



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

FRANCIRENE PEREIRA BONFIM

**ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS EM MATRIZES
CIMENTÍCIAS PARA CONCRETO MASSA**

TUCURUÍ
2021

FRANCIRENE PEREIRA BONFIM

**ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS EM MATRIZES
CIMENTÍCIAS PARA CONCRETO MASSA**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Fernanda Pereira Gouveia.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436a Pereira Bonfim, Francirene.

Análise da adição de resíduos siderúrgicos em matrizes cimentícias para concreto massa / Francirene Pereira Bonfim. —2021.

104 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Fernanda Pereira Gouveia Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo

de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2021.

1. Resíduos siderúrgicos. 2. Concreto massa. 3. Barragens.
4. Adição mineral. I. Título.

CDD 620.11

FRANCIRENE PEREIRA BONFIM

**ANÁLISE DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS EM MATRIZES
CIMENTÍCIAS PARA CONCRETO MASSA**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

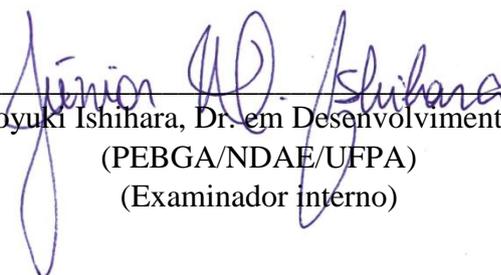
Orientador: Prof^a. Dr^a. Fernanda Pereira Gouveia.

Tucuruí, 17 de dezembro de 2021.

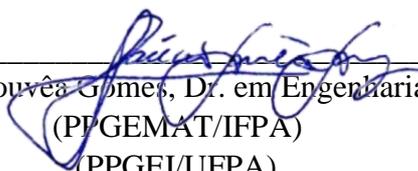
Aprovado por:



Prof^a. Fernanda Pereira Gouveia, Dr. em Estruturas e Construção Civil
(PEBGA/NDAE/UFPA)
(Orientador)



Prof. Júnior Hiroiyuki Ishihara, Dr. em Desenvolvimento Socioambiental
(PEBGA/NDAE/UFPA)
(Examinador interno)



Prof. Laércio Gouvêa Gomes, Dr. em Engenharia Mecânica
(PPGEMAT/IFPA)
(PPGEI/UFPA)
(Examinador externo)

RESUMO

Ao longo do processo de produção do aço ocorre a geração de resíduos industriais, podendo citar a escória granulada de alto-forno e o pó de balão, gerados na etapa de produção do ferro gusa; e o pó de aciaria elétrica, obtido na etapa de produção da aciaria. Na região norte, tem-se como destaque na produção do aço, a SINOBRAS - Siderúrgica Norte Brasil S.A, localizada no município de Marabá-PA que também vivencia a problemática da disposição de resíduos, e por isso vem apoiando parcerias com instituições de ensino da região para ampliação de alternativas de destinação. Desta forma, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar a influência dos resíduos da indústria SINOBRAS, escória granulada de alto-forno (EGAF), pó de balão (PB) e pó de aciaria elétrica (PAE) em matrizes cimentícias prevendo aplicações em concretos massa para barragens. A metodologia da pesquisa foi realizada em duas etapas, sendo a primeira direcionada ao estudo dos resíduos, analisando as suas características físico-químicas e mineralógicas, o potencial de pozolanicidade de acordo com a ABNT NBR 12653:2015, e classificação quanto ao tipo de resíduo sólido conforme ABNT NBR 10004:2004. A segunda etapa da metodologia compreendeu a análise de matrizes cimentícias compostas pelos resíduos, combinados com EGAF (EGAF70+PB30; EGAF50+PAE50), visando elevar o potencial de desempenho das propriedades verificadas para concretos massa, sendo realizados os ensaios de resistência à compressão, tempos de pega, calor de hidratação e reação álcali-agregado. Concluiu-se na etapa de estudo dos resíduos que o PB e PAE, não apresentaram propriedades pozolânicas, indicando não serem interessantes para aplicações de materiais cimentícios. Quanto à classificação, a EGAF e o PB foram classificados como resíduos classe IIA - não perigosos e não inertes, enquanto que o PAE se enquadrou na classe I – perigosos. Na segunda etapa do estudo, o PAE combinado com a EGAF apresentou pozolanicidade e o PB, mesmo após combinação, permaneceu não pozolânico. Avaliando as matrizes cimentícias combinadas, a (EGAF50+PAE50) obteve resultado satisfatório em todas as propriedades, uma vez que promoveu redução de calor de hidratação em 7% e conseqüentemente, aumento nos tempos de pega (cerca de 6 horas), e mitigação das reações de expansão. Logo, a utilização da matriz EGAF50+PAE50, no teor estudado, pode ser uma alternativa tecnicamente viável para aplicações em concreto massa para barragens, sendo necessário, porém, avançar nas pesquisas, visando produzir os traços do concreto compostos pela matriz combinada (EGAF50+PAE50).

Palavras chave: Resíduos siderúrgicos. Concreto massa. Barragens. Adição mineral.

ABSTRACT

During the steel production process, industrial waste is generated, including granulated blast furnace slag and balloon powder, generated in the pig iron production stage; and electric arc furnace dust, obtained in the production stage of the steelworks. In the northern region, the highlight in steel production is SINOBRAS - Siderúrgica Norte Brasil SA, located in the municipality of Marabá-PA, which also experiences the problem of waste disposal, and therefore has been supporting partnerships with educational institutions in the region for expansion of destination alternatives. Thus, this research aims to evaluate the influence of waste from the SINOBRAS industry, granulated blast furnace slag (GBFS), balloon powder (BP) and electric arc furnace dust (EAFD) in cementitious matrices, predicting applications in mass concrete for dams . The research methodology was carried out in two stages, the first being directed towards the study of waste, analyzing its physicochemical and mineralogical characteristics, the pozzolanicity potential according to ABNT NBR 12653:2015, and classification according to the type of solid waste according to ABNT NBR 10004:2004. The second stage of the methodology comprised the analysis of cement matrices composed of the residues, combined with GBFS (GBFS70+BP30; GBFS50+EAFD50), in order to increase the potential performance of the properties verified for mass concrete, with compressive strength tests being carried out, setting times, heat of hydration and alkali-aggregate reaction. It was concluded in the residue study stage that BP and EAFD did not present pozzolanic properties, indicating that they are not interesting for applications of cementitious materials. As for the classification, the GBFS and the BP were classified as class IIA waste - non-hazardous and non-inert, while the EAFD was classified as class I - hazardous. In the second stage of the study, the EAFD combined with the GBFS showed pozzolanicity and the BP, even after combination, remained non-pozzolanic. Evaluating the combined cementitious matrices, the (GBFS50+EAFD50) obtained satisfactory results in all properties, since it promoted a reduction of heat of hydration by 7% and, consequently, an increase in setting times (about 6 hours), and mitigation of expansion reactions, in aggregates gravel and sand by 49%. and 75% respectively. Therefore, the use of the matrix GBFS50+EAFD50, in the studied content, can be a technically viable alternative for applications in mass concrete for dams, being necessary, however, to advance in the research, aiming to produce the concrete traces composed by the matrix combined (GBFS50+EAFD50).

Keywords: Steel waste. Mass concrete. Dams. Mineral addition.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fatores relevantes no calor de hidratação do cimento para concretos massa. | 24 |
| Figura 2 - Ensaio do calor de hidratação pelo método da Garrafa de <i>Langavant</i> | 26 |
| Figura 3 - Gráfico caracterizado pelas curvas de calor de hidratação. | 27 |
| Figura 4 - Calorímetro adiabático de concreto. | 28 |
| Figura 5 - Curvas de elevação adiabática. | 28 |
| Figura 6 - Reação álcali-agregado em viga e laje de uma barragem. | 30 |
| Figura 7 – Corpos de prova imersos em banho de solução de hidróxido de sódio. | 31 |
| Figura 8 - Curva de expansão de reação álcali-agregado. | 31 |
| Figura 9 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem. | 32 |
| Figura 10 – Caracterização e classificação de resíduos sólidos. | 34 |
| Figura 11 - Fluxo do processo na SINOBRAS. | 35 |
| Figura 12 - Fluxograma do processo de fabricação no Alto-Forno. | 38 |
| Figura 13 - Fluxograma do processo de produção da Aciaria. | 40 |
| Figura 14 - Fluxograma do programa experimental. | 48 |
| Figura 15 – Agregados: a) pedrisco; b) areia natural e c) areia normal padrão IPT. | 49 |
| Figura 16 – Resíduos: a) EGAF <i>in natura</i> e após beneficiamento; b) PB <i>in natura</i> e após beneficiamento e; c) PAE <i>in natura</i> | 51 |
| Figura 17 - Difratoograma da EGAF com a identificação qualitativa de fases. | 57 |
| Figura 18 – Difratoograma do PB com a identificação qualitativa de fases. | 57 |
| Figura 19 – Difratoograma do PAE com a identificação qualitativa de fases. | 58 |
| Figura 20 - Classificação dos resíduos da pesquisa. | 58 |
| Figura 21 – Ensaio de compressão axial do cimento. | 66 |
| Figura 22 - a) Início tempo de pega; b) Fim tempo de pega. | 67 |
| Figura 23 - Equipamento de banho térmico para ensaio de RAA. | 68 |
| Figura 24 - a) Barras após a desmoldagem e b) Barras no banho-termorregulador; c) Etapa de medição da variação linear da barra. | 68 |
| Figura 25 - Etapas de execução do ensaio de calor de hidratação. | 70 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Composição granulométrica da EGAF, PB e PB..... | 54 |
| Gráfico 2 - Resistência à compressão axial média e desvio padrão. | 72 |
| Gráfico 3 - Expansões das matrizes cimentícia com e sem resíduos, na presença de brita..... | 74 |
| Gráfico 4 - Expansões das matrizes cimentícia com e sem resíduos, na presença de areia. | 75 |
| Gráfico 5 – Temperaturas de hidratação do CP II F + combinações..... | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Quantitativo de materiais utilizados na produção do ferro gusa. | 35 |
| Tabela 2 - Quantitativo dos resíduos gerados no Alto-forno..... | 36 |
| Tabela 3 - Relação entre a produção e consumo de matérias primas. | 39 |
| Tabela 4 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos. | 53 |
| Tabela 5 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos. | 53 |
| Tabela 6 - Composição química dos resíduos. | 55 |
| Tabela 7 - Resultados da caracterização dos resíduos quanto à pozolanicidade. | 60 |
| Tabela 8– Requisitos da EGAF e PB; e valores dos requisitos após combinação. | 63 |
| Tabela 9 - Requisitos da EGAF e PAE; e valores dos requisitos após combinação. | 63 |
| Tabela 10 - Análise da combinação de EGAF e PB com o cimento CII F. | 64 |
| Tabela 11 - Análise da combinação de EGAF e PAE com o cimento CII F. | 64 |
| Tabela 12 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos. | 65 |
| Tabela 13 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos. | 65 |
| Tabela 14 - Materiais utilizados no preparo das pastas de cimento para tempos de pega..... | 67 |
| Tabela 15 - Quantidade dos materiais utilizados no ensaio de calor de hidratação. | 70 |
| Tabela 16 – Verificação dos teores combinados, quanto à pozolanicidade. | 71 |
| Tabela 17 - Resultados dos ensaios de tempo de pega. | 73 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1-Principais compostos do cimento Portland. | 18 |
| Quadro 2 - Tipos de adições minerais e suas características..... | 19 |
| Quadro 3 - Produtos fabricados pela SINOBRAS. | 35 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1. Justificativa | 13 |
| 1.2 Objetivos..... | 15 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 15 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| | |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 Concreto massa | 16 |
| 2.1.1 Composição do concreto massa..... | 17 |
| 2.1.1.1 Cimento | 17 |
| 2.1.1.2 Adições minerais comumente aplicadas em concreto massa | 19 |
| 2.1.1.3 Agregados..... | 22 |
| 2.2 Propriedades requeridas para o concreto massa..... | 23 |
| 2.2.1 Calor de hidratação do cimento | 23 |
| 2.2.1.1 Elevação adiabática da temperatura do concreto..... | 27 |
| 2.2.2 Tempos de Pega..... | 29 |
| 2.2.3 Reação Álcali-agregado - RAA..... | 29 |
| 2.3. Resíduos sólidos | 32 |
| 2.4 Processo de produção do aço na siderúrgica Sinobras | 34 |
| 2.4.1 Processo de Produção Alto-forno | 36 |
| 2.4.2 Processo de produção Aciaria | 38 |
| 2.5 Pesquisas desenvolvidas com resíduos siderúrgicos | 41 |
| 2.5.1 Pesquisas com escória granulada de alto-forno..... | 41 |
| 2.5.2 Pesquisas com a escória de aciaria | 42 |
| 2.5.3 Pesquisas com o pó de balão | 44 |
| 2.5.4 Pesquisas com o pó de aciaria elétrica..... | 45 |
| 2.5.5 Pesquisas com lammas | 46 |
| 2.5.6 Pesquisas com a carepa..... | 47 |
| | |
| 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 48 |
| 3.1. Etapa 1 – estudo dos resíduos..... | 49 |
| 3.1.1 Materiais | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.1.1 Cimento | 49 |
| 3.1.1.2 Agregados | 49 |
| 3.1.1.3 Água | 50 |
| 3.1.1.4 Resíduos da indústria siderúrgica | 50 |
| 3.1.1.5 Aditivo químico | 50 |
| 3.1.2 Métodos | 50 |
| 3.1.2.1 Preparação e beneficiamento dos resíduos | 50 |
| 3.1.2.2 Caracterização físico-química dos resíduos | 51 |
| 3.1.2.2.1 Análise granulométrica | 51 |
| 3.1.2.2.2 Densidade | 51 |
| 3.1.2.2.3 Composição química | 52 |
| 3.1.2.3 Composição mineralógica | 52 |
| 3.1.2.4 Classificação dos resíduos quanto à periculosidade | 52 |
| 3.1.2.5 Caracterização dos resíduos quanto à pozolanicidade | 52 |
| 3.2 Apresentação e discussão dos resultados da etapa 1 | 53 |
| 3.2.1 Caracterização físico-química dos resíduos | 53 |
| 3.2.1.1 Granulometria, densidade e composição química dos resíduos | 53 |
| 3.2.2 Caracterização mineralógica dos resíduos | 56 |
| 3.2.3 Classificação quanto aos resíduos sólidos | 58 |
| 3.2.4 Caracterização das resíduos quanto à pozolanicidade | 60 |
| 3.3 Conclusões da etapa 1 | 61 |
| 3.4 Etapa 2 – estudo das matrizes cimentícias combinadas | 62 |
| 3.4.1 Definição dos teores dos resíduos combinados | 62 |
| 3.4.2 Análise dos teores dos resíduos combinados, quanto à pozolanicidade | 65 |
| 3.4.3 Análise das propriedades das matrizes cimentícias combinadas | 65 |
| 3.4.3.1 Resistência á compressão axial do cimento | 66 |
| 3.4.3.2 Tempos de pega da pasta de cimento | 66 |
| 3.4.3.3 Reação Álcali-Agregado (RAA) | 67 |
| 3.4.3.4 Calor de hidratação do cimento | 69 |
| 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS - ETAPA 2 | 71 |
| 4.1 Análise dos teores dos resíduos combinados, quanto à pozolanicidade | 71 |
| 4.2 Análise das propriedades das matrizes cimentícias combinadas | 72 |
| 4.2.1 Resistência à compressão | 72 |
| 4.2.2 Tempos de pega | 73 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3 Reação Álcali-Agregado (RAA) | 74 |
| 4.2.4 Calor de Hidratação | 76 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 78 |
| REFERÊNCIAS | 80 |
| APÊNDICES | 91 |
| APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO DO PB SEGUNDO A CORROSIVIDADE E REATIVIDADE..... | 91 |
| APÊNDICE C - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) DO PB..... | 92 |
| APÊNDICE D - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROSORGÂNICOS) DO PB..... | 92 |
| APÊNDICE E - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO DO PB..... | 93 |
| APÊNDICE F - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (CROMATOGRAFIA) DO PB..... | 94 |
| APÊNDICE G - CLASSIFICAÇÃO DO PAE SEGUNDO CORROSIVIDADE E REATIVIDADE..... | 95 |
| APÊNDICE H - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO DO PAE..... | 95 |
| APÊNDICE I - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) DO PAE..... | 96 |
| APÊNDICE J - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROSORGÂNICOS) DO PAE..... | 96 |
| APÊNDICE K - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO DO PAE..... | 97 |
| APÊNDICE L - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS(CROMATOGRAFIA) DO PAE..... | 98 |
| ANEXOS | 99 |
| ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DA EGAF SEGUNDO CORROSIVIDADE E REATIVIDADE..... | 99 |
| ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO DA EGAF..... | 99 |
| ANEXO C - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) EGAF..... | 100 |
| ANEXO D - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROSORGÂNICOS) EGAF..... | 101 |
| ANEXO E - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO EGAF..... | 102 |
| ANEXO F - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS(CROMATOGRAFIA) EGAF..... | 103 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de concreto massa está intimamente relacionada com estruturas de grande volume, como o concreto de barragem, e consiste em uma massa seca de cimento e de agregados com baixa umidade o que requer a tomada de precauções que evitem fissurações derivadas de seu comportamento térmico.

Os resíduos industriais causam impactos ambientais significativos, pois nele estão incluídos produtos químicos e metais que, se forem dispostos de forma inadequada, causarão alterações importantes no meio ambiente. A reutilização destes resíduos pode ajudar a reduzir os custos e prejuízos ambientais relativos ao tratamento e/ou disposição final desses resíduos (VIMIEIRO; LIAL, 2021).

No contexto da indústria siderúrgica, ocorre a geração de resíduos durante as etapas de fabricação do aço, podendo citar: a escória granulada de alto-forno e o pó de balão, gerados na etapa de produção do ferro gusa; e o pó de aciaria elétrica, na etapa de produção da aciaria (AÇO BRASIL, 2021). Na região norte, tem-se como destaque na produção do aço, a SINOBRAS - Siderúrgica Norte Brasil S.A, localizada no município de Marabá, estado do Pará, que também vivencia o contexto da disposição de resíduos, e por isso vem apoiando parcerias com instituições de ensino da região para ampliação de alternativas de destinação.

De acordo com o Memorial Descritivo da SINOBRAS (2020) a empresa possui capacidade produtiva de 380 mil toneladas de aço por ano, oferecendo produtos voltados para a indústria da construção civil, comercializados em todo o país. Nesta planta de produção são registrados os seguintes dados de geração de resíduos, a cada tonelada de aço produzido: 200 kg de EGAF por tonelada de ferro fusa; 35 kg de PB por tonelada de ferro gusa; e 20 kg de PAE por tonelada de aço.

A escória granulada de alto-forno (EGAF), devido as suas características cimentantes e/ou pozolânicas, já apresenta destinação consolidada no mercado da indústria cimentícia, de acordo com Mehta e Monteiro (2014); Neville (2016), com pequenas aplicações em outras áreas; bases e sub-bases de rodovias, corretivos de solo e metálicos para utilização interna (SINOBRAS, 2020). O pó de balão (PB) é reutilizado em sua maior parte no próprio processo de sinterização do aço, enquanto que o pó de aciaria elétrica (PAE) ainda não possui uma destinação comprovada cientificamente, sendo realizado pela empresa a codisposição, e esporadicamente o envio do mesmo para fabricação de elementos construtivos (SINOBRAS, 2020).

Destaca-se que a utilização de adições minerais advindas de diversos processos industriais, tais como, produção do silício metálico, carvão mineral e aço, é uma prática bem difundida na indústria cimenteira (RIBEIRO *et al.*, 2021; OLIVEIRA, DOS SANTOS e DE OLIVEIRA, 2021; BUŠATLIĆ *et al.*, 2019; ADORNO, 2017) , porém pesquisas visando o uso de PAE e PB, foram insuficientemente desenvolvidas , tornando-se oportuno uma maior investigação da viabilidade destes materiais em aplicações envolvendo grande demanda de concreto, ou seja, obras de concreto massa.

As barragens de concreto são o exemplo mais visível de aplicações de concreto massa, sendo necessário atentar para alguns cuidados com esse tipo de construção, que segundo Bušatlić *et al.*, (2019) se referem, ao controle de calor de hidratação do cimento e a não utilização de materiais expansivos (MOREIRA, 2021). Para tanto, a utilização de adições provenientes de resíduos industriais, substituindo parcialmente o cimento, auxilia na redução do calor de hidratação do cimento e na inibição de reações expansivas (RAA), evitando assim manifestações patológicas do tipo fissuras nas estruturas de concreto (GAMBALE, 2017).

Desta forma, a presente pesquisa pretende analisar a viabilidade do uso dos resíduos siderúrgicos da SINOBRAS (EGAF, PB e PAE) como adições minerais em matrizes cimentícias, na expectativa de que as adições possam atuar favorecendo a redução do calor de hidratação e inibição das reações de expansão em concretos de obras de grande volume.

1.1. Justificativa

As atividades industriais geram resíduos sólidos que precisam ser gerenciados adequadamente para evitar ou reduzir possíveis impactos ambientais que podem ser inclusive, de classe perigosa e não inertes, o que oferece maior risco ao meio ambiente e à saúde humana. No Brasil, esta preocupação é percebida quando nos deparamos com a Lei nº. 12.305 (BRASIL, 2010) da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que aborda, dentre outros aspectos, recomendações sobre a redução e à reutilização dos resíduos sólidos.

Adentrando nas informações referentes à siderúrgica, estudo de caso, a mesma apresenta ao longo do seu processo de produção, constante disposição de resíduos industriais, cujo montante, conforme o último relatório (SINOBRAS, 2020), soma um total de cerca de 25.750 toneladas de EGAF, 6.300 toneladas de PB e 5.700 toneladas de PAE anualmente). Pelo aspecto da classificação dos resíduos, a partir dos critérios da ABNT NBR 10004:2004, Lobato (2014) verificou que o PAE e PB, são resíduos do tipo perigosos, tendo como constituintes nocivos, o cromo hexavalente, o chumbo e o cádmio.

O chumbo é uma substância capaz de persistir no solo e no fundo de rios durante várias décadas. Os principais efeitos deletérios do chumbo são no sistema nervoso e nos rins, em casos mais graves, os danos cerebrais e renais podem levar à morte. O cádmio em contato com o corpo humano prejudica órgãos como rins, fígado e pulmão, podendo ter ocorrência de câncer, também afeta o metabolismo e o sistema cardiovascular (BRASIL, 2021).

Para que estes materiais possam ser descartados no meio ambiente é necessário realizar o procedimento de estabilização de seus componentes. Algumas técnicas tal como a estabilização de materiais pesados em matrizes cimentícias foram estudadas e se mostraram eficientes na neutralização desses componentes (PAULA, 2013; CUBUKCUOGLU & OUKI, 2012).

No contexto das estruturas de concreto massa, o consumo de cimento é um importante fator que deve ser levado em consideração na especificação dos traços, pois com um aumento do consumo deste aglomerante, ocorre o aumento no calor de hidratação, o que pode ocasionar fissuras que tendem a diminuir a durabilidade do concreto, já que permitem a entrada de agentes agressivos com mais facilidade (GAMBALE, 2017).

A reação álcali-agregado (RAA) em concretos massa, também é uma grande preocupação, pois essa reação depende e é influenciada por vários fatores e podem gerar expansão, fissuração, exsudação de gel e pipocamentos (pop-out) no concreto. (FIGUEIRA *et al.*, 2019). Analisando estruturas tais como barragens de concreto, Zhenhong *et al.*, (2018) afirmam que é fundamental evitar estes tipos de ocorrência, pois uma vez a segurança da estrutura comprometida, qualquer intervenção se torna mais complexa, justificando a relevância de ações preventivas desde a etapa de projeto de dosagem.

Diante disso, na área de dosagem de concretos passou a ser considerada de forma corrente, a utilização de adições minerais (sílica ativa, escória de granulada alto-forno e a cinza volante) na substituição dos cimentos, uma vez que o efeito destes materiais, segundo Rostami e Behfarnia (2017); Saha *et al.*, (2018), e Fraga *et al.*, (2020), implica na diminuição do consumo de cimento no traço e conseqüentemente na redução de calor de hidratação e, combate expansões devido à reação álcali-sílica.

A utilização dos resíduos siderúrgicos em aplicações de concreto já foi proposta e aplicada por diversos autores, podendo destacar conclusões importantes para motivar a presente pesquisa, a saber:

Vargas, Massuero e Vilela (2004) que ao analisarem o calor de hidratação de matrizes cimentícia com adição de PAE, em diferentes teores constataram uma liberação de

calor de hidratação mais lenta. Este resultado trata-se de um aspecto interessante para aplicações de matrizes de cimento que compõem o concreto massa.

Maslehuddin *et al.*, (2010) que substituiriam o cimento por PAE na produção de concreto, verificando que a adição deste material elevou a trabalhabilidade e a consistência, e melhorou a permeabilidade dos concretos, pois o PAE é constituído de partículas muito finas que provocam o efeito *filler*, preenchendo os vazios e conseqüentemente proporcionando maior durabilidade ao concreto ou argamassa.

Por tudo que foi exposto, tem-se a justificativa da elaboração de matrizes cimentícias compostas pelos resíduos da SINOBRAS (EGAF, PB e PAE), sendo desejável obter matrizes que atendam às propriedades de concreto massa. Ainda, a escolha do reaproveitamento dos resíduos em concretos de grande volume, está relacionada com a tentativa de escalonamento de consumo, aliando destinação em grande escala com redução da disposição dos resíduos no pátio da indústria estudo de caso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Análise da viabilidade dos resíduos siderúrgicos oriundos da indústria SINOBRAS como adições minerais em matrizes cimentícias, visando aplicação em concreto massa.

1.2.2 Objetivos específicos

Analisar as características físico-químicas e mineralógicas dos resíduos de Escória granulada de alto forno (EGAF), Pó de Balão (PB) e Pó de Aciaria Elétrica (PAE);

Análise da pozolanicidade dos resíduos de Escória granulada de alto forno (EGAF), Pó de Balão (PB) e Pó de Aciaria Elétrica (PAE), quanto à ABNT 12653:2015;

Análise da classificação dos resíduos PB e PAE, quanto à ABNT NBR 10004:2004;

Analisar matrizes cimentícias compostas por resíduos PB e PAE, combinados com Escória Granulada de Alto-forno (EGAF), quanto às propriedades de concretos massa (resistência à compressão, tempo de pega, calor de hidratação, reação álcali- agregado – RAA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto massa

O concreto massa é definido como um amplo volume de concreto que apresenta dimensões grandes o suficiente para exigir que algumas medidas sejam tomadas para reduzir a temperatura interna dessa estrutura, ou melhor, para reduzir o gradiente térmico entre as partes interna e externa do concreto (American Concrete Institute – ACI 116R, 2005).

De 1930 a 1970 houve um grande desenvolvimento na construção de barragens em concreto massa. Em 1930 foi organizado o ACI 207 que trata das informações e propriedades do concreto massa. A construção da HooverDam nos EUA nessa época, contribuiu para a evolução, devido ao seu tamanho, exigiu uma análise mais minuciosa dos materiais e técnicas construtivas, além de terem sido instalados tubos de pós-resfriamento do concreto (ACI 207.1R, 2005).

As propriedades em função da idade do concreto, módulo de elasticidade e fluência, devem ser consideradas nos cálculos das tensões térmicas do concreto massa. Existem várias funções de fluência, entre elas podemos citar os métodos do ACI, do European Committee for Concrete - CEB, do United States Department of the Interior Bureau of Reclamation - USBR e o Bazant-Panula.

O principal questionamento que surge na construção de estruturas de concreto massa é se irão ou não fissurar. Diferentemente do concreto convencional, não existe uma norma brasileira que sintetize as etapas de cálculo, construção e verificação dos esforços quanto a sua capacidade resistiva para essas estruturas. As construções são feitas com base em experiências profissionais e normas de outros países (COELHO, 2016).

