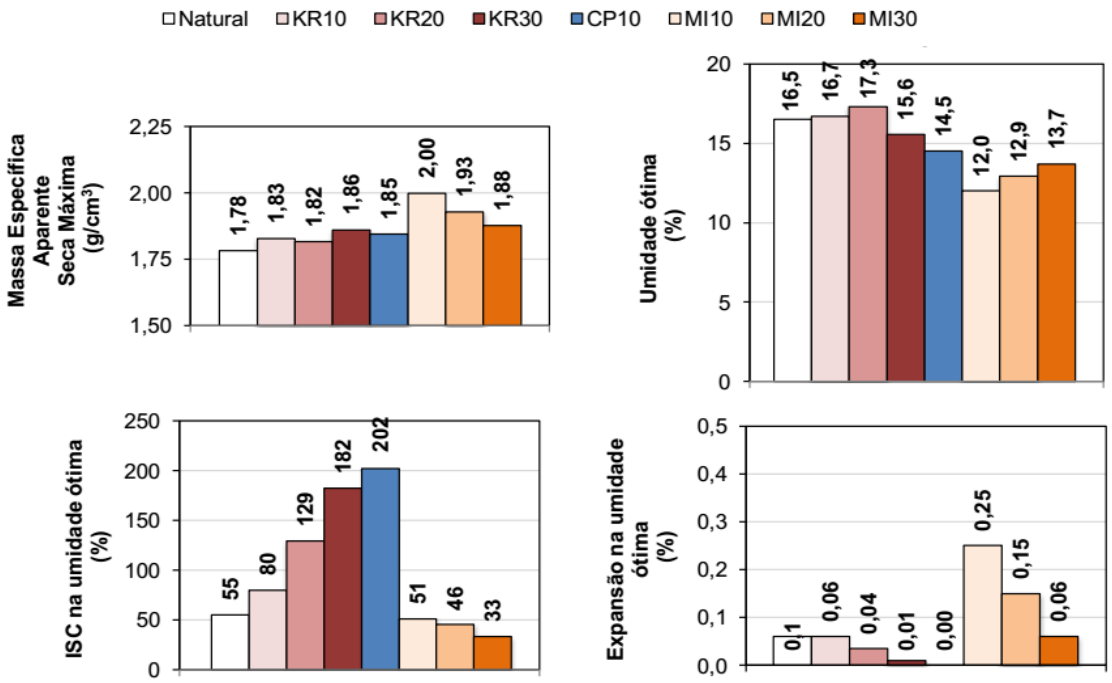


Fonte: Oliveira (2018)

Pelos resultados obtidos por Oliveira (2018), para o solo “S1” pode-se dizer que a escória KR obteve um desempenho positivo, se mostrando uma possível alternativa ao cimento. Em relação à expansibilidade, apesar de apresentar valores maiores em relação ao cimento e ao MI, não foram expressivos suficientes para prejudicar o desempenho do solo. Já para o ISC notamos um acréscimo para os solos estabilizados com escória, em relação ao cimento, e isto se deve às suas propriedades químicas, já que o MI com valores de granulometria semelhantes, não apresentou bom desempenho. O módulo de resiliência também foi um ponto positivo para o coproduto, mesmo que não tenha superado o cimento Portland, atingiu valores próximos, tendo um ganho de quase seis vezes o valor do solo natural.

Assim como no solo “S1”, Oliveira (2018) realiza em seu solo “S2” a adição de 10%, 20% e 30% de escória KR, comparando essas misturas com os resultados obtidos para o solo puro, solo com substituição de 10% por cimento, e solo com substituição de 10%, 20% e 30% com material inerte (MI). Para esta avaliação, foram realizados também os ensaios de compactação de solos, índice de suporte Califórnia e avaliação do potencial de expansão. A comparação foi feita de forma gráfica, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Resultados gráficos para os ensaios de Compactação, ISC e Expansão



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018)

Para este solo mais arenoso, Oliveira (2018) obteve resultados ligeiramente inferiores ao desempenho observado para a escória KR no solo argiloso “S1”, apesar disso, o coproduto apresentou desempenho competitivo, principalmente em maiores teores, onde o ISC esteve próximo ao do cimento. A expansão, que é um dos fatores de maior preocupação ao se trabalhar com escória, foi um ponto positivo para a KR neste solo, pois foi observado que o aumento do teor do coproduto apresentou expansões desprezíveis, sendo menores até que o solo puro, indicando uma possível influência positiva da escória neste aspecto.

Furieri (2019) faz a análise da estabilização do solo “AE” utilizando também os ensaios de compactação de solos, ISC e avaliações do potencial de expansão e do módulo de resiliência. Posteriormente foi realizada a aplicação em pistas experimentais, que será discutida no item seguinte. Para avaliação do desempenho da escória KR como estabilizante, foram confeccionadas misturas de solo contendo 15%, 20% e 25% de substituição por escória KR, ensaiados em comparação com os valores para o solo puro e os mínimos especificados em norma para pavimentos, exceto pelo MR, que foi comparado à um composto de solo com Blindasolo®, um agente estabilizante difundido no mercado. Neste solo não foi analisada a aplicação de cimento Portland como estabilizante, pois as misturas confeccionadas com a composição solo e cimento não atingiram os limites mínimos de resistência à compressão, ensaiados baseado na norma DNER-ME 201 (1994), em nenhum dos teores utilizados. Os resultados dos testes podem ser vistos na Tabela 35.

Tabela 35: Resultados dos ensaios de Compactação, Expansão, ISC e Módulo de resiliência

Parâmetro Ensaiado	Massa Específica Máx. Seca (g/cm³)		Expansão (%)		ISC (%)		MR (MPa)	
Energia	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]
100% Solo	1,752	1,808	0,02	1,752	1,808	0,02	-	-
85% Solo + 15% KR	1,772	1,849	0,00	1,772	1,849	0,00	2212,60	2211,63
80% Solo + 20% KR	1,804	1,853	0,01	1,804	1,853	0,01	1491,87	1107,87
75% Solo + 25% KR	1,877	1,886	0,00	1,877	1,886	0,00	-	-

AEBSSA2 [3]	-	-	-	-	-	-	-	715,95
AEBSSA1 [4]	-	-	-	-	-	-	-	725,07

[1] intermediária
[2] modificada
[3] Solo AE modificado com Blindasolo® na proporção 1:2000 e sulfato de alumínio 1:5000
[4] Solo AE modificado com Blindasolo® na proporção 1:1000 e sulfato de alumínio 1:5000

Fonte: Adaptado de Furieri (2019)

Pelos resultados obtidos em laboratório por Furieri (2019), podemos observar que devido à baixa expansibilidade, alto módulo de resiliência e valores de ISC acima dos limites mínimos impostos em norma, a escória KR se mostrou um bom agente estabilizante para o solo argiloso natural “AE”. Considerando os valores de ISC, temos que a mistura contendo 20% de escória KR se mostrou a melhor opção para a energia intermediária e a mistura contendo 15% do coproduto para a energia modificada, mostrando que é possível utilizar a escória KR tanto em camadas de base como de sub-base para pavimentos.

Para a análise da estabilização química do solo “JP6”, Furieri (2019) se utiliza dos mesmos métodos e aplica os mesmos teores da escória KR. Assim como o anterior compara os traços confeccionados com os valores base obtidos do solo puro e com os obtidos para o solo estabilizado com cimento, que, para este solo, atingiu valores aceitáveis de resistência à compressão. A avaliação do módulo de resistência foi comparada aos valores obtidos pelas misturas de solo com Blindasolo® e solo com cimento. Os resultados destes ensaios podem ser observados na Tabela 36.

Tabela 36: Resultados dos ensaios de Compactação, Expansão, ISC e Módulo de resiliência

Parâmetro Ensaiado	Massa Específica Máx. Seca (g/cm³)		Expansão (%)		ISC (%)		MR (MPa)	
Energia	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]	Inter [1]	Mod [2]
100% Solo	1,920	2,009	0,00	0,00	49,9	89,1	-	-
85% Solo + 15% KR	1,922	2,025	0,00	0,00	107,8	164,5	-	322,32
80% Solo + 20% KR	1,960	1,975	0,05	0,00	116,4	162,6	-	399,00
75% Solo + 25% KR	1,944	1,996	0,00	0,00	95,4	112,5	-	-
97% Solo + 3% Cimento	-	-	0,00	0,00	-	128,1	-	586,69

94% Solo + 4% Cimento	-	-	0,00	0,00	-	246,6	-	-
93% Solo + 6% Cimento	-	-	-	-	-	-	2107,95	1277,62
JP6BSSA1 [3]	-	-	-	-	-	-	782,77	591,94
JP6BSCH [4]	-	-	-	-	-	-	1909,15	3313,47

[1] intermediária
[2] modificada
[3] Solo JP6 modificado com Blindasolo® na proporção 1:1000 e sulfato de alumínio 1:5000
[4] Solo JP6 modificado com Blindasolo® na proporção 1:1500 + 3,0% de cal hidratada

Fonte: Adaptado de Furieri (2019)

Analisando os resultados de Furieri (2019), vemos que os valores obtidos para os ensaios de ISC indicam que a escória é uma opção viável a ser utilizada em estabilização de camadas de base e sub-base em solos como o “JP6”. Porém, como este solo se mostrou apto a ser estabilizado com cimento, pôde-se observar como este agente estabilizante obteve resultados bem superiores em todos os ensaios em comparação à escória KR.

