

**FRANCISCO FALEIROS LOPES**

**Blendagens de resíduos siderúrgicos  
na composição de adições minerais  
para substituição parcial de cimento  
Portland na produção de concreto**

**Dissertação de Mestrado**

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, maio de 2019

**Francisco Faleiros Lopes**

**Blendagens de resíduos siderúrgicos na composição de adições minerais para substituição parcial de cimento Portland na produção de concreto**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

Belo Horizonte, 17 de maio de 2019

L864b Lopes, Francisco Faleiros  
Blendagens de resíduos siderúrgicos na composição de adições  
minerais para substituição parcial de cimento Portland na produção de  
concreto. / Francisco Faleiros Lopes. -- Belo Horizonte, 2019.  
xiv, 84 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. 2019.

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues.

#### Bibliografia

1. Resíduos Como Materiais de Construção. 2. Gestão Integrada  
de Resíduos Sólidos. 3. Cimento Portland - Indústria. I. Rodrigues,  
Conrado de Souza. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

FRANCISCO FALEIROS LOPES

**ELENDAGENS DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS NA COMPOSIÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Péter Ludvig  
Examinador Interno  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães  
Examinador Externo  
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, UFMG

Belo Horizonte, 17 de maio de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Marcos e Maria de Lourdes e à minha esposa Cristiane.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues, pela orientação desta dissertação, que desde o início acreditou na minha proposta de pesquisa e me incentivou a continuar na busca de novas descobertas, sempre compartilhando seus profundos conhecimentos com muita dedicação, compreensão e companheirismo.

Aos professores Dr. Péter Ludvig e Dr. Aldo Giuntini de Magalhães, pelas valiosas colaborações na elaboração e aprimoramento deste trabalho.

À ArcelorMittal Monlevade, representada pelo eng. Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro, pelo incentivo e apoio no ingresso deste curso e aos colegas dos departamentos de Engenharia, Redução e Metalografia, pela importante ajuda no fornecimento dos resíduos siderúrgicos e nas análises microestruturais com MEV.

À empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), representada pelo Me. Tiago Couto e o supervisor de laboratório Ednaldo Martins, pelo fundamental apoio no entendimento da minha necessidade acadêmica e pela realização das análises e ensaios com os materiais pesquisados, desenvolvidos com excelente técnica e profissionalismo.

À empresa Valemix, representada pelo eng. Romério Sales Pereira e o técnico de laboratório Carlos de Souza Lima, por terem possibilitado a execução dos ensaios de concreto, dentro dos mais rígidos padrões de controle de qualidade, possibilitando obter resultados confiáveis.

Ao aluno de iniciação científica João Pedro Batista de Carvalho, pelo auxílio na realização das análises de caracterização físico-químicas dos resíduos no início deste trabalho.

Ao Ivan Batista Moraes, responsável pelo laboratório do Departamento de Engenharia Civil do CEFET - Campus 2, pela enorme ajuda em realizar as moagens dos materiais durante a minha ausência, sendo esta, uma etapa importante na evolução da pesquisa.

Enfim, aos demais funcionários, colegas de curso e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG, com os quais pude compartilhar as mais diversas experiências, que contribuíram de forma inestimável para a o meu crescimento e na concretização deste trabalho.

*Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la.*

Marcus Tullius Cicero

## Resumo

A indústria de base possui um caráter particular em termos de geração de resíduos, devido à maior complexidade das suas operações, desde a extração da matéria-prima até a fabricação do produto final, resultando em uma grande diversidade de materiais que podem ser reutilizados no próprio processo produtivo, comercializados como coprodutos ou que, por falta de conhecimento de suas propriedades, são descartados de forma equivocada. Neste contexto, a indústria siderúrgica se apresenta como uma potencial desenvolvedora de soluções para os problemas de gestão da sua ampla gama de resíduos, com o desafio de encontrar alternativas de utilização de materiais subutilizados, que atualmente são depositados em aterros, em aplicações que agreguem valor ao seu produto, de forma sustentável. Este trabalho buscou identificar os resíduos que apresentassem as características com maior afinidade de utilização como materiais cimentícios suplementares, na produção de cimentos, argamassas e concretos, quando combinados entre si, tais como a escória granulada e o pó do balão; materiais estes, provenientes do processo de fabricação de ferro-gusa, gerados no sistema de alto-forno a carvão mineral, localizado na unidade industrial da ArcelorMittal em João Monlevade - MG. Os estudos foram conduzidos visando analisar as suas propriedades físico-químicas, o estabelecimento das misturas e a realização dos ensaios de resistência, avaliando as reais possibilidades de utilização dos mesmos de forma segura e viável no segmento da construção civil. Como resultado, foi possível obter concretos com resistências máximas à compressão, aos 28 dias, na faixa entre 38,90 MPa a 44,90 MPa. Desta forma, a pesquisa mostrou ser viável a combinação destes resíduos, utilizados como adições na formulação de misturas pozolânicas para a produção de cimentos e concretos.

## Palavras Chave

Escória, Cinzas volantes, Pozzolanas, Gestão de resíduos sólidos, Ecologia industrial.

## **Abstract**

The base industry has particular aspects in terms of residues generation. Due to the greater complexity of its operations, from the extraction of raw materials to the manufacture of final products, resulting in a great diversity of materials that can be reused in the own production process, marketed as byproducts or that, due to lack of knowledge of their properties, are erroneously discarded. In this context, the steel industry presents itself as a potential developer of solutions to the management problems of its wide range of residues, with the challenge to create alternatives to the use of sub-used materials, which are currently deposited in landfills, in applications that add value to your product in a sustainable way. This work aimed to identify the residues that presented the characteristics with greater affinity of use as supplementary cementitious materials, in the production of cements, mortars and concretes, when combined, such as granulated slag and flue dust; materials from the pig iron manufacturing process generated in the coal-fired blast furnace system located in the industrial plant of ArcelorMittal in João Monlevade - MG. The studies were conducted in order to analyze their physico-chemical properties, the establishment of mixtures and the performance of resistance tests, evaluating the real possibilities of using them in a safe and viable way in the civil construction sector. As result, it was possible to obtain concretes with maximum compressive strength, at 28 days, in the range of 38.90 MPa to 44.90 MPa. In this way, the research proved to be feasible the combination of these residues, used as additions in the formulation of pozzolanic mixtures for the production of cements and concretes.

## **Keywords**

Slag, Fly ashes, Pozzolanas, Solid waste management, Industrial ecology.

## Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Localização das indústrias siderúrgicas e cimenteiras no Brasil  | 2  |
| Figura 2 - Destinação dos resíduos siderúrgicos no Brasil   | 3  |
| Figura 3 - Distribuição por tipo de resíduo gerado nas siderúrgicas   | 4  |
| Figura 4 - Fluxo de produção de aço em uma usina siderúrgica integrada  | 11 |
| Figura 5 - Fluxo de produção em uma fábrica de cimento Portland   | 20 |
| Figura 6 - Contribuição das fases puras na evolução da resistência à compressão                                   | 22 |
| Figura 7 - Etapas de hidratação do cimento Portland   | 24 |
| Figura 8 - Variação de calor durante as fases de hidratação do cimento  | 25 |
| Figura 9 - Organograma metodológico da pesquisa   | 35 |
| Figura 10 - Esquema de localização dos pontos de coleta das amostras dos resíduos no alto-forno                   | 38 |
| Figura 11 - Locais de coleta das amostras de resíduos na usina siderúrgica da ArcelorMittal, em João Monlevade-MG | 39 |
| Figura 12 - Coleta da escória granulada de alto-forno   | 39 |
| Figura 13 - Coleta do pó do balão de alto-forno   | 40 |
| Figura 14 - Amostras dos resíduos coletados para envio ao laboratório   | 40 |
| Figura 15 - Preparação da carga moedora   | 42 |
| Figura 16 - Moagem dos materiais de adição  | 43 |
| Figura 17 - Aspectos da escória granulada antes e após a moagem   | 43 |
| Figura 18 - Aspectos do pó do balão antes e após a moagem   | 43 |
| Figura 19 - Equipamento de FRX utilizado nas análises químicas  | 44 |
| Figura 20 - Equipamento de MEV utilizado nas análises de microestrutura   | 45 |
| Figura 21 - Preparação das amostras para ensaio de perda ao fogo  | 47 |
| Figura 22- Realização do ensaio de resíduo insolúvel em andamento   | 47 |
| Figura 23 - Ensaio para determinação de massa específica em andamento   | 48 |
| Figura 24 - Ensaio para determinação de finura Blaine em andamento  | 49 |
| Figura 25 - Preparação das pastas para realização dos ensaios   | 51 |
| Figura 26 - Aparelho de Vicat utilizado para determinação dos tempos de pega                                      | 51 |
| Figura 27 - Calorímetro semi-adiabático utilizado para determinação do calor de hidratação                        | 52 |
| Figura 28 - Câmara úmida e tanque de imersão para cura dos corpos de prova das argamassas                         | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 - Ensaio de ruptura à compressão axial dos corpos de prova das argamassas em andamento                       | 55 |
| Figura 30 - Conjunto dos corpos de prova após realização dos ensaios à compressão axial                                | 55 |
| Figura 31 - Pesagem do aditivo plastificante e das adições   | 58 |
| Figura 32 - Pesagem do cimento e dos agregados graúdo e miúdo  | 58 |
| Figura 33 - Mistura dos materiais para a produção dos concretos  | 58 |
| Figura 34 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone   | 59 |
| Figura 35 - Determinação do teor de ar aprisionado e da massa específica   | 59 |
| Figura 36 - Conjunto de 54 corpos de prova moldados e identificados  | 59 |
| Figura 37 - Processo de retificação das bases dos corpos de prova  | 60 |
| Figura 38 - Preparação dos corpos de prova para os ensaios de ruptura à compressão                                     | 60 |
| Figura 39 - Realização dos ensaios de ruptura à compressão dos corpos de prova   | 61 |
| Figura 40 - Detalhe da identificação da prensa utilizada   | 61 |
| Figura 41 - Detalhe do certificado de calibração da prensa utilizada   | 61 |
| Figura 42 - Curva granulométrica dos agregados miúdo e graúdo  | 63 |
| Figura 43 - Difratoograma da escória granulada de alto-forno   | 65 |
| Figura 44 - Difratoograma do pó do balão de alto-forno   | 65 |
| Figura 45 - Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno  | 66 |
| Figura 46 - Curva granulométrica do pó do balão de alto-forno  | 66 |
| Figura 47 - Micrografia BSE e espectro composicional EDS da EGAF após a moagem   | 67 |
| Figura 48 - Micrografia BSE e espectro EDS composicional do PBAF após a moagem   | 68 |
| Figura 49 - Curva calorimétrica semi-adiabática das reações das pastas   | 70 |
| Figura 50 - Taxa de aceleração de calor semi-adiabática das reações das pastas   | 71 |
| Figura 51 - Micrografia SE e espectro composicional EDS da mistura contendo 50 % de cimento CP V - ARI e 50% de MATPOZ | 73 |
| Figura 52 - Micrografia SE e espectro composicional EDS da mistura contendo 75 % de cimento CP V - ARI e 25% de MATPOZ | 74 |
| Figura 53 - Resistência média à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias  | 77 |
| Figura 54 - Ganho de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias   | 78 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Artigos pesquisados quanto ao teor de cinzas volantes   | 19 |
| Tabela 2 - Quantidade de resíduos gerados no alto-forno da usina siderúrgica da ArcelorMittal, em João Monlevade-MG    | 19 |
| Tabela 3 - Classes de materiais pozolânicos  | 30 |
| Tabela 4 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos   | 30 |
| Tabela 5 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos  | 31 |
| Tabela 6 - Limites de composição dos tipos de cimento Portland   | 32 |
| Tabela 7 - Composição das misturas analisadas  | 46 |
| Tabela 8 - Análise inicial das composições químicas das misturas   | 49 |
| Tabela 9 - Condições de atendimento para classificação de MATPOZ   | 50 |
| Tabela 10 - Análise comparativa dos teores ótimos de mistura do MATPOZ e do CP V-ARI, para elaboração de cimento CP IV | 50 |
| Tabela 11 - Condições de atendimento para classificação de cimento CP IV   | 50 |
| Tabela 12 - Quantidade de material, em massa, para moldagem de 06 corpos de prova cilíndricos                          | 54 |
| Tabela 13 - Quantidade de material, em massa, dos traços de concreto pesquisados                                       | 57 |
| Tabela 14 - Resultados dos ensaios realizados com o cimento CP V - ARI   | 62 |
| Tabela 15 - Análise granulométrica dos agregados miúdo e graúdo  | 63 |
| Tabela 16 - Composição química dos resíduos siderúrgicos   | 64 |
| Tabela 17 - Características químicas das misturas pesquisadas  | 69 |
| Tabela 18 - Características físicas das misturas pesquisadas   | 69 |
| Tabela 19 - Resultados dos ensaios de calorimetria semi-adiabática   | 70 |
| Tabela 20 - Índices de desempenho das misturas pozolânicas com cimento Portland aos 28 dias                            | 72 |
| Tabela 21 - Resultados dos ensaios físicos dos concretos   | 75 |
| Tabela 22 - Resultados dos ensaios mecânicos dos concretos   | 76 |
| Tabela 23 - Resistência média à compressão das famílias de concretos pesquisados                                       | 78 |

## Lista de abreviaturas e siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AFm – Mono-sulfoaluminato de Cálcio Hidratado  
AFt – Tri-sulfoaluminato de Cálcio Hidratado  
BSE – Backscattering Electron  
C-H – Hidróxido de Cálcio  
CP V - ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial  
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado  
DRX – Difração de Raios X  
EDS – Energy Dispersive Spectroscopy  
EGAF – Escória Granulada de Alto-Forno  
FRX – Fluorescência de Raios x  
ICDD-PDF – International Centre for Diffraction Data - Powder Diffraction File  
ICP – Injection Coal Pulverized  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
MATPOZ – Material Pozolânico  
MBC – Materiais de Base Cimentícia  
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo  
NBR – Norma Técnica Brasileira  
NM – Norma Mercosul  
PBAF – Pó do Balão de Alto-Forno  
SE – Secondary Electron  
SEM – Scanning Electron Microscopy  
ZTI – Zona de Transição Interfacial

## Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Contextualização  | 2         |
| 1.2. Objetivo geral  | 5         |
| 1.3. Objetivos específicos   | 5         |
| 1.4. Justificativa   | 5         |
| <b>2. Revisão bibliográfica</b>                                    | <b>8</b>  |
| 2.1. Os resíduos sólidos   | 8         |
| 2.2. O processo de produção do aço                                 | 10        |
| 2.3. Os tipos de resíduos siderúrgicos                             | 11        |
| 2.3.1. Escória granulada de alto-forno - EGAF                      | 12        |
| 2.3.2. Pó do balão de alto-forno - PBAF                            | 15        |
| 2.4. O cimento Portland  | 20        |
| 2.4.1. O processo de produção do cimento Portland                  | 20        |
| 2.4.2. A composição do cimento Portland                            | 21        |
| 2.4.3. Os mecanismos de hidratação do cimento Portland             | 22        |
| 2.5. As adições como materiais cimentícios suplementares           | 26        |
| 2.5.1. Os benefícios das adições                                   | 26        |
| 2.5.2. Os tipos de adições   | 29        |
| 2.5.2.1. Materiais pozolânicos                                     | 29        |
| 2.5.2.2. Materiais cimentantes                                     | 31        |
| 2.5.2.3. Materiais inertes   | 31        |
| 2.5.3. A aplicação das adições em cimentos e concretos             | 33        |
| <b>3. Metodologia</b>  | <b>35</b> |
| 3.1. Materiais   | 36        |
| 3.1.1. Materiais componentes das pastas, argamassas e concretos    | 36        |
| 3.1.1.1. Cimento CP V - ARI  | 36        |
| 3.1.1.2. Areias e brita nº 1                                       | 37        |
| 3.1.1.3. Aditivo plastificante                                     | 37        |
| 3.1.2. Resíduos siderúrgicos                                       | 38        |
| 3.1.2.1. Obtenção e caracterização dos materiais no estado natural | 38        |
| 3.1.2.2. Análise de composição química                             | 40        |
| 3.1.2.3. Análise mineralógica                                      | 41        |
| 3.1.2.4. Análise granulométrica                                    | 41        |
| 3.1.2.5. Processo de moagem  | 41        |
| 3.1.2.6. Caracterização dos materiais no estado moído              | 44        |
| 3.1.2.6.1. Análise de composição química                           | 44        |
| 3.1.2.6.2. Análise microestrutural                                 | 44        |
| 3.2. Métodos   | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2.1. Estudo dos resíduos como adições minerais  | 45        |
| 3.2.1.1. Definição das blendagens   | 45        |
| 3.2.1.2. Análise de perda ao fogo   | 46        |
| 3.2.1.3. Análise de resíduo insolúvel   | 47        |
| 3.2.1.4. Análise da massa específica  | 48        |
| 3.2.1.5. Análises de finura e da área de superfície específica  | 48        |
| 3.2.2. Procedimentos experimentais  | 51        |
| 3.2.2.1. Ensaio com as pastas   | 51        |
| 3.2.2.2. Ensaio com as argamassas   | 52        |
| 3.2.2.3. Ensaio com os concretos  | 56        |
| <b>4. Resultados e Discussão</b>  | <b>62</b> |
| 4.1. Resultados das análises de caracterização e ensaios dos materiais componentes das pastas, argamassas e concretos | 62        |
| 4.1.1. Caracterização físico-química e mecânica do cimento CP V - ARI   | 62        |
| 4.1.2. Granulometria dos agregados  | 63        |
| 4.2. Resultados das análises de caracterização e ensaios dos resíduos siderúrgicos                                    | 64        |
| 4.2.1. Composição química   | 64        |
| 4.2.2. Mineralogia  | 65        |
| 4.2.3. Granulometria  | 66        |
| 4.2.4. Análise microestrutural  | 67        |
| 4.3. Resultados dos procedimentos experimentais   | 68        |
| 4.3.1. Características físicas e mecânicas dos concretos  | 68        |
| 4.3.2. Características mecânicas das argamassas   | 71        |
| 4.3.3. Características físicas e mecânicas dos concretos  | 75        |
| <b>5. Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros</b>   | <b>79</b> |
| <b>6. Referências Bibliográficas</b>  | <b>81</b> |

## 1. Introdução

O crescimento do segmento siderúrgico nos últimos anos tem proporcionado um aumento expressivo na geração de resíduos sólidos, tais como as escórias, as lamas, as carepas e os materiais particulados constituídos por ferro, carbono, cálcio, silício, alumínio, entre outros. Por esse motivo, a indústria siderúrgica é considerada uma potencial poluidora tanto pela diversidade de agentes poluentes, como pela quantidade e toxicidade destes agentes.