As estruturas de concreto massa, com grande volume de concreto, requerem uma atenção especial por parte dos pesquisadores e construtores devido a característica de produzir calor internamente, o qual é chamado de calor de hidratação. O calor gerado internamente pode atingir temperaturas bastante elevadas, gerando gradientes térmicos, que dependendo das proporções tenciona o concreto levando ao aparecimento de fissuras (KUPERMAM & CARDIA, 2015).

Segundo Maken *et al.* (2014) grandes estruturas de concreto, tais como barragens, blocos de fundação e lajes de pontes, podem estar sujeitas a fissurações em idades precoces devido às tensões térmicas e a indução da retração autógena. Do ponto de vista da engenharia,

estas tensões podem ser minimizadas com algumas medidas preventivas que tentam reduzir os efeitos térmicos na reação de hidratação dos materiais cimentícios.

Dentre as utilizações do concreto massa destacam-se as barragens, blocos de fundação e as fundações para torres de energia eólica, que geralmente utilizam esse material. No nordeste do Brasil, a implementação de torres eólicas já é uma realidade e nos centros urbanos é muito comum a utilização de blocos de fundação de grandes edifícios (COELHO, 2016).

2.1.1 Composição do concreto massa

O concreto massa é composto por cimento, agregado, água e adições minerais, semelhantemente ao concreto convencional. Porém, o que o diferencia são suas características específicas, que de acordo com Aguiar *et al.* (2020), no concreto massa o consumo de cimento é reduzido e utilizam-se agregados de grandes dimensões (diâmetro máximo de até 152 mm ou 100 mm).

2.1.1.1 Cimento

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido a partir do clínquer triturado, com a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio, geralmente gipsita.

As propriedades do cimento são influenciadas pelo proporcionamento dos compostos no clínquer, pelo uso de adições e pela sua finura. O mercado nacional dispõe atualmente de dez tipos básicos de cimento Portland, como se pode observar na Tabela 1, em que são apresentados os tipos de cimentos com suas respectivas nomenclaturas e os percentuais de seus constituintes (em massa) especificados nas normas brasileiras.

Tabela 1 - Tipos de cimento.

| Tipo de Cimento Portland | Sigla | Composição em massa (%) | | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material pozolânico | Material carbonático |
| Comum | CP I | 95 - 100 | | 0 - 5 | |
| | CP I-S | 90 - 94 | 0 | 0 | 6 - 10 |
| Composto | CP II-E | 51 - 94 | 6 - 34 | 0 | 0 - 15 |
| | CP II-Z | 71 - 94 | 0 | 6 - 14 | 0 - 15 |
| | CP II-F | 75 - 89 | 0 | 0 | 11 - 25 |
| Alto-forno | CP III | 25 - 65 | 35 - 75 | 0 | 0 - 10 |
| Pozolânico | CP IV | 45 - 85 | 0 | 15 - 50 | 0 - 10 |
| Alta resistência inicial | CP V | 90 - 100 | 0 | 0 | 0 - 10 |
| Branco | CPB estrutural | 75 - 100 | - | - | 0 - 25 |
| | CPB não estrutural | 50 - 74 | - | - | 26 - 50 |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697, (2018).

Segundo Neville (2016), quatro compostos são destacados como os principais constituintes do cimento, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1-Principais compostos do cimento Portland.

| Nome do composto | Composição em óxidos | Abreviatura |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C_3S |
| Silicato dicálcico | $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C_2S |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Ferroaluminato tetracálcico | $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Fonte: Neville, 2016.

Os silicatos C_3S e C_2S são os compostos mais importantes, pois são os responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. A presença de C_3A no cimento é indesejável, pois ele contribui pouco ou praticamente nada para a resistência do cimento, exceto nas primeiras idades (METHA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, ocorre a formação da entrigita (sulfoaluminato de cálcio) que pode causar a desagregação do concreto, mas o C_3A facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica. O C_4AF não afeta significativamente o comportamento do cimento, mas ele reage com a gipsita e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2016).

Na presença de água, os silicatos e aluminatos do cimento formam compostos que com o tempo produzem uma massa sólida e resistente. A hidratação dos minerais de cimento C_3S (3CaO SiO_2), C_2S (2CaOSiO_2), C_3A ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) e C_4AF ($4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$) é um processo químico exotérmico. Segundo Neville (2013), cerca de metade do calor total gerado pelo cimento Portland é liberado entre 1 e 3 dias, cerca de $\frac{3}{4}$ em 7 dias e aproximadamente 90% em 6 meses, sendo que isto depende da composição química do cimento.

Para reduzir a temperatura máxima nas estruturas em concreto massa é recomendado escolher um cimento Portland com uma composição química que resulte em um despreendimento lento de calor (COELHO, 2016).

Para tanto, deve-se fazer uso de cimentos com adições que reajam mais lentamente, são eles: CP III, que possui adição de escória, e CP IV, com adição pozolânica. Esses cimentos possuem um menor teor de C_3S e C_3A , que são os compostos que se hidratam mais rapidamente. Em contrapartida, possuem uma evolução mais lenta da resistência à compressão (SALUM, 2016).

O C_3S , também chamado de Alita, é responsável pela resistência mecânica dos cimentos nas primeiras idades, possuindo uma velocidade de reação média e médio

desenvolvimento de calor de hidratação. O C_2S , também chamado de Belita, é responsável pela resistência mecânica dos cimentos nas idades avançadas, possuindo uma velocidade de reação lenta e pequeno desenvolvimento de calor de hidratação. O C_3A possui moderada resistência mecânica, porém possui reação rápida e libera grande quantidade de calor de hidratação, sendo responsável pela retração do cimento. O C_4AF possui baixa resistência mecânica, rápida reação e libera pequena quantidade de calor de hidratação (MAZER, 2017).

Os silicatos formam o Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), o mais importante componente da pasta de cimento hidratada. Os aluminatos são responsáveis pela pega e endurecimento da pasta (NEVILLE, 2016).

2.1.1.2 Adições minerais comumente aplicadas em concreto massa

Existem diversas adições minerais utilizadas atualmente na construção civil. Estas adições são resíduos provenientes de setores industriais, materiais que possivelmente seriam descartados em locais impróprios, em grande quantidade, gerando riscos de contaminação do solo e fontes de água potável (DAL MOLIN, 2011).

De acordo com Silva (2016) as adições minerais podem ser divididas em três categorias: materiais cimentícios, como a escória granulada de alto-forno; materiais não reativos, como o filler calcário; e materiais pozolânicos, como a cinza volante e a sílica ativa. Em resumo, tem-se o Quadro 2 com o detalhamento dos conceitos de cada categoria.

Quadro 2 - Tipos de adições minerais e suas características.

| Tipo de adição | Características |
|------------------------|--|
| Materiais cimentícios | São capazes de formar produtos cimentantes sem a necessidade do hidróxido de cálcio. Sua auto hidratação é lenta, porém quando usado com o cimento Portland, sua hidratação é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita. |
| Materiais pozolânicos | Materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente divididos e na presença de umidade e hidróxido de cálcio, reagem quimicamente e formam compostos com propriedades cimentantes. |
| Materiais não reativos | Praticamente inertes na mistura e possuem dimensão similar ao do cimento ou menor. Tem ação predominantemente física e devem ser fisicamente compatíveis com o cimento. |

Fonte: Silva (2016).

A seguir serão apresentadas as adições minerais mais utilizadas em traços de concreto, destacando as suas características e efeitos nas propriedades do material (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

a) Escória granulada de alto-forno

A escória granulada de alto-forno é definida pela ABNT NBR 16697:2018 como sendo o subproduto do tratamento do minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminosilicatos de cálcio.

Devido ao seu modo de obtenção, a EGAF incorporada ao concreto melhora o desempenho em algumas propriedades como: alta resistência mecânica; baixa permeabilidade; alta densidade; e altas resistências à penetração de íons cloreto, ao ataque de sulfatos e à corrosão do aço de reforço (SAHA *et al.*, 2018).

A escória granulada de alto-forno possui eficácia na mitigação da expansão por reação álcali-sílica o que caracteriza ação pozolânica. Nota-se que, ainda que a escória seja classificada como um material cimentante (ou hidráulico latente), e não puramente pozolânico, os mecanismos expostos na literatura para o controle da RAS são similares aos expostos para as cinzas volantes (SCOTT; ALEXANDER, 2016).

A EGAF como adição mineral utilizada na busca da redução da liberação de calor em concreto em substituição ao cimento Portland, tem-se como resultado uma diminuição da liberação de calor nas idades iniciais, seguido pela ocorrência da atividade aglomerante da escória em idades avançadas. (RIBEIRO *et al.*, 2021).

b) Sílica ativa

Segundo a NBR ABNT 13956-1:2012, a sílica ativa é um subproduto da produção do silício metálico, das ligas de silício e ferro silício, produzidos em grandes fornos, do tipo arco elétrico que produz alta temperatura, capaz de fundir o quartzo. Há diferentes tipos de sílica ativa com relação à composição química, cor, granulometria e outras características.

De acordo com Fraga *et al.* (2020), a sílica tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e a compacidade devido à ocorrência de reações pozolânicas (devido a interação com o hidróxido de cálcio do cimento produzindo o silicato de cálcio hidratado) e ao efeito filler (devido ao processo de refinamento dos poros, no concreto fresco, a sílica ativa contribui para a diminuição da exsudação e da segregação).

Segundo Tartuce (2011) as sílicas ativas, quando usadas de 3% a 10% no traço do concreto, proporcionam melhorias no concreto, algumas de suas vantagens são: aumento da resistência ao desgaste ou abrasão; aumento da resistência mecânica à compressão; aumento do módulo de elasticidade; diminuição da permeabilidade e da porosidade.

c) Cinza volante

A ABNT NBR 12653:2015 caracteriza as cinzas volantes como materiais finamente divididos oriundos da combustão de carvão pulverizado ou granulado que apresentam características pozolânicas.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a mineralogia das cinzas é diversificada, pois varia de acordo com a composição do carvão, ambiente de armazenamento e condições de calcinação. A finura da cinza volante é o principal fator que afeta sua qualidade, podendo contribuir para a resistência, pela redução direta de água, incremento do volume na pasta de mistura e atividade pozolânica (CANON, 1968 *apud* COSTA, 2015).

A substituição de cimento por cinza volante, no concreto, afeta diversos aspectos das suas propriedades. Como parte dos materiais componentes do concreto, a cinza volante age, em parte, como um agregado fino e, parte, como um componente reativo, devido às reações pozolânicas. Isso influencia as propriedades reológicas do concreto no estado fresco, na elevação de temperatura, na resistência, porosidade, na durabilidade no estado endurecido e no custo e consumo energético do produto final (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

d) Metacaulim

Rocha (2017) destaca que o metacaulim classificado como uma pozolana de alta reatividade, em fase amorfa (vítrea), reage com hidróxido de cálcio presente nas pastas de cimento Portland, formando compostos quimicamente estáveis e mecanicamente mais resistentes. Apresenta-se nas colorações branca, cinza-claro, bege, laranja ou vermelho (ou mistura entre estas). Este produto obedece às especificações da ABNT NBR 15.894:2010.

Segundo Rezende *et al.* (2012), o metacaulim é o material pozolânico resultante da calcinação de argilas cauliníticas submetidas a temperaturas que oscilam aproximadamente entre 500 °C e 800 °C dependendo do tipo de argila a ser utilizada. Sua influência nas propriedades mecânicas do concreto depende, além da sua pureza e reatividade, do teor de cimento no concreto e do intervalo e tipo de cura, por isto é necessário fazer uma extensa análise experimental da influência de todas as variáveis envolvidas nos estudos de aplicação desse material pozolânico.

Constituído basicamente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa, o metacaulim tem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ao longo do processo de hidratação do cimento Portland, podendo assim formar produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação do cimento Portland. Essas reações conferem

propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido, quando comparadas às propriedades apenas do cimento (MEDINA, 2011).

2.1.1.3 Agregados

As faixas granulométricas dos agregados graúdos utilizados em obras de barragens é uma particularidade, sendo utilizadas geralmente as seguintes dimensões máximas características: 19 mm, 38 mm, 76 mm e 150 mm. A quantidade de agregados do concreto massa pode chegar a aproximadamente 90% do volume total. Devido ao grande volume desses materiais, devem-se realizar ensaios de controle de qualidade. (SOUZA, 2017).

Os agregados miúdos seguem a norma brasileira NBR 7211:2019. Para os agregados graúdos, porém, podem-se adotar faixas granulométricas maiores do que as indicadas na norma a fim de diminuir o consumo de cimento. É importante lembrar que devem ser neutralizadas as reações álcali-agregado. Uma medida adequada é a adição de materiais pozolânicos ao concreto.

Para a aplicação de agregados em concretos massivos, deve-se verificar a possibilidade de ocorrência da reação álcali-agregado, ou seja, a possível reação dos agregados com os álcalis presentes nos cimentos, o que promove a expansão do concreto e perda de vida útil dos elementos. Segundo a norma ABNT NBR 15577-1:2018 a reação álcali-agregado (RAA) é considerada uma reação química entre alguns constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Sua ocorrência está condicionada à presença simultânea de três fatores: agregado potencialmente reativo, umidade e álcalis.

A influência do agregado na composição do coeficiente de expansão térmica do concreto é relevante, pois é o material mais presente no volume da mistura do concreto, logo, quando houver opções de escolha com antecedência dos materiais, deve-se priorizar por um agregado cujo coeficiente de dilatação térmica seja o menor possível para obtenção de concretos menos instáveis (DANTAS DUARTE, 2018).

Segundo a ACI (2005), o agregado graúdo deve consistir em material duro, denso e partículas não revestidas. Teores de sulfatos e sulfetos, determinados por análise química, não deve exceder 0,5% do peso do agregado graúdo. O agregado miúdo não deve conter altas quantidades de argila, lodo, poeira, mica, matéria orgânica ou outras impurezas para que não venha a interferir nas propriedades necessárias do concreto ao empregar proporções normais dos agregados.

Segundo a Votorantim (2017) os especialistas defendem a adoção de dosagens com baixo consumo de cimento por metro cúbico, além do uso de aditivos redutores de água, retardadores de pega e estabilizadores de hidratação e, quando possível, a escolha por agregados capazes de dar maior capacidade de deformação ao concreto. Como regra, recomenda-se o uso de um cimento com baixo calor de hidratação e com adições (tipo CPIII ou CPIV, por exemplo).

2.2 Propriedades requeridas para o concreto massa

Campos (2012) ressalta que ao se iniciar o estudo de dosagens há que se ter em mente que o concreto a ser dosado deverá estar em conformidade com os requisitos especificados para o projeto em estudo. Desta maneira verifica-se a necessidade de um adequado estudo das propriedades tecnológicas em concreto massa.

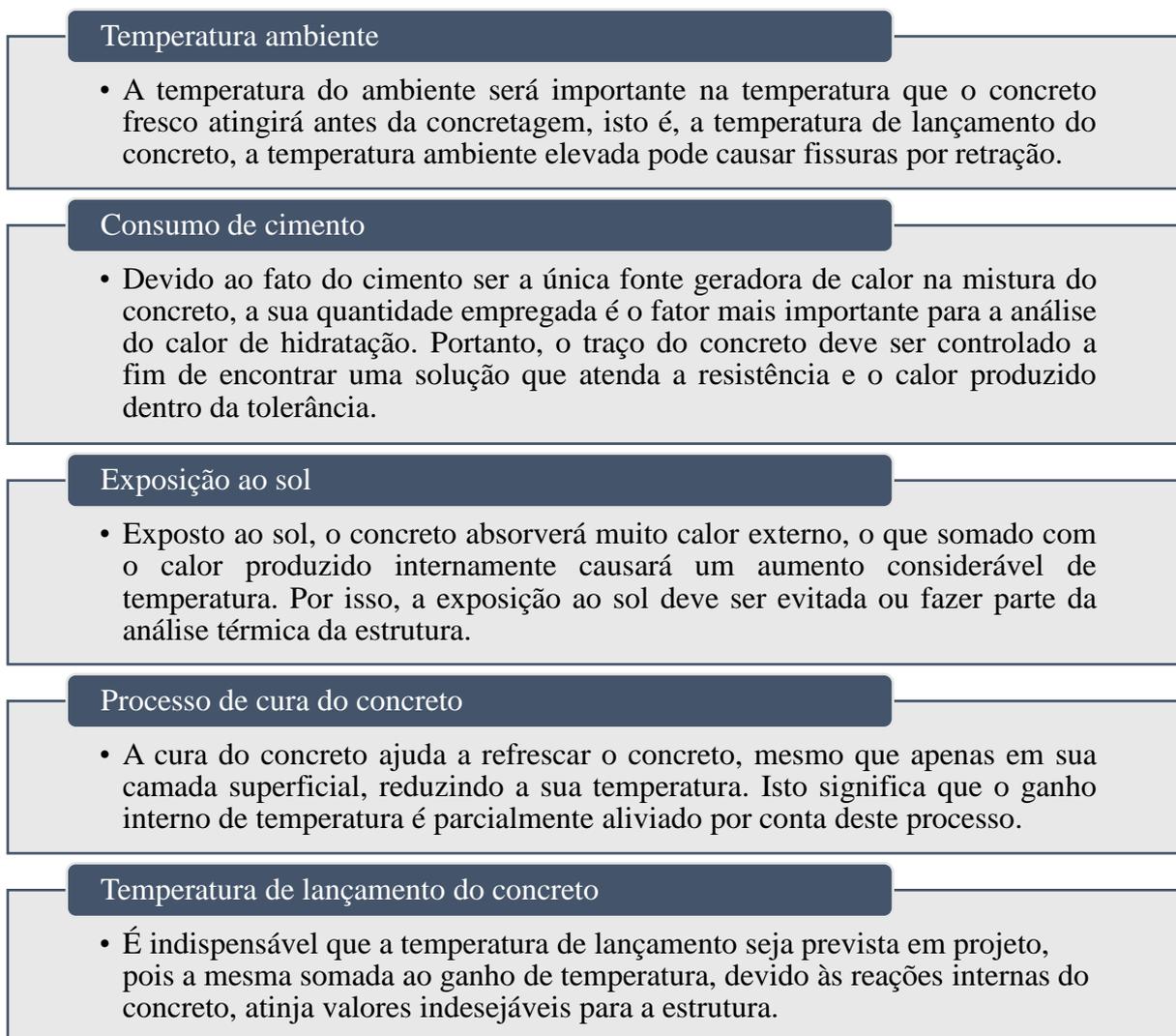
Dentre as propriedades a serem consideradas na produção de concretos massa, podem-se destacar as propriedades térmicas e a reação álcali-agregado, sendo estas melhor discutidas a seguir.

2.2.1 Calor de hidratação do cimento

O calor de hidratação é um fenômeno que ocorre na reação de hidratação dos compostos do cimento para a produção de subprodutos como o hidróxido de cálcio, o silicato de cálcio hidratado e a etringita. Este processo é responsável por uma grande liberação de calor, que muda de acordo com a idade do concreto (SILVA, 2019).

Victor *et al.* (2011) definem que o calor de hidratação é a energia liberada em decorrência da reação exotérmica que ocorre no processo de hidratação do cimento, ou seja, quanto maior o volume de concreto, maior o calor liberado pela mistura, que pode ser dissipado na atmosfera ou absorvido pela própria massa de concreto. Tal fenômeno causa danos à estrutura de concreto por meio de fissuras, que são responsáveis por perda de resistência, interpolação de água, lixiviação, corrosão da armadura e outras possíveis patologias. O quantitativo do calor de hidratação depende de vários fatores, entre eles estão os demonstrados na Figura 1.

Figura 1 - Fatores relevantes no calor de hidratação do cimento na produção dos concretos massa.



Fonte: Victor *et al.*, (2011).

O mecanismo de hidratação do cimento pode ser dividido em quatro estágios principais sendo: pré-indução (1), período de indução (2), período de aceleração (3), e período de desaceleração (4) (GUILGE, 2011).

O estágio da pré-indução ocorre logo após o contato com a água, onde começam a ocorrer solubilizações, e compostos como sulfatos alcalinos, aluminatos de cálcio e silicatos de cálcio que conferem aumento da concentração iônica das espécies cálcio, alumínio, sulfato e silício na água de mistura. Nesta etapa uma considerável quantidade de energia é liberada. Ocorrem três fenômenos de maior relevância que contribuem para a liberação de energia: a) decorrente da molhagem das partículas, b) relativa à dissolução rápida do C_3S e, c) relativa a dissolução do C_3A (composto altamente reativo). As reações de hidratação do C_4AF ocorrem do mesmo modo que as do C_3A , diferenciando-se especialmente pela substituição parcial do alumínio pelo ferro (SALUM, 2016).

Quando a solubilidade das fases citadas anteriormente cai, paralelamente a taxa de reação diminui devido à escassez de íons Ca_2^+ e H_2SiO_4 em solução. Dá-se, então, início ao período de “indução ou de reações lentas”. Neste período se dá o início da formação de compostos hidratados como o C-S-H, a partir da reação do C_3S com a água. A taxa de dissolução do C_3S diminui à medida que a concentração de cálcio em solução aumenta. Quando a solução se supersatura de C-S-H começa a nucleação rápida na superfície do C_3S e crescimento lento do C-S-H dado à pequena área superficial inicial (GUILGE, 2011).

O período de aceleração é marcado pelo final do tempo de indução onde as reações são lentas. O período de indução chega ao seu final quando um ponto crítico é atingido, então, os fenômenos de nucleação e crescimento de C-S-H aceleram-se bruscamente. É nesta etapa que as reações de formação do C-S-H ocorrem com maior velocidade e conferem resistência mecânica ao cimento. Por esta razão, o início e o fim da pega do cimento estão presentes neste período (SCRIVENER & NONAT, 2011).

O período final, desaceleração, é marcado pela redução gradativa da taxa de reação, o mesmo começa quando ocorre uma inversão na curva de aceleração indicada pelo calor máximo liberado. O fenômeno que controla as reações no período de desaceleração é o de difusão. Porém, outros fatores como área específica e teor de água também estão associados e assumem importante papel neste fenômeno. A granulometria das partículas de cimento é muito importante, pois no intervalo entre início da liberação de calor e o final do período de aceleração, a maioria das partículas menores que 3 micrômetros, são consumidas pelas reações de hidratação, enquanto que partículas maiores, com menor área de reação, começam a ser consumidas em velocidade menor quando comparadas com as anteriores (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando ocorre a hidratação do cimento, os espaços disponíveis para solubilização e precipitação dos compostos de hidratação são menores devido ao crescimento e consequente densificação da matriz de pasta por produtos hidratados. Estes três fatores, a granulometria das partículas, a redução da disponibilidade de água e de espaço, atuam conjuntamente para a redução da taxa de difusão de íons causando, conseqüentemente, a redução da taxa de hidratação neste período (THOMAS *et al.*, 2011).

Em resumo, o período de desaceleração é o período onde as reações de formação do C-S-H diminuem. Porém, outras fases são também formadas durante este estágio: a conversão da entrigita em monossulfoaluminato de cálcio, a hidratação da belita residual e a formação de entrigita secundária (GUILGE, 2011).

A propriedade do calor de hidratação do cimento pode ser verificada por meio de dois métodos usuais que utilizam calorímetros adiabáticos e semi-adiabáticos conforme descritos a seguir:

O ensaio para determinação do calor de hidratação em Cimento Portland pode ser realizado através de dois métodos, sendo estes, método isotérmico de indução e método semi-adiabático. O primeiro utiliza um equipamento chamado de Tam Air, no qual, segundo Júnior (2018) determina as velocidades de reação e o grau de hidratação para as temperaturas definidas no ensaio, pois nesse procedimento a temperatura de ensaio é constante. Ressalta-se que este método é normalizado pela ASTM 1702:2017, não sendo ainda normalizado no Brasil.

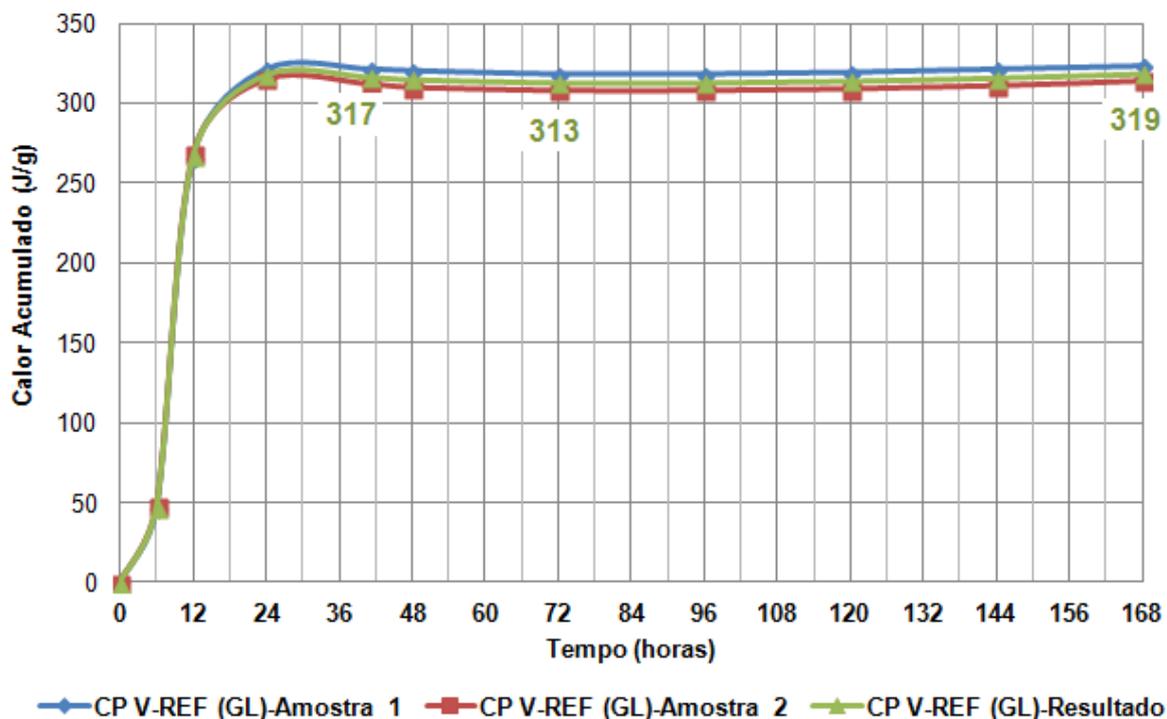
O método com calorímetro semiadiabático (Método da Garrafa de *Langavant*) consiste em uma garrafa que possui uma ampola de vidro de parede dupla, espelhada e com forte vácuo entre as paredes, fechada com uma tampa isolante (ABNT NBR 12006:1990). Na garrafa é introduzida um recipiente cilindro metálico contendo argamassa de cimento e areia, e através de um termômetro ou termopar é realizada a medição da temperatura em intervalos pré-definidos por um período de sete dias. As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente, o esquema de ensaio do método da garrafa de *Langavant* e o exemplo de gráfico obtido no ensaio.

Figura 2-Esquema do ensaio do calor de hidratação pelo método da Garrafa de *Langavant*.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Figura 3 - Gráfico caracterizado pelas curvas de calor de hidratação.



Fonte: Funahashi Junior, 2018.

2.2.1.1 Elevação adiabática da temperatura do concreto

A ABNT NBR 12819:2012 define elevação adiabática como o aumento da temperatura causado pelo calor gerado na hidratação do cimento, em condições adiabáticas, isto é, sem troca de calor com o ambiente.

Os ensaios em calorímetros adiabáticos são utilizados para a determinação do desenvolvimento da elevação adiabática de temperatura em concretos de forma direta, sem que haja o conhecimento prévio do perfil do calor de hidratação do cimento.