6.2 Melhoramento de BGTC com escória KR para camada de base

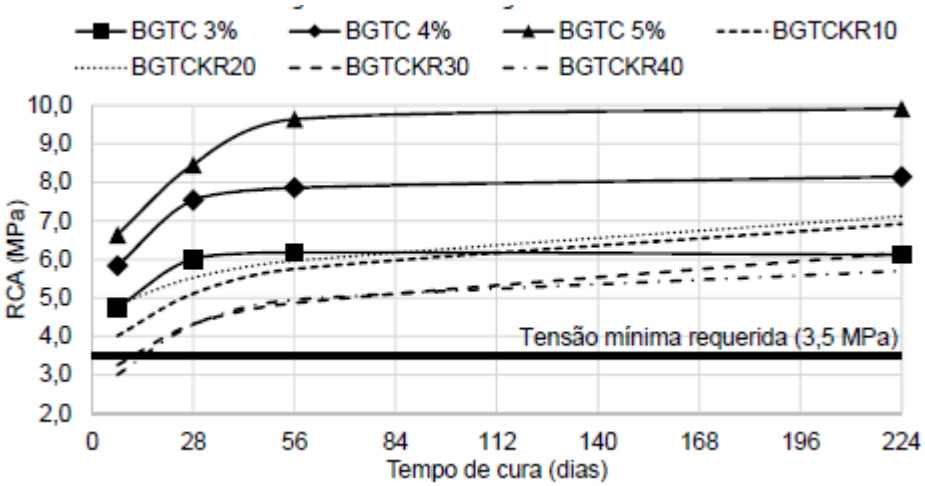
Andrade (2018) em sua dissertação propõe a incorporação de escória KR em Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) nas bases de pavimentos flexíveis. Para isto, foi moldado e comparado os corpos de prova de BGTC padrão com os corpos de prova que continham misturas com o coproduto KR nas proporções de 10, 20, 30 e 40% em substituição a brita.

Andrade (2018) aponta que a falta de normas específicas de coproduto KR levou o autor a utilizar a DNER-EM 262 (1994), uma norma de escória de aciaria para avaliar as caracterizações físicas. Com isso, ele aponta que o único parâmetro que não se encaixa nos limites é a absorção de água, que a norma indicava um intervalo ideal entre 1 e 2%, porém o coproduto apresentou 6,8%. Em relação a expansibilidade, item de bastante relevância na pavimentação, a escória apresentou resultado abaixo do limite exigido por norma (≤ 3,0), proporcionando segurança em relação à utilização em camadas de base de rodovias.

É observado por Andrade (2018) que as misturas que contem coproduto KR demonstraram um maior ganho de resistência com o tempo após os 56 dias de cura,

se comparadas com as misturas BGTC padrão. Tal comportamento, é explicado pelo autor pela presença de alumínio e ferro na composição do KR, que atuam como retardadores de pega no cimento devido ao encapsulamento da água presente na mistura e a liberação dela aos poucos para a hidratação do cimento presente nas amostras. Isto confere um ganho de resistência com o tempo mais gradual, ao contrário da BGTC padrão, que o ganho de resistência até os 56 dias é elevado, porém após esse período o aumento é quase imperceptível. Ao fim, o autor especifica um ganho de resistência após os 56 dias para BGTC com KR de até 20%, como pode-se observar na Figura 10.

Figura 10: Gráfico do ganho de resistência a compressão axial.



Fonte: Adaptado de Andrade (2018)

Embora apresente ganho de resistência mais gradual com o tempo, as misturas com KR, como visto na, apresentam uma resistência menor em comparação o BGTC padrão. Porém, Andrade (2018) indica um módulo de resiliência superior para as misturas com KR, em especial, para a BGTC com 20% KR. A Tabela 37 mostra os valores de modulo de resiliência para nas proporções de KR já citadas e um BGTC com 4% de cimento Portland.

Tabela 37: Valores de módulo de resiliência determinados em ensaio.

Traço	Módulo de Resiliência (Mpa)
BGTC 4%	17634,7
BGTCKR10	15682,1

BGTCKR20	27996,3
BGTCKR30	23936,1
BGTCKR40	9333,3

Fonte: Adaptado de Andrade (2018)

Em síntese, Andrade (2008) afirma que os resultados obtidos dos ensaios feitos indicam a viabilidade técnica da utilização de coproduto KR para o melhoramento de BGTC em camadas de base rodoviária.

6.3 Pistas experimentais confeccionadas com base e sub-base de solos estabilizados com escória

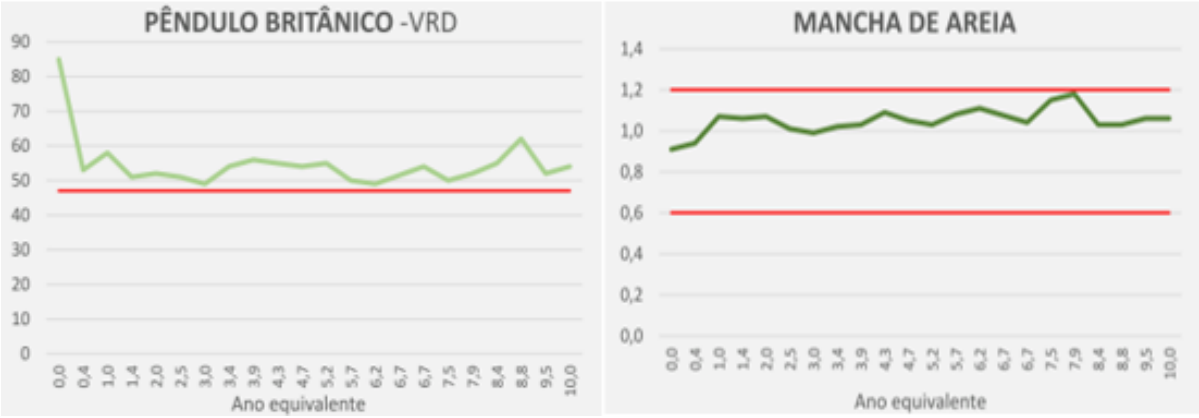
Neste item são analisados os trabalhos que utilizam da confecção de pistas experimentais para ensaiar o comportamento de pavimentos confeccionados com bases e sub-bases de solos estabilizados com escória. O objetivo é verificar os danos sofridos após submeter o pavimento à diversos impactos físicos e climáticos e como suas camadas inferiores influenciaram neste aspecto.

Em sua monografia, Oliveira e Daniel (2018), confeccionaram uma pista teste com pavimento flexível formato por 9 cm de revestimento CBUQ de ligante asfáltico modificado com borracha, 20 cm de base em solo melhorado com 3% de teor de cimento Portland e 20 cm de sub-base de solo com 20% de substituição por escória KR. A pista experimental foi submetida à carregamento pelo Simulador de Tráfego Móvel (HVS) em ciclos correspondentes a 10 anos, e, em seguida, foram realizados ensaios de micro e macroestrutura utilizando, respectivamente, os métodos de Pêndulo Britânico, previsto na norma ASTM E 303-93 (2003), e de Mancha de Areia, baseado na norma ASTM E 965-96 (2001). Também se realizou as medições de deflexão através do método da Viga Benkelman, previsto na norma DNIT 133/2010-ME, e de deformação permanente por afundamento de trilho de roda (ATR) pelo método da Treliça Metálica, baseado na norma DNIT 006/2003-PRO.

Oliveira e Daniel (2018) também confeccionaram uma segunda pista no mesmo formato, porém com sub-base igualmente em solo melhorado com 3% de cimento Portland. Esta segunda pista foi submetida e apresentou bons desempenhos nos mesmos ensaios descritos, porém, como a avaliação não foi comparativa e sim

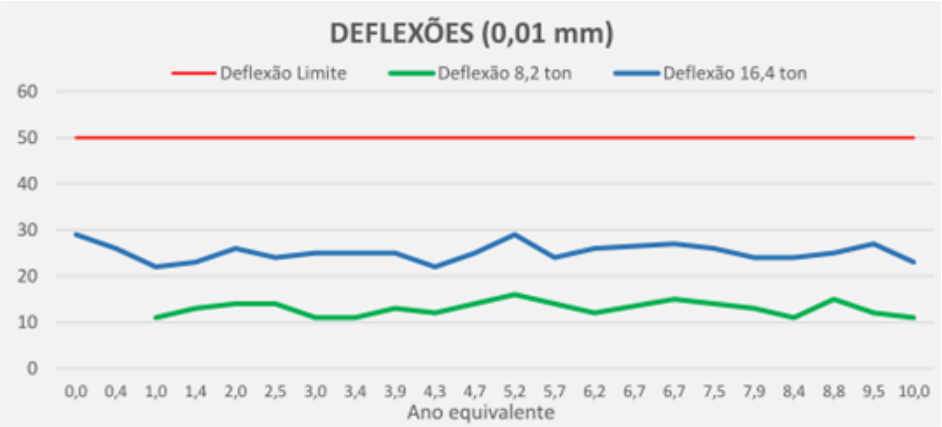
baseada em valores limites estabelecidos pelas normas, apresentaremos nas Figuras a 11, 12 e 13 apenas os resultados e discussões para pista contendo a escória KR, sendo as linhas vermelhas representando estes limites.