Neste cenário, as siderúrgicas devem estar preparadas para desenvolver um eficiente programa de gerenciamento ambiental dos seus processos produtivos, desde a extração das matérias-primas, a fabricação do produto final e a destinação dos resíduos gerados, cumprindo com as obrigações de atuarem de forma sustentável.

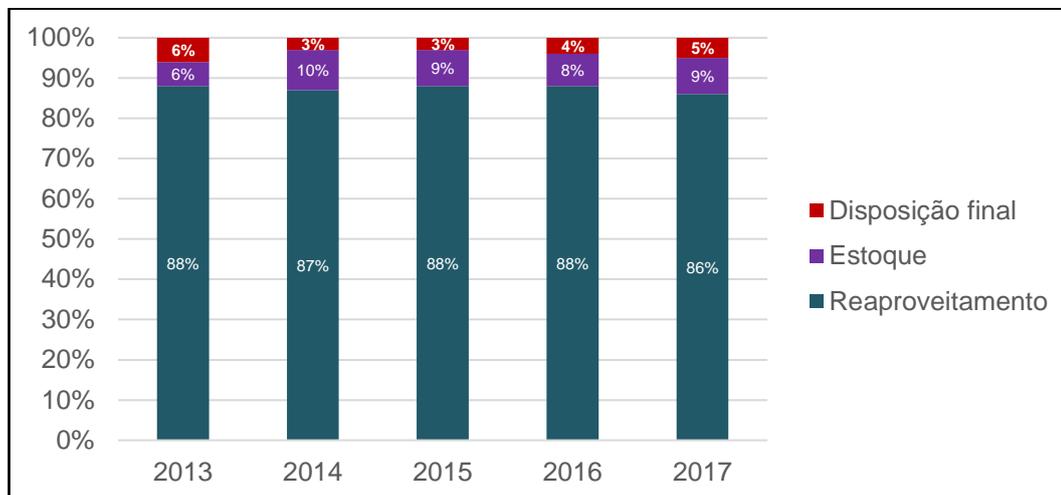
Como forma de minimizar os impactos ambientais e encontrar alternativas de reutilização destes resíduos, abre-se um campo extenso para a pesquisa e desenvolvimento de aplicações que agreguem valor a estes materiais, tornando-os fontes alternativas de renda e que venham a gerar economias no processo industrial, aumentando a competitividade do setor siderúrgico nacional (ARCELORMITTAL BRASIL, 2018).

De outro lado, a indústria da construção civil também tem um papel extremamente relevante sob o ponto de vista dos aspectos de sustentabilidade com relação à produção e consumo de uma crescente gama de materiais cerâmicos. Uma das formas mais eficientes para diminuir os impactos ao meio-ambiente, decorrentes do seu processo produtivo é através do desenvolvimento do seu potencial de incorporação de diferentes tipos de resíduos na fabricação do cimento e na sua utilização em concretos e argamassas (CNI, 2016).

Visando alcançar melhores desempenhos em termos de eficiência dos recursos energéticos, de redução na utilização de fontes não-renováveis de matérias-primas e de otimização na ocupação de espaços destinados para deposição final dos seus resíduos, torna-se premente o esforço conjunto destes dois grandes segmentos da indústria. Neste sentido, cabe explorar as potencialidades de interação entre alguns destes resíduos, ainda subutilizados, visando a sua utilização como materiais suplementares na fabricação de cimentos com menor teor de clínquer e contribuindo para a elevação dos padrões de sustentabilidade das suas respectivas cadeias produtivas.



Conforme dados do último relatório de sustentabilidade da indústria brasileira de aço (IAB, 2018), no Brasil, que atualmente responde por aproximadamente 2% da produção mundial de aço, são gerados 19,9 milhões de toneladas de resíduos, distribuídos conforme indicação da Fig. 2.



**Figura 2** - Destinação dos resíduos siderúrgicos no Brasil. Fonte: (IAB, 2018).

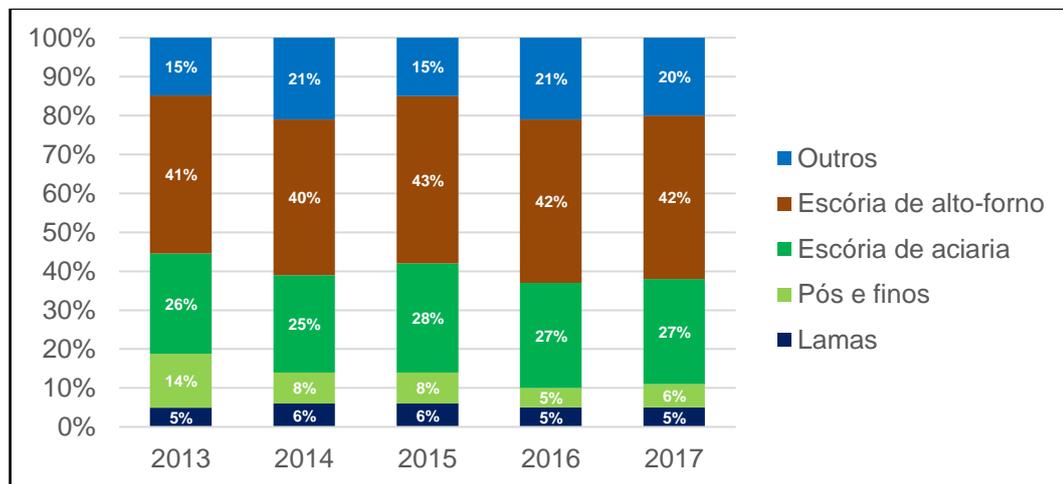
Apesar do elevado índice de reaproveitamento destes resíduos, o volume destinado para disposição final ainda deve ser objeto de estudo, com o propósito de encontrar novas alternativas de utilização e valorização destes materiais. O levantamento realizado junto às empresas que compõem o setor siderúrgico, indica que, uma ou mais das alternativas abaixo estão sendo usadas como forma de reduzir e/ou agregar valor aos seus coprodutos e resíduos (IAB, 2018):

- Novas formas de reciclagem no próprio processo – 74,2% do setor;
- Novas formas de reuso – 52,1% do setor;
- Identificação e boas práticas para coleta, manuseio, estocagem e transporte – 78,5% do setor;
- Inovação tecnológica para desenvolvimento de novas aplicações – 52,1% do setor;
- Desenvolvimento de novos mercados para potencializar a venda de resíduos e coprodutos – 78,6% do setor;
- Estruturação / aperfeiçoamento da gestão de resíduos e coprodutos – 54,6% do setor.

Constata-se que, há uma intensa mobilização das siderúrgicas em investir no desenvolvimento de soluções para a questão dos seus resíduos e coprodutos.

Dentre os resíduos que ainda não tem a sua capacidade de reutilização totalmente explorada, encontram-se os pós, as lamas e alguns tipos de escórias, incluídos aqueles provenientes do processo de produção de ferro-gusa, objeto de pesquisa neste trabalho.

A Fig. 3 indica a participação de cada tipo de resíduo diretamente ligado ao processo produtivo das siderúrgicas brasileiras.



**Figura 3** - Distribuição por tipo de resíduo gerado nas siderúrgicas. Fonte: (IAB, 2018).

Seguindo estas prerrogativas, a ArcelorMittal Brasil, atualmente a maior produtora de aço da América Latina e sendo parte do maior grupo industrial siderúrgico mundial, tem se posicionado proativamente no desenvolvimento de estudos que visem otimizar a gestão dos resíduos sólidos originados em seus processos, em consonância com as suas diretrizes de desenvolvimento sustentável e economia circular (ARCELORMITTAL BRASIL, 2018).

Dentre elas, encontra-se a temática da inovação em processos voltados para o segmento da construção civil, que tem uma participação relevante no consumo de coprodutos gerados pelas unidades industriais da ArcelorMittal Brasil, atualmente na ordem de 3,8 milhões de toneladas por ano.

Assim, foram identificadas oportunidades de utilizar dois tipos de resíduos provenientes da unidade siderúrgica de João Monlevade - MG (escória granulada de alto-forno - EGAF e o pó do balão de alto-forno - PBAF), que atualmente são reaproveitados no próprio processo ou são destinados para disposição final em aterros industriais, como adições minerais na produção de cimentos, argamassas e concretos, dentro dos respectivos limites normativos.

As razões da escolha destes dois materiais se deram pelos seguintes motivos:

- O conhecimento das propriedades cimentantes da EGAF, altamente benéficas na fabricação de cimento Portland;
- A observação de que, frequentemente, o PBAF apresenta características de concreção quando em contato com ambientes úmidos.

## **1.2. Objetivo geral**

Avaliar as possibilidades de interação entre a escória granulada de alto-forno - EGAF e o pó do balão de alto-forno - PBAF na produção de cimentos compostos.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Caracterizar as propriedades físico-químicas dos resíduos;
- Formular misturas conforme a compatibilidade de interação e potencial de reatividade dos resíduos com o cimento Portland;
- Analisar a viabilidade de utilização de cada mistura com base no seu comportamento mecânico e
- Selecionar as misturas mais promissoras para a aplicação na produção de concretos convencionais nas classes de 30 MPa a 40 MPa.