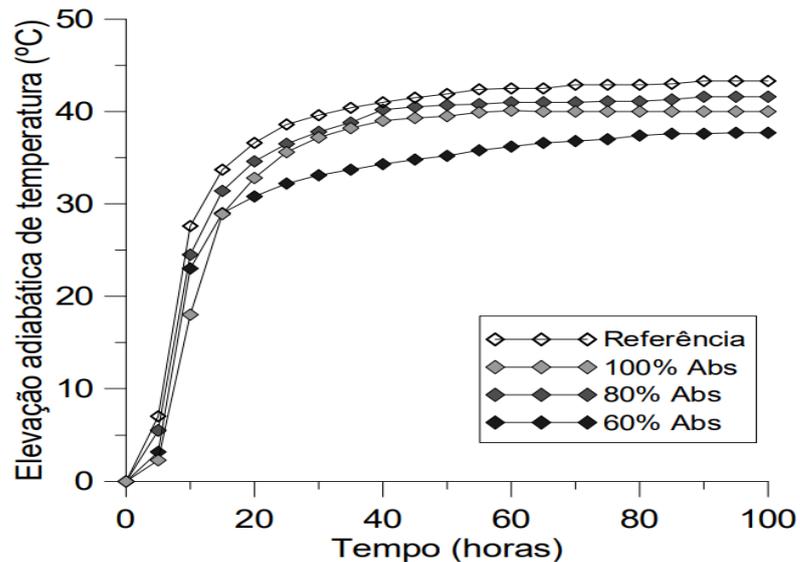
O ensaio é realizado diretamente na amostra de concreto através da instalação de sensores de temperatura em condições adiabáticas de ensaio com pouca ou nenhuma perda de calor para o ambiente. De acordo com a ABNT NBR 12819:2012, o ensaio consiste no monitoramento da temperatura de uma amostra de concreto no estado fresco colocada em um calorímetro constituído de duas câmaras, uma interna e outra externa dotada de um sistema de aquecimento e resfriamento, simulando uma estrutura real de concreto massa (Figura 4). Nesse ensaio é gerada uma curva de elevação adiabática da temperatura do concreto (Figura 5), no qual é possível analisar de acordo com o tempo a temperatura atingida pelo concreto.

Figura 4 - Calorímetro adiabático de concreto.



Fonte: Funahashi Junior, 2018.

Figura 5 - Curvas de elevação adiabática.



Fonte: Andrade, 2018.

No Brasil este ensaio é realizado pelo laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A, localizado em Goiânia-GO, e pelo laboratório da COPPE/UFRJ, localizado no Rio de Janeiro. (COELHO, 2016). Além disso, existem pesquisas que utilizam métodos numéricos para estimar a temperatura no interior do concreto, a partir de softwares de simulação (COELHO, 2016; GOMES, 2011). Porém, apesar desses métodos resultarem em uma boa aproximação, apenas o ensaio de elevação adiabática simula as condições reais de uma grande massa de concreto.

2.2.2 Tempos de Pega

O conceito de pega é definido como o enrijecimento da pasta de cimento, ou seja, a mudança do estado fluido para o estado rígido, ocasionada pela hidratação dos compostos do cimento. (NEVILLE, 2016). Bauer (2019) complementa que o tempo de início de pega é o tempo disponível para manuseio de argamassas e concretos, e após esse período os materiais devem permanecer em repouso definitivo.

Viecili *et al.*, (2018) explicam que o no início da pega ocorre um aumento da viscosidade da pasta que é percebido a partir de 150 minutos da adição da água na pasta, e o ponto conhecido como fim da pega ocorre à passagem do estado plástico para o estado sólido.

O conceito de pega é diferente de endurecimento, enquanto a pega refere-se a mudança do estado fluido para o rígido, o endurecimento ocorre após o fim de pega, período que se inicia o ganho de resistência mecânica (NEVILLE, 2016).

O tempo de pega tem relação direta com a geração de calor, devido ao C_3A do cimento, portanto o tempo de pega deve ser regulado conforme o tipo de aplicação do concreto, pois existem situações que é necessário pega rápida, a exemplo de obturações de vazamentos, em outras situações é necessário tempo de pega mais longo, a exemplo do lançamento de concreto sob água como as barragens de concreto massa, as quais são estruturas volumosas, e, portanto é necessário maior tempo para lançamento do concreto. (BAUER, 2019).

Em relação ao uso de adições minerais para o controle do tempo de pega alguns estudos são realizados com o reaproveitamento de resíduos industriais como adições em substituição parcial ao cimento Portland. Pode –se cita como exemplo as pesquisas de TAN *et al.*, 2021; MANGURU *et al.*, 2020.

2.2.3 Reação Álcali-agregado - RAA

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e alguns compostos minerais presentes em determinados agregados, gerando consequências ao concreto, como por exemplo, fissuração que proporciona a entrada de agentes agressivos. A reação com maiores ocorrências registrada no Brasil é a reação álcali-sílica (RAS), devido à rapidez com que esta ocorre em função das formas minerais reativas envolvidas. (SOUZA; ZOLETT; CARRAZEDO, 2016).

O teor em álcalis do cimento é também um fator decisivo para a existência de reações expansivas, uma vez que a concentração de íons de cálcio, potássio e sódio está diretamente ligada à formação de RAS. (REBELO, 2021).

A RAS é um processo mecânico de origem química e geralmente necessita de um longo período para se manifestar e quando esse fato acontece na sua forma nociva, gera a expansão do concreto, surgimento de fissuras e diminuição da sua resistência química e mecânica (HERNÁNDEZ-CRUZ *et al*, 2016).

A Reação álcali-agregado é um dos principais problemas que podem afetar estruturas de concreto massa, pois as tensões internas geradas devido as reações expansivas provocam fissuras mapeadas e irregulares nos elementos estruturais, e a exemplo das barragens, as fissuras são portas de entrada para a percolação de água o que pode afetar a sua estabilidade e durabilidade. (POSSAN, 2015).

Campos *et al.*, (2018) afirmam que a reação álcali-agregado mais comum nas estruturas de barragens é a álcali-sílica, que apesar de possuir uma reação lenta é a principal causa dos deslocamentos verticais nos elementos estruturais de barragens como apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Reação álcali-agregado em viga e laje de uma barragem.



Fonte: Neto e Quitete (2016).

Diversos métodos estudados, como o de Menéndez *et al.* (2020), comprovaram que a substituição parcial de cimento por adições como as pozolanas, são eficazes para o controle desta reação. A ABNT NBR 15577:2018 prescreve as especificações e o método do ensaio

dessa propriedade, que se torna de extrema importância para concreto massa aplicado em barragens, uma vez que a mesma está ligada diretamente à durabilidade da estrutura.

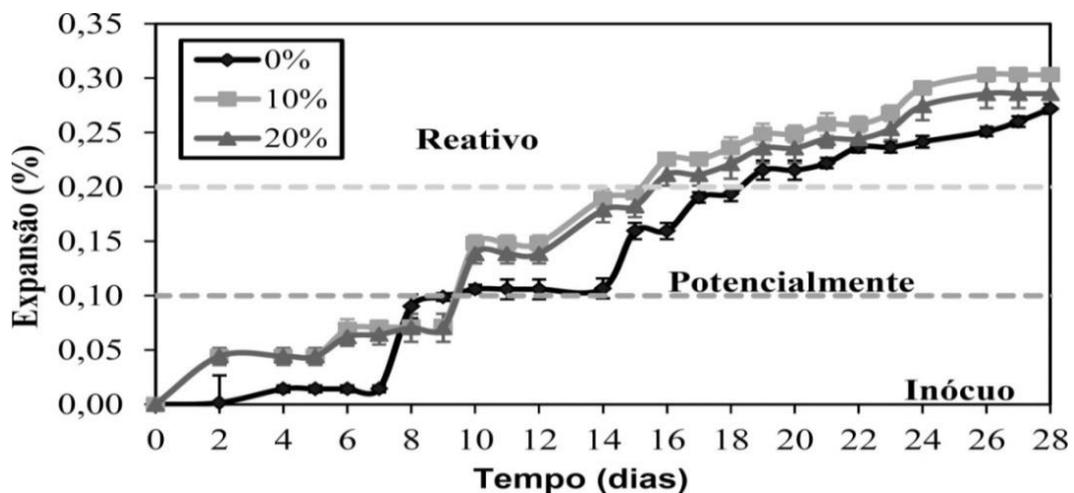
O ensaio consiste basicamente na imersão de barras de argamassa ou concreto em um banho contendo solução de NaOH a 80° C por um período de 30 dias, no caso da argamassa, e 365 dias no caso de concreto (Figura 7). Leituras de variação de comprimento são realizadas com o objetivo de se obter uma curva de expansão dos corpos de prova em relação ao tempo de ensaio (Figura 8).

Figura 7 – Corpos de prova imersos em banho de solução de hidróxido de sódio.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Figura 8 - Curva de expansão de reação álcali-agregado.



Fonte: França *et al.*, 2016.

2.3. Resíduos sólidos

Na área de concreto, como já mencionado no item 2.1.1.2, é comum a utilização de adições minerais, sendo em sua maioria resíduos sólidos provenientes de processos industriais relacionados à produção de silício metálico (sílica ativa), produção de carvão mineral (pozolanas) e produção do aço (escórias de alto forno e de aciaria, pó de balão, lamas e etc).

As indústrias geram resíduos em seu processo de produção e, muitas dessas empresas, devido à falta de conhecimento, ou mesmo à falta de fiscalização e estrutura dos órgãos públicos ambientais, acabam dispondo os resíduos de maneira inadequada, pois o armazenamento destes resíduos é uma etapa do processo que não agrega valor ao produto. (OLIVEIRA *et al*, 2021).

De acordo com a Lei nº. 12.305 (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos são classificados quanto à origem e à periculosidade. Quanto à origem são classificados em: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transportes e resíduos de mineração. Esta classificação quanto à origem dos resíduos sólidos se apresenta na Figura 9.

Figura 9 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem.



Fonte: Adaptado de Schalch, (2010).

Com relação à periculosidade, a classificação é sub-dividida em resíduos perigosos e não perigosos. Resíduos perigosos são aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica. Os resíduos não perigosos são aqueles não enquadrados nas características citadas anteriormente (BRASIL, 2010).

Outra definição de resíduos sólidos é apresentada pela ABNT NBR 10004:2004 que conceitua os resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A referida norma considera a seguinte classificação dos resíduos:

a) Resíduos Classe I - Perigosos

Aqueles que apresentam periculosidade, (risco à saúde pública ou ao meio ambiente), ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou está contido nos anexos da ABNT NBR 10004:2004.

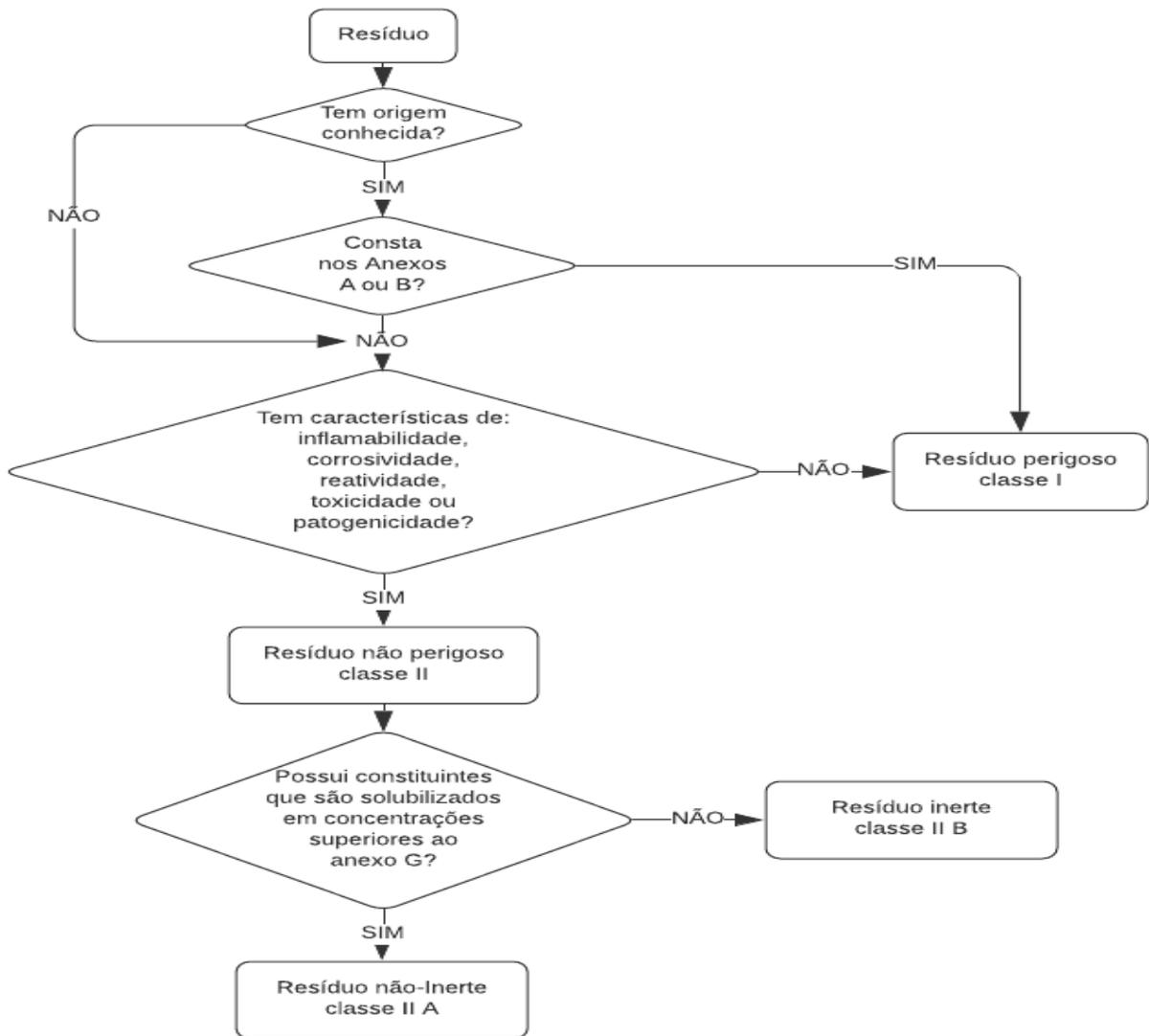
b) Resíduos classe II A – Não inerte

São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes. Os resíduos classe II A podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

c) Resíduos classe II B - Inertes

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. A Figura 10 apresenta as etapas para classificação dos resíduos sólidos.

Figura 10 – Caracterização e classificação de resíduos sólidos.



Fonte: ABNT NBR 10004:2004.

2.4 Processo de produção do aço na siderúrgica Sinobras

As informações contidas nesse tópico foram extraídas do Memorial Descritivo da SINOBRAS - Siderúrgica Norte Brasil S.A, disponibilizada pela empresa no ano de 2020, onde nele estão detalhadas todas as etapas da produção do aço.

A SINOBRAS é única usina siderúrgica integrada das regiões Norte e Nordeste do país, sediada em Marabá - PA, sendo dedicada à produção de barras de aço e produtos ampliados para concreto armado, detém 7% da demanda nacional deste segmento, distribuídos de acordo com informações constantes no Quadro 3.

Quadro 3 - Produtos fabricados pela SINOBRAS.

| Produto | Uso final |
|----------------|---|
| CA 25 (SI 25) | Vergalhões lisos para concreto armado |
| CA 50 (SI50) | Vergalhões nervurados para concreto armado |
| CA 60 (SI60) | Fios de aço para concreto armado |
| Arame Recozido | Arames |
| Treliças | Treliças eletro soldadas para concreto armado |
| Telas | Telas eletro soldadas para concreto armado |
| Telas | Telas para Coluna |
| Fio Máquina | Intermediário para trefilação ou forjarias |
| BRM | Barras redondas mecânicas |

Fonte: SINOBRAS, 2020.

As matérias primas básicas utilizadas na fabricação do ferro gusa, para a posterior fabricação do aço, são minério de ferro, o sinter e o carvão vegetal. Outros insumos importantes são os fundentes, que são o seixo e o calcário. O quantitativo de material utilizado está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantitativo de materiais utilizados na produção do ferro gusa.

| Área | Insumo | Consumo kg/t | Consumo t/dia |
|-------------|------------------|---------------------|----------------------|
| ALTO-FORNO | Calcário | 62 | 25 |
| | Seixo | 12 | 5 |
| | Minério de ferro | 1450 | 600 |
| | Carvão vegetal | 740 | 300 |
| | Sinter | 300 | 121 |

Fonte: SINOBRAS, 2020.

O fluxo do processo de produção da empresa é composto por quatro etapas: fabricação do ferro gusa em Alto-forno, Aciaria, Laminações e Trefila. Esse fluxo pode ser verificado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxo do processo na SINOBRAS.



Fonte: SINOBRAS, 2020.

2.4.1 Processo de Produção Alto-forno

O Alto-forno é um reator metalúrgico de contracorrente destinado à produção de ferro gusa. Este é obtido a partir da redução da carga metálica (óxidos de ferro) que reage com os gases de combustão – CO₂ e H₂ - em sentido contrário à descida do óxido, provenientes do material redutor (coque ou a carvão vegetal). O ferro gusa é uma liga de ferro e carbono, contendo de 4,0 a 4,5% de carbono e outros elementos residuais como, por exemplo, silício, manganês, fósforo e enxofre e etc.

Além do ferro gusa, são gerados subprodutos como: a escória, a moinha, o fino de minério, o gás de Alto-forno, pó de balão e lama de espessador provenientes da limpeza de gás nas quantidades apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantitativo dos resíduos gerados no Alto-forno.

| Resíduo | kg/t gusa | t/mês |
|-----------------|------------------|--------------|
| Pó de balão | 35 | 374 |
| Escória | 200 | 2.146 |
| Lama | 45 | 486 |
| Moinha | 93 | 981 |
| Fino de Minério | 90 | 1.100 |

Fonte: SINOBRAS, 2020.

a) Escória de Granulada de Alto-forno

Obtida pela fusão e separação da ganga de matérias-primas e dos fundentes. É constituída principalmente de óxidos termodinamicamente muito estáveis como MgO, CaO, Al₂O₃ e SiO₂, atingindo a soma desses óxidos cerca de 95% em peso na escória. É considerada um coproduto da produção do ferro gusa, após cumprir sua função durante o processo de redução do minério de ferro (depuração das impurezas do minério e carvão), tem sido empregada na fabricação de cimento em proporções que chegam a 70%. Entretanto, apesar dessa nobre aplicação para a escória, essa ainda apresenta maior volume de produção do que a absorvida pela indústria cimenteira.

O ferro gusa e a escória são armazenados numa região do forno, denominada cadinho, e são separados por diferença de densidade. Devido ao trabalho de operação de um Alto-forno ser ininterrupto, as gusa e escória, depositados no cadinho, necessitam de um escoamento contínuo através de carros torpedos em panela ou roda de lingotamento de gusa, formando o gusa sólido. No Alto-forno da SINOBRAS, é produzido gusa líquido para consumo direto na Aciaria e gusa sólido em momentos de parada da Aciaria e anormalidades no processo de redução.

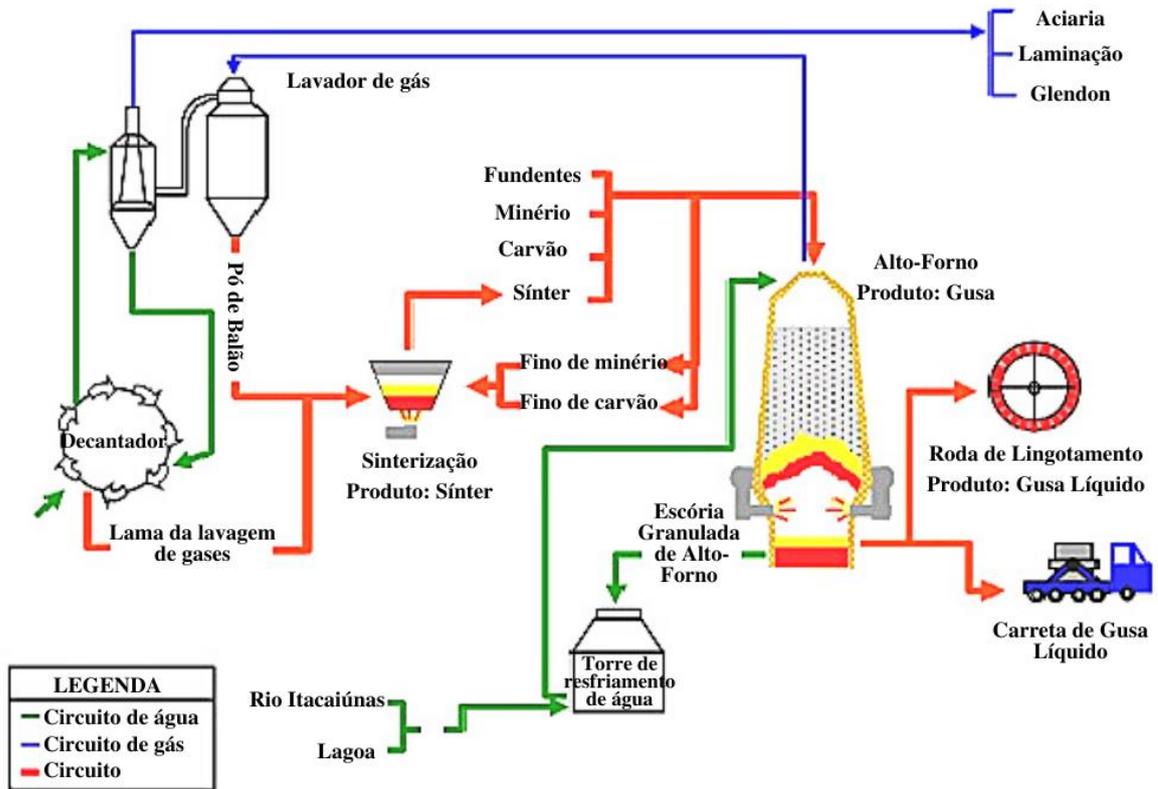
O processo de granulação de escória granulada de alto-forno tem como objetivo converter a escória líquida em escória granulada, que é um produto de maior valor agregado. O processo é baseado no “resfriamento brusco” da escória líquida com água fria, onde a qualidade do processo depende principalmente da temperatura inicial e a composição química da escória líquida, da vazão de escória, da pressão e da temperatura da água de granulação.

b) Pó de coletor ou Pó de Balão

O pó de coletor ou pó de balão consiste no material particulado fino carregado do forno pelos gases efluentes, removido no coletor de pó via seca, e a quantidade gerada é da ordem de 30 kg/t gusa – 45 kg/t gusa, sendo que a composição do resíduo varia com o processo e com as matérias-primas empregadas. Os principais componentes são: óxidos de ferro, carbono, sílica e alumina. Utiliza-se uma parcela deste material para produção de sinter, cerca de 29 kg/t sinter na planta da Sinterização.

Os gases saem do topo do Alto-forno arrastando muitas partículas sólidas. Para a sua adequação industrial e reutilização nos processos, o mesmo passa por um processo de limpeza gerando pó e lama de Alto-forno. O gás perde a velocidade no interior do balão e vai depositando-se no fundo do balão. O operador aciona o botão de intertravamento da válvula e retira o pó do balão que é depositado na caçamba. Em situações normais de operação, o colaborador retira duas vezes por turno, à caçamba cheia de pó de balão, cerca de 35 kg/t gusa com destino ao pátio de resíduos e a Sinterização, que se utiliza habitualmente cerca de 29 kg/t sinter. A Figura 12 apresenta o fluxograma que demonstra o resumo do processo de produção do Alto-forno.

Figura 12 - Fluxograma do processo de fabricação no Alto-Forno.



Fonte: Adaptado de SINOBRAS, 2020.

2.4.2 Processo de produção Aciaria

A Aciaria é uma unidade da usina siderúrgica onde existem máquinas e equipamentos voltados para o processo de transformar o ferro gusa líquido e/ou sólido e a sucata em diferentes tipos de aço. A SINOBRAS dispõe de forno elétrico a arco – FEA, forno panela e lingotamento contínuo.

Na rota de produção adotada nesta unidade os principais insumos são: gusa líquido, gusa sólido ou sucata de gusa ou de ferro-fundido, sucata de aço e retornos de geração interna, ferro - ligas, para desoxidação e ajuste da composição química, carburantes (coque e carbureto de silício) e fundentes (cal, calcário e MgO). A Tabela 4 apresenta o quantitativo dessas matérias primas.

Tabela 4 - Relação entre a produção e consumo de matérias primas.

| CONSUMO POR t PARA UMA PRODUÇÃO DE 1200 t / DIA | | | |
|--|------------------------|---------------------|----------------------|
| ÁREA | INSUMO | CONSUMO kg/t | CONSUMO t/dia |
| ACIARIA | Energia elétrica | 330,00 kWh/t | 396,00 MW/dia |
| | Eletrodos | 1,60 | 1,92 |
| | Gusa | 326,00 | 391,00 |
| | Sucata gusa | 15,00 | 18,00 |
| | Sucata | 835,00 | 1002,00 |
| | Carbureto de Silício | 2,34 | 2,80 |
| | Ferro Silício | 0,20 | 0,24 |
| | Concentrado FeSi | 1,61 | 1,93 |
| | Ferro Silício | 11,00 | 13,20 |
| | Manganês | | |
| | Sucata de Al. | 0,08 | 0,096 |
| | Alumínio em fio | 0,003 | 0,0036 |
| | Coque injeção no forno | 5,00 | 6,00 |
| | Coque para F. | 1,97 | 2,36 |
| | Panela | | |
| | Cal | 37,00 | 44,00 |
| | MgO | 8,75 | 10,50 |
| Calcário | 8,00 | 9,60 | |

Fonte: SINOBRAS, 2020.

Da matéria-prima metálica usada para a transformação do aço, 70% vem da reciclagem de sucata, o que significa dar destino adequado a um grande volume de material que, se disposto aleatoriamente e sem tratamento adequado, compromete o meio ambiente. O reaproveitamento leva ainda à redução de uso de recursos naturais, como minério de ferro e redutor bioenergético (carvão), e contribui para desafogar os aterros sanitários.

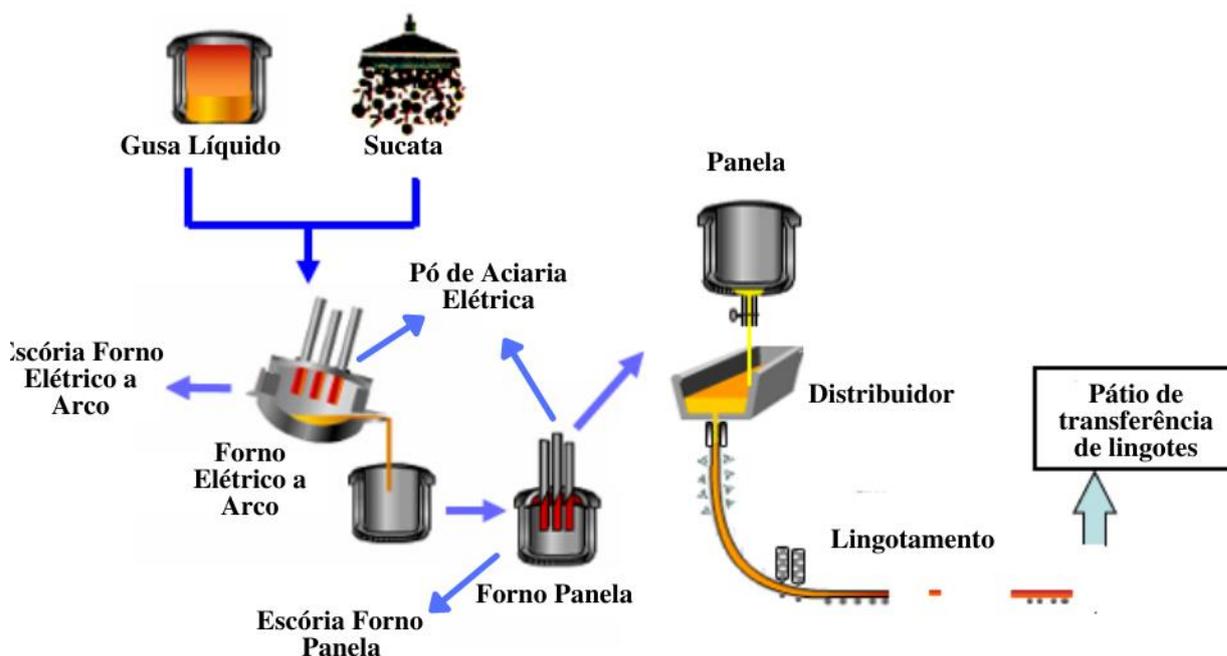
A aquisição de sucata metálica ocorre por meio de uma enorme rede coletora, englobando não apenas grandes fornecedores, mas também pequenos catadores, sobras do processo e demais formas de aquisição, para isso são instalados postos de coleta em vários municípios.