Figura 11: Gráficos dos ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia



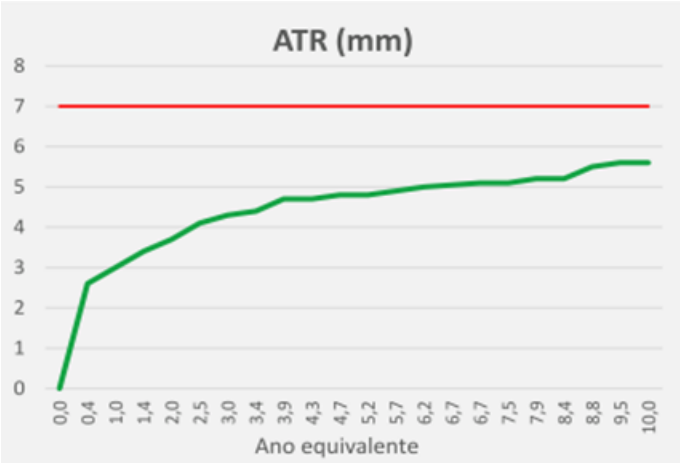
Fonte: Adaptado de Oliveira e Daniel (2018)

Figura 12: Resultado gráfico do ensaio de Viga Benkelman



Fonte: Oliveira e Daniel (2018)

Figura 13: Gráfico de resultados do ensaio de Treliça Metálica

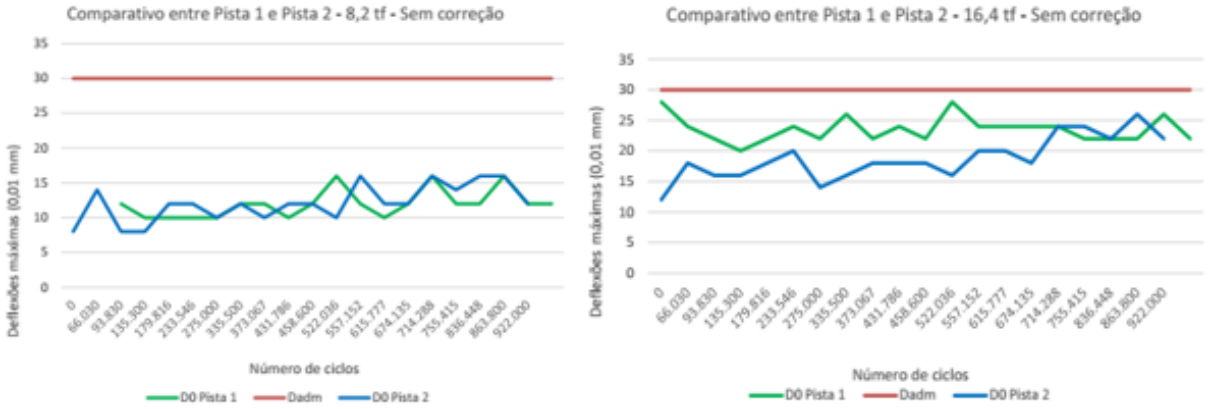


Fonte: Oliveira e Daniel (2018)

Pelos resultados obtidos nos ensaios de Oliveira e Daniel (2018), podemos ver que a pista confeccionada atende aos critérios de segurança devido aos bons resultados nos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico. O desempenho satisfatório no ensaio de deflexão indica uma boa vida útil para o pavimento e o resultado da viga Benkelman mostrou excelentes valores de resiliência, ainda melhores do que os que foram observados para a pista sem escória KR, mostrando como este material teve influência positiva no desempenho do pavimento.

Dando continuidade ao trabalho de Furieri (2019) apresentado no Capítulo 5**,** o solo “AE” melhorado com 20% de escória foi utilizado como sub-base de uma pista (Pista 1) experimental de pavimento flexível, composto por uma base de solo “JP6” melhorado com 3% de cimento e revestimento em CBUQ, utilizando as mesmas espessuras que Oliveira e Daniel (2018). Para a avaliação da pista foram utilizados o método da Viga Benkelman utilizando o Simulador de Tráfego (HVS), comparando os resultados com os de uma segunda pista (Pista 2), feita nos mesmos moldes, porém, com sub-base de solo “AE” melhorado com 3% de cimento. Uma terceira pista (Pista 4) foi confecciona com base e sub-base contendo solos melhorados com composições de Blindasolo®, como visto no Capítulo 5**,** porém, este não atendeu os limites de norma, portanto foi inviabilizado. A comparação de resultados de deflexão para as pistas 1 e 2 podem ser observadas na Figura 14.

Figura 14: Comparação gráfica entre os resultados para o ensaio de Viga Benkelman



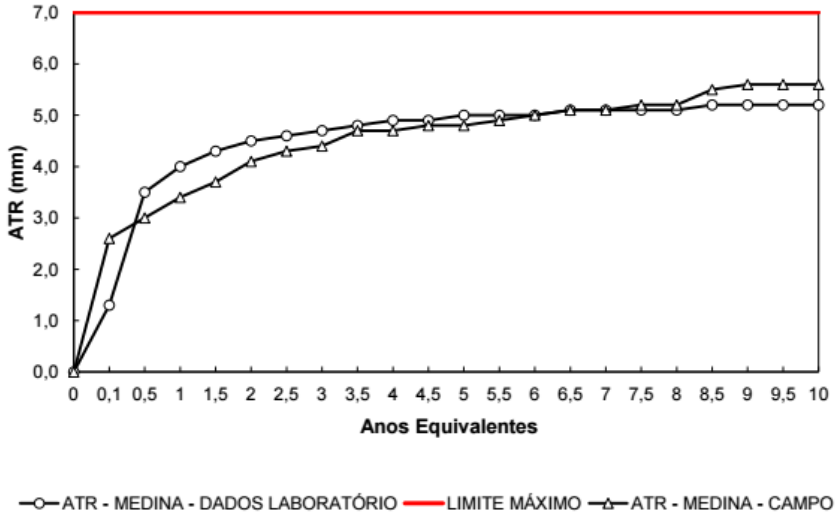
Fonte: Adaptado de Furieri (2019)

Os gráficos obtidos por Furieri (2019) mostram resultados muito semelhantes para as duas pistas em carga aplicada de 8,2 tf por eixo. Já para a carga aplicada por eixo de 16,4 tf, vemos uma deflexão maior para quase toda simulação no que diz respeito à estabilização com KR, mas apesar disso, ainda se encontra dentro do valor limite, mostrando que esta aplicação é competitiva, considerando seus impactos no gasto de materiais naturais e cimento.

A dissertação desenvolvida por Nepomuceno (2019) se assemelha em métodos ao que foi apresentado por Oliveira e Daniel (2018), utilizando as mesmas composições de pavimento, com algumas variações no solo utilizado, e avaliando da mesma forma por Pêndulo Britânico, Mancha de Areia, Viga Benkelman e ATR, nas pistas submetidas ao HVS em ciclos que correspondem a 10 anos. Os resultados destes ensaios também foram semelhantes e corroboram o bom desempenho da escória observado por Oliveira e Daniel (2018).

Nepomuceno (2019) utiliza o programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), que é o empregado atualmente pelo DNIT, para fazer uma simulação computacional de pista com características de tráfego de um trecho da BR-101. O MeDiNa apresentou dados de ATR para os materiais usados e, sendo pré-definido 9 cm para o revestimento, apresentou novas espessuras para as camadas de base e sub-base que otimizem a estrutura do pavimento. A comparação entre os ATR's obtidos para pavimento com sub-base de escória KR nos dois métodos pode ser observada na Figura 15.

Figura 15: Comparação dos valores ATR para avaliação em campo e no MeDiNa



Fonte: Nepomuceno, 2019

Pelos resultados obtidos por Nepomuceno (2019), não foram observadas mudanças significativas para a vida útil entre os valores de campo e do MeDiNa, sendo apresentado resultados satisfatórios em ambos. O dimensionamento realizado pelo MeDiNa foi contrário ao esperado, o que pode ser justificado pela falta de ensaios laboratoriais realizados no solo, no qual se usou um equivalente do banco de dados, e por isso os resultados foram insuficientes para determinação. Mesmo ocorrendo superdimensionamento no MeDiNa, os novos valores de ATR calculados para as novas estruturas não se aproximaram do limite.

6.4 Lastro Ferroviário

Em seu artigo, Canal, *et al.* (2020) estudam a viabilidade de uso de escória de aciaria e resíduo de rochas ornamentais como lastro ferroviário. Eles analisam as escórias por meio de ensaios de caracterização física, mineralógica, microestrutural, ambiental e análises de expansibilidade e condutividade. Já o resíduo de rocha ornamental tem resultados de ensaios retirados de estudos anteriores.

Os materiais utilizados por Canal*, et al.* (2020) são as escórias LD e FEA, bem como resíduos de rocha ornamental amarelo, cinza e verde. A Tabela 38 compara os resultados dos ensaios de cada material com os resultados referências pela NBR 5564 (ABNT, 2014).

Tabela 38: Caracterização física dos materiais

Ensaios	Resultados					
	Escória LD	Escória FEA	Resíduo Amarelo	Resíduo Cinza	Resíduo Verde	NBR 5564
Índice de Forma	100% Cúbica	99% Cúbica	52% Cúbica	58% Cúbica	48% Cúbica	85% Cúbica
Massa Específica Aparente	3333,05 Kg/m³	3399,19 Kg/m³	2583 Kg/m³	2537 Kg/m³	2549 Kg/m³	>2500 Kg/m³
Absorção de Água	0,86%	2,09%	0,74%	0,72%	0,57%	<0,8%
Porosidade Aparente	2,72%	6,98%	1,89%	1,82%	1,46%	<1,5%
Resistência a Intempérie	12,05%	1,59%	73,18%	32,14%	1,49%	<10%
Compressão Axial	99,70 MPa	136,25 MPa	48,86 MPa	91,68 MPa	68,39 MPa	>100 MPa
Índice Treton	8,25%	21,96%	—	—	—	<25%
Fragmentos Macios e Friáveis	0%	0,8%	—	—	—	<5%
Material Pulverulento	0%	0%	0,17%	0,10%	0,08%	<1%
Torrões de Argila	0%	0%	0%	0%	0%	<0,5%
Massa Unitária	1,52 g/cm³	1,42 g/cm³	1,25 g/cm³	1,25 g/cm³	1,25 g/cm³	>1,25 g/cm³
Abrasão Los Angeles	9,11%	21,11%	55%	50%	48%	<30%

Fonte: Adaptado de Canal, *et al.* (2020)

Os autores apontam em seu estudo que a NBR 5564 (ABNT, 2014) não foi pensada para materiais alternativos, por isso as escórias não atenderam todos quesitos da norma, como a escória LD, por exemplo, que não atende os parâmetros de absorção de água, resistência a intempérie, porosidade e compressão simples. Já a escória FEA não atende em porosidade e absorção de água. Canal, *et al.* (2020) também afirmam que a expansibilidade, condutividade elétrica e alta resistência a abrasão apresentada pelas escórias são um empecilho em seu reuso, pois geram problemas para a via.