## **1.4. Justificativa**

Com uma produção anual atualmente de 1,6 bilhões de toneladas de aço bruto por ano e responsável por 6,7 % das emissões globais de CO<sub>2</sub> (WSA, 2016), a indústria siderúrgica possui enormes desafios quanto à definição de estratégias para conciliar a sua necessidade de produção e a gestão dos resíduos decorrentes das suas atividades, que são extremamente intensivas quanto ao uso de matérias-primas, insumos e energia. Como referência, as usinas integradas geram, aproximadamente, 600 kg de resíduos sólidos por tonelada de aço produzido.

Caso não fossem reaproveitados, eles provavelmente inviabilizariam a produção de aço em razão de fatores econômicos e ambientais. Conforme são gerenciados, os resíduos sólidos gerados pela atividade siderúrgica podem ser classificados como subprodutos ou mesmo coprodutos da fabricação do aço, possibilitando o

seu ingresso na cadeia produtiva como materiais alternativos de valor econômico importante em consonância com os princípios conservacionistas adotados mundialmente, entre os quais, o de preservação dos recursos naturais, que privilegia a reciclagem dos resíduos gerados em detrimento de sua deposição em aterros controlados, desde que suas propriedades técnicas e ambientais sejam seguras e compatíveis com o campo de aplicação desejado.

Neste contexto, para minimizar os impactos decorrentes deste intensivo consumo de recursos, a indústria siderúrgica tem o desafio de continuar atuando dentro dos princípios do desenvolvimento sustentável, buscando aperfeiçoar continuamente a ecoeficiência dos seus processos e produtos e adotar medidas para a proteção do meio-ambiente, da saúde, da segurança e do bem-estar dos seus trabalhadores e da comunidade onde está inserida.

Além do atendimento às exigências das legislações ambientais, ela deve trabalhar em parceria com universidades, instituições de pesquisa, órgãos governamentais e outros segmentos industriais, visando o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e eficientes, que permitam racionalizar o consumo de matérias-primas e insumos, otimizar a eficiência energética e maximizar o aproveitamento de gases, água e coprodutos dos processos envolvidos na produção direta de aço (IBS, 2009).

De outro lado, têm-se a indústria cimenteira, com uma produção mundial de 4 bilhões de toneladas de cimento Portland por ano, considerada a terceira maior consumidora mundial de energia, responsável pelo consumo de cerca de 7% do total disponível, sendo também, a segunda maior emissora de CO<sub>2</sub>, responsável por cerca de 7 % das emissões globais (WBCSD, 2018). Produzir cimento é um processo que também requer um intensivo consumo de matéria-prima e energia, resultando na geração de fortes impactos ambientais (STRUBLE; GODFREY, 2004). A produção de uma tonelada de cimento consome cerca de 5 GJ de energia e necessita de aproximadamente 1,7 toneladas de matéria-prima, basicamente composta de calcário e argila, resultando na emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por tonelada de clínquer produzido, além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como o CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, em menores proporções.

Nas emissões específicas da indústria do cimento, aproximadamente 40% referem-se ao processo de queima de combustíveis fósseis em operações de fabricação, cerca de 5% as atividades de transporte, 5% ao uso da eletricidade e

os outros 50% ao processo de clínquerização (HUMPHREYS; MAHASENAN, 2002).

A indústria de cimento brasileira é moderna e tecnologicamente atualizada, onde o consumo médio de energia por tonelada de cimento produzido no país é de 107 kw/h, enquanto nos Estados Unidos esse consumo é da ordem de 146 kw/h. Os esforços da indústria nacional têm resultado em progressos significativos, mediante a adoção de processos de produção mais eficientes e com menor consumo de energéticos, tal como a utilização de adições minerais, que reduzem a quantidade de clínquer nos cimentos comerciais. Com isso, o Brasil atingiu atualmente um fator de emissão de aproximadamente 610 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento, bem abaixo de países como a Espanha (698 kg), Inglaterra (839 kg) e China (848 kg) (WBCSD, 2018).

Atualmente, a indústria do concreto tem como principal desafio a conciliação do desenvolvimento tecnológico e da preservação do meio ambiente, principalmente em função dos problemas associados ao cimento Portland, com relação ao intenso uso de recursos naturais e a significativa emissão de gases para o aquecimento global (SNIC, 2018). Face a esta situação, as melhores estratégias a serem tomadas pela indústria cimenteira para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> associada à produção de cimento são (SNIC, 2018):

- Aumentar a eficiência energética por meio do uso de combustíveis alternativos (adoção da técnica de coprocessamento de resíduos industriais e utilização de biomassa) ou de combustíveis fósseis com menores emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção de clínquer;
- Utilizar tecnologias de neutralização, captura e armazenamento de carbono (Carbon Capture Storage) como projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL);
- Utilizar unicamente o processo de produção via seca, com menor consumo de energia termo-elétrica;
- Reduzir a quantidade de clínquer na fabricação de cimento utilizando adições minerais suplementares (escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim, cinzas de casca de arroz, cinzas da cana de açúcar, entre outros com propriedades pozolânicas e/ou cimentantes) e ampliar o uso de cimentos compostos mais eficientes e econômicos na cadeia da construção civil.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Os resíduos sólidos**

No Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2008), em seu artigo 4º, tem como um de seus objetivos, a preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida.

Também, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2017), em seu Capítulo II, Artigo 3º, define claramente os termos relacionados à gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos, para fins de distinção entre as suas diversas formas de classificação e processamento.

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos, independentemente de seu valor econômico, como: Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Há que se destacar, porém, que o objetivo da norma é classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, de modo a que possam ser gerenciados adequadamente. Isto significa que, embora haja a necessidade de classificação dos coprodutos segundo tal norma, para efeito de avaliação de eventuais riscos ao meio ambiente ou à saúde, tal classificação não é determinante na definição da rota de reciclagem ou da forma de recuperação adotada.

Ela diz respeito fundamentalmente à forma de armazenamento temporário ou definitivo dos resíduos sólidos, perigosos ou não perigosos. Em caso de reciclagem ou recuperação deve-se proceder a uma avaliação do risco referente ao processamento e utilização do resíduo e/ou coproduto, sempre com a concordância da agência ambiental estadual.

Ainda, inserido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2017), encontra-se um instrumento denominado SINIR – Sistema Nacional de

Informações Sobre a Gestão de Resíduos Sólidos, responsável por receber, analisar, classificar, sistematizar, consolidar e divulgar dados e informações qualitativas e quantitativas sobre a gestão de resíduos sólidos, onde as empresas que operam com resíduos perigosos, em qualquer fase do seu gerenciamento, serão obrigadas a se cadastrar, sinalizando a origem, transporte e destinação final dos seus resíduos gerados.

Esta sistemática de classificação define a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos, que envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Para os resíduos provenientes da indústria do ferro e do aço (Código 10 02), objetos de estudo deste trabalho, tem-se:

- 10 02 02: Escórias de altos-fornos granulada (areia de escória) proveniente da fabricação do ferro e do aço;
- 10 02 03: (\*) Lodos ou poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregado na produção de aço primário.

Onde, o símbolo \* indica resíduos perigosos pela sua origem, ou porque, 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.

Foi realizado um estudo quanto à gestão de coprodutos no setor siderúrgico, avaliando o potencial de exploração e as estratégias de utilização destes materiais, enfatizando que a adoção de rotas de reciclagem e/ou recuperação de resíduos deve ser adotada tão somente quando atender as seguintes condições definidas pelo tripé da sustentabilidade (CGEE, 2008):

- Viabilidade econômica, conferindo compatibilidade de custos frente à metodologia empregada;
- Viabilidade técnica, considerando a disponibilidade e a eficiência dos recursos tecnológicos e
- Viabilidade ambiental, certificando de que a tecnologia a ser aplicada atenda aos padrões legais exigíveis e promova benefícios à sociedade.

## 2.2. O processo de produção do aço

O aço é um produto de extrema importância na dinâmica da atividade humana, assumindo papel determinante no funcionamento da economia, sobretudo por figurar como um elemento essencial para o perfeito encadeamento de diversas cadeias produtivas.

Quando considerado ao longo de todo o seu ciclo de vida, o aço integra diferentes grupos de atividades econômicas. Uma enorme rede é organizada desde a indústria extrativista, que produz alguns dos insumos necessários à sua produção, até os setores que trabalham com reciclagem de materiais.

Uma visão geral da indústria do aço remete a quatro grandes setores da atividade econômica: indústria extrativista, metalurgia, setores consumidores do aço e setor de beneficiamento e comercialização de coprodutos e sucatas (IAB, 2018).

Ele é obtido a partir do ferro, que é um dos metais mais comuns na crosta terrestre, podendo ser encontrado na natureza misturado com outros elementos, sob diversas formas de minerais formados por óxidos de ferro, sendo os mais importantes a hematita e a magnetita.

Na siderurgia, usa-se carvão mineral (antracito) ou carvão vegetal para remoção do oxigênio do ferro, etapa chamada de redução e realizada no alto-forno, de onde se obtém o ferro-gusa, ou em processos de redução direta, onde se utiliza como combustível o gás natural e se obtém o ferro-esponja. Antes de serem levados ao alto-forno, o minério de ferro e o carvão são previamente preparados para melhoria do rendimento e economia no processo, etapa da produção conhecida como preparação da carga.