A sucata quando recebida pela SINOBRAS é selecionada, classificada e processada por tesouras, oxicorte, shredder e outros, sendo posteriormente carregada em cestões por meio de eletroímãs em quantidades pré-estabelecidas juntamente com outras cargas sólidas que compõem o carregamento do Forno Elétrico a Arco (FEA).

O Forno Elétrico a Arco - FEA é constituído de um vaso com soleira, comportando em seu interior o metal líquido, sendo revestido de refratário nas paredes e por painéis refrigerados a água e cobertos por uma abobada também refrigerada a água.

Este equipamento bascula em dois sentidos, sendo que pelo lado anterior se operam as lanças de oxigênio e grafite, escoam-se a escória, colhem-se amostras, medidas de temperatura e se acompanha o processo de fusão e refino. Pelo lado posterior inferior, ocorre o vazamento do aço líquido para a panela a qual irá ao refino secundário (forno panela). A Figura 13 contém o fluxograma do processo de produção até o lingotamento.

Figura 13 - Fluxograma do processo de produção da Aciaria.



Fonte: Adaptado de SINOBRAS, 2020.

Após a passagem pelo forno de fusão, o aço líquido é vazado em uma panela e deslocado até a unidade de refino secundário, forno panela. Nesta etapa é ajustada a temperatura final em que o aço deve ser lingotado, efetuada a correção da escória e ajustada a composição química fina do produto. Por meio de passagem de gás inerte, Nitrogênio ou Argônio injetado pelo fundo da panela, se obtêm uma homogeneização química e de temperatura do produto dentro da panela, e ainda promove um arraste das impurezas não metálicas para a superfície do banho, onde as mesmas são incorporadas à escória. Nesta etapa também ocorrem reações entre o banho metálico e a escória as quais promovem a dessulfuração do banho.

Os resíduos produzidos na aciaria são as escórias, pó de despoeiramento, carepa e refratários:

- a) Escoria do FEA: gerada no processo de fusão e refino primário do Forno Elétrico;
- b) Escórias do Forno Panela/Panela/Distribuidor: gerada no processo de refino do Forno Panela, proveniente parte do Forno Elétrico, durante o vazamento e das adições de fundentes (CaO/CaF₂), óxidos e inclusões geradas resultantes do processamento do metal;
- c) Pó de despoeiramento: gerado no Forno Elétrico e Forno Panela, captado pelo sistema de despoeiramento, gerados no processo do forno elétrico, forno panela, cales adicionados e ligas de baixa granulometria, numa parcela de 15 a 20 kg/ton de aço produzido. O pó de despoeiramento é composto basicamente de 30% de FeO, 15% a 20% de zinco, 20% a 30% de CaO, 15% de sílica, alumina.

2.5 Pesquisas desenvolvidas com resíduos siderúrgicos

Com o objetivo de utilizar resíduos provenientes da atividade siderúrgica, várias pesquisas foram desenvolvidas para se obter uma utilização para os chamados “resíduos”, que dependendo da área utilizada têm se obtido resultados satisfatórios.

Essas pesquisas são de interesse da academia e também da própria siderurgia, uma vez que estes materiais tendo uma destinação correta deixam de ocupar espaço em pátios da empresa e custos com o seu descarte no ambiente, já que alguns desses resíduos se classificam como perigosos ao meio ambiente.

2.5.1 Pesquisas com escória granulada de alto-forno

Gruyaert *et al.* (2010) estudaram a hidratação do cimento Portland comum misturado com teores de EGAF de 0, 30, 50 e 85%. Foram realizadas medidas calorimétricas isotérmicas, semi-adiabáticas e adiabáticas para determinar o calor da hidratação e análises termogravimétricas (TG) para acompanhar a hidratação pela avaliação da relação água cimento.

Os resultados dos testes calorimétricos isotérmicos mostram um aprimoramento da hidratação do cimento e um pico de hidratação adicional na presença da EGAF, enquanto as medidas calorimétricas semi-adiabáticas indicam claramente um aumento decrescente da temperatura com o aumento do conteúdo de escória granulada de alto-forno (GRUYAERT *et al.*, 2010).

Gómez *et al.* (2015) analisaram a substituição de cimento por 10% de cinza volante, 35% de EGAF e 5% de metacaulim. Esta porcentagem de substituição favoreceu o crescimento da resistência a compressão aos 60 dias de idade e com isso concluiu que altas quantidades de materiais pozolânicos e hidráulicos na elaboração dos traços apresentados produziram um aumento nas suas propriedades mecânicas, assim como nas reações de hidratação, melhorando a resistência à compressão.

Rossa Jr. e Portella (2012) investigaram o uso da adição de 5 a 20% da EGAF em argamassa colante tipo ACI, em substituição ao cimento de Portland. Os aspectos físicos e químicos (difração de raios X, fluorescência de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise por dispersão de elétrons) de três composições de escória de diferentes partes do Brasil foram estudados, usando a escória de menor reatividade. Os resultados indicaram a potencialidade do seu uso, com resistência de aderência à tração similar às amostras de referência e mais altas do que as recomendações normativas.

Liduário *et al.* (2016) analisaram concretos com adições, entre elas a EGAF, que no teor de substituição de 50% do cimento se obteve elevação de temperatura inferior à do concreto de referência, juntamente com o melhor comportamento em relação a permeabilidade. A permeabilidade a água é reduzida com a adição de EGAF em concreto de cimento Portland, principalmente com o aumento da sua finura. Também foi observado que a EGAF apresentou comportamento inócuo, ou seja, inibiu a expansão de concretos.

Santos (2011) analisou a adição mineral de EGAF na proporção de 50% em volume de cimento, concluindo que em relação às propriedades térmicas a EGAF apresentou temperaturas maiores que o concreto de referência após o 7º dia. O autor atribui esse retardo a grande fluência que o concreto com escória apresenta.

2.5.2 Pesquisas com a escória de aciaria

Pinto Junior *et al.* (2011) verificaram a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduo do corte de granito para ajustar a relação CaO/SiO_2 da escória de aciaria LD, visando a sua utilização na fabricação de cimento Portland. Para isso, foram realizadas a caracterização química dos resíduos e a sua mistura e fusão, a fim de se obter uma relação CaO/SiO_2 em torno de 0,9 e 1,2. Os resultados permitiram concluir que o ajuste da basicidade da escória de aciaria LD através da adição de resíduo de granito mostrou-se eficiente, indicando a sua viabilidade técnica para a fabricação de cimento Portland.

Pacheco (2017) estudou o emprego a escória de aciaria LD natural (EACN) e outras duas escórias modificadas por processo pirometalúrgico, (EACM1) e (EACM2) em

substituição o cimento tipo CP V – ARI. Com o estudo concluiu que a substituição de até 10% no caso da EACN, 20% no caso da EACM1 e até 40% no caso da EACM2 no lugar do cimento apresentou resistência à compressão maior que o traço de referência nas idades de 28 e 91 dias.

Arrivabene (2012) analisou a viabilidade técnica da fabricação de cimento com uma mistura de resíduo de granito e escória de aciaria LD. Para isso, foi preparada uma mistura desses materiais de modo que a relação $\%CaO / \%SiO_2$ fosse 1,2. Essa mistura foi fundida e resfriada rapidamente em água, depois foi adicionada ao clínquer para a fabricação de cimento. Com o cimento fabricado, foram feitos ensaios cujos resultados foram comparados com os valores obtidos para o cimento de alto-forno. Os resultados indicaram a viabilidade técnica da utilização da mistura na fabricação de cimento.

Castro *et al.* (2016) estudaram a incorporação de resíduos siderúrgicos em substituição parcial ao solo para a fabricação de blocos de solo-cimento, entre eles a adição de até 20 % em massa de escória de aciaria. Os resultados obtidos sugerem a potencialidade de uso dos resíduos siderúrgicos em blocos intertravados de solo-cimento para alvenaria sustentável, como alternativa de aplicação para esses resíduos se obteve como um dos resultados satisfatórios, 10% de escória de aciaria ou 20% de escória de aciaria juntamente com 10% de reuso do bloco solo-cimento.

Masuero *et al.* (2004) testaram um método de estabilização da escória de aciaria elétrica quanto à sua expansão e avaliou o comportamento mecânico e quanto à absorção de água de argamassas com uso de uma escória de aciaria estabilizada. Os resultados indicaram que argamassas com até 50% de substituição de cimento por escória estabilizada apresentam desempenho semelhante do ponto de vista mecânico e de absorção de água que argamassas sem escória.

Oliveira *et al.* (2018) avaliaram o potencial do reaproveitamento da escória de aciaria LD como agregado siderúrgico por meio da análise de documentos internos da ArcelorMittal Monlevade S.A. Com se pôde concluir que a reutilização da escória de aciaria mostra-se benéfica ao meio ambiente por promover a substituição de substâncias não metálicas.

Souza, Zolett e Carrazedo (2016) estudaram a utilização da escória de aciaria elétrica como redutor da reação álcali-agregado, sendo desenvolvido com base nas orientações da NBR 15577:2008 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado, avaliado para diferentes proporções de substituição parcial de cimento por escória. A escória de aciaria elétrica, uma pozolana não tradicional resultante do processo de produção do aço e de características expansivas, teve êxito ao reduzir a expansão da RAS.

Feitosa (2017) estudou o efeito da incorporação da escória do forno panela (EFP) e em argilas usadas para a confecção de massas para fabricação de cerâmica vermelha nas proporções de 8%, 14% e 16%. Resultados mostraram que a incorporação dessa escória em argilas altera a plasticidade, porém, em alguns casos, não inviabiliza seu uso no processo de extrusão, levando em conta que, a partir dos resultados notou-se que a EFP pode ser usada em massas cerâmicas com teores menores que 10%.

Geyer (2002) apontou as potencialidades de uso da escória de aciaria elétrica, com destaque para a proveniente do forno-panela na indústria da construção civil através de testes em que a escória é utilizada, após moagem, como adição ao cimento Portland comum. Após o estudo realizado comprovou-se ser perfeitamente viável a utilização de até 10% da escória do forno panela como adição ao cimento para produção de concretos. Inclusive, independentemente do tempo de estocagem da escória, pode-se constatar melhorias no concreto produzido.

Rocha (2011) avaliou a viabilidade de reutilização da escória de forno panela através de ferramentas experimentais de caracterização, visando determinar as composições química e mineralógica destas escórias. Os resultados encontrados mostraram a presença de compostos químicos importantes que viabilizam a utilização deste tipo de escória.

2.5.3 Pesquisas com o pó de balão

Castro *et al.* (2016) estudaram a incorporação de resíduos siderúrgicos em substituição parcial ao solo para a fabricação de blocos de solo-cimento, entre eles a adição de até 20 % em massa de PB. Os resultados obtidos sugerem a potencialidade de uso dos resíduos siderúrgicos em blocos intertravados de solo-cimento para alvenaria sustentável, como alternativa de aplicação para esses resíduos se obteve como um dos resultados satisfatórios, 20% PB juntamente com 10% de reuso do bloco solo-cimento.

Silva, A. *et al.* (2017) investigaram a incorporação do PB aplicado a placas cerâmicas estruturais. Foram realizadas formulações de 0%, 3% e 5% em massa de resíduo para a obtenção dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram sinterizados a 850°C com um patamar de queima de 2,0 horas. Foram avaliadas as propriedades tecnológicas e os resultados obtidos mostram que a incorporação de resíduo na massa cerâmica apresentou melhor desempenho nas propriedades tecnológicas quando comparado com a matriz, com 0% de resíduo, enquadrando-se nas normas da ABNT/NBR 15.370 (2005) e 15.270 (2005).

Ferreira *et al.* (2019) estudaram a viabilidade do reaproveitamento do PB através da sua incorporação na cerâmica vermelha. Avaliou-se as características químicas das matérias

primas e o comportamento físico mecânico e químico de corpos de prova fabricados com a incorporação de percentuais de 0%, 2%, 4% e 6% de pó de balão na produção de cerâmica vermelha, sendo estes sinterizados a temperaturas de 950°C, 1050°C e 1150°C. Concluiu-se que é possível a utilização de até 6% do resíduo como matéria-prima na cerâmica vermelha sem que haja interferência significativa nas propriedades estruturais e técnicas do material resultante.

Vasconcelos e Rabelo (2018) por meio de um estudo, concluíram que aplicação do PB em massas para fabricação de materiais cerâmicos e sua utilização como fertilizante para a agroindústria têm-se mostrado promissora, constituindo-se de alternativas sustentáveis para o aproveitamento deste material.

Fernandes *et al.* (2016) estudaram a influência da adição do PB nas propriedades mecânicas do concreto destinado à fabricação de *pavers*, com adição de 4% em massa do pó de balão. Os corpos de prova moldados a partir do traço substituído exibiram maior resistência à compressão tanto na idade de 7 dias, quanto na idade de 28 dias, quando comparados aos corpos moldados a partir do traço referência.

Silva, R. *et al.* (2017) caracterizaram física e quimicamente o PB para aproveitamento futuro em estudos que visem sua utilização em um dos processos de aglomeração dos resíduos siderúrgicos, a sinterização. Para isso fez-se análises para determinação da massa específica, da distribuição granulométrica, dos compostos cristalinos pela difratometria de raios-X, da composição química pela espectrometria fluorescência de raios-X.

2.5.4 Pesquisas com o pó de aciaria elétrica

Vargas *et al.* (2004) avaliaram o comportamento do PAE em pastas de cimento Portland composto (CP II-Z) por meio da determinação dos tempos de pega e do calor de hidratação, bem como a sua caracterização mineralógica e microestrutural, com o objetivo de uma possível utilização na construção civil.

Machado *et al.* (2002) analisaram o comportamento mecânico e ambiental do concreto de média resistência (cerca de 20 MPa) contendo adição do PAE nos teores de (10, 15, 20 e 25) %, em relação à massa de cimento. Os resultados preliminares indicaram um aumento de 69,2 % na resistência à compressão axial do concreto contendo 15 % de PAE e aumento de 81,2 % para o concreto com 20 % de PAE. Além disso, observou-se um retardamento no ganho de resistência mecânica dos corpos-de-prova com teores de PAE acima de 10 %.

Castro *et al.* (2016) estudaram a incorporação de resíduos siderúrgicos em substituição parcial ao solo para a fabricação de blocos de solo-cimento, entre eles a adição de até 10 % em massa de PAE. Os resultados obtidos sugerem a potencialidade de uso dos resíduos siderúrgicos em blocos intertravados de solo-cimento para alvenaria sustentável, como alternativa de aplicação para esses resíduos se obteve como um dos resultados satisfatórios, 2,5% de PAE juntamente com 20% de reuso do bloco solo-cimento.

Machado *et al.* (2005) realizaram a caracterização química e estrutural de duas amostras de PAE com diferentes conteúdos de Zn. Com a caracterização concluiu que em relação aos compostos de Zn, quanto maior a concentração desse elemento, maior o teor de ZnO e menor o teor de ZnFe₂O₄.

Maslehuddin *et al.* (2010) avaliaram as propriedades mecânicas e a durabilidade características do cimento Portland comum e cimento misturado com PAE com substituição de 2% do conteúdo total de cimento. O tempo de pega, a retração e a resistência a corrosão aumentaram devido a incorporação do PAE, já a absorção de água e a permeabilidade diminuíram.

Silva (2013) elaborou formulações cerâmicas com adição de 10 a 40% de PAE, que depois de prensados foram sinterizados em temperaturas de 850 a 1000 °C em forno elétrico. Verificou-se que a incorporação do PAE à massa cerâmica proporcionou melhorias consideráveis nas características físicas e mecânicas avaliadas através de ensaios tecnológicos. Os melhores resultados foram para a formulação com 30% de PAE na temperatura de 1000 °C, mas foi possível obter boas propriedades em temperaturas abaixo de 1000 °C como a absorção de água e a resistência mecânica.

2.5.5 Pesquisas com lamas

Mothé (2008) caracterizou e incorporou numa massa cerâmica argilosa, utilizada para a fabricação de tijolos e telhas, lama de alto-forno em quantidades de até 20% em peso. Os resultados mostraram que a lama de alto-forno é um resíduo combustível que apresenta um poder calorífico elevado, contribuindo assim para a economia de energia durante a etapa de queima da cerâmica. Entretanto, esta incorporação deve ser realizada em pequenas quantidades, máximo de 5% em massa para a mistura de argila utilizada para evitar o efeito deletério na cerâmica.

Sobrinho e Tenório (2004) realizaram, em escala de laboratório, um estudo da recuperação dos metais cromo e níquel, contidos em lamas do processo de fabricação do aço, utilizando-se altas temperaturas (1570, 1600 e 1635°C.). Os resultados mostraram que é

possível, recuperar os metais contidos nos resíduos através desse processo, produzindo uma liga à base de ferro, cromo e níquel.

2.5.6 Pesquisas com a carepa

Bagatini (2011) afirma em seu estudo a possibilidade do uso de briquetes autorredutores, formados por carepa, finos de carvão vegetal e aglomerantes em fornos elétricos a arco, ressaltando-se que o material produzido deve apresentar elevada taxa de redução e uma boa resistência mecânica.

Fay (2006) utilizou técnicas à base de fosfato para o aproveitamento e reciclagem de pó de carepa para a fabricação de elementos construtivos em alvenarias na construção civil. As diversas composições estudadas dos solidificados apresentaram valores de resistência à compressão acima dos valores citados nas referências de outros materiais, e os teores dos elementos solubilizados e lixiviados abaixo dos valores permitidos pela norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Além disso, os baixos valores de densidade apresentados pelos corpos de prova tornam esse material viável, sem risco ambiental, e até competitivo para o mercado, podendo ser sugerido na aplicação de diversos elementos construtivos para alvenarias. Porém, a alta absorção de água devida à porosidade do material pode vir a restringir o seu uso em elementos utilizados em ambientes sujeitos a altos teores de umidade.

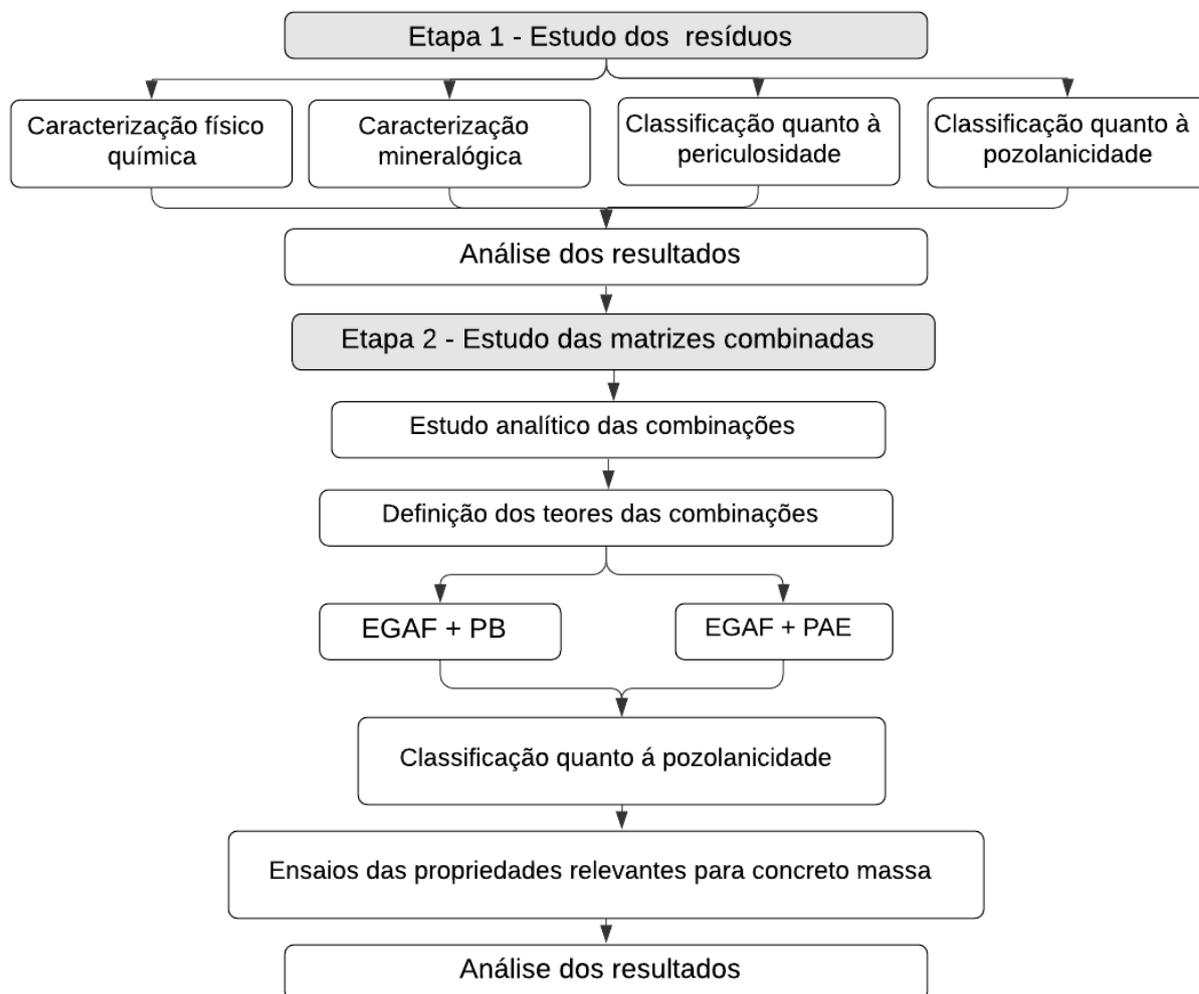
Magalhães, Sobrinho e Mazur (2011) utilizaram a carepa de laminação para tratamento químico de solo para plantio de eucalipto e constatou que os teores dos elementos de metais pesados diminuíram em todas as partes das plantas, verificando que na maior dose as folhas apresentaram concentrações de cádmio e zinco na faixa considerada normal para o desenvolvimento do eucalipto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas, sendo a Etapa 1 dedicada à fase de Estudo dos Resíduos Siderúrgicos PB, PAE e EGAF, analisando as suas características, físico-químicas e mineralógicas e ainda, verificando a existência de possível atividade pozolânica dos materiais.

Na Etapa 2, objetivou-se a avaliação da viabilidade dos resíduos na forma combinada com a escória de alto-forno, em matrizes cimentícias aplicadas à concreto massa, sendo executados os ensaios das propriedades mais importantes para concretos de grande volume, a saber: calor de hidratação, reatividade do cimento com os agregados (RAA), tempos de início de fim de pega. O fluxograma da Figura 14 demonstra as etapas do programa experimental da pesquisa.

Figura 14 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.1. Etapa 1 – estudo dos resíduos

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Cimento

O aglomerante selecionado para a pesquisa foi o cimento composto com adição de fíler, CP II-F 32, adquirido na loja de material de construção local. É válido ressaltar que como proposta inicial do estudo, planejou-se a utilização do cimento isento de adições minerais (cimento puro), denominado de CPI, para avaliar melhor a influência das adições na matriz cimentícia. Entretanto, após contato com diversas cimenteiras foi verificado que este cimento não se encontrava mais disponível para aquisição comercial, apenas para casos de encomendas de obras de grande volume de concretagens, como foi o caso da UHE Belo Monte.

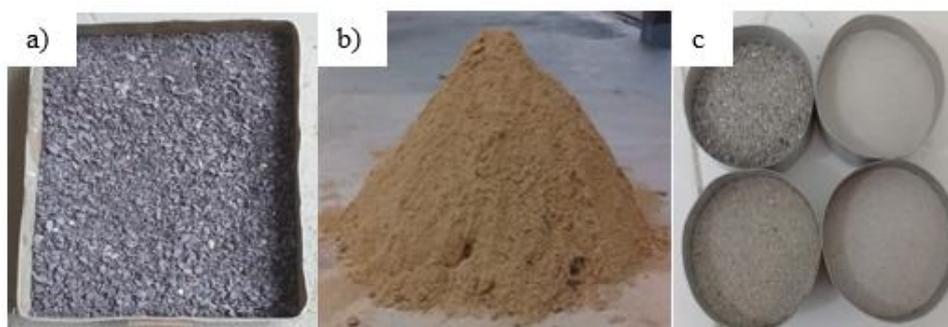
3.1.1.2 Agregados

Foram utilizados agregados miúdos e graúdos na pesquisa para atender alguns ensaios das propriedades exigidas para concreto massa, sendo estes, RAA, índice de Atividade pozolânica e calor de hidratação.

Para o ensaio de RAA, foi utilizada tanto a areia natural extraída do leito do rio Tocantins quanto o pedrisco proveniente dos processos de escavações de rochas para implantação das obras da UHE Tucuruí para a produção de corpos de prova de argamassa, (Figura 15).

Para os ensaios de índice de atividade pozolânica, calor de hidratação e resistência á compressão do cimento, foi utilizada a areia denominada de normal, com granulometria em conformidade às recomendações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que segue a norma ABNT NBR 7214:2015 como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Agregados: a) pedrisco; b) areia natural e c) areia normal padrão IPT.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.1.1.3 Água

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a água potável proveniente da rede de abastecimento da Vila Permanente da cidade de Tucuruí, fornecida pela Eletrobras/Eletronorte. Para a preparação dos reagentes necessários e para alguns ensaios foi utilizada água destilada do Laboratório de Química da Universidade Federal do Pará - Campus Tucuruí.

3.1.1.4 Resíduos da indústria siderúrgica

Os resíduos selecionados para a pesquisa foram provenientes da empresa Siderúrgica Norte Brasil S. A. – SINOBRAS, localizada na cidade de Marabá, sudeste do estado do Pará. A Escória Granulada de Alto-forno (EGAF), obtida da etapa de produção do ferro gusa, apresenta-se na forma granular, contendo grãos com alta densidade e dureza; o Pó de Balão (PB) também gerado na etapa de produção do ferro gusa foi coletado do filtro de mangas no alto-forno e apresenta-se na forma de pó, contendo algumas frações maiores de cinzas; o Pó de Aciaria Elétrica (PAE), resíduo resultante da etapa de aciaria, coletado através de sistema de exaustão em filtros de manga, apresenta-se inteiramente na forma de material pulverulento.

3.1.1.5. Aditivo químico

Para garantir uma boa consistência, no caso das argamassas preparadas para atender aos ensaios de índice de atividade pozolânica e de calor de hidratação, foi utilizado o aditivo químico multifuncional Muraplast FK -101 do fabricante MC-BAUCHEMIE. Este produto é utilizado de forma corrente no mercado de concretos e argamassas devido à sua boa eficiência.

3.1.2 Métodos

3.1.2.1 Preparação e beneficiamento dos resíduos

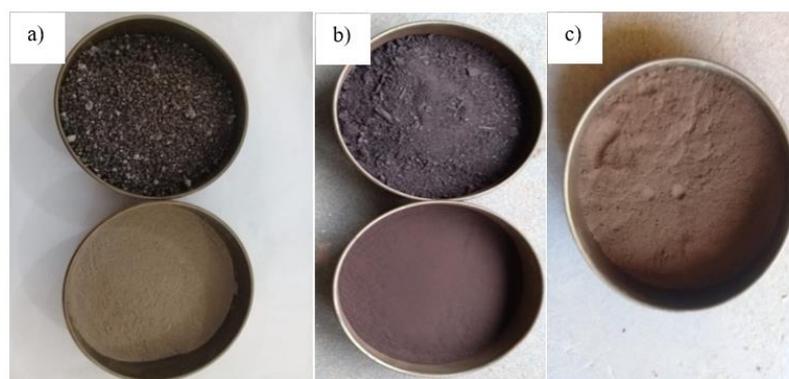
Para que os resíduos fossem aplicados na pesquisa com granulometria de pó, foram realizados os seguintes processos de beneficiamento nos materiais:

- a) EGAF: processo de moagem em abrasão Los Angeles, seguida de peneiramento na peneira #200;
- b) PB: processo de peneiramento na peneira #200;

c) PAE: não foi realizado beneficiamento, sendo utilizado *in natura* devido ao aspecto de pó verificado pela avaliação visual.