Ao fim, Canal, *et al.* (2020) concluem que o ensaio de expansão mostrou que das três amostras estudadas, uma sem cura, uma com dois meses de cura e outra

com cinco meses de cura resultou em, respectivamente, 6,71%, 3,16% e 1,89%. A norma americana da American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), utilizada pelos autores, apresenta valor máximo admissível como 3% de expansão, logo eles concluem que com o processo de cura as escórias podem atender a norma e serem utilizadas em lastro ferroviário. Vale ressaltar que as escorias FEA apresentaram pouca ou nenhuma expansibilidade.

No que tange o ensaio de condutividade, os autores perceberam que a baixa resistividade era originada da concentração de hidróxido de cálcio na solução, que confere um aumento de condutividade ao meio. Tal problema pode ser resolvido a partir do processo de cura ou da lavagem do material, pois há a possibilidade de a escória estabilizar o meio e reduzir a sua condutividade.

7 REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Neste item serão contempladas as pesquisas voltadas a avaliação de desempenho de misturas asfálticas com incorporação de escória, podendo esta ser na fração fíler ou na fração agregado do material. Por se tratar de um material comum e de boa performance, os trabalhos que se seguem optaram por utilizar como aglomerante em seus concretos asfálticos o Cimento Asfáltico de Petróleo de penetração 50 a 70 (CAP 50/70).

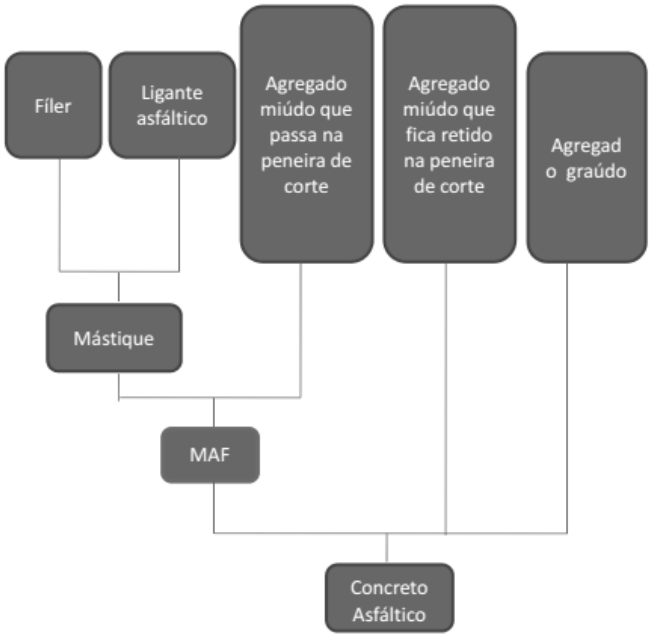
Em adição, tem-se os trabalhos de Do Nascimento (2020) e Costa (2020) que têm como proposta a utilização de diferentes tipos de escória como agregados para microrrevestimento asfáltico.

7.1.1 Fíler

A seguir, veremos os trabalhos que propõem a incorporação dos coprodutos siderúrgicos em substituição ao fíler em misturas asfálticas. O fíler em concreto asfáltico é responsável por preencher os vazios entre os agregados na mistura, o que ajuda na formação do esqueleto mineral, e influência nas propriedades do ligante, o que aumenta a viscosidade da mistura e por consequência a resistência à deformação do concreto (PINILLA 1965; *apud* FONSECA 2016).

Por escolhas dos autores, a sequência de dissertações analisadas neste item será de acordo com o fluxograma da Figura 16, indo da mistura mais simples à mais complexa. Portanto a ordem que se segue é Cosme (2015), que trabalha com mástiques, Fonseca (2016), utilizando as matrizes de agregado fino (MAF), e Gottardi (2015), que tem como objeto de estudo o concreto asfáltico. O objeto de estudo destes trabalhos foi a Escória de Aciaria Moída com Redução de Expansão, de nome comercial ACERITA®, fornecida pela ArcelorMittal.

Figura 16: Organograma das frações de misturas asfálticas



Fonte: Fonseca, 2016

Cosme (2015) disserta sobre a incorporação de fíleres de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais e escoria moída de aciaria nas misturas asfálticas, estudando os matiques produzidos com proporções fíler/betume de 0,36; 0,54 e 0,72.

Uma análise reológica é produzida pelo autor de tal forma que fosse relacionado o módulo de cisalhamento dinâmico (G*) e ângulo de fase (δ) para as frequências de trafego lento, médio e rápido, cujos valores, respectivamente, são de 0,1; 1,0 e 10 Hz. Além disso, Cosme (2015) propõe mástiques de proporção 100% com escória moída de aciaria, 100% com resíduo de beneficiamento de rocha ornamental e uma mistura com 50% de cada um dos resíduos estudados.

Figura 17: Valores de módulo cisalhamento e ângulo de fase para frequências de 0,1 1,0 e 10Hz a 40º após envelhecimento

Mástique	f/b	Módulo de cisalhamento dinâmico (G*) Pa			Ângulo de fase δ		
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
Ligante puro	0	1,16E5	5,40E5	2,27E6	67,81	62,11	55,79
EMA	0,36	2,37E5	1,51E6	6,89E6	84,21	77,67	70,11
	0,54	4,95E5	2,76E6	1,31E7	80,72	75,22	68,63
	0,72	1,57E6	6,59E6	2,43E7	62,49	59,48	56,02
RBRO	0,36	1,11E5	7,08E5	3,77E6	73,48	68,58	62,36
	0,54	1,29E5	7,74E5	3,82E6	70,03	65,60	61,25
	0,72	5,21E5	2,83E6	1,38E7	68,81	63,53	57,66
EMA/RBRO	0,36	5,44E5	3,04E6	1,33E7	70,03	64,85	58,99
	0,54	2,32E5	1,56E6	7,79E6	85,73	80,35	73,45
	0,72	2,40E5	1,69E6	6,54E6	87,44	81,71	74,11

Fonte: Adaptado de Cosme (2015)

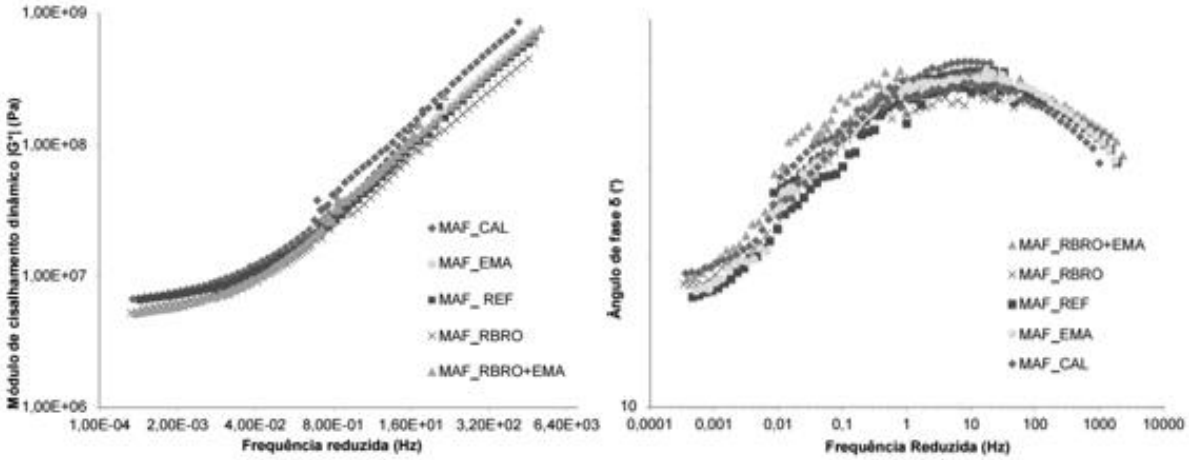
Por fim, Cosme (2015) conclui que a escória moída de aciaria proporcionou ao ligante um maior módulo de cisalhamento dinâmico, se comparado com o resíduo de rocha. Isto acontece, segundo o autor, pois a EMA contém maior presença de óxido de ferro e menor impurezas (sílica), consequentemente, o mástique teve um maior enrijecimento com EMA do que com a maior concentração de grãos finos do resíduo de rocha.

Ademais, Cosme (2015) aponta que os ensaios de fluência e recuperação demonstraram que os mástiques com escória moída de aciaria apresentaram menor susceptibilidade a deformação permanente. Tal fato é explicado, pois o aspecto anguloso dos grãos de fíleres do resíduo de escoria oferecia uma maior estabilidade ao sistema.