Na preparação da carga, dependendo da rota tecnológica e da qualidade da matéria-prima, são utilizados vários processos. Para o minério de ferro, as principais formas de preparação são a sinterização e pelotização. O carvão mineral é sempre submetido à coqueificação, processo no qual se produz o coque e também o alcatrão, de onde são retirados os coprodutos carboquímicos de alto valor agregado.

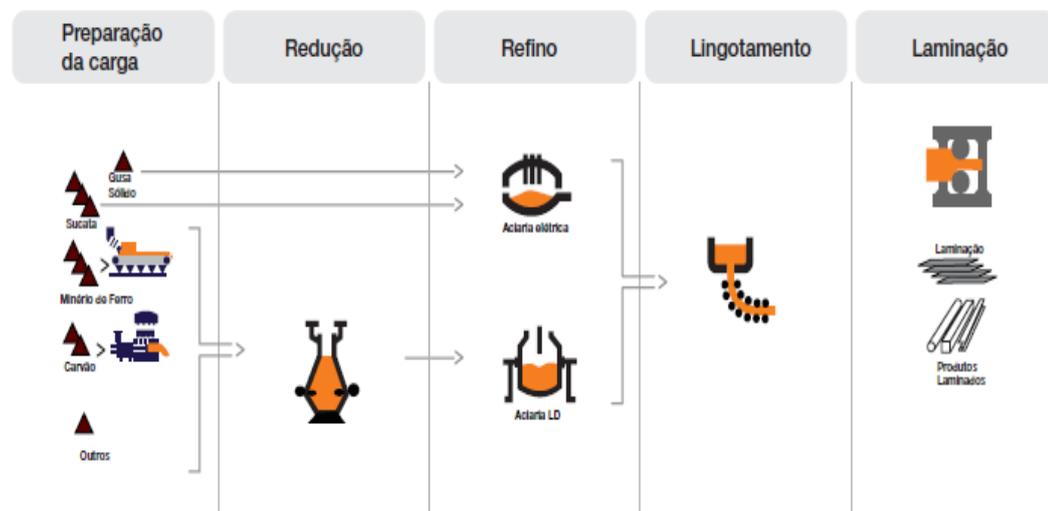
A seguir, no processo de redução, à alta temperatura, o ferro se separa do oxigênio, gerando ferro-gusa em estado líquido. Impurezas como calcário, sílica e alumínio se fundem a uma temperatura de aproximadamente 1400 °C e formam um material sobrenadante, denominado escória. A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa e a sucata são carregados em aciarias a oxigênio ou

elétricas para a obtenção do aço, mediante o ajuste do teor de carbono e a remoção de impurezas. A fase seguinte do processo siderúrgico é a laminação. O aço é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas e bobinas grossas e finas (aços planos), tubos, perfis, barras, vergalhões, tarugos e fios-máquina (aços longos), ente outros.

De acordo com seu processo produtivo, as usinas de aço são classificadas como integradas, semi-integradas ou não integradas.

As usinas integradas operam as três fases básicas: redução, refino e laminação, tendo seu processo produtivo iniciado com a utilização de minério de ferro. As usinas semi-integradas operam duas fases, sendo as mais usuais refino e laminação. Essas usinas partem do ferro gusa ou sucata, para transformá-los em aço. As usinas não integradas operam apenas uma fase do processo: redução ou laminação.

A Fig. 4 indica o fluxo de produção simplificado de aço em uma usina integrada.



**Figura 4** - Fluxo de produção de aço em uma usina siderúrgica integrada. Fonte: (IAB, 2018).

### 2.3. Os tipos de resíduos siderúrgicos

Dentre os diversos tipos de resíduos que são gerados durante o processo de fabricação do aço em uma usina siderúrgica integrada, podemos citar, por unidade produtora:

- Redução (Sinterização: finos de minério de ferro calcinados e sinterizados/ Alto-forno: escória granulada de resfriamento rápido, pó do balão coletor e lama do filtro de lavagem de gás);
- Aciaria (escória de conversores a oxigênio, escória de forno-panela, lama do filtro de lavagem de gás e carepa do lingotamento contínuo) e
- Laminação (limalha de esmerilhamento de tarugos, carepa do forno de reaquecimento de tarugos e carepa da laminação à quente).

Para o contexto deste trabalho, foram analisados somente os resíduos provenientes do processo de redução, realizados no alto-forno e utilizando carvão mineral (coque), sendo:

### 2.3.1. Escória granulada de alto-forno - EGAF

As escórias produzidas na siderurgia são a escória de alto-forno e a de aciaria (forno elétrico e forno-panela). As escórias são essenciais para o processo de produção do aço, pois, elas são responsáveis pela absorção dos elementos indesejáveis na formulação dos diferentes tipos de aço, controlando a sua composição química, além de isolar o banho da atmosfera evitando assim a perda da temperatura e a reoxidação do ferro. Por exemplo, no alto-forno, durante o processo de redução, o minério é exposto a temperaturas elevadas e às impurezas contidas na carga (originadas pela ganga, fundentes e cinzas) são separadas do metal fundido e removidas sob a forma de escória.

Da mesma forma, na aciaria, as escórias têm um importante papel no rendimento metálico das corridas, através da proteção dos revestimentos refratários, remoção de impurezas, tais como enxofre e fósforo e refinamento da carga metálica. Entretanto, este tipo de escória não será analisado no contexto deste trabalho.

A separação da escória da fase metálica se dá devido à imiscibilidade e à diferença de densidade entre as duas fases. Assim, a escória é eliminada sempre na forma líquida, passando em sequência pela etapa de solidificação. Cada tipo de solidificação confere a esse material características diferentes acarretando, portanto, empregabilidades distintas.

As escórias são os resíduos com maior volume de geração em uma usina siderúrgica integrada, sendo consideradas como coprodutos, devido à sua vasta aplicação, principalmente no setor da construção civil, como adições para a redução do teor de clínquer na fabricação de cimentos Portland, na fabricação de

materiais vitrocerâmicos e como agregados para concretos e pavimentos, como corretivo de acidez em solos na agricultura, como adsorventes de dióxido de enxofre e metais pesados na dessulfuração de gases e em tratamentos de águas residuárias, como agentes redutores de processos de eutrofização de ambientes aquáticos, como catalizadores na produção de biocombustíveis, entre outras. Entretanto, devido a eventuais sazonalidades de consumo, parte desse material permanece estocada por longos períodos, ocupando grandes áreas no interior das instalações industriais, sendo, portanto, necessário realizar novas formas de gerenciamento e aproveitamento destes coprodutos.

Este resíduo é classificado normalmente como um resíduo classe IIB (não perigoso e inerte) segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004). No entanto, pode ser classificado como um resíduo classe IIA (não perigoso e não inerte) caso apresente concentração dos seus constituintes (parâmetros analisados), superior ao limite máximo permitido, conforme os requisitos exigíveis para obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, prescritos nas normas NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente.

A escória granulada de alto-forno é gerada a partir da fusão das impurezas contidas no minério de ferro (cálcio, sílica e alumina), sendo constituída em sua maior parte por aluminossilicatos de cálcio sob forma vítrea, juntamente com os componentes do fundente (calcário e dolomita) e as cinzas do coque ou carvão vegetal. São gerados por volta de 200 a 400 kg de escória por tonelada de gusa para altos-fornos à coque, e de 150 a 300 kg por tonelada de gusa para altos-fornos movidos a carvão vegetal (JACOMINO *et al.*, 2002) e (SOUZA JÚNIOR, 2007).

Sua composição é constituída principalmente por elementos inorgânicos, tais como óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e óxidos de ferro ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A concentração de cada um desses óxidos é decorrente da constituição química das matérias-primas (tipo e qualidade do minério de ferro, natureza do combustível redutor e dos fundentes) utilizadas na fabricação do gusa, além do tipo de refratário usado na parede do forno, das condições de operação do equipamento e do controle rigoroso das reações termodinâmicas que ocorrem durante o processo produtivo.

Os óxidos de cálcio e de magnésio, ocupam 60% de seu peso total, onde o óxido de cálcio tem um papel fundamental para a basicidade binária do processo (controle da relação  $\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$ ), enquanto o óxido de magnésio promove a

proteção das paredes refratárias dos fornos. Os óxidos de silício e alumínio juntos a outros óxidos, constituem outros 40% do peso total da escória produzida (JACOMINO *et al.*, 2002).

Para que a escória de alto-forno possa ser utilizada na produção de cimentos, é necessário que ela possua características hidráulico-cimentantes que, ao serem potencializadas, permitam utilizá-la de forma eficiente sob os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Essas características, dependem de vários fatores, tais como: composição química, amorficidade, tipo de resfriamento, estrutura física, composição mineralógica, granulometria e área de superfície específica.

Entre os métodos propostos para avaliação da atividade hidráulica da escória (análise química, grau de hidratação e estrutura), a caracterização através da análise química é o método mais comumente utilizado e permite correlacionar a sua composição mineralógica com o desenvolvimento das suas propriedades hidráulicas. Os resultados podem ser utilizados para calcular os índices ou módulos químicos, que relacionam a reatividade da escória à sua basicidade, pois, durante o processo de dissolução da escória na água, é necessário que se tenha um ambiente altamente alcalino, para que as reações de hidratação ocorram de forma eficiente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O processo térmico utilizado na sua produção, definirá os diferentes graus de vitrificação das partículas e as respectivas potencialidades hidráulicas (VOINOVITCH, 1980).