Os resíduos estão apresentados na Figura 16, onde é possível observar o aspecto dos resíduos *in natura* (PAE) e no caso da EGAF e do PB, após beneficiamento.

Figura 16 – Resíduos: a) EGAF in natura e após beneficiamento; b) PB in natura e após beneficiamento e; c) PAE in natura.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.1.2.2 Caracterização físico-química dos resíduos

Nesta etapa foram realizados todos os ensaios básicos para caracterização dos resíduos envolvidos na pesquisa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, campus Tucuruí, com exceção da composição química.

3.1.2.2.1 Análise granulométrica

A composição granulométrica foi determinada com base na ABNT NBR NM 248:2003, pois por se tratarem de material na forma de pó foram utilizadas as peneiras #100, #200, #230, #270 e #400 com abertura de malha de 0,150mm; 0,075mm; 0,062 mm; 0,053 mm e 0,037 mm, respectivamente. Após o peneiramento, foi elaborado o gráfico de granulometria contendo a massa retida acumulada (%) *versus* abertura das peneiras (mm).

3.1.2.2.2 Densidade

A massa específica dos materiais foi determinada com base na ABNT NBR 16605:2017 por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual consiste no enchimento desse frasco com um líquido até as marcas de 0 a 1 cm³ e enchê-lo com o material de massa conhecida até o deslocamento do líquido entre as marcas de 18 cm³ a 24 cm³.

3.1.2.2.3 Composição química

As medidas de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro *Rigaku* modelo *ZSX Primus IV*, equipado com tubo de Rh, localizado no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, no Campus de Samambaia da Universidade Federal de Goiás.

Para análise dos elementos menores, os resultados foram obtidos por pacote de curvas *GeoTrace 3®* da *Rigaku*. Os elementos menores estão representados em partes por milhão (ppm).

3.1.2.3 Composição mineralógica

As medidas de difração de raios X (DRX) foram realizadas em um difratômetro *Bruker D8 Discover*, localizado no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, no Campus de Samambaia da Universidade Federal de Goiás, utilizou-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador *Johansson* para $K_{\alpha 1}$ operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano θ - 2θ , detector unidimensional *Lynxeye®*, intervalo de 2θ de 5° a 80°, com passo de 0,02°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida.

3.1.2.4 Classificação dos resíduos quanto à periculosidade

A classificação dos resíduos foi realizada apenas para os resíduos “desconhecidos” PB e PAE quanto à periculosidade, uma vez que os dados para a EGAF já haviam sido disponibilizados pela SINOBRAS. A avaliação da periculosidade foi orientada pela ABNT NBR 10004: 2004 que trata da classificação dos resíduos sólidos.

Dentre as etapas da classificação, conforme fluxograma, a norma indica a execução dos testes de lixiviação e solubilização, quando os resíduos não constam em listagem anexa à norma. Estas análises foram executadas pela empresa SGS GEOSOL Laboratórios Ltda, localizada Vespasiano, em Minas Gerais.

3.1.2.5 Caracterização dos resíduos quanto à pozolanicidade

Para a verificação da existência da atividade pozolânica dos resíduos siderúrgicos foram realizados os ensaios das propriedades físico – químicas constantes na Tabelas 5 e 6 da ABNT NBR 12653:2015. Esta norma estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados a uso de cimentos Portland em pasta, argamassa e concreto.

Tabela 5 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.

| Requisitos químicos | | | | |
|--|--------------------------------------|----------|----------|---|
| Propriedades | Classe do material pozolânico | | | Método de ensaio indicado pela Norma |
| | N | C | E | |
| (1) SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | ≥ 70 % | ≥ 50 % | ≥ 50 % | NBR NM 22:2012 |
| (2) SO ₃ | ≤ 4 % | ≤ 5 | ≤ 5 % | NBR NM 16:2012 |
| (3) Teor de umidade | ≤ 3 % | ≤ 3 % | ≤ 3 % | NBR NM 24:2002 |
| (4) Perda ao fogo | ≤ 10 % | ≤ 6 % | ≤ 6 % | NBR NM 18:2012 |
| (5) Álcalis disponíveis em Na ₂ O | ≤ 1,5 % | ≤ 1,5 % | ≤ 1,5 % | NBR NM 25:2003 |

Fonte: ABNT NBR 12653 (2015).

Tabela 6 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos.

| Requisitos Físicos | | | | |
|---|--------------------------------------|----------|----------|--------------------------|
| Propriedades | Classe do material pozolânico | | | Método de ensaio |
| | N | C | E | |
| (1) Material retido na peneira 45 µm | < 20 % | < 20 % | < 20 % | ABNT NBR NM 15894-3:2010 |
| (2) Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias | ≥ 90 % | ≥ 90 % | ≥ 90 % | ABNT NBR NM 5752:2014 |
| (*) (3) Atividade pozolânica com cal aos sete dias | ≥ 6 MPa | ≥ 6 MPa | ≥ 6 Mpa | ABNT NBR NM 5751:2015 |

Fonte: ABNT NBR 12653 (2015).

(*) Ensaio realizado, porém, não foi considerado na pesquisa porque no momento da desmoldagem ocorria a quebra do corpo de prova. Logo, a avaliação dos requisitos físicos se baseou nas propriedades (1) e (2).

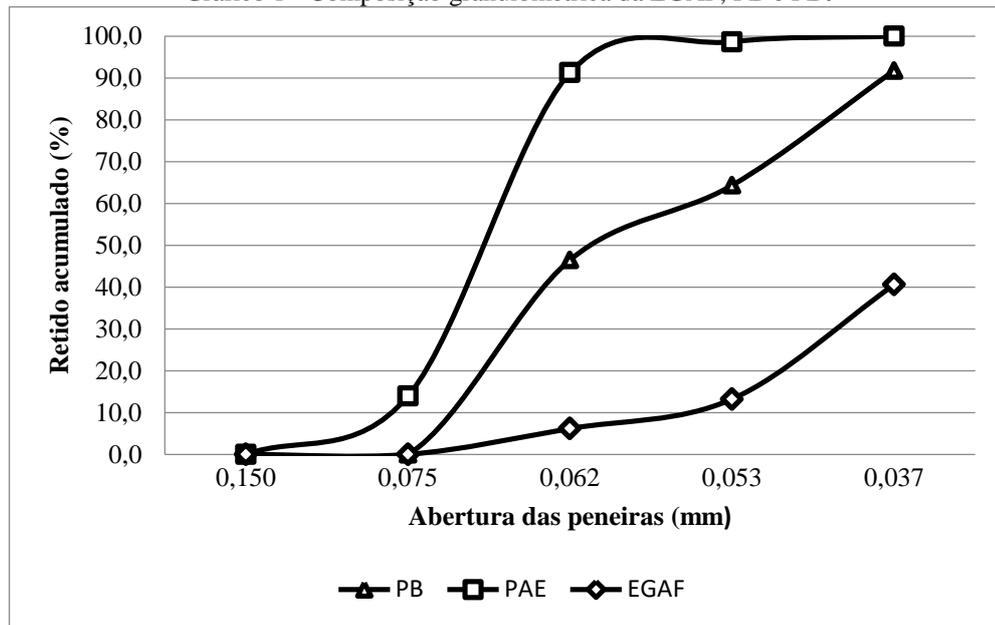
3.2 Apresentação e discussão dos resultados da etapa 1

3.2.1 Caracterização físico-química dos resíduos

3.2.1.1 Granulometria, densidade e composição química dos resíduos

O Gráfico 1 contém a curva granulométrica das adições (EGAF, PB e PAE) após beneficiamento para utilização na pesquisa.

Gráfico 1 - Composição granulométrica da EGAF, PB e PB.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Com base no Gráfico 1 verificou-se que o pó de aciaria (PAE), o qual foi utilizado na pesquisa na forma *in natura*, apresentou dimensão máxima (DMC) de 0,150 mm (peneira #100) e uma boa distribuição granulométrica. Em comparação com os demais resíduos, o PAE resultou em um material mais grosseiro. No caso do PB e da EGAF que foram utilizados na pesquisa, após peneiramento (peneira #200), a DMC foi de 0,075 mm, resultando em materiais em forma de pó, porém com curvas com menor distribuição granulométrica.

De acordo com Adorno (2017) quanto maior o nível de finura das adições minerais empregadas em compósitos de cimento Portland, maior é a resistência apresentada. Segundo Fonseca (2010) o uso de materiais finos como as adições minerais em concreto provoca o efeito microfíler devido o aumento da densidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições inferiores às partículas do cimento, o que consequentemente melhora o desempenho e a durabilidade do concreto.

Avaliando a propriedade de densidade dos resíduos, constatou-se que o PAE é o resíduo de maior densidade, obtendo valor de 4,52 g/cm³, seguido do PB (3,29 g/cm³) e da EGAF (2,87g/cm³). É possível justificar estes resultados por meio da composição química dos materiais, onde verifica-se para o PAE e PB, grande presença de metais pesados com elevada densidade dentre a família dos metais, tais como chumbo, zinco, cobre e cromo.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da caracterização química da EGAF, do PB e PAE.

Tabela 7 - Composição química dos resíduos.

| Óxidos analisados (%) | EGAF (%) | PB (%) | PAE (%) | Elementos traços Analisados | EGAF (ppm) | PB (ppm) | PAE (ppm) |
|--------------------------------|----------|--------|---------|-----------------------------|------------|----------|-----------|
| SiO ₂ | 45,44 | 3,96 | 4,90 | Sc | <LQ | <LQ | <LQ |
| TiO ₂ | 1,14 | 0,28 | 0,10 | V | 44 | 130 | 47 |
| Al ₂ O ₃ | 15,81 | 2,39 | 0,31 | Cr | 57 | 101 | 2900 |
| Fe ₂ O ₃ | 5,46 | 75,13 | 46,14 | Co | <LQ | <LQ | 13 |
| MnO | 2,24 | 0,36 | 2,82 | Ni | 6 | 9 | 260 |
| MgO | 2,89 | 0,21 | 2,14 | Cu | 17 | 102 | 1775 |
| CaO | 25,78 | 1,59 | 7,25 | Ga | <LQ | 6 | 162 |
| Na ₂ O | 0,42 | 0,02 | 0,44 | As | <LQ | <LQ | <LQ |
| K ₂ O | 1,15 | 0,07 | 0,18 | Rb | 34 | 9 | 63 |
| P ₂ O ₅ | <LQ | <LQ | 0,25 | Sr | 656 | 69 | 60 |
| SO ₃ | <LQ | <LQ | 1,00 | Y | 38 | 6 | <LQ |
| ZnO | <LQ | <LQ | 26,37 | Zr | 252 | 119 | <LQ |
| LOI (%) | 0,28 | 16,81 | 8,19 | Nb | 4 | 6 | 12 |
| - | - | - | - | Mo | <LQ | <LQ | 37 |
| - | - | - | - | Sn | 6 | 18 | 659 |
| - | - | - | - | Ba | 1033 | 164 | 375 |
| - | - | - | - | La | 76 | <LQ | <LQ |
| - | - | - | - | Ce | 112 | 28 | <LQ |
| - | - | - | - | Pb | 66 | 201 | 10818 |
| - | - | - | - | Th | 13 | <LQ | <LQ |
| Soma (%) | 100,61 | 100,82 | 100,09 | U | 9 | <LQ | <LQ |

(<LQ) = Abaixo do limite quantificável.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Analisando o resultado da composição química da escória (EGAF), observa-se a maior presença dos silicatos e aluminatos, sendo estes em ordem decrescente: sílica (SiO₂) (45,44%), cálcio (CaO) (25,78%) e alumina (Al₂O₃) (15,81%). Vale observar que a EGAF tem bastante utilização na indústria cimentícia, devido à mesma apresentar composição química semelhante ao Cimento Portland (GRUSKOVNJAK *et al.*, 2006).

A composição química do PB aponta que o seu maiores compostos são a hematita (Fe₂O₃) (75,13%), seguido de sílica em pequenas quantidades (SiO₂) (3,96%). A constituição

do PAE é em sua maioria formada por hematita (Fe_2O_3) (46,14%), seguida de óxido de zinco (ZnO) (26,37%), e um pequeno teor de sílica (SiO_2) (4,9%).

Verificando os elementos traços da composição química de todos os resíduos, identificou-se que para a EGAF, tem-se como metais pesados mais presentes, o bário (Ba)(1033 ppm) e o estrôncio (Sr) (656 ppm). O PB tem presente na sua composição em maior quantidade, o chumbo (Pb)(201 ppm) e o bário (164 ppm) e na composição do PAE, pode-se destacar além do chumbo (Pb)(10818 ppm), o cobre (Cu)(1775 ppm), o cromo (Cr)(2900 ppm) e o estanho (Sn)(659 ppm).

Estes resultados podem ser compreendidos devido ao processo de produção do aço, que na etapa do alto-forno gera os resíduos de EGAF e PB não são adicionadas ligas metálicas no processo, o que resulta em uma composição química com menor presença de metais pesados, enquanto que na etapa da aciaria, onde se obtém o resíduo PAE, já é verificada considerável presença dos metais pesados, devido à adição de sucatas e de elementos de liga para ajuste da composição química do aço (SINOBRAS, 2020).

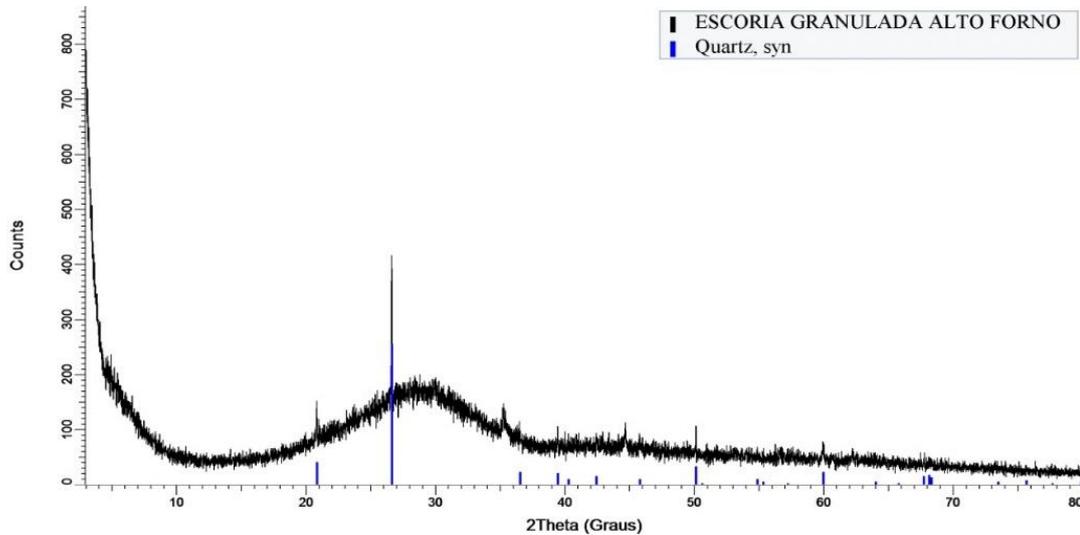
Cabe citar que segundo Liu *et al.* (2018), os metais pesados, devido à sua não degradabilidade, se tornam persistentes no ambiente e acumulativos na cadeia alimentar e com isso apresenta um risco à saúde humana quando se apresentam em quantidades acima de limites estabelecidos.

A contaminação do solo por metais pesados em relação à saúde e meio ambiente no mundo se apresenta como uma grande preocupação, pois podem causar graves danos ecológicos, além de implicar em bioacumulação, por isso, esses elementos são considerados um dos grupos mais poluentes, e se concentram ao longo dos níveis tróficos da cadeia alimentar pelo fato de permanecerem no meio ambiente por muito tempo (VARDHAN *et al.*, 2019).

3.2.2 Caracterização mineralógica dos resíduos

A Figura 17 contém o difratograma da EGAF indicando a presença de picos na forma do mineral quartzo, que segundo Demange (2012) é o principal mineral do grupo da SiO_2 dos tectossilicatos, sendo evidenciado a predominância do quartzo na análise da composição química da escória que indicou percentual da ordem de 45%. Este mesmo mineral também foi identificado na composição mineralógica da EGAF, em pesquisas realizadas por ANJOS *et al.*, (2021); CECHIN, (2018); PIMENTEL *et al.*,(2019).

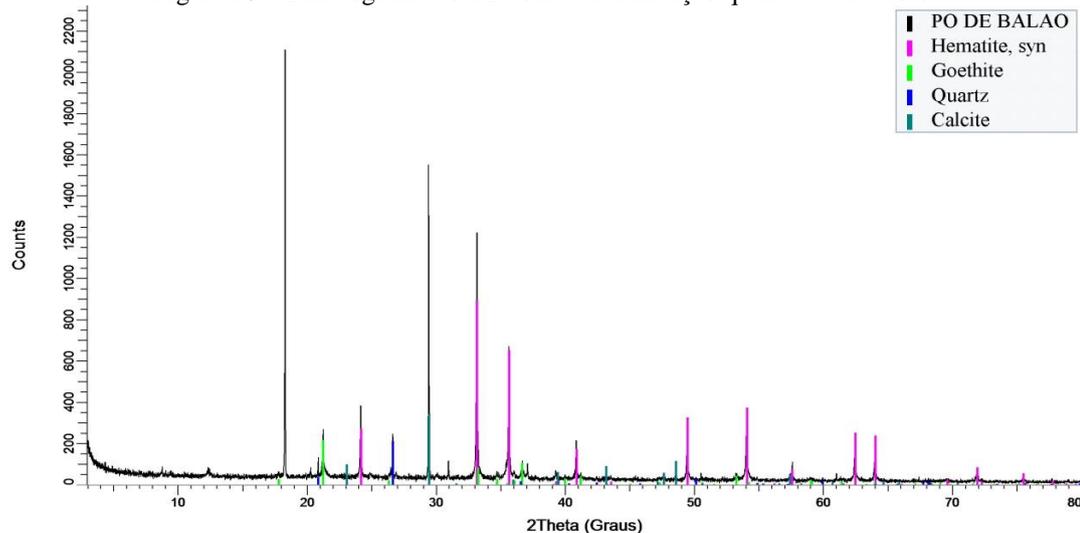
Figura 17 - Difratoograma da EGAF com a identificação qualitativa de fases.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Analisando a Figura 18, o PB apresentou fases cristalinas variadas, com picos bem definidos, principalmente a hematita (Fe_2O_3) verificada com maior intensidade, correspondendo a 75% da composição química, conforme apresentada no item 4.1.2. Também foram identificadas fases cristalinas de goethita, um mineral do óxido de ferro, quartzo e calcita. Estes mesmos minerais também foram identificados na composição mineralógica do PB, em pesquisas realizadas por QUEIROGA, (2020); SILVA *et al.*, (2021); SILVA, R, *et al.* (2017).

Figura 18 – Difratoograma do PB com a identificação qualitativa de fases.

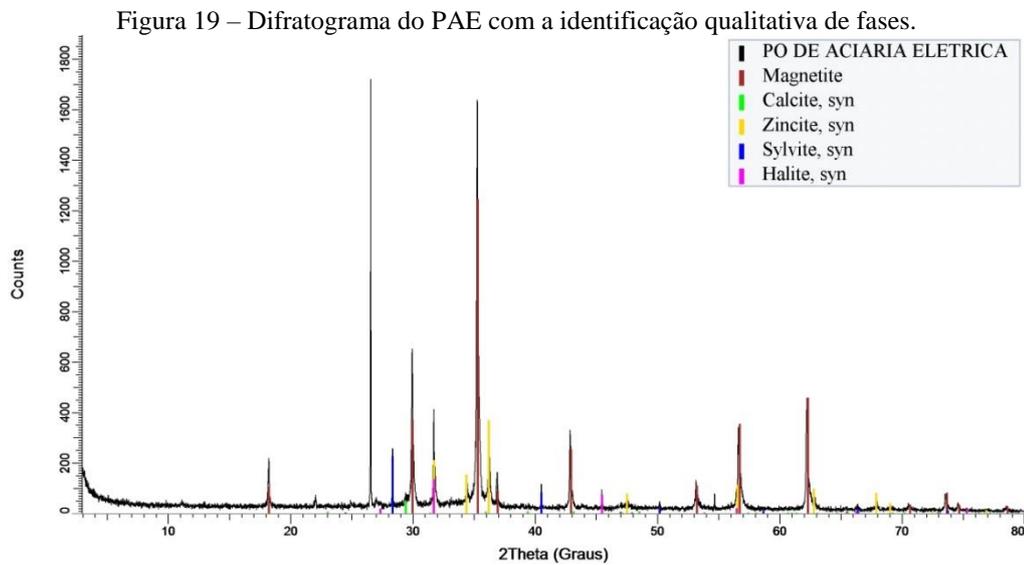


Fonte: Próprio Autor, 2021.

O difratograma do PAE indicou a presença dos seguintes minerais: magnetita, calcita, zincita, silvita e alite, podendo destacar principalmente a intensidade da magnetita

(Fe_3O_4) e a frequência da zincita (ZnO), havendo relação direta com a composição química do PAE (item 4.2.1) que revela presença de ferro e óxido de zinco como maiores constituintes do PAE. Estas fases também foram encontradas por PAULA, (2013); MAGALHÃES *et al.* (2017); FAGUNDES *et al.*, (2020); ARNOLD, (2017).

A presença de alita, que também pode ser representada pela fórmula química C_3S (silicato de cálcio), foi um diferencial em relação a outras literaturas, provavelmente isso seja devido à composição variada da sucata utilizada no forno elétrico (SUETENS *et al.*, 2015). O difratograma do PAE está apresentado na Figura 19.

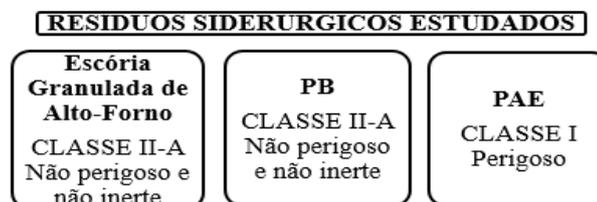


Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.2.3 Classificação quanto aos resíduos sólidos

A Figura 20 apresenta o resultado das classificações dos resíduos de EGAF, PB e PAE, de acordo com ABNT NBR 10004:2004.

Figura 20 - Classificação dos resíduos da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

A partir dos ensaios previstos para a classificação dos resíduos sólidos, constatou-se que a EGAF se trata de um resíduo, Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte) por apresentar teor de alumínio na amostra solubilizada, acima do limite máximo permitido pela ABNT NBR 10004:2004.

Na avaliação da corrosividade, este resíduo ficou classificado como não corrosivo por não ser aquoso e não apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 ou sua mistura com água, na proporção 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5 (pH:8,92).

Com relação à reatividade, o resíduo se classifica como não reativo por não ser normalmente instável e não reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; não reagir violentamente com água e não formar misturas potencialmente explosivas com a água.

O resíduo PB, também obteve a classificação Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte), por apresentar teor de manganês na amostra solubilizada acima do limite máximo normativo da ABNT NBR10004:2004, enquanto que para a corrosividade e a reatividade, constatou-se que o PB se trata de um resíduo não corrosivo (pH:7,72) e não reativo por apresentar características iguais à EGAF.

A classificação do PAE foi enquadrada como Classe I (Resíduo Perigoso), pois através do ensaio de lixiviação (utilizada em resíduos Classe I) foi possível constatar que o mesmo apresentou teores de 2,384mg/L de cádmio (Cd) e 12,20mg/L de chumbo (Pb), sendo estes valores acima do limite máximos normatizado (0,5mg/L e 1,0mg/L) pela ABNT. No Apêndice H é possível verificar os dados obtidos no ensaio.

Na composição química apresentada na Tabela 7 não foi observada a presença de cádmio, entretanto, pode-se considerar que o cádmio trata-se de um elemento presente na amostra, haja vista que este metal obteve alta concentração no resíduo lixiviado.

Verificou-se ainda que o PAE se caracterizou como não corrosivo, devido não ser aquoso e não apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 ou sua mistura com água, na proporção 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5 (pH:10,11).

Na análise de reatividade, o resíduo se classifica como não reativo por não ser normalmente instável e não reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; não reagir violentamente com água e não formar misturas potencialmente explosivas com a água.

Na análise complementar de toxicidade por solubilização realizada para resíduos perigosos, o resultado indicou teores de chumbo, cloreto, fluoretos, selênio, sódio, sulfato e surfactantes, acima do limite máximo permitido pela ABNT NBR10004:2004. Os resultados de todas as análises laboratoriais (corrosividade, reatividade, lixiviação e solubilização) podem ser verificados nos Anexo A ao Anexo F e; Apêndice A ao Apêndice L.

A partir da classificação dos resíduos estudados é possível afirmar que, apesar dos resíduos EGAF e PB não serem perigosos, os mesmos podem apresentar propriedades

biodegradáveis, comburentes ou solúveis em água, já que foram classificados como não inertes. Maior preocupação ainda é verificada com a disposição do PAE, por ser um resíduo perigoso, e conseqüentemente mais prejudicial ao meio ambiente.

Conforme registros do Memorial descritivo da SINOBRAS (2020), a siderúrgica já considera a reutilização do PB no próprio processo de produção do ferro gusa e a destinação da EGAF para cimenteiras.

Para o resíduo EGAF, a situação da destinação é bem mais favorável, já que este resíduo apresenta características cimentantes, e/ou às vezes pozolânicas, conforme pesquisas já reconhecidas pelo meio acadêmico (GRUYAERT *et al.*, 2010; ROSSA JR. e PORTELLA, 2012; GÓMEZ *et al.*, 2015; LIDUÁRIO *et al.*, 2016). O Memorial descritivo da SINOBRAS (2020), destaca, porém, que a quantidade de escória de alto-forno gerada e destinada à cimenteiras é maior do que a demanda existente, sendo relevante verificar novas alternativas de utilização do resíduo.

3.2.4 Caracterização das resíduos quanto à pozolanicidade

Os resultados da caracterização de todos os resíduos, quanto à pozolanicidade, estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da caracterização dos resíduos quanto à pozolanicidade.

| Ensaio | RESULTADOS | | | Requisitos ABNT NBR 12653:2015 (Classe E) | Verificação |
|---|--|------------------------------|------------------|---|----------------------|
| | Escória granulada de alto-forno (EGAF) | Pó de aciaria elétrica (PAE) | Pó de balão (PB) | | |
| $S_iO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3$ | 66,71 | 51,35 | 81,48 | ≥ 50 | Atenderam |
| SO ₃ | 0,1 | 1,0 | 0,1 | ≤ 5 | Atenderam |
| NaO ₂ | 1,18 | 0,56 | 0,07 | $\leq 1,5$ | Atenderam |
| Perda ao Fogo (%) | 0,82 | 10,95 | 15,8 | ≤ 6 | Somente EGAF atendeu |
| Finura Material retido na peneira de 45 μ m (%) | 44,91 | 42,5 | 75,9 | ≤ 20 | Não atenderam |
| Teor de Umidade (%) | 1,9 | 0,07 | 0,02 | ≤ 3 | Atenderam |
| Índice de desempenho (%) | 99,75 | 85,45 | 78,25 | ≥ 90 | Somente EGAF atendeu |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7 constatou-se que o PB e o PAE não se caracterizam como material pozolânico, uma vez que, não atenderam todos os requisitos da

ABNT NBR 12653:2015, pois o PB e o PAE apresentaram perda ao fogo elevada, grande quantidade de material retido na peneira de 45 μm e índice de desempenho inferior a 90 %.

A EGAF apenas não atendeu o requisito de finura, este fator pode ser devido ao processo de beneficiamento para a obtenção da mesma, mas como a EGAF atendeu praticamente todos os requisitos, ela pode ser considerada um material pozolânico. Esse resultado da constatação de atividade pozolânica já foi verificado por vários autores. (GRUYAERT *et al.*, 2010; GÓMEZ *et al.*, 2015; SANTOS, 2011.)