Utilizando os mesmos fíleres do trabalho de Cosme (2015), o trabalho de Fonseca (2016), estuda os efeitos da incorporação da escória moída de aciaria em MAF contendo brita 0, brita 1, granilha e pó de pedra na fração agregado. As misturas realizadas foram: MAF de referência sem fíler, MAF com substituição por 2% fíler calcário, MAF com substituição por 2% escória moída de aciaria, MAF com substituição por 2% resíduo de rocha ornamental (RBRO) e MAF com substituição por 1% EMA e 1% de RBRO

A dosagem do MAF utilizada por Fonseca (2016) utiliza o método desenvolvido por Coutinho (2012) onde se faz uma mistura asfáltica completa utilizando os agregados e fazendo o peneiramento da porção fina, calculando o teor de ligante necessário em cada composição. Nos traços dosados foram realizados o Ensaio de Varredura de Frequência para caracterização viscoelástica linear, o Ensaio de Fratura SCB e o Ensaio de Varredura de Tempo. Os resultados destes ensaios se encontram na Figura 18 e na Tabela 39.

Figura 18: Resultados gráficos do ensaio de Varredura de Frequência



Fonte: Adaptado de Fonseca (2016)

Tabela 39: Resultados dos ensaios de Fratura SCB e Varredura de Tempo

Parâmetro	Referência	2% Cal	2% EMA	2% RBRO	1% EMA + 1% RBRO
Teor de ligante (%)	9,68	8,89	9,19	9,53	9,19
Fratura SCB					
Volume de Vazios (%)	9,7	10	9,8	9,7	9,1
Carga Máxima (Pmáx) (N)	880,87	953,04	933,52	1157,68	1311,10
Deslocamento na carga máxima (δmáx) (mm)	4,05	2,16	2,71	3,55	3,66
Energia dissipada até atingir a carga máxima (EPmáx) (N.mm)	2224,96	1099,88	1417,46	2415,91	2888,48
Varredura de Tempo					
Coeficiente de variação da integridade (C_f)	0,27	0,30	0,24	0,28	0,29
Coeficiente de variação de dano acumulado (S_f)	9,17E+09	5,10E+09	9,67E+09	1,04E+10	1,00E+10

Fonte: Adaptado de Fonseca (2016)

Pelos resultados obtidos por Fonseca (2016), podemos observar que pela caracterização viscoelástica linear, as misturas com EMA apresentaram valores de rigidez muito próximas aos da referência, ficando abaixo apenas do traço com Cal. Já nos demais ensaios vemos que a mistura contendo 2% de EMA mostrou resultados muito baixos, se mostrando um material mais frágil que a referência. Já o traço contendo EMA+RBRO foi o que apresentou o melhor desempenho nestes ensaios, se mostrando uma composição que pode ser utilizada para melhorar as propriedades do pavimento.

Gottardi (2015) utiliza em sua dissertação os mesmos materiais para confecção de suas misturas de concreto asfáltico experimentais que os trabalhos anteriores, com a diferença de que, para os fíleres de EMA, RBRO e 50% EMA + 50% RBRO, foram confeccionadas misturas com teores de 2%, 3% e 4%. Os teores de ligante foram determinados por Dosagem *Marshall*, prevista na norma DNER-ME 43/95 (1995). Para sua caracterização mecânica se utilizou dos ensaios de Estabilidade *Marshall*, de acordo com a DNER ME 43/95 (1995), e Resistência à Tração (RT), previsto na norma DNER ME 138/94 (1994), e para avaliar a adesividade os ensaios de *Lottman* Modificado, de acordo com a DNER ME 138/94 (1994), e Desgaste Cântabro, previsto na DNER ME 383/99 (1999). Os resultados destes ensaios podem ser observados na Tabela 40.

Tabela 40: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração e Desgaste Cântabro

Traço	Teor de Ligante (%)	Estabilidade de *Marshall* (kgf)	Fluência de *Marshall* (mm)	RT (MPa)	Desgaste Cântabro (g)	
					Antes	Depois
Referência	5,49	1148	3,18	0,71	1242,38	1196,77
2% Cal	5,06	1185	3,05	0,74	1260,70	1198,73
2% RBRO	5,21	1121	2,38	0,69	1237,69	1191,70
3% RBRO	5,11	1088	2,91	0,68	1254,19	1201,37
4% RBRO	5,26	1068	2,78	0,82	1249,19	1192,59
2% EMA	5,21	1234	2,91	0,69	1247,11	1213,16
3% EMA	5,24	1172	3,04	0,71	1252,40	1212,87
4% EMA	5,30	1103	2,78	0,69	1245,86	1212,47
2% EMA+RBRO	5,17	1195	2,38	0,79	1256,79	1208,41

3% EMA+RBRO	5,01	1189	2,38	0,74	1255,81	1215,18
4% EMA+RBRO	5,02	1283	2,65	0,75	1247,27	1206,19

Fonte: Adaptado de Gottardi (2015)

Gottardi (2015) também fez uma avaliação do efeito deletério da água em que todas as amostras contendo EMA se mostraram menos susceptíveis aos danos por umidade do que as misturas contendo cal e de referência. Por estes resultados podemos concluir que os traços com EMA promovem uma maior economia de ligante que o de referência, mas apenas a composição EMA+RBRO conseguiu se equiparar ao obtido pela cal. Todas as misturas contendo escória obtiveram valores de resistência à tração e adesividade dentro dos limites impostos pelas normas do DNIT, confirmando que este material pode ser competitivo no melhoramento de concretos asfálticos.

7.1.2 Agregado

Neste item serão apresentados os trabalhos que tem como proposta a substituição de parte do agregado natural utilizado na confecção de concretos asfálticos, pelas escórias de aciaria LD e de alto-forno resfriada ao ar. Este tópico possui grande relevância ambiental, pois os agregados naturais utilizados na construção civil são bens finitos, e a área de pavimentação é uma de suas maiores consumidoras por área construída (ANEPAC, 2015).

A dissertação de Azeredo (2018) avalia o comportamento da escória LD (3% de expansão) quando empregada como agregado de concretos asfálticos do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*) contendo também incorporação de fíler natural pó de pedra (PP), de fíler escória KR moída e de fibra de celulose do tipo TOPCEL. As misturas propostas foram: uma de referência apenas com agregados naturais e 5% fíler pó de pedra; três com 30% de agregado por escória LD e 7% de fíler, sendo uma com fíler pó de pedra, uma com fíler pó de pedra e fibra e uma com fíler escória KR; e três com 50% de agregado por escória LD e 4% de fíler, também sendo uma com fíler pó de pedra, uma com fíler pó de pedra e fibra e uma com fíler escória KR.

A dosagem dos traços e os ensaios de estabilidade e fluência foram feitos através do método *Marshall*, também se realizou os ensaios de Escorrimento de Misturas Não Compactadas, previsto na norma ASTM D6390-11 (2011), Resistência

à Tração por Compressão Diametral, de acordo com a NBR 15087 (ABNT, 2012), Desgaste Cântabro e Dano por Umidade Induzida através da Resistência a Tração Retida (RRT), baseado na norma NBR 15617 (ABNT, 2015). Os resultados obtidos por Azeredo (2018) podem ser observados na Tabela 41, exceto pelo escorrimento que obteve valores insignificantes para todas as misturas.

Tabela 41: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração, Desgaste Cântabro e Dano por Umidade Induzida

Traço	Teor de Ligante (%)	Estabilidade de *Marshall* (kgf)	Fluência de *Marshall* (mm)	RT (MPa)	Desgaste por Abrasão (%)	RRT
0%LD_PP_s/fibra	5,0	1078	3,3	1,86	7,4	0,81
30%LD_PP_s/fibra	5,6	1161	5,0	1,74	10,9	0,79
30%LD_PP_c/fibra	5,8	1311	4,7	1,93	7,9	0,91
30%LD_KR_s/fibra	6,5	1250	3,0	1,96	13,0	0,88
50%LD_PP_s/fibra	6,2	1734	5,0	2,15	15,4	0,76
50%LD_PP_c/fibra	6,4	1742	4,8	2,15	13,5	0,85
50%LD_KR_s/fibra	6,2	1956	4,8	1,90	15,6	0,70

Fonte: Adaptado de Azeredo (2018)

O trabalho realizado por Azeredo (2018) conclui que, no geral, todas as misturas com escória apresentaram bom desempenho, superiores à mistura de referência em todos os ensaios, com exceção apenas do valor de RT para o traço 30%LD_PP_s/fibra. Nesse caso não se buscou a economia de ligante pois, para SMA, existe um limite mínimo de 6% a ser atingido, indicando que as três primeiras misturas da tabela não seriam adequadas, porém, este tipo de asfalto é geralmente feito com ligantes modificados, portanto, o uso de CAP pode ter afetado negativamente neste quesito. Neste trabalho também pode-se observar a possibilidade de se empregar escória KR na fração fíler, que se mostrou competitiva em relação ao pó de pedra.

A dissertação de Schumacher (2018) também avalia a substituição do agregado natural por escória LD, contudo, o objetivo principal é a comparação de amostras deste material com diferentes níveis de expansão (6,71%, 3,16% e 1,33%) verificando o quanto esta característica afeta as propriedades do concreto asfáltico. Para este trabalho foram confeccionados cinco traços, sendo um de referência apenas com agregados naturais, três com 25% de agregado de escória LD compreendendo

cada nível de expansão, e um com 50% de agregado de escória LD com expansão 3,16%.

Schumacher (2018) fez uso do Método *Marshal* para dosagem, estabilidade e fluência das misturas, assim como dos ensaios de RT e Módulo de Resiliência (MR), que é previsto pela norma do DNIT 135/2010-ME. Os resultados destes ensaios podem ser observados na Tabela 42.