Quanto à forma de resfriamento da escória líquida gerada pelo alto-forno, existem quatro modos de produção:

- 1 - Resfriada ao ar, lentamente, tornando-se cristalina;
- 2 - Resfriada rapidamente, por jatos d'água sob alta pressão, tornando-se amorfa, processo este conhecido por granulação (objeto de estudo neste trabalho);
- 3 - Através de vazamento rápido em poços de parede inclinada, contendo água no fundo, de forma a permitir que o vapor d'água penetre na escória líquida, resultando em uma escória porosa conhecida por escória expandida;
- 4 - Através da pelotização, onde o resfriamento ocorre em um tambor rotativo que dispersa o material no ar, gerando uma distribuição variada de granulometria.

Os processos de resfriamento das escórias resfriadas ao ar e expandida (modos I e III) são simples e baratos, enquanto o processo da escória granulada (modo II) tem um custo mais elevado devido ao valor dos equipamentos, consumo de água

e energia e controle de efluentes. Já os custos da pelotização da escória (modo IV) são ainda maiores, apesar do menor consumo de água (VOINOVITCH, 1980).

As possibilidades de reaproveitamento da escória granulada são bem maiores quando comparada aos outros tipos de escórias, devido à sua hidraulicidade latente, ou seja, a característica de endurecer ao entrar em contato com a água. No processo de resfriamento brusco não há tempo suficiente para que ocorra o arranjo atômico cristalino, resultando em um material de natureza predominantemente vítrea (estrutura amorfa e com alto nível de energia de ligação), sem a periodicidade e a simetria regulares que caracterizam os sólidos cristalinos. Então, quanto mais rápido for este resfriamento, maior será o grau de vitrificação (amorficidade) e melhores serão as propriedades hidráulicas da escória.

A fração vítrea é uma característica fundamental da escória granulada, pois, está relacionada à porosidade do material e, em geral, quanto mais porosa, mais vítreas, claras e reativas serão estas escórias. Por outro lado, observa-se que tonalidades mais escuras indicam a presença de fase cristalina, o que não é desejável (VOINOVITCH, 1980).

Além disso, quanto mais básica for a escória (maior a relação % CaO / % SiO<sub>2</sub>), maior o seu poder dessulfurante, maior o seu ponto de fusão e menor a sua viscosidade, resultando numa maior hidraulicidade e conseqüentemente numa maior capacidade de desenvolver as reações cimentantes desejadas deste material, para a fabricação de cimentos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### 2.3.2. Pó do balão de alto-forno - PBAF

Os pós são resíduos sólidos obtidos pelo sistema de tratamento à seco dos gases que são produzidos e liberados durante o processo de produção de ferro-gusa no alto-forno ou de aço na aciaria, retidos nos equipamentos de controle de emissão de particulados para a atmosfera, denominados sistemas de desempoeiramento, constituídos por elementos separadores, filtrantes e acumuladores.

O pó do balão é obtido durante o primeiro estágio de limpeza dos gases que são liberados pelo topo do alto-forno, onde são retidas as partículas mais grossas e pesadas, que se sedimentam e ficam armazenadas no equipamento denominado ciclone, popularmente chamado de balão devido à sua forma geométrica, para posterior coleta e destinação. O segundo e último estágio de limpeza dos gases é

feito por via úmida, no equipamento denominado lavador Venturi, onde as partículas mais finas são retidas em espessadores e desidratadoras, formando a lama. Após ser limpo e desumidificado, os gases são enviados para os regeneradores ou são utilizados como combustível em outros processos da usina. Todo o processo de coleta do pó do balão deve ser realizado seguindo rigorosamente procedimentos e padrões operacionais dos equipamentos e do sistema de limpeza de gases do alto-forno, como forma de controle à exposição de contaminação de pessoas e do meio ambiente.

Em geral, são resíduos ricos em materiais carbonosos, óxidos metálicos, álcalis e materiais voláteis, bem como, elementos metálicos como zinco, potássio, cromo, cádmio e chumbo, os quais contribuem para o seu potencial tóxico e, conseqüentemente, dificultam o seu gerenciamento ambiental. A fração carbonosa é composta por finos de coque ou carvão vegetal proveniente da formação da carga redutora no topo do alto-forno e de carvão incombusto (char) proveniente da injeção de carvão pulverizado (ICP) nas suas ventaneiras (SAHAJWALLA; GUPTA, 2005).

O processo de ICP é uma tecnologia amplamente utilizada nos altos-fornos, em escala mundial, e tem como objetivo, no caso onde utiliza-se carvão mineral, reduzir o coke-rate (quantidade de coque necessária para a produção de 1,0 tonelada de gusa) e uma conseqüente diminuição dos custos de produção do gusa, pois, também possibilita um aumento do volume e da eficiência de redução da carga metálica, proporcionando maior estabilidade térmica do alto-forno e diminuição do teor de elementos nocivos ao aço, tais como enxofre, fósforo e silício.

Usualmente, são utilizadas taxas de injeção em torno de 150 kg de carvão pulverizado/tonelada de gusa, variando conforme as condições operacionais e a composição das matérias-primas utilizadas.

O pó de alto-forno é classificado segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), como um resíduo classe I (perigoso), devido à presença de constituintes inorgânicos e orgânicos com alto potencial poluidor, tais como o cromo, chumbo, arsênio, fenóis, cloretos e sulfatos em sua composição, sendo necessários cuidados especiais na estocagem, manuseio e transporte do resíduo. Sua geração é em torno de 20 a 45 kg por tonelada de gusa em altos-fornos à carvão vegetal e de 15 a 35 kg em altos-fornos à coque (MACHADO *et al.*, 2011).

A aplicação mais comum é como matéria-prima para a indústria de cerâmica, sendo adicionado à massa de argila em uma porcentagem de aproximadamente 10%. A presença de elevada quantidade de óxidos de ferro contribui para o aumento da coloração avermelhada da cerâmica, enquanto que a presença do carbono auxilia no processo de queima, reduzindo, portanto, o consumo de combustíveis. Para uma adição de 10% a economia é da ordem de até 50% no consumo de combustível primário durante a fase de queima. Quanto à presença de fenóis no resíduo adicionado à cerâmica, estes são em grande parte destruídos durante o processo de queima, sendo que os gases emitidos durante o processo apresentam concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela legislação (OLIVEIRA; MARTINS, 2003).

Sistemas de flotação e separação magnética têm sido utilizados para a recuperação de carbono, ferro, metais pesados e álcalis, com eficiência de 80%, possibilitando a utilização deste resíduo no processo de sinterização (DAS *et al.*, 2002). Entretanto, são tecnologias que envolvem custos financeiros significativos e acabam por não serem amplamente utilizados.

Como forma de buscarem soluções imediatas para a destinação destes resíduos, muitas siderúrgicas integradas utilizam diretamente o pó do balão do coletor como material combustível em suas sinterizações, muitas vezes sem realizarem uma avaliação mais crítica sobre o real benefício desta prática comparado aos potenciais danos ambientais e problemas operacionais que se desencadearão durante o referido processo.

Outra proposta de reciclagem do resíduo é na fabricação de pigmentos à base de ferro, onde foi verificado que a tinta obtida possui características como estabilidade química, alta resistência ao tingimento, longa durabilidade e custo baixo, além de não apresentar toxicidade (SHEN *et al.*, 2010).

O pó de alto-forno também pode ser aplicado como adsorvente para a remoção de corantes em efluentes líquidos, como, por exemplo, nas indústrias têxteis (AMORIM, 2010).

Ao explorar amplamente a questão da gestão dos resíduos sólidos siderúrgicos, verifica-se que, diferentemente das escórias, atualmente bastante pesquisadas e com aplicações definidas, existe oportunidade de estudos quanto à reutilização de forma técnica, ambiental e economicamente viável dos pós e lamas, seja no próprio processo siderúrgico, ou em outros segmentos (LOBATO, 2014).

Entretanto, ao investigar as suas aplicações como materiais cimentícios suplementares, não foram encontradas pesquisas que indicassem a possibilidade, ou não, do seu uso na produção de cimentos ternários ou quaternários, bem como, na sua utilização em argamassas ou concretos.

Baseado em experimentos realizados por diversos pesquisadores, relatados em artigos publicados, em média, nos últimos cinco anos, em periódicos com alto fator de impacto na área de materiais cimentícios; buscou-se fazer uma análise dos métodos de misturas utilizados que contemplassem os mesmos materiais utilizados neste trabalho e que tivessem similaridade com os objetivos aqui pretendidos.

Importante observar que, a revisão bibliográfica geral aqui realizada, não identificou a utilização de lamas e pós oriundos do alto-forno em misturas com a finalidade específica de produção de materiais cimentícios à base de cimento Portland.

Entretanto, em menor escala, o pó do balão de alto-forno possui características que se assemelham às cinzas volantes (fly ashes) provenientes de outros processos industriais e, para tal, serão utilizadas como referência para posterior definição das misturas objeto deste trabalho.

Cabe destacar que, apesar de algumas misturas pesquisadas conterem outras adições (cimentos ternários e quaternários), em média, o teor de cinzas volantes foi de 30%.