Escórias obtidas de fornos de carvão vegetal geralmente apresentam relação CaO/SiO_2 baixa, sendo assim consideradas ácidas. No caso escórias que são geradas de fornos de coque são consideradas básicas. Encontra-se na literatura a seguinte relação: $\text{CaO/SiO}_2 < 1$ Escórias Ácidas e $\text{CaO/SiO}_2 > 1$ Escórias Básicas (MALARD, 2009).

As escórias ácidas, normalmente não apresentam características cimentantes, apresentando apenas características de material pozolânico. No caso das escórias básicas, devido a sua reatividade, são considerados materiais cimentícios que podem ser utilizados na fabricação de cimento Portland (BLACK, 2016).

3.3 Conclusões da etapa 1

A partir do estudo das características dos resíduos PAE e PB, quando da sua aplicação como adição em matrizes cimentícias, concluiu-se que os mesmos não apresentam propriedades pozolânicas, não atendendo aos limites da ABNT NBR 12653:2015. Já para a EGAF, considerou-se tal resíduo pozolânico, o que era de se esperar, uma vez que este material apresenta composição química similar a dos cimentos (dióxidos de sílica e hidróxido de cálcio), diferentemente dos resíduos de PAE e PBA que apresentam composição básica formada por óxidos de ferro e metais pesados.

As densidades dos materiais foram bastante variadas entre os resíduos, sendo o mais denso o PAE (4,52g/cm³), seguido do PB (3,29g/cm³) e por último, a EGAF (2,87g/cm³). Esta diferença de densidade está relacionada com a composição química dos materiais, uma vez que o PB e PAE apresentam considerável quantidade de metais de alta densidade em sua composição (chumbo, cromo). Enquanto, que a EGAF, apesar de ter presente metais, estes não possuem alta densidade (estrôncio e zircônio). A detecção de metais pesados foi verificada também nos difratogramas de DR-X, quando analisada a composição mineralógica dos resíduos.

Com relação a classificação dos materiais, por meio da norma de resíduos sólidos (ABNT NBR 10004:2004), o EGAF e o PB se enquadram na Classe IIA (Não Perigoso – Não

Inerte) e o PAE na Classe I (Perigoso), sendo mais uma informação importante para a busca de destinações tecnicamente viáveis para estes resíduos que são gerados diariamente pela indústria estudo de caso, somando 250 kg para cada tonelada de aço fabricado.

Ao se analisar a possibilidade da aplicação dos resíduos selecionados em matrizes cimentícias, a serem avaliadas posteriormente, concluiu-se que o PB e PAE não apresentaram propriedade de adição mineral pozolânica, sendo redefinido como utilização na forma combinada com a EGAF, viabilizando assim o índice de desempenho dos resíduos PB e PAE.

Pesquisa de Lopes (2019) utilizou da mesma estratégia quando combinou a EGAF com PB em teores diversos de acordo com a composição química de cada material, obtendo assim melhor desempenho na combinação dos resíduos, no que se refere as propriedades de material pozolânico.

No item 3.4 – Etapa 2 da pesquisa serão elaboradas matrizes cimentícias contendo teores dos resíduos PB e PAE, combinados com teores de escória granulada de alto-forno (EGAF).

3.4 Etapa 2 – estudo das matrizes cimentícias combinadas

Tendo em vista que os resíduos de pó de aciaria elétrica (PAE) e pó de balão (PB) não apresentaram pozolanicidade, buscou-se primeiramente, determinar teores de combinação destes resíduos com a escória (EGAF+PB e EGAF+PAE), antes de elaborar as matrizes cimentícias e as suas respectivas propriedades.

3.4.1 Definição dos teores dos resíduos combinados

Para a definição dos teores combinados dos resíduos, adotou-se como base para a combinação a EGAF substituída parcialmente pelo PB e pelo PAE, em teores em massa de 30% e 50% respectivamente.

A escolha dos teores teve como referência a pesquisa de Lopes (2019), que por meio de análise dos parâmetros (físico-químicos) normativos, identificou as combinações que atenderiam às exigências das normas de requisitos de materiais pozolânicos (ABNT NBR 12653:2015) e requisitos de cimentos (ABNT NBR 16697:2018), visando o enquadramento dos resíduos, nas classes de cimentos pozolânicos. Os resultados das verificações estão apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9– Requisitos da EGAF e PB; e valores dos requisitos após combinação.

| Requisitos e limites (ABNT NBR 12653:2015) | | | Teor de combinação do EGAF e PB | | | |
|--|-------------|-------|---------------------------------|------------|----------|---------------|
| Requisitos (%) | Limites (%) | EGAF | PB | EGAF (70%) | PB (30%) | EGAF + PB (%) |
| P.F. Perda ao fogo | ≤6 | 0,82 | 15,81 | 0,57 | 4,74 | 5,32 |
| Teor de umidade | ≤3 | 1,9 | 0,03 | 1,33 | 0,01 | 1,34 |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | ≥50 | 66,71 | 81,48 | 46,70 | 24,44 | 71,14 |
| SO ₃ | ≤5 | 0,10 | 0,1 | 0,07 | 0,03 | 0,10 |
| Na ₂ O eq. | ≤1,5 | 1,18 | 0,07 | 0,82 | 0,02 | 0,84 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A partir da análise da tabela 9, verificou-se que para a combinação EGAF70 e PB30, os limites dos requisitos da ABNT NBR 12365:2015 foram atendidos, demonstrando um potencial para a utilização da mesma como adição mineral em matrizes cimentícias.

Na Tabela 10 estão apresentados os valores da combinação de EGAF e PAE em comparação com os requisitos da ABNT NBR 12653:2015.

Tabela 10 - Requisitos da EGAF e PAE; e valores dos requisitos após combinação.

| Requisitos e limites ABNT NBR 12653:2015 | | | | Teor de combinação do EGAF e PAE | | |
|--|-------------|-------|-------|----------------------------------|-----------|----------------|
| Requisitos (%) | Limites (%) | EGAF | PAE | EGAF (50%) | PAE (50%) | EGAF + PAE (%) |
| P.F. Perda ao fogo | ≤6 | 0,82 | 10,95 | 0,57 | 4,74 | 5,32 |
| Teor de umidade | ≤3 | 1,9 | 0,07 | 1,33 | 0,01 | 1,34 |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | ≥50 | 66,71 | 51,35 | 33,36 | 25,68 | 59,03 |
| SO ₃ | ≤5 | 0,10 | 1,00 | 0,07 | 0,03 | 0,10 |
| Na ₂ O eq. | ≤1,5 | 1,18 | 0,56 | 0,82 | 0,02 | 0,84 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Ao analisar a Tabela 10, pode-se verificar que assim como a combinação EGAF70+PB30, a combinação EGAF50+PAE50 também atendeu aos requisitos selecionados da ABNT NBR 12653:2015.

A mesma análise foi realizada para a verificação da matriz cimentícia composta por cimento (CP II F) e teor combinado (EGAF70+PB30) e; cimento (CP II F) com o teor combinado (EGAF50+PAE50), verificando a possibilidade da utilização da maior porcentagem de adição de material pozolânico para a composição do cimento CP II Z, no máximo 14%, e que atendessem aos requisitos químicos da norma ABNT NBR 16697:2018. Os dados desta análise estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Análise da combinação de EGAF e PB com o cimento CII F.

| Parâmetros | Limites (%) | Requisitos ABNT NBR 16697:2018 | | | Teor ótimo de mistura de adições | |
|--------------------|-------------|--------------------------------|-----------|---------------|----------------------------------|------------------|
| | | CP II F | EGAF e PB | CP II F (86%) | EGAF e PB (14%) | CP II Z (MATRIZ) |
| P.F. Perda ao fogo | ≤8,5 | 10,99 | 5,32 | 9,45 | 0,74 | 7,39 |
| SO ₃ | ≤4,5 | 3,37 | 0,10 | 2,90 | 0,01 | 2,91 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 12 - Análise da combinação de EGAF e PAE com o cimento CII F.

| Parâmetros | Limites (%) | Requisitos ABNT NBR 16697:2018 | | | Teor ótimo de mistura de adições | |
|--------------------|-------------|--------------------------------|------------|---------------|----------------------------------|------------------|
| | | CP II F | EGAF e PAE | CP II F (86%) | EGAF e PAE (14%) | CP II Z (MATRIZ) |
| P.F. Perda ao fogo | ≤8,5 | 10,99 | 5,89 | 9,45 | 0,82 | 8,29 |
| SO ₃ | ≤4,5 | 3,37 | 0,55 | 2,90 | 0,08 | 2,98 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Ao analisar as Tabelas 11 e 12 pôde-se verificar que as combinações EGAF70+PB30 e EGAF30+PAE30 com o cimento apresentaram valores dentro dos limites da ABNT 16697:2018, no que se refere à perda ao fogo e teor de anidro sulfúrico (SO₃), possibilitando assim o uso dessas matrizes nos ensaios de propriedades mais relevantes do concreto massa.

3.4.2 Análise dos teores dos resíduos combinados, quanto à pozolanicidade

Após a definição dos teores das combinações entre os resíduos (EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50), buscou-se avaliar a existência de atividade pozolânica dos materiais, por meio da verificação dos requisitos constantes na norma de adições pozolânicas, a ABNT NBR 12653:2015 de acordo com os requisitos mostrados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.

| Propriedades | Requisitos químicos | | | Método de ensaio indicado pela Norma |
|--|-------------------------------|---------|---------|--------------------------------------|
| | Classe do material pozolânico | | | |
| | N | C | E | |
| (1) SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | ≥ 70 % | ≥ 50 % | ≥ 50 % | NBR NM 22:2012 |
| (2) SO ₃ | ≤ 4 % | ≤ 5 | ≤ 5 % | NBR NM 16:2012 |
| (3) Teor de umidade | ≤ 3 % | ≤ 3 % | ≤ 3 % | NBR NM 24:2002 |
| (4) Perda ao fogo | ≤ 10 % | ≤ 6 % | ≤ 6 % | NBR NM 18:2012 |
| (5) Álcalis disponíveis em Na ₂ O | ≤ 1,5 % | ≤ 1,5 % | ≤ 1,5 % | NBR NM 25:2003 |

Fonte: ABNT NBR 12653 (2015).

Tabela 14 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos.

| Propriedades | Requisitos Físicos | | | Método de ensaio |
|---|-------------------------------|---------|---------|--------------------------|
| | Classe do material pozolânico | | | |
| | N | C | E | |
| (1) Material retido na peneira 45 µm | < 20 % | < 20 % | < 20 % | ABNT NBR NM 15894-3:2010 |
| (2) Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias | ≥ 90 % | ≥ 90 % | ≥ 90 % | ABNT NBR NM 5752:2014 |
| (*) (3) Atividade pozolânica com cal aos sete dias | ≥ 6 MPa | ≥ 6 MPa | ≥ 6 MPa | ABNT NBR NM 5751:2015 |

Fonte: ABNT NBR 12653 (2015).

(*) Ensaio realizado, porém, não foi considerado na pesquisa porque no momento da desmoldagem ocorria a quebra do corpo de prova. Logo, a avaliação dos requisitos físicos se baseou nas propriedades (1) e (2).

3.4.3 Análise das propriedades das matrizes cimentícias combinadas

As matrizes cimentícias contendo os teores combinados (EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50) foram submetidas aos ensaios das propriedades mais relevantes para

aplicações em concreto massa, sendo estes: resistência à compressão, tempos de pega, reação álcali-agregado e calor de hidratação.

3.4.3.1 Resistência á compressão axial do cimento

O ensaio de resistência à compressão axial do cimento foi avaliado através na ABNT NBR 7215:2019. Moldou-se um traço de referência (sem adição) e outros traços com as combinações das adições minerais em substituição ao cimento Portland, sendo seis corpos de prova para o traço de referência e seis para cada um dos seguintes teores: 14% EGAF70+PB30, e 14% EGAF50+PAE50, para a idade de 28 dias. A ruptura foi realizada em prensa mecânica conforme a Figura 21.

Figura 21 – Ensaio de compressão axial do cimento.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.4.3.2 Tempos de pega da pasta de cimento

Antes da execução do ensaio de tempo de pega, foi necessária a determinação da água de consistência normal das pastas de cimento com cada combinação de adições, conforme a ABNT NBR 16606:2018, foram moldadas pastas contendo somente cimento e outras duas com cimento e as combinações de adições minerais: EGAF70+PB30; e EGAF50+PAE50 nos teores de 14% de substituição em relação à massa de cimento, de acordo com a Tabela 15.

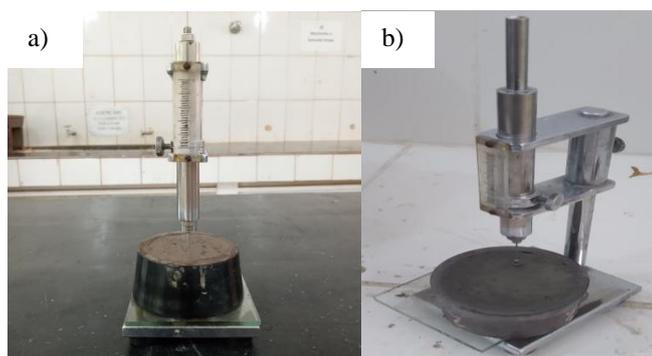
Tabela 15 - Materiais utilizados no preparo das pastas de cimento para tempos de pega.

| Identificação das pastas | Teor adição (%) | Cimento (g) | Adição (g) | Água (g) | a/c |
|--------------------------|-----------------|-------------|------------|----------|------|
| CP II F | 0 | 500 | 0 | 155 | 0,31 |
| CP II F + EGAF70+PB30 | 14 | 430 | 70 | 150 | 0,30 |
| CP II F + EGAF50+PAE50 | 14 | 430 | 70 | 140 | 0,28 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

No preparo das pastas tomou-se o cuidado para anotar o tempo exato que o cimento entrou em contato com a água, a fim de posteriormente a determinação do tempo de início de fim de pega. Essas determinações foram realizadas através do aparelho de Vicat de acordo com a ABNT NBR 16607:2018 como mostra a Figura 22.

Figura 22 - a) Início tempo de pega; b) Fim tempo de pega.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.4.3.3 Reação Álcali-Agregado (RAA)

Para a avaliação da reatividade álcalis do cimento e agregados (RAA) foram adotados os procedimentos indicados na ABNT NBR 15577:2018-4 que prescreve o método de ensaio acelerado em barras de argamassa, onde as mesmas após desmoldadas e passarem 24h imersas em água a 80°C, são colocadas em solução concentrada de NaOH a 80°C por um período de 30 dias.

Para expansão menor que 0,19% para 30 dias, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo, demonstrando que o mesmo pode ser utilizado para uso em concreto. Para expansão maior ou igual a 0,19% para 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo, não sendo passível de ser utilizado em aplicações de concretos massa.

A Figura 23 apresenta uma imagem do equipamento utilizado para as determinações do RAA, pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil/UFGA.

Figura 23 - Equipamento de banho térmico para ensaio de RAA.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Foram utilizados os agregados brita e areia (normalmente utilizados em concreto massa) em frações granulométricas de acordo com a ABNT NBR 15577:2018-4. Foram moldadas nove barras de argamassa para cada tipo de agregado, sendo três barras contendo apenas cimento como aglomerante e seis barras com a combinação de adições minerais em substituição parcial ao cimento (três barras cada combinação de adições). Após a moldagem, as barras foram submetidas à cura úmida por 24 h, e após a desmoldagem as barras foram submersas em água aquecida até 80 °C em banho-termorregulador por 24 h (Figura 24).

Figura 24 - a) Barras após a desmoldagem e b) Barras no banho-termorregulador; c) Etapa de medição da variação linear da barra.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

As barras de argamassas foram mantidas na solução de hidróxido por um período de 28 dias, e nesse período foram realizadas leituras obrigatórias nas idades de 16 dias e 30 dias contadas a partir da moldagem, e leituras intermediárias em cada período. As variações de comprimento das barras de argamassas foram determinadas por meio de um relógio comparador em um equipamento constituído de uma barra padrão para verificação do comparador de comprimento, conforme apresenta a Figura 24c.

3.4.3.4 Calor de hidratação do cimento

A medida do calor de hidratação é fundamental para estudar e compreender o desenvolvimento da hidratação de pastas cimentícias. Uma forma simplificada e eficiente de monitorar a velocidade de hidratação de pastas é a técnica de calorimetria semi-adiabática. Esta técnica consiste em submeter uma pasta de cimento a um sistema termicamente isolado, ou seja, que não permite troca de calor com o meio ambiente. Sendo assim, o calor liberado na hidratação do cimento é quantificado diretamente pela monitoração do fluxo de calor gerado pela pasta.

A ABNT NBR 12006:1990 descreve o método de ensaio do calor de hidratação do cimento que é realizado através de calorímetro semi-adiabático (Garrafa de Langavant) e de leitores de temperaturas (termopares) que são monitorados por sete dias, sendo realizadas leituras de temperatura em horários pré-determinados.

Para realização do ensaio foi preparada uma argamassa de referência contendo apenas cimento e as demais amostras com as combinações de adições minerais em substituição parcial do cimento no teor de 14%. A quantidade de materiais utilizados no preparo da argamassa foi de acordo com as especificações da ABNT NBR 12006:1990, sendo especificados 360 g de cimento, 1080 g de areia normal brasileira do IPT e 180g de água destilada, isso para o traço contendo apenas cimento como aglomerante. Nos demais traços substituiu-se parte do cimento pelas combinações de adições minerais. A Tabela 16 apresenta a quantidade de materiais em cada amostra.

Tabela 16 - Quantidade dos materiais utilizados no ensaio de calor de hidratação.

| Traços | Teor de adição (%) | Cimento (g) | Adição (g) | Areia (g) | Água (g) |
|------------------------|--------------------|-------------|------------|-----------|----------|
| CP II F | 0 | 360 | 0 | 1080 | 180 |
| CP II F + EGAF70+PB30 | 14 | 309,6 | 50,4 | 1080 | 180 |
| CP II F + EGAF50+PAE50 | 14 | 309,6 | 50,4 | 1080 | 180 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

As argamassas foram preparadas em cuba mecanizada, em seguida foram inseridas na lata de Langavant e introduzido no centro da superfície da argamassa um tubo de ensaio de 10 mm de diâmetro contendo 3 ml de óleo mineral. Após a vedação da lata de argamassa foi introduzido o termopar no tubo de ensaio contendo o óleo mineral, e por fim a lata de argamassa foi colocada dentro da garrafa de *Langavant*, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Etapas de execução do ensaio de calor de hidratação.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

As garrafas foram colocadas sobre uma chapa isolante seca e as temperaturas de hidratação foram monitoradas por oito dias, conforme a Figura 19. O instrumento utilizado para medição de temperatura foi o termopar tipo K acompanhado do voltímetro para leitura das temperaturas. Após a colocação das garrafas nas posições definitivas foi realizada a leitura inicial e nas primeiras 5 horas foram anotadas as temperaturas com intervalos de 1h entre elas, e a partir desse período as leituras foram realizadas com intervalos de no máximo 2h. No primeiro dia foram realizadas leituras das temperaturas até chegar-se a temperatura máxima. A temperatura ambiente foi monitorada continuamente de forma a garantir o que preconiza a norma (23 ± 2 °) e a umidade relativa do ar superior a 50 %.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS - ETAPA 2

4.1 Análise dos teores dos resíduos combinados, quanto à pozolanicidade

A Tabela 17 contém a verificação dos teores dos resíduos combinados (EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50) em relação aos requisitos exigidos para materiais pozolânicos, conforme ABNT NBR 12653:2015.

Tabela 17 – Verificação dos teores combinados, quanto à pozolanicidade.

| Parâmetros | Limites (%) | EGAF70+ PB30 | Verificação | EGAF50+PAE50 | Verificação |
|---------------------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|
| $S_iO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3$ | ≥ 50 | 71,14 | Atendeu | 72,35 | Atendeu |
| SO ₃ | ≤ 5 | 0,1 | Atendeu | 0,55 | Atendeu |
| NaO ₂ | $\leq 1,5$ | 0,84 | Atendeu | 0,87 | Atendeu |
| Perda ao Fogo (%) | ≤ 6 | 5,65 | Atendeu | 5,81 | Atendeu |
| Finura (%) | ≤ 20 | 54,21 | Não atendeu | 43,71 | Não atendeu |
| Teor de Umidade (%) | ≤ 3 | 1,34 | Atendeu | 0,99 | Atendeu |
| Índice de desempenho (%) | ≥ 90 | 74,13 | Não atendeu | 108,39 | Atendeu |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Para a análise da pozolanicidade da combinação (EGAF70+PB30) observou-se que sete dos requisitos da norma foram atendidos e dois não foram atendidos, sendo estes: parâmetro de finura e índice de desempenho. No caso da finura do material houve ineficácia no processo de beneficiamento realizado para obtenção de material pulverulento. Entretanto, este requisito é passível de atendimento, devendo apenas ser modificado o processo de cominuição e peneiramento da EGAF e, o processo de peneiramento do PB, visando obter uma adição extremamente fina, com no máximo de 20% de material retido na peneira de abertura 45 μ m, conforme requisito da norma.

O não atendimento do índice de desempenho da combinação EGAF70+PB30 pode ser explicado pela composição química do PB que apresenta mais de 75% de óxido de ferro, que segundo Neville (2016), no processo de hidratação do cimento não auxilia no ganho de resistência mecânica do cimento.

Avaliando a combinação (EGAF50+PAE50), quanto à atividade pozolânica, observou-se que todos os requisitos da norma foram atendidos, com exceção apenas do parâmetro de finura devido a ineficácia do processo de beneficiamento realizado para obtenção de material pulverulento. Para que seja atendida a finura do material, é necessário

modificar o processo de cominuição e peneiramento da EGAF e, realizar o peneiramento do PAE, visando obtenção de um material extremamente fino de no máximo de 20% de material retido na peneira de abertura 45 μm , conforme limite da ABNT NBR 12653:2015.

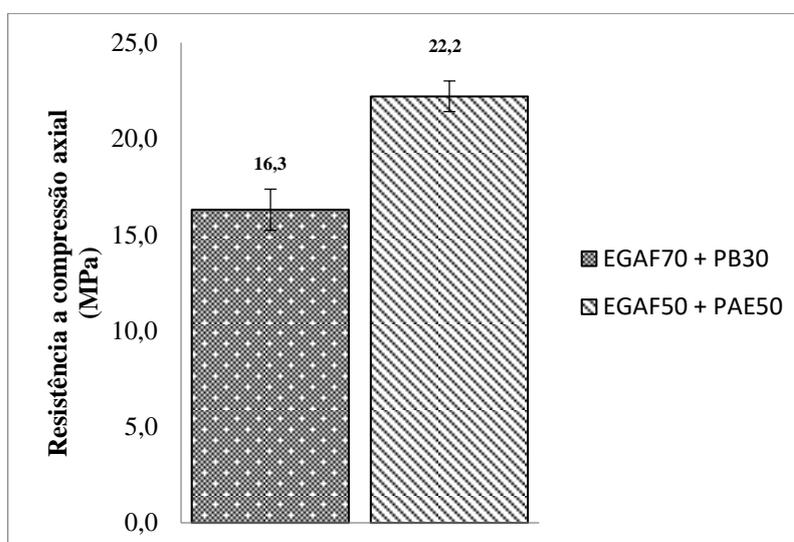
Partículas minúsculas auxiliam na aceleração de hidratação nas primeiras idades, devido ao efeito de compactação dos materiais constituintes e também contribuem para formação de hidratos da pasta cimentícia, aumentando sua resistência e diminuindo sua permeabilidade (METHA; MONTEIRO, 2014).

4.2 Análise das propriedades das matrizes cimentícias combinadas

4.2.1 Resistência à compressão

O Gráfico 2 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial média, aos 28 dias, das matrizes cimentícias combinadas (EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50)

Gráfico 2 - Resistência à compressão axial média e desvio padrão.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

De acordo com o resultado apresentado no Gráfico 2, verificou-se que a matriz contendo EGAF50+PAE50 apresentou melhor desempenho mecânico, resultando em 22 MPa, enquanto que a matriz de EGAF70+PB30 apresentou resistência menor, igual a 16 MPa.

Este comportamento pode ser explicado devido a melhor composição química e mineralógica do PAE, que contém compostos importantes para as propriedades cimentantes das matrizes, a exemplo da presença do mineral Alita, que se apresenta como fórmula química C_3S (silicato de cálcio).

Segundo Neville (2016) e Metha Monteiro (2014) o C_3S é um dos compostos responsável pela resistência mecânica do cimento. Ainda, em termos composição química, o PB é composto basicamente por óxido de ferro em, mais de 75%, que não atua no ganho de resistência.

4.2.2 Tempos de pega

Os resultados dos tempos de início e fim de pega dos cimentos com as combinações estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de tempo de pega.

| Identificação das pastas | Teor adição (%) | Água de consistência (%) | Início de Pega (h: min) | Fim de pega (h: min) |
|--------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| CP II F | 0 | 31 | 03:25 | 04:40 |
| CP II F + EGAF70+PB30 | 14 | 30 | 03:03 | 04:01 |
| CP II F + EGAF50+PAE50 | 14 | 28 | 09:09 | 10:55 |

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A partir da Tabela 17, avaliando-se as amostras com adição das combinações, tem-se que para a combinação EGAF50+PAE50 houve um aumento nos tempos de início e fim de pega em comparação com as amostras de referência. No caso das amostras com adições da combinação de EGAF70+PB30, considera-se que não houve alteração significativa para os tempos de início e fim de pega quando comparados à amostra de referência.

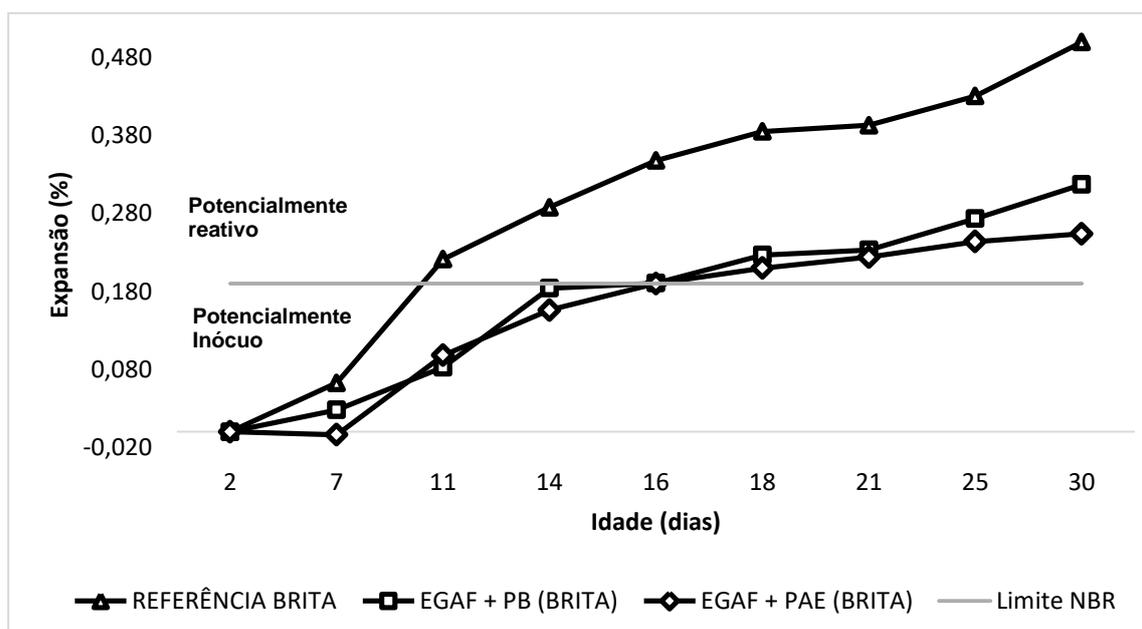
Comparando os resultados das amostras compostas por EGAF50+PAE50 com a amostra de referência verifica-se que a pasta apresentou tempo de início e fim de pega em aproximadamente 5hs e 6hs a mais que a pasta de referência. Estudos anteriores já indicaram retardo nos tempos de pega de pasta de cimento com adição de PAE, sendo eles, pesquisas de Metz (2016) e Fares et al. (2021).