Tabela 42: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração, e Módulo de Resiliência

Traço	Teor de Ligante (%)	Estabilidade de *Marshall* (kgf)	Fluência de *Marshall* (mm)	RT (MPa)	MR (MPa)
0%LD	5,14	2165	5,4	1,62	8687
25%LD (6,71%)	5,14	2335	4,4	1,59	8233
25%LD (3,16%)	5,14	2260	5,0	1,57	8551
25%LD (1,33%)	5,14	2328	4,6	1,56	7733
50%LD (3,16%)	5,90	2295	5,6	2,4	-

Fonte: Adaptado de Schumacher (2018)

Em conclusão à dissertação de Schumacher (2018), vemos que a adição de até 25% de agregado de escória LD não apresentou alteração no teor de ligante utilizado em comparação à referência. E em relação ao desempenho mecânico, podemos observar que o coproduto pode ser empregado sem perdas significativas em comparação com os agregados naturais, podendo até melhorar suas características. Vale ressalta que, através destes métodos não foi possível observar influência dos níveis diferentes de expansão da escória no concreto asfáltico.

Izoton (2020) utilizou o mesmo princípio de Schumacher (2018), comparando escórias LD de três níveis de expansão distintos (1,63%, 2,31% e 5,92%) substituindo em 25% o agregado natural em misturas asfálticas, utilizando a comparação também com um traço referência sem escória. Neste caso, o objetivo é avaliar o efeito causado pela expansão em misturas envelhecidas a curto prazo, em 2h na estufa à 145°C, e a longo prazo ao ar livre e em estufa (amostra solta e compactada).

Após o envelhecimento, as misturas confeccionadas por Izoton (2020), foram submetidas aos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, previsto na norma DNIT 136/2017-ME, e Dano por Umidade Induzida (RRT) utilizando 1 e 5

ciclos de gelo-degelo, realizado de acordo com a norma DNIT 180/2018-ME. Também foi feita uma longa análise estatística que não será discutida na presente monografia. Vemos os resultados obtidos pelos ensaios na Tabela 43, sendo RT para o grupo não-condicionado e RTc para o grupo condicionado.

Tabela 43: Resultados dos ensaios de Resistência à Tração Condicionada e Não-condicionada e de Dano por Umidade Induzida em amostras com envelhecidas por diferentes métodos

Traço	Envelhecimento	$RT_{méd}$ (MPa)	$RTc_{méd}$ (MPa)		RRT (%)	
			1 ciclo	5 ciclos	1 ciclo	5 ciclos
Amostras Envelhecidas ao Ar Livre						
0%LD	12 meses	1,58	2,18	1,06	137,97	67,09
25%LD (1,63%)		1,60	1,75	1,39	118,37	87,28
25%LD (2,31%)		1,75	1,86	1,77	106,48	101,14
25%LD (5,92%)		1,45	1,67	1,70	115,67	117,28
Amostras Envelhecidas em estufa						
0%LD	Curto	1,24	0,87	0,71	70,43	56,85
25%LD (1,63%)		1,15	1,06	0,95	92,15	82,56
25%LD (2,31%)		1,24	1,11	1,05	89,78	84,95
25%LD (5,92%)		1,31	0,97	0,88	74,23	67,35
0%LD	Longo	1,77	1,31	1,00	74,34	56,79
25%LD (1,63%)		1,49	1,31	0,92	88,14	62,89
25%LD (2,31%)		1,79	1,39	1,23	78,06	74,80
25%LD (5,92%)		1,77	1,38	1,09	78,19	61,57

Fonte: Adaptado de Izoton (2020)

Os valores atingidos pelas misturas confeccionadas por Izoton (2020), confirmam a afirmativa de Schumacher (2018) de que a substituição parcial de agregado natural por escória LD gera um incremento na resistência ao dano por umidade, sendo na maioria dos casos, observado também o aumento da resistência à tração. Novamente, o nível de expansão das escórias não mostrou afetar o desempenho do concreto asfáltico.

Como visto nos trabalhos anteriores, a escória LD tem um bom desempenho como agregado de misturas asfálticas e, na dissertação de Moura (2020) ela confirma este comportamento o comparando com outra escória, a EAFRA. Para aferir se a

escória de alto-forno resfriada ao ar também seria uma opção como agregado natural fez-se amostras com substituição de 25% do agregado natural por ambos os coprodutos, sendo que para a EAFRA foram confeccionadas mais quatro amostras de teor 25%, cada com um aditivo diferente, sendo eles a cal hidratada, o pó FGD (*Flue Gas Dessulfurization*), o pó EP (precipitador eletrostático) e o pó AN (agregado natural).

Para avaliação mecânica das misturas asfálticas, utilizou-se novamente o método de *Marshall* e os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e o Dano por Umidade Induzida. Os valores obtidos por Moura (2020) podem ser observados na Tabela 44.

Tabela 44: Resultados dos ensaios de Marshall, Resistência à Tração e Dano por Umidade Induzida

Traço	Teor do aditivo (%)	Teor de Ligante (%)	Estabilidade de *Marshall* (kgf)	RT (MPa)	RRT (%)
25% EAFRA	-	5,84	1296,19	1,16	54
25% EAFRA + Cal	1,50		1446,15	1,42	65
25% EAFRA + FGD	1,65		1321,88	1,35	58
25% EAFRA + EP	2,29		1471,53	1,37	63
25% EAFRA + AN	1,73		1086,1	1,66	52
25%LD	-	5,14	2334,67	1,59	74

Fonte: Adaptado de Moura 2020

Moura (2020) conclui que apesar do desempenho inferior em todos os testes em comparação à escória LD, a EAFRA ainda é um agregado que pode se apresentar competitivo em relação a misturas apenas com agregado natural. Foi observado também que a adição de Cal e de EP teve impacto positivo no desempenho mecânico dos traços com EAFRA. O ponto negativo para a escória de alto-forno resfriada ao ar foi no ensaio DUI onde nenhuma das amostras contendo o coproduto esteve dentro do mínimo de 70% exigido para resistir aos danos por umidade.

7.2 Microrrevestimento asfáltico com emulsão

Do Nascimento (2020) e Costa (2020) apresentam trabalhos em que empregam a escória granulada de alto forno e escória de aciaria LD em substituição a agregados naturais nas misturas de Microrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF). Do Nascimento

(2020) aplica uma substituição parcial dos agregados naturais enquanto Nascimento, uma substituição total.

Do Nascimento (2020) adota uma metodologia, do qual são utilizadas três misturas contendo 67% de agregados naturais e 33% de agregados siderúrgicos e uma mistura apenas com agregados naturais. Já Costa (2020), utiliza duas misturas compostas de agregado siderúrgico e fíler natural, cujo valores são de 16,5% de EGAF e 82,5% de escória LD e outra de 9% de EGAF e 90% de escória LD; com teor fixado de 1% para fíler. Vale ressaltar que ambos adotaram misturas com faixa granulométrica do DNIT em Faixa II (dedicada a rodovias de tráfego pesado e intenso).

Em suma, ambos autores atestam para a viabilidade técnica tanto da escória LD quanto a EGAF. Com destaque para a LD que, segundo Do Nascimento (2020), as misturas com tal escória apresentam um elevado aumento de resistência.

8 TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Neste tópico serão discutidas as dissertações que tem como proposta avaliar a utilização de coprodutos siderúrgico na fabricação de tijolos prensados maciços, como material aglomerante e agregado. Souza Filho (2005) indica que esta é uma questão não apenas ambiental, mas econômica, pois muitas casas populares ainda dependem destes materiais, portanto, baratear este produto beneficiaria a muitos.

Souza Filho (2005) se baseia na metodologia de produção para tijolos solo-cimento com as características previstas na NBR 8491 (ABNT, 1984), atual NBR 8491 (ABNT, 2012), para fabricação de tijolos contendo escória granulada de alto-forno moída como aglomerante e agregado, e EAFRA como aglomerante. Para este estudo foram confeccionados 46 traços de tijolos distintos, porém, na presente dissertação, serão contemplados apenas os traços 43 a 46, pois foram os selecionados para as avaliações de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Além das escórias, foram utilizados também resíduo de corte de rocha, cal CH I e lama de ETA como demais agregados. A composição destes traços pode ser vista na Tabela 45.

Tabela 45: Composição dos traços principais

Traço	Aglomerantes (%)		Agregados (%)					Umidade (%)
	EGAF moída	Na_2O	Corte de Rocha	Cal CH I	Lama de ETA	EGAF moída	EAFRA	
43	1,00	-	1,00	-	-	1,00	8,20	18,97
44	1,00	-	-	0,75	0,25	1,00	8,20	18,26
45	0,94	1,00	-	-	-	1,50	8,70	19,27
46	1,00	-	0,75	-	0,25	1,00	8,20	16,64

Fonte: Adaptado de Souza Filho (2005)

Souza Filho (2005) realizou a avaliação técnica dos tijolos através dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água, previstos naquele período pela norma NBR 8492 (ABNT, 1984), que atualmente equivale à NBR 8492 (ABNT, 2012), e do ensaio de perda de massa, de acordo com a NBR 13554 (ABNT, 1996), atual NBR 13554 (ABNT, 2012). Para análise ambiental foram observados o pH e os extratos solubilizados em vista dos limites impostos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004) e a análise econômica foi feita através de estimativas dos custos médios dos traços para 10 km de distância de transporte, comparando-os com os valores de

mercado encontrados em Vitória. Os principais resultados destas verificações podem ser vistos na Tabela 46.