A Tab. 1, apresenta a série de artigos analisados e o teor de cinzas volantes utilizado nas misturas, adotados pelos autores.

Esta visão corrobora com a hipótese da necessidade de criar oportunidades para a experimentação destes resíduos, similarmente ao que já é feito com as cinzas volantes e outros materiais que apresentem propriedades reativas na presença de cimentos Portland, que levem à exploração de formas inovadoras de reaproveitamento deste material.

A Tab. 2 indica a quantidade média de escória granulada e pó do balão gerados anualmente no processo de produção de ferro-gusa no alto-forno da usina siderúrgica da ArcelorMittal, localizado em João Monlevade-MG (dados de 2018), com potencial de utilização a ser explorado.

**Tabela 1** – Artigos pesquisados quanto ao teor de cinzas volantes. Fonte: Própria.

| Artigos de referência para a definição dos teores de adição de cinzas volantes    |  |      |   |  |
|---|--|------|---|--|
| Autor (es)  | Título   | Ano  | Outros materiais cimentícios suplementares utilizados nas blendagens (%)        | Teor de substituição de cimento Portland por cinzas volantes (%) |
| KARA, P.;<br>KORJAKINS, A.,<br>STOKMANIS-<br>BLAUS, V.                            | Evaluation of properties of concrete incorporating ash as mineral admixtures                               | 2013 | -   | 20 - 40  |
| SAHA, A. K.   | Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete   | 2018 | -   | 10 - 40  |
| PILLAI, M. M.;<br>ANIL, S.  | Experimental study on concrete with penta blended cement using pozzolanic and micro sized materials        | 2018 | Micro-sílica (10)<br>Escória de alto-forno (3 - 5)<br>Óxido de ferro (1 - 2,5)  | 16 - 22  |
| SAHA, A. K.;<br>KHAN, M.N.N.;<br>SARKER, P. K.;<br>SHAIKH, F. A.;<br>PRAMANIK, A. | The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review      | 2018 | -   | 30   |
| DAMINELI, B. L.;<br>M. KEMEID, F. M.;<br>AGUIAR, P. S.;<br>JOHN, V. M.            | Measuring the eco-efficiency of cement use   | 2010 | Micro-sílica (6 - 10)   | 30   |
| LI, G.; ZHAO, X.  | Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag                      | 2003 | Escória de alto-forno (15)  | 25 - 45  |
| JUENGER, M. C. G.,<br>SIDDIQUE, R.  | Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete              | 2015 | Metacaulim (5 - 20)<br>Cinza da casca de arroz (5 - 30)<br>Micro-sílica (2 - 6) | 10 - 20  |
| KANDASAMY, S.;<br>SHEHATA, M, H.  | The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction | 2014 | Escória de alto-forno (15 - 50)   | 15 - 50  |
| LAUCHA, K.;<br>DIERYCKA, V.,<br>POLLETA, V.                                       | The use of ternary cements to reduce the environmental impact of concrete                                  | 2016 | Escória de alto-forno (10 - 30)<br>Cálcario (5 - 45)                            | 10 - 30  |

**Tabela 2** - Quantidade de resíduos gerados no alto-forno da usina siderúrgica da ArcelorMittal, em João Monlevade-MG. Fonte: Própria.

| Tipo de resíduo                        | Produção anual (t) |
|--|--------------------|
| Escória granulada de alto-forno - EGAF | 395.000,00         |
| Pó do balão de alto-forno - PBAF       | 16.000,00          |

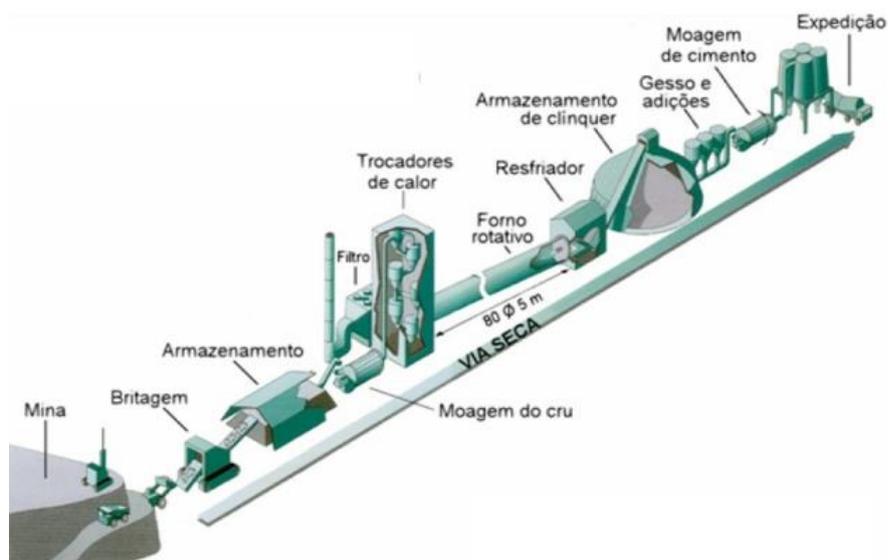
## 2.4. O cimento Portland

### 2.4.1. O processo de produção do cimento Portland

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições minerais. O clínquer é o seu principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. As adições minerais são matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. As principais adições são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

O clínquer tem como matérias-primas o calcário (80 a 90%) e a argila (5 a 20%), ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A sua composição varia em função do fabricante, do tipo de cimento a ser produzido e dos volumes de matérias-primas disponíveis.

A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450 °C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas (5 a 25mm de diâmetro). Na saída do forno, o clínquer ainda incandescente é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó (partículas inferiores a 75 µm). A Fig. 5 indica o fluxo de produção simplificado em uma fábrica de cimento Portland.



**Figura 5** - Fluxo de produção em uma fábrica de cimento Portland. Fonte: (ABCP, 2002).

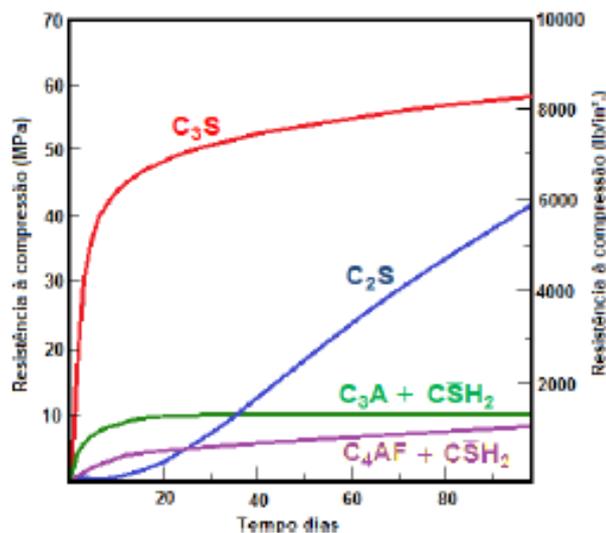
O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, sendo a sua propriedade mais importante.

#### 2.4.2. A composição do cimento Portland

A composição típica do clínquer de cimento Portland contém, em média, 60 a 67% de CaO, 17 a 25% de SiO<sub>2</sub>, 3 a 8% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,5 a 6% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de outros componentes, tais como MgO, SO<sub>3</sub> e álcalis (NEVILLE; BROOKS, 2013). A combinação destes óxidos origina as principais fases naturais constituintes do cimento:

- Alita, ou silicato tricálcico, (composição: 3CaO.SiO<sub>2</sub>, notação química: C<sub>3</sub>S, representatividade: 50 a 70%). É o principal mineral que contribui para a resistência mecânica da pasta de cimento endurecida;
- Belita ou silicato dicálcico (composição: 2CaO.SiO<sub>2</sub>, notação química: C<sub>2</sub>S, representatividade: 15 a 30%). Reage mais lentamente com a água, porém, após períodos maiores (aproximadamente um ano), atinge a mesma resistência mecânica que a Alita;
- Celita, ou aluminato tricálcico (composição: 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, notação química: C<sub>3</sub>A, representatividade: 5 a 10%). Reage muito rapidamente com a água, liberando muito calor, mas sem apresentar grande resistência mecânica;
- Ferrita, ou ferroaluminato tetracálcico (composição: 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, notação química: C<sub>4</sub>AF, representatividade 5 a 15%);
- Sulfato de cálcio (composição: CaSO<sub>4</sub>, notação química: CS, representatividade: 1 a 5%). Apresenta taxas inicialmente altas de reatividade com a água e, em idades mais avançadas, taxas baixas ou muito baixas, não contribuindo pouco para a resistência mecânica;
- Outros compostos em menores quantidades, tais como periclásio (MgO), cal livre (CaO) e outros sulfatos alcalinos, que devem ser restringidos ao máximo, pois, podem reagir de forma prejudicial com os demais constituintes dos concretos e argamassas.

A concentração destas fases é que indica as suas diferentes propriedades como ligante hidráulico (LEA, 1970) e (TAYLOR, 1997). A Fig. 6 apresenta a contribuição das fases puras do cimento na resistência à compressão das pastas.



**Figura 6** - Contribuição das fases puras na evolução da resistência à compressão.

Fonte: (NEVILLE, 1997).