Fares et al. (2021) explicam que essa característica se deve pela presença de ZnO (óxido de zinco) que retarda drasticamente o tempo de pega do cimento, no qual o ZnO presente no PAE, como apresentado na composição mineralógica, ao entrar em contato com C_3A do clínquer do cimento forma um produto de hidratação cristalino, o hidrozincato de cálcio ($CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$), resultando em aumento nos tempos de pega das pastas de cimento. Já na pasta com o PB, provavelmente não houve influência nos tempos de pega devido ao baixo percentual de ZnO na sua composição.

4.2.3 Reação Álcali-Agregado (RAA)

O Gráfico 3 apresenta os resultados das expansões das matrizes cimentícia contendo EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50, na presença de agregado graúdo (brita). E o Gráfico 4 contém os valores das expansões das matrizes cimentícia contendo EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50, na presença do agregado miúdo (areia).

Gráfico 3 - Expansões das matrizes cimentícia com e sem resíduos, na presença de brita.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

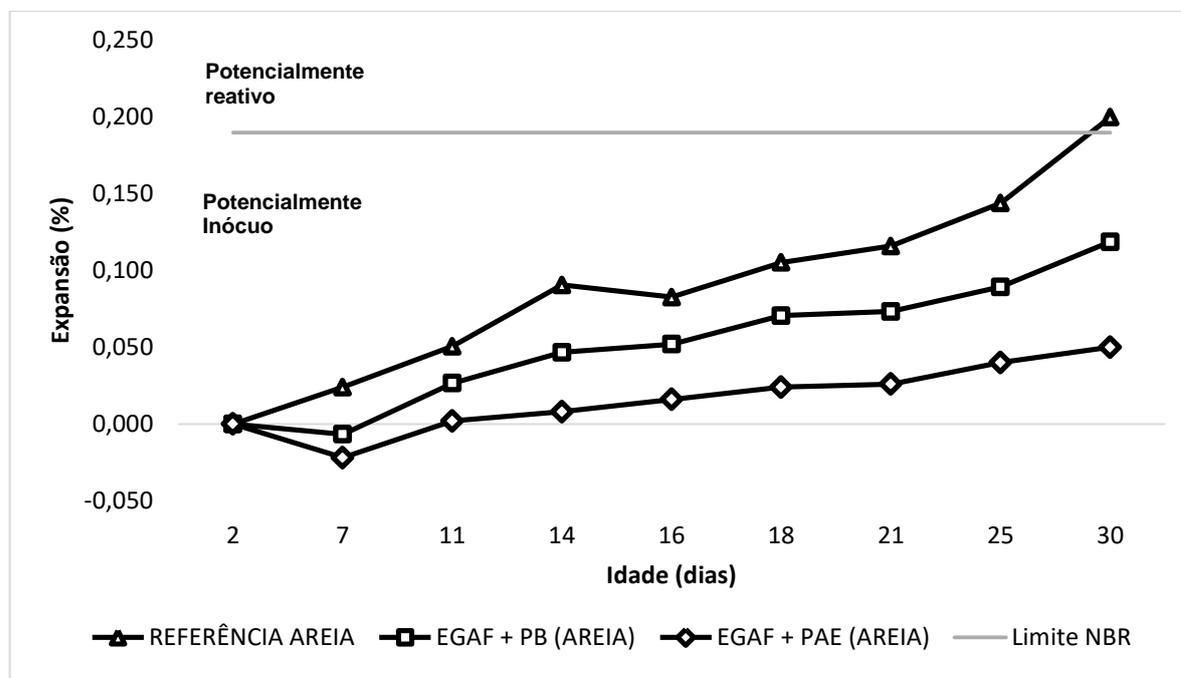
Analisando o Gráfico 3, o agregado brita sem adição, segundo ABNT NBR 15577-1:2018 é classificado como potencialmente reativo grau R2, pois apresentou expansão de 0,50% aos 30 dias de ensaio. Essa mesma norma apresenta que agregados com grau de reatividade R2 possuem grau de risco moderado de ocorrência de Reação Álcali-Sílica (RAS) para utilização em elementos de concreto maciço em ambiente seco, e grau alto em elementos expostos a umidade, ar ou imersas.

A ABNT NBR 15577-1:2018 define elemento maciço como aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1 metro, esse conceito se relaciona com o concreto massa que apresenta grandes dimensões. Em relação a elementos de concreto expostos a umidade, ar ou imersas, podemos citar como exemplo as barragens de concreto.

Ao analisar as expansões das amostras com adição de EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50, as mesmas apresentaram valores de 0,32% e 0,25% respectivamente, classificando a brita como potencialmente reativo grau R1 com risco mínimo de RAS para utilização em elementos de concreto maciço em ambiente seco, e grau moderado em

elementos expostos a umidade, ar ou imersas. Essa classificação possibilita a utilização da brita com adição de EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50 em concreto massa em ambiente seco e com moderação em ambiente expostos.

Gráfico 4 - Expansões das matrizes cimentícia com e sem resíduos, na presença de areia.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

O Gráfico 4 mostra que a areia sem adição é classificada como potencialmente reativo grau R1 segundo ABNT NBR 15577-1:2018, pois apresentou expansão de 0,20% aos 30 dias de ensaio. Esse tipo de agregado, como dito anteriormente, possui grau de risco mínimo de ocorrência de Reação Álcali-Sílica (RAS) para utilização em elementos de concreto maciço em ambiente seco, e grau moderado em elementos expostos a umidade, ar ou imersas.

As expansões das amostras com adição de EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50 apresentaram valores de 0,12% e 0,05% respectivamente, classificando a areia como potencialmente inócuo grau R0 com risco desprezível de RAS para utilização em elementos em qualquer situação, segundo a ABNT NBR 15577-1:2018.

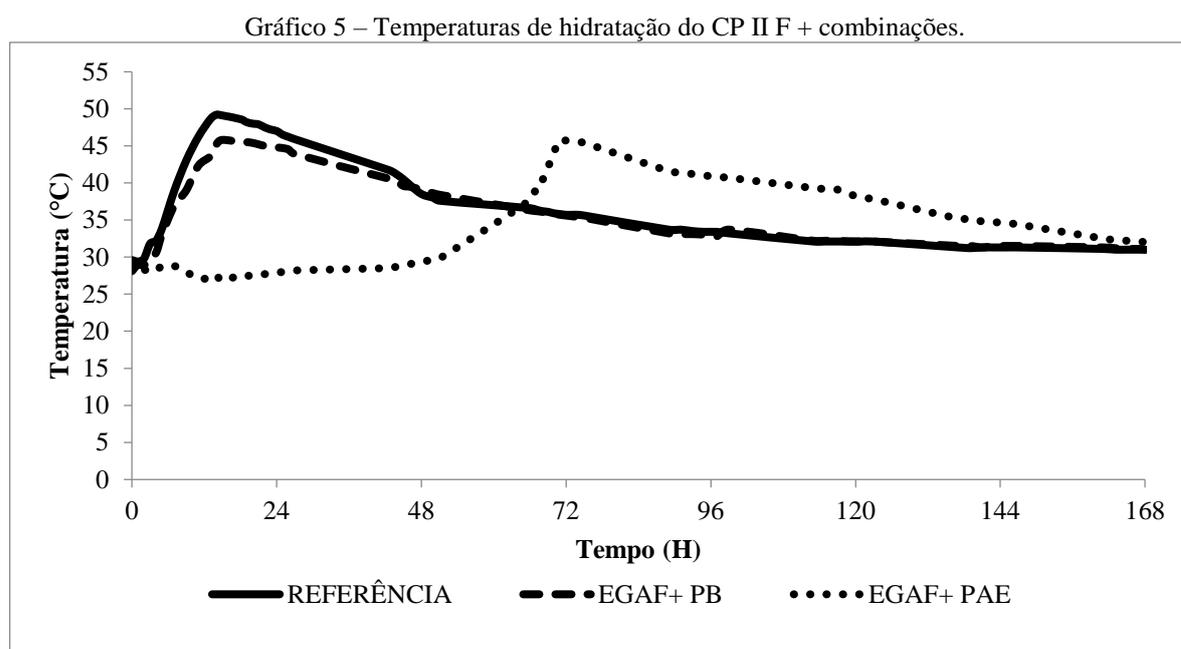
Essa classificação possibilita a utilização da areia com adição de EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50 em qualquer tipo de elemento de concreto, mesmo ele sendo maciço e exposto ao ar, umidade ou imerso. Nesse caso torna-se possível o uso desse agregado com EGAF70+PB30 e EGAF50+PAE50 em concreto massa de barragens, tanto em ambiente seco como expostos ou imersos, no requisito de reação álcali-agregado.

Estudos como de Cassiani *et al.* (2021), Pimentel *et al.* (2017), Souza *et al.* (2016) e Souza (2017), afirmam que quando a relação Ca/Si das adições for menor que 1, há mitigação das reações expansivas. No caso das combinações dessa pesquisa, a relação Ca/Si da combinação EGAF70+PB30 é igual a 0,56, e da EGAF50+PAE50 é igual a 0,66.

Esse baixo valor de relação Ca/Si se deve a EGAF apresentar essa relação isolada no valor de 0,57, já o PB e o PAE apresentam valores de 0,57 e 1,48 respectivamente. A combinação EGAF50+PAE50 apresentou maior mitigação nas expansões tanto na brita quanto na areia, isso pode ser devido à combinação ter característica de material pozolânico.

4.2.4 Calor de Hidratação

O Gráfico 5 apresenta a evolução das temperaturas semi-adiabática da geração do calor de hidratação do cimento das matrizes cimentícias com e sem o uso das combinações.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

A partir do Gráfico 5 pode-se constatar que o uso da combinação EGAF70+PB30 apresentou pico de temperatura máxima de hidratação menor do que a amostra de referência. A amostra de referência apresentou pico máximo de temperatura de 49,2°C enquanto a amostra com a EGAF70+PB30 mostrou temperatura máxima de 45,8°C, uma diminuição da temperatura de cerca de 7%. Este desempenho está relacionado com a menor quantidade de cimento na mistura, pois segundo Ribeiro *et al.* (2021) quanto menor o consumo de aglomerante no concreto, menor é a elevação de temperatura.

Com relação ao tempo para atingir a temperatura máxima, a amostra de referência alcançou esse valor no tempo de 14hs e a amostra de EGAF70+PB30 em 15hs, constatando que não houve grande influência nesse fator, o que proporcionaria o uso dessa combinação sem prejudicar tempos de cura e desforma de concretos.

Em paralelo com outras adições não pozolânicas, a pesquisa de Siqueira *et al.* (2020), obteve curvas de calor hidratação de finos de rochas graníticas com comportamento similar ao observado para amostra com EGAF70+PB30, ou seja, teores abaixo de 10% praticamente não alteraram o calor de hidratação, enquanto maiores teores proporcionaram menor geração de calor.

Analisando o Gráfico 5 verificou-se a influência da EGAF50+PAE50 na temperatura de hidratação do cimento Portland e o seu efeito retardador da geração de calor, pois o tempo de ocorrência do pico máximo de temperatura foi mais extenso. A argamassa de referência alcançou a temperatura máxima de hidratação de 49,2°C depois de decorridas 14hs de hidratação, no entanto a argamassa EGAF50+PAE50 atingiu a temperatura máxima de 45,8°C após 71h de hidratação.

Essa característica representa o efeito das reações químicas produzidas entre compostos presentes no PAE e compostos no cimento, que segundo Fares *et al.* (2021) a interação do Zn presente no PAE e o C₃A do clínquer do cimento leva à formação do hidrozincato de cálcio (CaZn₂(OH)₆2H₂O), um produto de hidratação cristalino, que gera atraso e redução da evolução de calor e na formação de etringita. Portanto, essa reação impossibilita a liberação de grandes quantidades de calor nas primeiras horas, característica intrínseca do C₃A.

Massarweh *et al.* (2020) destacam que o uso de PAE mostra-se de maneira positiva no controle da reação exotérmica produzida pela hidratação do cimento, possibilitando o seu uso em obras de grande porte que utilizam o concreto massa, como por exemplo as barragens.

5 CONCLUSÃO

A partir de estudo dos resíduos siderúrgicos da empresa SINOBRAS (EGAF, PB e PAE), concluiu-se que a escória de alto forno (EGAF), apresenta composição química e mineralógica similar aos cimentos portland, contendo óxidos de silício, cálcio e alumínio, revelando ter características de pozolanicidade (atendendo aos requisitos da ABNT NBR 12653:2015) e por isso a sua aplicação já é bastante disseminada no mercado de cimenteiras.

O pó de balão (PB), por sua vez trata-se de um resíduo de composição química, composto em sua maior parte, por óxidos de ferro, com presença de metais pesados, tais como o chumbo e o cromo. O pó de aciaria elétrica (PAE) é composto basicamente de óxido de ferro e óxido de zinco, com presença de pequeno teor de sílica. Ambos resíduos não apresentaram atividade pozolânica, implicando em adições não interessantes para aplicações de materiais cimentícios.

Com relação à classificação dos materiais, por meio da norma de resíduos sólidos (ABNT NBR 10004:2004) o EGAF e o PB se enquadram na Classe IIA (Não Perigoso – Não Inerte) e o PAE na Classe I (Perigoso).

Ao se analisar a possibilidade da aplicação dos resíduos selecionados em matrizes cimentícias, a serem avaliadas posteriormente, concluiu-se que o PB e PAE não apresentaram propriedade de adição mineral pozolânica, sendo redefinido como utilização na forma combinada com a EGAF, viabilizando assim o índice de desempenho do PAE.

A combinação de resíduo de PB com EGAF, nos teores de 30% e 70%, respectivamente, não conferiu propriedades pozolânicas ao material composto, devido a própria composição do PB que não favorece as reações pozolânicas. Por outro lado, a combinação do PAE com a EGAF em teores de 50% e 50%, respectivamente, indicou características pozolânicas em níveis consideráveis, agregando valor ao material combinado.

Com base na avaliação das propriedades das matrizes cimentícias devidamente combinadas, nos teores mencionados, foi possível concluir que a matriz EGAF50+PAE50, apresentou melhor desempenho em todas as propriedades requeridas para concreto massa, podendo destacar a redução da expansão por RAA, nos agregados brita e areia em 49% e 75% respectivamente.

Outra propriedade otimizada com o uso da matriz EGAF50+PAE50 foi o calor de hidratação que sofreu 7% de redução, sendo esta propriedade muito importante para estruturas

de concreto massa, pois o calor elevado acaba provocando fissuras de origem térmica na estrutura.

Logo, a utilização da matriz cimentícia EGAF50+PAE50 em obras de concreto massa poderia ser uma alternativa tecnicamente viável para estas demandas, sendo necessário o estudo de demais teores de combinação de EGAF com PAE e pesquisas com aplicação em traços de concreto massa.

Vale ressaltar que com a comprovação de viabilidade em obras de concreto massa, torna-se promissor o uso dessa matriz cimentícia, visto que o volume destinado dos resíduos seria bastante elevado, principalmente pelo fato do PAE ter características de resíduo perigoso, conforme classificação da ABNT NBR 10004:2004.

REFERÊNCIAS

AÇOBRASIL – Instituto Aço Brasil. **Relatório Institucional**. 2021. Disponível em: < <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes> >.

ADORNO, C. S. **Efeitos físico-químicos de adições minerais na reatividade álcali-agregado em compósitos de cimento Portland**. Dissertação - Universidade Federal Do Paraná. Curitiba, 2017.

AGUIAR, G. F.; LACERDA, M. V. P. SILVA, W. C. T. Controle tecnológico na concretagem de blocos de fundação de grande porte. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 05, Vol. 01, pp. 17-32. Maio de 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. ACI 116R. Farmington Hills, 2005.

_____. **Guide to Mass Concrete**. ACI 207.1R-05. Farmington Hills, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS -. **ASTM C 1702**: Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry.. USA, 2017.

ANDRADE, F. R. D. et al. Portland clinker production with carbonatite waste and tire-derived fuel: crystallochemistry of minor and trace elements. **Cerâmica** [online]. 2014, v. 60, n. 356 [Accessed 29 November 2021] , pp. 552-562. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400014>>. Epub 26 Jan 2015. ISSN 1678-4553. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400014>.

ANDRADE, Gabriella Puente de. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado miúdo de resíduo de concreto**. Dissertação – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

ARNOLD, C. M, *et al.* Study of electric-arc furnace dust (EAFD) in fly ash and rice husk ash-based geopolymers, **Advanced Powder Technology**, Volume 28, Issue 9, 2017, Pages 2023-2034, ISSN 0921-8831, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.05.007>.

ARRIVABENE, Lúcio Flávio et al. Viabilidade técnica da fabricação de cimento com mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 2, p. 241-246, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12006**: Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12819:** Concreto – Elevação adiabática da temperatura – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR13956-1:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15577:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15894:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15894-3:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Tempos de pega do cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7215:** Resistência à compressão do cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 22:** Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 24:** Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAGATINI, Maurício Covcevich. **Estudo de reciclagem da carepa através de briquetes autorredutores para uso em forno elétrico a arco.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. 2011.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. V. 1. Ed. LTC. 2019.

BLACK, L. Low clinker cement as a sustainable construction material. In: KHATIB, J. M. **Sustainability of Construction Materials**. 2 ed. 2016.

BRASIL. Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos sólidos e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm . Acesso em: 01/12/2021.

BRASIL. Ministério da saúde. Disponível em: <https://antigo.saude.gov.br/vigilancia-em-saude/vigilancia-ambiental/vigipeq/contaminantes-quimicos/chumbo>. Acesso em 01/12/2021.

BUSATLIC, Ilhan, et al. Industrial wastw materials as raw materials for the production of low heat hydratin cement. **Recycling and Sustainable Development**, v. 12, p. 31-36. 2019.

CAMPOS, A. **Análisis numérico de presas de hormigón bajo acciones expansivas**. Tesis (Doctoral), Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, 2012.

CAMPOS, A.; LOPEZ, C. M.; BLANCO, A.; AGUADO, A. Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 668-683, 2018.

CASSIANI, J.; DUGARTE, M.; MARTINEZ, G. A. Evaluation of the chemical index model for predicting supplementary cementitious material dosage to prevent the alkali-silica reaction in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122158, 2021.

CASTRO, Mário Andrean Macedo *et al.* Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com resíduos siderúrgicos. **Revista Materia**, v. 21, n. 3, p. 666–676, 2016.

CECHIN, Luana et al. Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

COELHO, N. A. (2016) "**Métodos analíticos e numéricos para o estudo dos efeitos termomecânicos no concreto massa orientados às barragens de gravidade**", Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília - UnB, Brasília.

COSTA, A.B. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário INIVATES. Lajeado, 2015.

CUBUKCUOGLU, Beste; OUKI, Sabeha. Solidification/stabilisation of electric arc furnace waste using low grade MgO. **Chemosphere**. n. 86, p. 789-796, 2012.

DAL MOLIN, Denise CC. **Adições minerais**. ISAIA, GC Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

DA SILVA, Laís Cândido *et al.* Análise do uso de resíduo da siderurgia para aplicação em cerâmica vermelha através da caracterização química e mineralógica. **Revista Matéria**, v. 26, n. 4, 2021.

DANTAS DUARTE, Francisco Kléber. **Avaliação Térmica do Concreto nas Primeiras Idades**. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2018.

DEMANGE M.A.. *Mineralogy for Petrologists: optics, chemistry and occurrences of rock-forming minerals*. London, CRC Press/Balkema, 218 p. 2012.

DOS ANJOS, Janne Caroline Silva et al. Produção e caracterização de argamassas não estruturais a partir de resíduos do processo siderúrgico do ferro Gusa (Escória de Alto-forno) do Estado do Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28768-28780, 2021.

EVANGELISTA, Andressa Tairine. **Análise do impacto ambiental do processo de produção do ferro-gusa por meio dos princípios da química verde e de indicadores de sustentabilidade**. Dissertação. SENAI CIMATEC. Salvador.2020.

FAGUNDES, Larissa Virgínia Queiroz et al. Pelletizing of electric arc furnace dust for obtain zinc concentrate in Waelz oven. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineracao**, v. 17, n. 4, p. 567-572, 2020.

FAY, Liliana. **Aproveitamento de resíduos siderúrgicos para a fabricação de elementos construtivos para alvenarias na construção civil**. 233 p. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Engenharia Química, Rio de Janeiro. 2006.

FARES, Galal *et al.* Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v 112, p. 210-221, 2016.

FEITOSA, Edna Fernandes. **Estudo da incorporação da escória granulada de alto-forno e da escória do Forno panela em massas para cerâmica vermelha: zonas de extrusão**. 2017. 43 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação de Engenharia de Materiais)- Faculdade de Engenharia de materiais, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2017.

FERNANDES, Amanda Martins *et al.* **Estudo da substituição parcial do pó de pedra por pó de balão em blocos pré- moldados de concreto**. ENEMET, v 16; 2016, Rio de Janeiro. **Anais**. p. 1475-1480, 2016.

FERREIRA, Taiana da Silva *et al.* **Reaproveitamento do pó de balão da indústria siderúrgica como matéria-prima na cerâmica vermelha**. FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, v 10; 2019, João Pessoa. **Anais**. p. 1–11, 2019.

FIGUEIRA R.B., R. SOUSA, L. COELHO, M. AZENHA, J.M. de Almeida, P.A.S. Jorge, C.J.R. Silva, Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods, **Construction and Building Materials**, Volume 222, 2019, Pages 903-931, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230>.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

FRAGA, Y. S. B.; RÊGO, J. H. S.; CAPUZZO, V. M. S.; ANDRADE, D. S. Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. **Revista Matéria**, v. 25, n.4, p. 1-16, 2020.

FRANÇA, Débhora Flávia Soto et al. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente construído**. Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 153-166, 2016.

FURNAS; **Concretos: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997. 1 v.

FUNAHASHI JÚNIOR, Eduardo Issamu. **Influência do tipo de cimento no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo do desempenho do concreto**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios. São Paulo, 2018.

GAMBALE, Patrícia Guedes. **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GEOSOL. **SGS Geosol Laboratórios LTDA**. 2017.

GEYER, Maria Rejane Tubino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese de doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, p. 169, 2001.

GOMES, Flávio Mamede Pereira. **Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada**. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.

GÓMEZ, L. Y. *et al.* Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto-forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois aditivos superplastificantes. **Alconpat**, v. 5, n. 3, p. 203–218, 2015.

GRUYAERT, E. *et al.* Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 102, n. 3, p. 941–951, 2010.

GRUSKOVNJAK, A. E. A. “Hydration mechanisms of super sulphated slag cement.” **Cement and Concrete Research**. 983–992, 2008.

GUILGE, Mario Sérgio. **Desenvolvimento de ligante hidráulico a partir de resíduos de cimento hidratado, tijolo cerâmico e metacaulinita**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 220 p. São Paulo. 2011.

HERNÁNDEZ-CRUZ, D. et al. Fiber reinforced mortar affected by alkali-silica reaction: A study by synchrotron microtomography. **Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 123-130, 2016. ISSN 0958- 9465.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; FURIATTI, L. E. **Controle ambiental das indústrias de produção de ferrogusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302 p. ISBN: 85-88669- 0566.

KUPERMAM, S.; CARDIA, R. J. **Curso Segurança de Barragens. Módulo I I: Inspeção e Auscultação De Barragens. Unidade 1: Anomalias Em Barragens**. Agência Nacional das Águas, 2015.

LIDUÁRIO, A, S. *et al.* Estudo da Influência de Adições Pozolânicas e Minerais no Concreto. **Instituto CGTI – Centro de gestão de tecnologia e inovação**. 5 f, 2016.

LOBATO, Natália C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, 2014.

LOPES, Francisco Faleiros. **Blendagens de resíduos siderúrgicos na composição de adições minerais para substituição parcial do cimento Portland na produção de concreto**. Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2019.

LIU, L., Li, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. **Science of The Total Environment**, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>.

MACHADO, A. T. *et al.* Utilização do pó de aciaria (PAE) como adição ao concreto. **CBCIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. p. 1272–1278, Natal, 2002.

MACHADO, Janaína Gonçalves Maria da Silva *et al.* Characterization study of electric arc furnace dust phases. **Materials. Research**. vol.9, n.1, pp.41-45.2005.

MAGALHÃES, M. S.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C.; BRUNELLI, K. S. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 141-150, 2017.

MAGALHÃES, M. S.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C.; BRUNELLI, K. S. Influence of alkali addition on the setting and mechanical behavior of cement pastes and mortars with electric arc furnace dust. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 413-419, 2019.

MAKEN, D. D., Léger, P., & Roth, S.-N. (2014). Seasonal Thermal Cracking of Concrete Dams in Northern Regions. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 28(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000483](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000483)

- MALARD, A. A. M. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais** Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2009.
- MARANGU, J. M; MUTURIA, C. M.; BEDIAKO, M. Physicochemical Properties of Hydrated Portland Cement Blended with Rice Husk Ash. **Journal of Chemistry**, v. 2020, ID 5304745, 2020.
- MASLEHUDDIN, M. *et al.* Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 308–312, 2011.
- MASSARWEH, O.; MASLEHUDDIN, M.; AL-DULAIJAN, S. U.; SHAMEEM, M.; AHMAD, S. Development of a concrete set retarder utilizing electric arc furnace dust. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119378, 2020.
- MASUERO, Angela Borges, *et al.* Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 57-81. Porto Alegre. 2004.
- MAZER, Welligton. **Argamassas e concretos**. Notas de aula. 2017.
- MAZUR, Nelson. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 219-227. 2011.
- MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binário com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 11p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia De Construção Civil E Urbana, Escola Politécnica, Universidade De São Paulo, São Paulo. 2011.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo/SP. Edit. IBRACON, 2014.
- MOREIRA, Kelvya Maria de Vasconcelos. **Mitigação da reação álcali-sílica em compósitos cimentícios com o uso de cinza volante e de escória granulada de alto forno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém**. Tese. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2021.
- METZ, J. C. **Avaliação do uso combinado de pó de aciaria elétrica (PAE) com resíduo do forno de cal (RFC) na hidratação de pastas de cimento**. Dissertação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. São Leopoldo, 2016.
- MOTHÉ, Alice Vasconcellos. **Utilização de lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. 100f. Campos dos Goytacazes, 2008.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, Andrielli Moraes; DOS SANTOS, Marco Antônio; DE OLIVEIRA, Ana Paula. Um estudo da perspectiva do uso de resíduo industrial de silício como adição mineral em matrizes cimentícias: origem, processamento e propriedades. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, v. 15, n. 1, p. 103-119, 2021.

OLIVEIRA, Bianca Stephanie, *et al.* Avaliação do potencial do reaproveitamento da escória de aciaria Id como agregado siderúrgico. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**. v. 7, n. 2, p.206-229. Florianópolis. 2018.

OGIRIGBO, O. R.; BLACK, L. Influence of slag composition and temperature on the hydration and microstructure of slag blended cements. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 496-507, nov. 2016.

PACHECO, Ronaldo Feu Rosa. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 297 p. São Paulo, 2017.

PAULA, Leandro Neves de. **Transformação do pó de aciaria elétrica em materiais com aplicações para remediação ambiental**. 2013. 96 f. - Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2013.

PICKLES, C. A. Thermodynamic modelling of the formation of zinc–manganese ferrite spinel in electric arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1–3, p. 309–317, jul. 2010.

PIMENTEL, Maurílio Gomes et al. Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019.

PIMENTEL, G. M.; VASCONCELOS, A. L. R.; PICANÇO, M. S.; SOUZA, J.V. B. S. **Caracterização da Escória de Alto-forno Proveniente de Resíduos Industriais visando seu uso na Construção Civil**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Belém, 2017.

PINTO JUNIOR, Luiz Alberto Baptista et al . Caracterização da mistura de resíduos de granito e escória de aciaria LD. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto , v. 64, n. 2, p. 169-174, 2011.

POSSON, E. **Curso Segurança de Barragens. Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais. Unidade 10: Barragens de Concreto**. Agência Nacional das Águas, 2015.

QUEIROGA, A. F. F. **A influência do uso de um resíduo siderúrgico no setor de cerâmica vermelha**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2020.