Tabela 46: Resultados das análises técnicas, econômicas e ambientais

Traço	Compressão aos 7 dias (MPa)	Absorção (%)	Perda de Massa (%)	pH	Custo Estimado (R$)
43	11,25	17,58	0,47	10,07	0,164
44	15,38	15,90	0,59	11,91	0,203
45	12,34	16,43	0,27	10,49	0,198
46	14,50	15,63	0,17	11,41	0,164

Fonte: Adaptado de Souza Filho (2005)

Estes valores apresentados por Souza Filho (2005) mostram que quanto à avaliação técnica todos os tijolos satisfizeram os limites impostos em norma. A análise ambiental mostra que o pH está fora da zona de risco para corrosão, porém o estudo detalhado dos extratos solubilizados mostrou concentrações acima dos limites para alumínio e ferro para os traços 46 e 44, que também apresentou alto valor para manganês. Na pesquisa de preços para comparação na análise econômica, o menor valor encontrado na região foi de R$0,315 por tijolo, mostrando que todos os traços são economicamente viáveis.

Já na dissertação de Da Silva (2005), é proposto uma Análise do Ciclo de Vida (LCA), comparando os processos produtivos de tijolos prensados de solo-cimento, tijolos cerâmicos maciços e tijolos prensados de escória de alto-forno, sendo avaliados desde a extração das matérias primas até suas destinações finais. Utilizando o *SimaPro* e o método *Eco-indicator 99*, a autora demonstra o desempenho ambiental de tijolos compostos exclusivamente pela escória de alto-forno.

Por fim, após todas as considerações feitas, Da Silva (2005) pôde concluir que os tijolos prensados de escória de alto-forno apresentam performance ambiental superior aos demais, independente da perspectiva adotada. Esta comparação mostra o potencial ambiental da reutilização deste coproduto, pois ambos os tijolos de solo-cimento e cerâmico são vistos como tendo um bom desempenho ecológico, e mesmo assim, na LCA foram inferiores em todos os cenários avaliados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, neste capítulo serão realizadas as considerações finais, trazendo de forma resumida algumas das conclusões feitas pelas pesquisas analisadas. A seguir, serão apresentados em estrutura de tópicos, os resultados que foram julgados mais significativos no que diz respeito a apresentarem boas alternativas para a reutilização de coprodutos siderúrgicos.

- A aplicação de escória LD como fíler conferiu um aumento da fluidez e consequentemente da capacidade de preenchimento do CAA em comparação ao tradicional fíler calcário. Já para as propriedades mecânicas, se mostrou competitivo à cal, atingindo resistência à compressão suficiente para ser considerado de alta resistência.
- O CAA com fíler de escória de alto-forno resfriada ao ar também superou o fíler calcário no desempenho reológico (reduzindo a viscosidade e aumentando a fluidez), exceto nos casos de granulometria fina, onde se observou aumento da viscosidade. Também foi competitivo quanto à resistência à compressão.
- A incorporação do PEA em argamassa autoadensável apresentou redução da propriedade de fluidez da mistura, exigindo maior teor de aditivo. Já as propriedades de resistência mecânica apresentaram resultados significativamente superiores aos de referência.
- A escória KR se apresentou como um excelente agente estabilizante para solos de diferentes origens e classificações, rivalizando com o cimento, estabilizante tradicional. Porém, este coproduto apresentou melhor performance para solos predominantemente argilosos do que para os arenosos.
- O muro de contenção com pneus se mostrou uma excelente forma de reaproveitamento para escória do tipo LD, podendo substituir até 60% do solo utilizado e ainda apresentando resultados bem acima dos limites de segurança impostos em norma.
- Confirmando o bom desempenho como agente estabilizante de solos, a escória KR se mostra viável também quando utilizada para solos e BGTC empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos.

- Em misturas asfálticas a escória do tipo moída de aciaria apresenta boa performance quando utilizada como fíler, porém, isto só é observado quando combinando-a com resíduos de rocha ornamental em proporções iguais.
- Na substituição de agregados naturais para concretos asfálticos a escória LD apresentou ótimo desempenho, podendo ser empregada em teores de até 50% mesmo com níveis de expansão acima dos 6%. Além disso, em muitos casos foi observado aumento de propriedades do asfalto como a resistência à tração e ao dano por umidade.
- A EAFRA também obteve bons resultados em substituição ao agregado natural em concretos asfálticos, apesar de inferiores aos da escória LD. Apesar disso, necessitou de aditivos específicos para atingir performances satisfatórias.
- A incorporação de escória de alto-forno em tijolos prensados teve bom desempenho nas análises técnicas, econômicas e ambientais e se saiu melhor na análise de ciclo de vida do que os tradicionais tijolos cerâmicos e solo-cimento. Apesar disso é uma área pouco empregada, acredita-se que por este tipo de bloco estar caindo em desuso, sendo mais utilizado como alternativa para elementos estéticos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. M. D. **Utilização de Escória Produzida Em Alto-Forno A Carvão Vegetal Como Agregado Graúdo e Miúdo Para Concreto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Belém, p. 124. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E965 - 96 - Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. ASTM. Pennsylvania, p. 3. 1996.

_____. **ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. ASTM. Philadelphia. 2004.

_____. **ASTM D3080/D3080M-11 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. ASTM. Pennsylvania, p. 9. 2011.

_____. **ASTM D4648 / D4648M - 16 - Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for SaturatedFine-Grained Clayey Soil**. ASTM. Pennsylvania, p. 7. 2016.

_____. **ASTM D6390 - 11(2017) - Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures**. ASTM. Pennsylvania, p. 3. 2017.

_____. **ASTM E 303:1993 (2018) - Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. ASTM. Pennsylvania, p. 5. 2018.

ANDRADE, C. M. S. **Avaliação de Desempenho Mecânico e Microestrutural da Brita Graduada Tratada com Cimento com Incorporação de Coproduto de Aciaria KR**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 104. 2018.

ARRIBAVENE, L. F.; MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V. P. F. M. **Siderurgia Para Não Siderurgistas**. Vitória. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. (BT-106). São Paulo, p. 28. 2002.

_____. **ABNT NBR 13600:1996 - Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 2. 1996.

_____. **ABNT NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos: classificação**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 77. 2004.

_____. **ABNT NBR 13278:2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2005.

_____. **ISO 14040:2006 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 21. 2006.

_____. **ABNT NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 33. 2009.

_____. **ABNT NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2009.

_____. **ABNT NBR 13554:2012 - Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2012.

_____. **ABNT NBR 15087:2012 - Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 5. 2012.

_____. **ABNT NBR 16606:2018 - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 8. 2012.

_____. **ABNT NBR 8491:2012 - Tijolo de solo-cimento — Requisitos**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 5. 2012.

_____. **ABNT NBR 8492:2012 - Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2012.

_____. **ABNT NBR 9779:2012 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 3. 2012.

_____. **ABNT NBR 5564:2011 Versão Corrigida:2014 - Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 26. 2014.

_____. **ABNT NBR 6118:2014 Versão Corrigida:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 238. 2014.

_____. **ABNT NBR 15617:2015 - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 5. 2015.

_____. **ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 9. 2016.

_____. **ABNT NBR 6459:2016 - Solo - Determinação do limite de liquidez**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 5. 2016.

_____. **ABNT NBR 7180:2016 - Solo — Determinação do limite de plasticidade**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 3. 2016.

_____. **ABNT NBR 7181:2016 - Solo - Análise granulométrica**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 12. 2016.

_____. **ABNT NBR 7182:2016 - Solo - Ensaio de compactação**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 9. 2016.

_____. **ABNT NBR 15823-1:2017 - Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 14. 2017.

_____. **ABNT NBR 15823-2:2017 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 5. 2017.

_____. **ABNT NBR 15823-3:2017 - Concreto autoadensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

_____. **ABNT NBR 15823-5:2017 - Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

_____. **ABNT NBR 6458:2016 Versão Corrigida 2:2017 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 10. 2017.

_____. **ABNT NBR 9895:2016 Versão Corrigida:2017 - Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 14. 2017.

_____. **ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland - Requisitos**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 12. 2018.

_____. **ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

_____. **ABNT NBR 8802:2019 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 11. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Relatório Auditoria 2015**. ANEPAC. São Paulo. 2015.

AVELAR, M. G. D. **Estudo das Propriedades Reológicas do Concreto Auto-Adensável de Alta Resistência com Filler de Escória de Aciaria LD**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 238. 2008.

AZEREDO, L. D. B. **Verificação do Potencial de Uso de Resíduos Siderúrgicos Proveniente de Diferentes Etapas do Processo de Refino do Aço Como Agregados em Misturas Asfálticas do Tipo SMA**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 120. 2018.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do Fator de Expansão de Uma Escória de Aciaria em Diferentes Processos de Curo para Uso em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 93. 2001.

BATTAGIN, A. F. Uma Breve História do Cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, 2009.

BETIOLI, A. et al. Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: Isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 440-445, 2009.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da Resistência à Compressão na Carbonatação de Concretos com Diferentes Teores de Escória de Alto-Forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 170. 2004.

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Politica Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo**, Brasília, DF, 02 de Agosto de 2010.

BRASIL, E. C.; NICOLI, C. M. L.; DE OLIVEIRA, R. F. **Alternativas Tecnológicas para o Aproveitamento de Resíduos Gerados Durante o Processo de Produção de Ferro Gusa Voltadas para Utilização Agroflorestal:** Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica Título da Publicação. 1ª. ed. Belém: Embrapa, 2008.

BRIDI, L. O. **Estudo do Efeito da Estabilização com Coproduto de Dessulfuração KR Sob as Propriedades Físicas, Mecânicas e Químicas de Solos com Diferentes Teores de Finos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 141. 2020.