REBELO, Rodolfo Pereira Basílio Trigos. **Estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem da Bemposta**. 2021. Tese de Doutorado.

REZENDE, M. L. S. *et al.* Uso de metacaulin em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. **Rev. Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, p. 135-146, 2012.

RIBEIRO, A.V.S. et al. Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão. **Revista Matéria**, v.26, n.1, 2021.

ROCHA, Bruno Paiva. **Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco**. Trabalho de conclusão de curso. 66 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Engenharia Metalúrgica, Rio de Janeiro, 2011.

ROCHA, G.G.N. **Adições minerais e suas influências na qualidade do concreto**. Metacaulim do Brasil. II Congresso Nacional de Tecnologia do Concreto online, 2017.

ROSSA JR., J.; PORTELLA, K. F. Adição de escória granulada de alto-forno em argamassas colantes tipo AC-I. **Cerâmica**. v. 58, n. 348, p. 542–548, 2012.

ROSTAMI, M., BEHFARNIA, K. “The effect of silica fume on durability activated slag concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 134, pp. 262-268, 2017.

SAHA, A. K. et al. The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 743-758, 2018.

SALUM, Paula de Lima. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante**. 2016. 164 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016.

SANTOS, Sergio Botassi dos. **Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades: influência de aditivos plastificantes e adições minerais**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2011.

SCHALCH, Valdir. **Gerenciamento de resíduos sólidos**. Notas de aula. 2010

SCOTT, A.; ALEXANDER, M. G. Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 45-55, 2016.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, presente na future. **Cement and Concrete Research**, Special Issue: 13th International Congresso n the Chemistry of Cement. V. 41, n. 7, p. 651-665, jul. 2011.

SILVA, Andreia Rocha da. **Incorporação de pó de despoejamento em cerâmica vermelha**. 2013. 57 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação de Engenharia de Materiais) -Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, 2013.

SILVA, A. S. Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem. 2016a. Universidade Federal do Paraná, 2016.

SILVA, A. R. P. *et al.* **Adição de resíduo da siderurgia “charcok” em blocos cerâmicos estruturais**. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v 27; Belém, 2017.

SILVA, André Filipe da. **Análise do uso de pré-refrigeradores de concreto para concretagem de blocos de fundação na região de balneário camboriú.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). 62 f. Faculdade de Engenharia Civil - Centro Universitário Avantis - UniAvan, 2019.

SILVA, R.N.J.F. *et al.* **Caracterização do resíduo pó de balão de alto-forno de uma siderúrgica integrada do sudeste do Pará.** Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v 27; Belém, 2017.

SINOBRAS - Siderúrgica Norte Brasil S.A. **Memorial descritivo.** 2020.

SOBRINHO, Pedro José Nolasco; TENORIO, Jorge Alberto Soares. Utilização de um aparato em escala de laboratório para o estudo da recuperação do cromo contido em resíduos gerados na produção de aço inoxidável. **Revista. Escola de. Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 3, p. 177-182. 2004.

SOUZA, Grazielle Tigre de. **Dosagem experimental de concreto massa com adição De sílica ativa aplicado em barragem.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental. 2017.

SOUZA, L; ZOLETT, ER; CARRAZEDO, R . Estudo do efeito da escória de forno elétrico a arco na expansão de argamassas submetidas à reação álcali-agregado. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** , São Paulo, v. 9, n. 4, pág. 572-578, 2016.

SOUZA, M. M.; CAMARA, T. A.; AKASAKI, J. L. Estudo do Teor de Metacaulim em Concretos de Alto Desempenho. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 9, n. 17, 2016.

SIQUEIRA, Thaís Pinto Lôbo et al. Adição de finos de rocha granítica e seus efeitos nas propriedades de argamassas autoadensáveis. **Ambiente Construído** [online]. 2020, v. 20, n. 3 [Acessado 3 Dezembro 2021] , pp. 451-466. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300439>>. Epub 03 Jul 2020. ISSN 1678-8621. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300439>.

SUETENS, T.; GUO, M.; ACKER, K. VAN; BLANPAIN, B. Formation of the ZnFe₂O₄ phase in an electric arc furnace off-gas treatment system. **Journal of Hazardous Materials**, v. 287, p. 180–187, abr. 2015.

TAN, Y.; YU, H.; SUN, S.; WU, C.; DING, H. Properties and microstructure of basic magnesium sulfate cement: Influence of silica fume. **Construction and building materials**, v. 266, p. 121076, 2021.

TARTUCE, Ronaldo. **Principio básico sobre resistência.** Revista Tecnosil. 2011.

THOMAS, J. J. et al. Modelin and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. **Cement and Concrete Research**. Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City, 2009 & CONMOD10, Lausanne, 2010.v. 41, n. 12, p. 1257-1278, Dezembro2011.

TUTIKIAN, Bernardo; HELENE, Paulo. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. 2011.

VARDHAN, K. H., Kumar, P. S., Panda, R. C. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. **Journal of Molecular Liquids**, 2019.

VARGAS, Alexandre Siva de; MASUERO, Angela Borges; VILELA, Antonio Cezar Farias. Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). **Ambiente Construído**, v. 4.n. 2, p. 7-18, Porto Alegre, 2004.

VASCONCELOS, Flávio França; RABELO, Sabrina Nogueira. Análise da viabilidade técnica de aplicações para o resíduo sólido charco ou “pó de balão”. **SICIT 2018**. Semana de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade de Itaúna. Minas Gerais. 2018.

VASKE, Nei Ricardo. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. Tese de doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 325 p. Porto Alegre-RS. 2012.

VIECILI, M. J. C.; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. **Comparativo entre o teste de Vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos Portland**. *Matéria (Rio J.)* vol.23 no.3, Rio de Janeiro, 2018.

VICTOR, Guilherme *et al.* **Calor de Hidratação no Concreto**. Trabalho de conclusão de curso. 67 p. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil, 2011.

VIMIEIRO, Gisele Vidal; LIAL, Gabriela Turra. **Proposta de gerenciamento de resíduos sólidos industriais de uma empresa de médio porte fabricante de grupos geradores**. XIX SILUBESA. Recife. 2021.

VOTORANTIM. **Mapa da obra**. 2017. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/concreto-massa-exige-acoes-especiais-para-minimizar-fissuracao>>. Acesso em 12 de março de 2020.

ZHENHONG wang, LI tao, YI liu, jiang yunhuI , Temperature control measures and temperature stress of massive concrete during the construction period in high altitude regions, **Advances in Civil Engineering** , vol. 2018 , Artigo ID 9249382 , 12 páginas , 2018 . <https://doi.org/10.1155/2018/9249382>.

ZHIWEI P, LIN X, YAN J, HWANG J-Y. Characterization of low – zinc electric arc furnace dust. In: Ikhmayies S, Bowen L, Carpenter JS, Li J, Hwang J-Y, Monteiro SN, et al. **Characterization of minerals, metals and materials**. USA: Springer; 2017. p. 103-109.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO DO PB SEGUNDO A CORROSIVIDADE E REATIVIDADE.

| Código de Identificação | Resíduo Perigoso | Resultado |
|--------------------------------|---|------------------|
| D002 | a) Ser aquoso e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 ou sua mistura com água, na proporção 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5 | 7,72 |
| D003 | a) Ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; b) Reagir violentamente com água; c) Formar misturas potencialmente explosivas com a água | Negativo |

APÊNDICE B - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO DO PB.

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Arsênio | D005 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| Bário | D006 | SMEWW 3030, 3120 B | 70,0 | 0,01 | 0,44 |
| Cádmio | D007 | SMEWW 3030, 3120 B | 0,5 | 0,001 | 0,008 |
| Chumbo | D008 | SMEWW 3030, 3120 B | 1,0 | 0,01 | 0,01 |
| Cromo Total | D009 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,01 | <0,01 |
| Fluoretos | D010 | SMEWW 4500 F- C | 150,0 | 0,06 | 0,10 |
| Mercúrio | D011 | SMEWW 3125 | 0,1 | 0,0002 | <0,0002 |
| Prata | D012 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,005 | <0,005 |
| Selênio | D013 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | <0,001 |

**APÊNDICE C - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) DO PB.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Adrin e Dieldrin | D014 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos isomeros) | D015 | EPA 3510C 8270 D | 0,02 | 0,0002 | <0,0002 |
| DDT (todos isomeros) | D016 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0003 | <0,0003 |
| Pentaclorofenol | D024 | EPA 3510C 8270 D | 0,9 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4-D | D026 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Endrin | D018 | EPA 3510C 8270 D | 0,06 | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e Heptacloro Epoxido | D019 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00003 | <0,00003 |
| Lindano | D022 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | D023 | EPA 3510C 8270 D | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Toxafeno | D025 | EPA 3510C 8270 D | 0,5 | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | D027 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | D028 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,0001 | <0,0001 |

**APÊNDICE D - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROS ORGÂNICOS) DO PB.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Benzeno | D030 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | 0,001 |
| Benzo (a) pireno | D031 | EPA 3510C 8270 D | 0,07 | 0,0001 | <0,0001 |
| Cloreto de Vinila | D032 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Clorobenzeno | D033 | EPA 5021A 8260 C | 100 | 0,001 | <0,001 |
| Clorofórmio | D034 | EPA 3510C 8270 D | 6,0 | 0,001 | <0,001 |

| | | | | | |
|-------------------------|------|------------------|-------|--------|---------|
| Cresol Total | D036 | EPA 3510C 8270 D | 200,0 | 0,003 | <0,0003 |
| 1,4-Diclorobenzeno | D039 | EPA 5021A 8260 C | 7,5 | 0,001 | <0,001 |
| 1,2-Dicloroetano | D040 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| 1,1-Dicloroetileno | D041 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4-Dinitrotolueno | D042 | EPA 5021A 8260 C | 0,13 | 0,0001 | <0,0001 |
| Hexaclorobenzeno | D021 | EPA 3510C 8270 D | 0,1 | 0,0001 | <0,0001 |
| Hexaclorobutadieno | D043 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Hexacloroetano | D044 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metil-etil cetona | D045 | EPA 5021A 8260 C | 200,0 | 1 | <1 |
| Nitrobenzeno | D046 | EPA 5021A 8260 C | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Piridina | D047 | EPA 5021A 8260 C | 5,0 | 1 | <1 |
| Tetracloreto de Carbono | D048 | EPA 5021A 8260 C | 0,2 | 0,001 | <0,001 |
| Tetracloroetileno | D049 | EPA 3510C 8270 D | 4,0 | 0,001 | <0,001 |
| Tricloroetileno | D050 | EPA 3510C 8270 D | 7,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4,5 Triclorofenol | D051 | EPA 5021A 8260 C | 400,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,6 Triclorofenol | D052 | EPA 3510C 8270 D | 20,0 | 0,0001 | <0,0001 |

APÊNDICE E - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO DO PB.

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Duplicata (mg/L) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------|--|---|---|
| Inorgânicos | | | | | |
| Alumínio (mg Al/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,2 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Arsênio (mg As/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Bário (mg Ba/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,7 | 0,01 | 0,20 | 0,19 |
| Cádmio (mg Cd/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,005 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Chumbo (mg Pb/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,01 | 0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Cianeto (mg CN/L) | SMEWW 4500CN-B, C, D, E | 0,07 | 0,002 | 0,024 | 0,024 |
| Cloreto (mg Cl/L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | 111 | 110 |
| Cobre (mg Cu/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 2,0 | 0,009 | <0,009 | <0,009 |

| | | | | | |
|---|---------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Cromo Total (mg Cr/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Ferro (mg Fe/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,3 | 0,1 | 0,15 | <0,1 |
| Fluoretos (mg F/L) | SMEWW 4110 B | 1,5 | 0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Manganês (mg Mn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,1 | 0,02 | 0,42 | 0,43 |
| Mercúrio (mg Hg/L) | SMEWW 3125 | 0,001 | 0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| Nitrato (mg N/L) | SMEWW 4110 B | 10,0 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Prata (mg Ag/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Selênio (mg Se/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | 0,002 | 0,003 |
| Sódio (mg Na/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 200,0 | 0,1 | 17,1 | 17,3 |
| Sulfato (mg SO ₄ ⁻² /L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | 77,9 | 78,0 |
| Zinco (mg Zn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,02 | 0,02 | <0,02 |
| Orgânicos | | | | | |
| Fenóis Totais (mg C ₆ H ₅ OH/L) | SMEWW 5530 B,C, D | 0,01 | 0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Surfactantes (mg MBAS/L) | SMEWW 5540 C | 0,5 | 0,3 | <0,3 | <0,3 |

APÊNDICE F - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO – PARÂMETROS ORGÂNICOS (CROMATOGRÁFIA) DO PB.

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/l) | Limite de Quantificação do Método (mg/l) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/l) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|--|---|
| Adrin e Dieldrin | EPA 3510/8270 C | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos os isomeros) | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-4}$ | 0,0002 | <0,0002 |
| 2,4-D | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |
| DDT (todos isomeros) | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0002 | <0,0002 |
| Endrin | EPA 3510/8270 C | $6,0 \times 10^{-4}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e seu epóxido | EPA 3510/8270 C | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,00003 | <0,00003 |
| Hexaclorobenzeno | EPA 3510/8270 C | $1,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Lindano | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | EPA 3510/8270 C | 0,02 | 0,0001 | <0,0001 |

| | | | | |
|----------|-----------------|----------------------|--------|---------|
| Toxafeno | EPA 3510/8270 C | $5,0 \times 10^{-3}$ | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |

APÊNDICE G - CLASSIFICAÇÃO DO PAE SEGUNDO CORROSIVIDADE E REATIVIDADE.

| Código de Identificação | Resíduo Perigoso | Resultado |
|--------------------------------|---|------------------|
| D002 | a) Ser aquoso e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 ou sua mistura com água, na proporção 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5 | 10,11 |
| D003 | a) Ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; b) Reagir violentamente com água; c) Formar misturas potencialmente explosivas com a água | Negativo |

APÊNDICE H - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO DO PAE.

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Arsênio | D005 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| Bário | D006 | SMEWW 3030, 3120 B | 70,0 | 0,01 | 0,48 |
| Cádmio | D007 | SMEWW 3030, 3120 B | 0,5 | 0,001 | 2,384 |
| Chumbo | D008 | SMEWW 3030, 3120 B | 1,0 | 0,01 | 12,20 |
| Cromo Total | D009 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,01 | <0,01 |
| Fluoretos | D010 | SMEWW 4500 F- C | 150,0 | 0,06 | <0,06 |
| Mercurio | D011 | SMEWW 3125 | 0,1 | 0,0002 | <0,0002 |
| Prata | D012 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,005 | 0,027 |
| Selênio | D013 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | 0,018 |

**APÊNDICE I - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) DO PAE.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração do Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Adrin e Dieldrin | D014 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos isômeros) | D015 | EPA 3510C 8270 D | 0,02 | 0,0002 | <0,0002 |
| DDT (todos isômeros) | D016 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0003 | <0,0003 |
| Pentaclorofenol | D024 | EPA 3510C 8270 D | 0,9 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4-D | D026 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Endrin | D018 | EPA 3510C 8270 D | 0,06 | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e Heptacloro Epoxido | D019 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00003 | <0,00003 |
| Lindano | D022 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | D023 | EPA 3510C 8270 D | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Toxafeno | D025 | EPA 3510C 8270 D | 0,5 | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | D027 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | D028 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,0001 | <0,0001 |

**APÊNDICE J - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROS ORGÂNICOS) DO PAE.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração do Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Benzeno | D030 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Benzo (a) pireno | D031 | EPA 3510C 8270 D | 0,07 | 0,0001 | <0,0001 |
| Cloreto de Vinila | D032 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Clorobenzeno | D033 | EPA 5021A 8260 C | 100 | 0,001 | <0,001 |
| Clorofórmio | D034 | EPA 3510C 8270 D | 6,0 | 0,001 | 0,087 |
| Cresol Total | D036 | EPA 3510C 8270 D | 200,0 | 0,003 | <0,0003 |
| 1,4-Diclorobenzeno | D039 | EPA 5021A 8260 C | 7,5 | 0,001 | <0,001 |
| 1,2-Dicloroetano | D040 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| 1,1-Dicloroetileno | D041 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4-Dinitrotolueno | D042 | EPA 5021A 8260 C | 0,13 | 0,0001 | <0,0001 |
| Hexaclorobenzeno | D021 | EPA 3510C 8270 D | 0,1 | 0,0001 | <0,0001 |

| | | | | | |
|--------------------------|------|------------------|-------|--------|---------|
| Hexaclorobutadieno | D043 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Hexacloroetano | D044 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metil-etil cetona | D045 | EPA 5021A 8260 C | 200,0 | 1 | <1 |
| Nitrobenzeno | D046 | EPA 5021A 8260 C | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Piridina | D047 | EPA 5021A 8260 C | 5,0 | 1 | <1 |
| Tetracloroeto de Carbono | D048 | EPA 5021A 8260 C | 0,2 | 0,001 | <0,001 |
| Tetracloroetileno | D049 | EPA 3510C 8270 D | 4,0 | 0,001 | <0,001 |
| Tricloroetileno | D050 | EPA 3510C 8270 D | 7,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4,5 Triclorofenol | D051 | EPA 5021A 8260 C | 400,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,6 Triclorofenol | D052 | EPA 3510C 8270 D | 20,0 | 0,0001 | <0,0001 |

APÊNDICE K - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO DO PAE.

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Duplicata (mg/L) |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|--|---|---|
| Inorgânicos | | | | | |
| Alumínio (mg Al/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,2 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Arsênio (mg As/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Bário (mg Ba/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,7 | 0,01 | 0,35 | 0,37 |
| Cádmio (mg Cd/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,005 |
| Chumbo (mg Pb/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,01 | 0,01 | 0,16 | 0,16 |
| Cianeto (mg CN/L) | SMEWW 4500CN-B, C, D, E | 0,07 | 0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Cloreto (mg Cl/L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | 6447 | 6300 |
| Cobre (mg Cu/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 2,0 | 0,009 | 0,020 | 0,019 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,01 | 0,04 | 0,04 |
| Ferro (mg Fe/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,3 | 0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Fluoretos (mg F/L) | SMEWW 4110 B | 1,5 | 0,05 | 8,65 | 8,66 |
| Manganês (mg Mn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,1 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Merúrio (mg Hg/L) | SMEWW 3112 B | 0,001 | 0,0002 | 0,0003 | 0,0004 |

| | | | | | |
|---|-------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Nitrato (mg N/L) | SMEWW 4110 B | 10,0 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Prata (mg Ag/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,005 | 0,026 | 0,027 |
| Selênio (mg Se/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | 0,051 | 0,052 |
| Sódio (mg Na/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 200,0 | 0,1 | 1400,8 | 1351,2 |
| Sulfato (mg SO₄⁻² /L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | 1357 | 1404 |
| Zinco (mg Zn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,02 | 0,02 | <0,02 |
| Orgânicos | | | | | |
| Fenóis Totais (mg C ₆ H ₅ OH/L) | SMEWW 5530 B,C, D | 0,01 | 0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Surfactantes (mg MBAS/L) | SMEWW 5540 C | 0,5 | 0,3 | 1,0 | 0,9 |

**APÊNDICE L - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS(CROMATOGRAFIA) DO PAE.**

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/l) | Limite de Quantificação do Método (mg/l) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/l) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Adrin e Dieldrin | EPA 3510/8270 C | 3,0 x 10 ⁻⁵ | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos os isômeros) | EPA 3510/8270 C | 2,0 x 10 ⁻⁴ | 0,0002 | <0,0002 |
| 2,4-D | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |
| DDT (todos isômeros) | EPA 3510/8270 C | 2,0 x 10 ⁻³ | 0,0002 | <0,0002 |
| Endrin | EPA 3510/8270 C | 6,0 x 10 ⁻⁴ | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e seu epóxido | EPA 3510/8270 C | 3,0 x 10 ⁻⁵ | 0,00003 | <0,00003 |
| Hexaclorobenzeno | EPA 3510/8270 C | 1,0 x 10 ⁻³ | 0,0001 | <0,0001 |
| Lindano | EPA 3510/8270 C | 2,0 x 10 ⁻³ | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | EPA 3510/8270 C | 0,02 | 0,0001 | <0,0001 |

| | | | | |
|----------|--------------------|----------------------|--------|---------|
| Toxafeno | EPA 3510/8270 C | $5,0 \times 10^{-3}$ | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |

ANEXOS

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DA EGAF SEGUNDO CORROSIVIDADE E REATIVIDADE.

| Código de Identificação | Resíduo Perigoso | Resultado |
|-------------------------|---|-----------|
| D002 | a) Ser aquoso e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 ou sua mistura com água, na proporção 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5 | 8,92 |
| D003 | a) Ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; b) Reagir violentamente com água; c) Formar misturas potencialmente explosivas com a água | Negativo |

ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO DA EGAF.

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|-------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------|--|--|
| Arsênio | D005 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| Bário | D006 | SMEWW 3030, 3120 B | 70,0 | 0,01 | 0,11 |
| Cádmio | D007 | SMEWW 3030, 3120 B | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Chumbo | D008 | SMEWW 3030, 3120 B | 1,0 | 0,01 | <0,01 |
| Cromo Total | D009 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,01 | <0,01 |
| Fluoretos | D010 | SMEWW 4500 | 150,0 | 0,06 | <0,06 |

| | | | | | |
|----------|------|--------------------------|-----|--------|---------|
| | | F- C | | | |
| Mercúrio | D011 | SMEWW 3125 | 0,1 | 0,0002 | <0,0002 |
| Prata | D012 | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,005 | <0,005 |
| Selênio | D013 | SMEWW 3125 | 1,0 | 0,001 | <0,001 |

**ANEXO C - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO -
PARÂMETROS ORGÂNICOS (PESTICIDAS) EGAF.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Adrin e Dieldrin | D014 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos isômeros) | D015 | EPA 3510C 8270 D | 0,02 | 0,0002 | <0,0002 |
| DDT (todos isômeros) | D016 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0003 | <0,0003 |
| Pentaclorofenol | D024 | EPA 3510C 8270 D | 0,9 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4-D | D026 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Endrin | D018 | EPA 3510C 8270 D | 0,06 | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e Heptacloro Epoxido | D019 | EPA 3510C 8270 D | 0,003 | 0,00003 | <0,00003 |
| Lindano | D022 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | D023 | EPA 3510C 8270 D | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Toxafeno | D025 | EPA 3510C 8270 D | 0,5 | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | D027 | EPA 3510C 8270 D | 0,2 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | D028 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,0001 | <0,0001 |

**ANEXO D - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR LIXIVIAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS (OUTROS ORGÂNICOS) EGAF.**

| Parâmetro | Código de Identificação | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L) |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Benzeno | D030 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Benzo (a) pireno | D031 | EPA 3510C 8270 D | 0,07 | 0,0001 | <0,0001 |
| Cloreto de Vinila | D032 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Clorobenzeno | D033 | EPA 5021A 8260 C | 100 | 0,001 | <0,001 |
| Clorofórmio | D034 | EPA 3510C 8270 D | 6,0 | 0,001 | <0,001 |
| Cresol Total | D036 | EPA 3510C 8270 D | 200,0 | 0,003 | <0,0003 |
| 1,4-Diclorobenzeno | D039 | EPA 5021A 8260 C | 7,5 | 0,001 | <0,001 |
| 1,2-Dicloroetano | D040 | EPA 3510C 8270 D | 1,0 | 0,001 | <0,001 |
| 1,1-Dicloroetileno | D041 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4-Dinitrotolueno | D042 | EPA 5021A 8260 C | 0,13 | 0,0001 | <0,0001 |
| Hexaclorobenzeno | D021 | EPA 3510C 8270 D | 0,1 | 0,0001 | <0,0001 |
| Hexaclorobutadieno | D043 | EPA 5021A 8260 C | 0,5 | 0,001 | <0,001 |
| Hexacloroetano | D044 | EPA 3510C 8270 D | 3,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Metil-etil cetona | D045 | EPA 5021A 8260 C | 200,0 | 1 | <1 |
| Nitrobenzeno | D046 | EPA 5021A 8260 C | 2,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| Piridina | D047 | EPA 5021A 8260 C | 5,0 | 1 | <1 |
| Tetracloroeto de Carbono | D048 | EPA 5021A 8260 C | 0,2 | 0,001 | <0,001 |
| Tetracloroetileno | D049 | EPA 3510C 8270 D | 4,0 | 0,001 | <0,001 |
| Tricloroetileno | D050 | EPA 3510C 8270 D | 7,0 | 0,001 | <0,001 |
| 2,4,5 Triclorofenol | D051 | EPA 5021A 8260 C | 400,0 | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,6 Triclorofenol | D052 | EPA 3510C 8270 D | 20,0 | 0,0001 | <0,0001 |

ANEXO E - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO EGAF.

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/L) | Limite de Quantificação do Método (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L) | Concentração no Resíduo Solubilizado Duplicata (mg/L) |
|--|---------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| Inorgânicos | | | | | |
| Alumínio (mg Al/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,2 | 0,02 | 0,38 | 0,39 |
| Arsênio (mg As/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Bário (mg Ba/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,7 | 0,01 | 0,04 | 0,04 |
| Cádmio (mg Cd/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,005 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Chumbo (mg Pb/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,01 | 0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Cianeto (mg CN/L) | SMEWW 4500 CN- B, C, D, E | 0,07 | 0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Cloreto (mg Cl/L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | <1 | <1 |
| Cobre (mg Cu/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 2,0 | 0,009 | <0,009 | <0,009 |
| Cromo Total (mg Cr/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Ferro (mg Fe/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,3 | 0,1 | 0,14 | 0,10 |
| Fluoretos (mg F/L) | SMEWW 4110 B | 1,5 | 0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Manganês (mg Mn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,1 | 0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Mercúrio (mg Hg/L) | SMEWW 3125 | 0,001 | 0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| Nitrato (mg N/L) | SMEWW 4110 B | 10,0 | 0,02 | 1,13 | 1,10 |
| Prata (mg Ag/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 0,05 | 0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Selênio (mg Se/L) | SMEWW 3125 | 0,01 | 0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Sódio (mg Na/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 200,0 | 0,1 | 1,03 | 1,10 |
| Sulfato ⁻² (mg SO ₄ /L) | SMEWW 4110 B | 250,0 | 1 | <1 | <1 |
| Zinco (mg Zn/L) | SMEWW 3030, 3120 B | 5,0 | 0,02 | <0,02 | 0,02 |
| Orgânicos | | | | | |
| enóis Totais (mg C ₆ H ₅ OH/L) | SMEWW 5530 B, C, D | 0,01 | 0,002 | <0,002 | <0,002 |
| urfactantes (mg MBAS/L) | SMEWW 5540 C | 0,5 | 0,3 | <0,3 | <0,3 |

**ANEXO F - CLASSIFICAÇÃO DE TOXICIDADE POR SOLUBILIZAÇÃO –
PARÂMETROS ORGÂNICOS(CROMATOGRAFIA) EGAF.**

| Parâmetro | Método Analítico | Valor Máximo Permitido (mg/l) | Limite de Quantificação do Método (mg/l) | Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/l) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Adrin e Dieldrin | EPA 3510/8270 C | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,00002 | <0,00002 |
| Clordano (todos os isomeros) | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-4}$ | 0,0002 | <0,0002 |
| 2,4-D | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |
| DDT (todos isomeros) | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0002 | <0,0002 |
| Endrin | EPA 3510/8270 C | $6,0 \times 10^{-4}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Heptacloro e seu epóxido | EPA 3510/8270 C | $3,0 \times 10^{-5}$ | 0,00003 | <0,00003 |
| Hexaclorobenzeno | EPA 3510/8270 C | $1,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Lindano | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| Metoxicloro | EPA 3510/8270 C | 0,02 | 0,0001 | <0,0001 |
| Toxafeno | EPA 3510/8270 C | $5,0 \times 10^{-3}$ | 0,005 | <0,005 |
| 2,4,5-T | EPA 3510/8270 C | $2,0 \times 10^{-3}$ | 0,0001 | <0,0001 |
| 2,4,5-TP | EPA 3510/8270 C | 0,03 | 0,0001 | <0,0001 |