CANAL, R. T.; DO ROSÁRIO, C. V. S.; PIRES, P. J. M. Estudo de Viabilidade do Uso de Escória de Aciaria e Resíduo de Rochas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 23335-23352, Maio 2020. ISSN 2525-8761.

CHO, B.; CHOI, H. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 436-443, Outubro 2016.

COELHO, F. Z. **Avaliação do Ciclo de Vida Cradle-To-Gate de Traços de Concretos Autoadensáveis com Incorporação de Resíduos e Subprodutos Industriais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 175. 2016.

COSME, R. L. **Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória de Aciaria (EMA)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 114. 2015.

COSTA, F. D. **Aplicação de Coprodutos da Indústria Siderúrgica na Técnica de Microrevestimento Asfáltico a Frio em Obras de Pavimentação e Recuperação de Superfícies de Pavimentos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 107. 2020.

DA CUNHA, Y. G. **Avaliação das Propriedades Ambientais do Lixiviado de Obras Geotécnicas Melhoradas com Coprodutos Siderúrgicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 99. 2020.

DA SILVA, J. G. **Análisedo Ciclo de Vida de Tijolos Prensados de Escória de Alto-Forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 257. 2005.

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA / IPR. **DNIT 006/2003 - PRO - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 10. 2003.

DO NASCIMENTO, P. **Uso de Agregados Siderúrgicos Granulado de Alto Forno e Aciaria do Tipo LD na Produção de Microrrevestimento Asfáltico a Frio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 119. 2020.

EMERY, J. J. Pelletized Lightweight Slag Aggregate. **Proc. Concrete International**, Londres, 1980.

FERRAZ, H. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Paulo, v. 22, 2003.

FONSECA, J. F. **Efeitos do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais e Escória de Aciaria como Fíleres na Rigidez Viscoelástica Linear e Características de Fratura da Matriz de Agregados Finos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 122. 2016.

FURIERI, E. C. **Avaliação em Laboratório e Em Campo por Meio de Simulador Linear de Tráfego Móvel de Solos Estabilizados com Coproduto KR, Cimento Portland e Blindasolo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 230. 2019.

GOTTARDI, E. V. **Aproveitamento do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais e de Escória Moída de Aciaria Como Fíller em PAvimentos de Concreto Asfáltico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 134. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. IABr. Rio de Janeiro, p. 84. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS – IPR. **DNIT 113/2009 - ME - Pavimentação rodoviária – Agregado artificial –Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 12. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **DNIT 133/2010 - ME - Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 8. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS – IPR. **DNIT 134/2018-ME - Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 18. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **DNIT 135/2018 - ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 13. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **DNIT 136/2018 - ME - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **NORMA DNIT 180/2018 - ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio**. DNIT. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

ISO/TC 182 GEOTECHNICS. **ISO/TS 17892-6:2004 - Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 6: Fall cone test**. ISO. Londres, p. 8. 2004.

IZOTON, S. **Avliação dos Efeitos da Expansão de Agregados Contendo Escória de Aciaria LD no Desempenho Mecânico de Misturass Asfálticas Envelhecidas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória , p. 115. 2020.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil**. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 5. 2003.

KIRMSE, O. J. **Estudo do comportamento metalúrgico do "reator kambara" através de modelagem física.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 119. 2006.

KOVACS, T.; DOHERTY, R. Nonferrous Industry. In: SCHROEYES, W. **Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction**. Duxford: WP, 2017.

LEMOS, L. R. et al. Aumento da Eficiência de Dessulfuração do Gusa Líquido em Um Reator Kanbara. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 31-36, jan-mar 2011.

LONG, N. T. Utilization of used tyres in civil enginnering: the pneusol "tyresoil". **Environmental Geotechnics**, Rotterdam, p. 809-814, 1996.

MELLO, R. Z. **Avaliação do Ciclo de Vida de Concreto Auto Adensável: Comparação com Diferentes Teores de Adição de Escória de Alto-Forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 109. 2015.

MENEGUETE, D. S. **Estabilização "Físico-Químico" de Resíduo Sulfetado/Sulfatado com Incorporação de Escória de Dessulfuração**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 99. 2018.

MORAES, S. G. **A Capacidade de Proteção de Cobrimento de Concretos com Elevados Teores de Escória de Alto-Forno: Avaliação da Corrosão das Armaduras**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 190. 2008.

MORIAN, D.; VAM DAM, T.; PERERA, R. **Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements**. Federal Highway Administration. Washington DC. 2012.

MOTTA, A. C. P.; BUENO, I. M. **Caracterização de Solo Estabilizado com Escória KR e Verificação de Desempenho no MEDINA de Trecho Experimental da BR-101-ES Empregando Esta Solução**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 114. 2021.

MOURA, B. L. R. D. **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 (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 155. 2020.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia**. 1ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-EM 262/94 - Escórias de Aciaria para pavimentos rodoviários**. DNER. Rio de Janeiro, p. 4. 1994.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 201/94 - Solo-cimento - Compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos**. DNER. Rio de Janeiro, p. 4. 1994.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-PRO 137/94 - Coleta de amostras de água para ensaios químicos**. DNER. Rio de Janeiro, p. 3. 1994.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. DNER. Rio de Janeiro, p. 11. 1995.

MT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro**. DNER. Rio de Janeiro, p. 2. 1999.

NEPOMUCENO, D. V. **Avaliação em Campo de Estrutura de Pavimento Incorporando Solo Estabilizado com Coproduto de Aciaria KR Sujeita à Carregamento com Simulador HVS e Comparação com Previsões de Desempenho Segundo o Novo Método Brasileiro de Dimensionamento MEDINA**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 188. 2019.

O'SHAUGHNESSY, V. **Reinforcement of earth structures using scrap tires**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculty of Enginnering, University of Ottawa. Ottawa. 1997.

OLIVEIRA, C. F. **Uso de Coproduto de Dessulfuração de Reator Kambara como Agente Estabilizante de Solos para Fins de Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 108. 2018.

OLIVEIRA, F. D.; SOLLERO, L. P. **Consumo de Aço no Brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade de uso**. Banco Central do Brasil. Brasília, p. 67. 2014.

OLIVEIRA, F. U. D. **Avaliação de Três Métodos de Ensaio para Determincação do Potencial de Expansão de Escórias de Aciaria para Uso em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 144. 2006.

OLIVEIRA, J. C. P.; MEDINA, T. M. **Estudo de Concreto Autoadensável com Incorporação de Escória de Alto-Forno Resfriada ao Ar Moída**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 72. 2019.

PIMENTA, A. A. G. **Obtenção de Parâmetros para Estudo de Dimensionamento de Um Muro de Contenção com Pneus e Coproduto Siderúrgico de Aciaria**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 98. 2019.

PIMENTEL, M. G. et al. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil / Characterization of blast furnace slag from industrial waste aiming its use in construction. **Brazilian Aplied Science Review**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 895-907, mar/abr 2019.

PINHO, A. B. B. D. **Estudo da Redução do Consumo de Fundentes no Processo de Dessulfuração em Planta KR**. Monografia (Bacharel em Engenharia Mealúrgica) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 81. 2018.

PINHO, M. S. **Reestruturação Produtiva e Inserção Internacional da Siderurgia Brasileira**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2001.

POLESE, M. D. O. **Estudo da Expansibilidade e da Microestrutura de Escórias de Aciaria LD e EAF**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 292. 2007.

POLESE, M. D. O. et al. aracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 444-454, jun/jul 2006.

RAMOS, L. B. D. S. **Estudo do Ganho de Resistência e da Estabilização Química pela Adição do Coproduto KR no Melhoramento de Solos Argilosos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 161. 2018.

RAMOS, R. A. **Caracterização do Pó de Aciaria Elétrica e Estudo da Viabilidade de Processos de Aproveitamento**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2013.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo Experimental de Compactação e Expansão de Uma Escória de Aciaria LD para Uso em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 164. 2005.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 147. 2007.

RODRIGUES, J. A. **Crack Modeling of Asphalt Mixtures Using Nonlinear Viscoelastic Cohesive Zone (NVCZ) to Assess The Influence of Different Fillers in The Material's Fracture Resistance**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 96. 2018.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 118. 2002.

SCHRAMA, F.; VAN HATTUM, G.; VAN DEN BERG, B. **The Leading Hot Metal Desulfurization Methods: A Comparison Between KR, MMI and Co-injection**. Technical contribution to the 46º Seminário de Aciaria – Internacional, part of the ABM Week. Rio de Janeiro, p. 10. 2015.

SCHUMACHER, A. G. **Avaliação dos Efeitos da Expansão de Agregados Siderúrgicos nas Características do Material e no Desempenho de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 94. 2018.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia**. 1ª. ed. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém e Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

SOUZA FILHO, M. L. D. S. **A Utilização de Co-Produtos da Siderurgia e da Indústria de Beneficiamento de Rochas Ornamentais na Produção de Tijolos Prensados**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 218. 2005.

TESSARI, C. L.; COBE, R. P. **Melhoramento de Solo com Incorporação de Resíduos de Siderurgia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 102. 2015.

TONG, Z. et al. Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment. **Waste Biomass Valor**, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2016.

VARGAS, A. S. D.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). **Revista Online da ANTAC**, v. 4, n. 2, p. 7-18, 2004. ISSN 1678-8621.

VASCONCELOS, A. L. R. **Efeito da substituição parcial do agregado graúdo por escória de alto-forno nas propriedades mecânicas de concretos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Belém, p. 100. 2016.

YASERI, S. et al. The development of new empirical apparatuses for evaluation fresh properties of self-consolidating mortar: Theoretical and experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 631-648, 2018.