#### 2.4.3. Os mecanismos de hidratação do cimento Portland

As reações de hidratação do cimento Portland são reações químicas que ocorrem entre os aluminatos de cálcio ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), responsáveis pela sua pega e enrijecimento e os silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), responsáveis pelo seu endurecimento, quase que imediatamente após a adição de água; se desenvolvendo sob diferentes velocidades e de forma simultânea, devido à sobreposição de reações dos compostos individuais do cimento. Num primeiro momento, a hidratação ocorre pelo mecanismo de dissolução-precipitação, que envolve a dissolução dos compostos anidros, a formação de hidratos na solução e, a precipitação dos produtos hidratados devido às suas baixas solubilidades.

A precipitação dos produtos da reação dos componentes do clínquer com a água permite a dissolução de nova quantidade dos componentes anidros e assim sucessivamente, continuando a reação até haver água suficiente para transformação integral do sistema anidro em hidratado.

Posteriormente, quando ocorre restrição na mobilidade iônica, a hidratação passa a ocorrer por reações no estado sólido (mecanismo topoquímico), (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Como resultado da hidratação do cimento, são formados, compostos hidratados que se aderem uns aos outros, conferindo ao cimento as propriedades adesivas e coesivas, que ocorrem conforme as seguintes etapas:

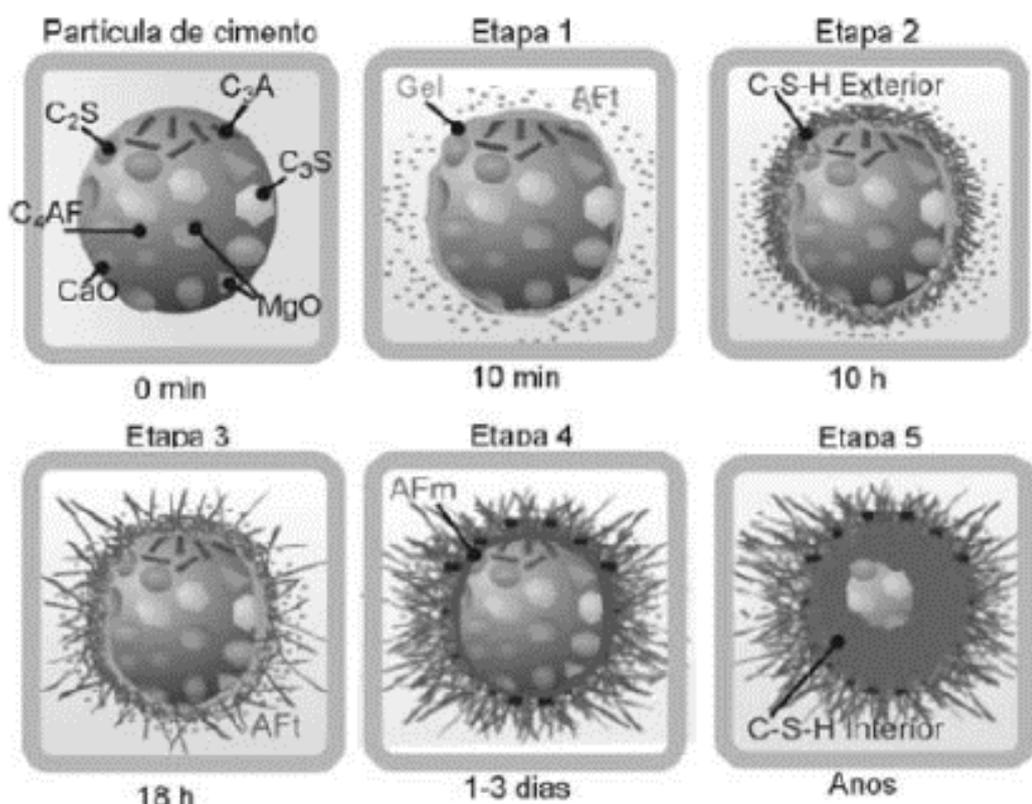
- Etapa 1 - Nos primeiros minutos ocorre essencialmente a reação da água com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o sulfato de cálcio (C S) formando-se cristais curtos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt), denominado etringita; e com o silicato tricálcico ( $C_3S$ ) formando-se um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que se deposita na superfície da partícula e hidróxido de cálcio (C-H), denominado portlandita, que se precipita nos espaços entre as partículas de cimento;
- Etapa 2 - Prossegue a reação da água com os silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), formando-se uma camada adicional de C-S-H em torno da partícula a uma distância de cerca 1  $\mu\text{m}$ , que se designa correntemente por C-S-H exterior;
- Etapa 3 - Ocorre uma reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ) formando-se compostos aciculares longos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt). O C-S-H que se começa a formar nesta etapa designa-se por interior, uma vez que, devido à mobilidade progressivamente mais reduzida dos produtos das reações, se deposita dentro da camada de hidratação formada nas etapas anteriores;
- Etapa 4 - A hidratação prossegue a uma velocidade lenta, correspondente a reações em estado sólido. Continua a formar-se C-S-H interior, com diminuição progressiva do espaço livre entre a camada de hidratação e a partícula não hidratada, e aparece uma nova fase de aluminato, mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm);
- Etapa 5 - As reações de hidratação decorrem ao longo de anos, continuando essencialmente a formar C-S-H interior adicional (HADLEY, *et al.*, 2000).

As fases dos silicatos e dos aluminatos hidratados começam a criar algumas ligações interpartículas, que resulta no endurecimento progressivo da pasta. Após algumas horas, ocorre a redução da velocidade da reação. Isto deve-se ao fato de alguns grãos de cimento que não reagiram estarem cobertos por uma camada de hidratos (que se torna cada vez mais espessa com o passar do tempo), camada esta que dificulta as moléculas de água chegarem às partes não hidratadas (AÏTCIN, 1998).

O produto resultante é pouco solúvel na água não agressiva, como se confirma pela estabilidade da pasta de cimento hidratada em contato com ambientes úmidos.

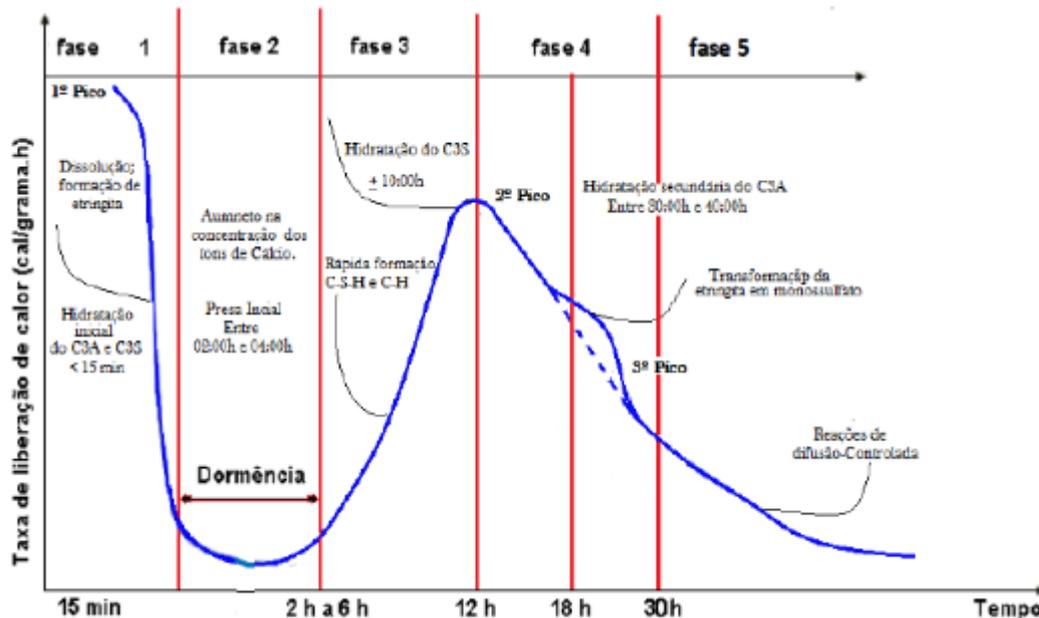
Desta forma, pode-se verificar que o tempo de início de pega (quando se inicia o enrijecimento) deve ser visto e respeitado com muito rigor. A partir deste momento, tanto as agulhas formadas na reação com os aluminatos como os cristais gerados na reação com os silicatos serão prejudicados se o concreto for manuseado após este tempo.

A Fig. 7 apresenta um esquema simplificado das etapas de hidratação do cimento Portland.



**Figura 7** - Etapas de hidratação do cimento Portland. Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As reações químicas exotérmicas e termoativadas geradas em cada uma das etapas anteriormente descritas, alteram continuamente a cinética de hidratação do cimento e os mecanismos de formação dos compostos hidratados. A Fig.8 apresenta a variação de calor liberado durante as etapas de hidratação do cimento Portland.



**Figura 8** - Variação de calor durante as fases de hidratação do cimento. Fonte: (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em síntese, a microestrutura dos materiais de base cimentícia (MBC) hidratados é constituída por: fases sólidas (essencialmente, C-S-H, C-H, AFt, AFm, partículas de cimento ainda por hidratar e inertes); poros (com diferentes formas, dimensões e conectividades); e, fases líquidas e gasosas (no interior dos poros). Os compostos hidratados de C-S-H constituem a fase ligante mais importante dos MBC uma vez que estabelecem entre si ligações de van der Waals que asseguram a aglomeração das fases sólidas e determinam a sua coesão e adesão.

Os mecanismos de hidratação do cimento são extremamente complexos e ainda não estão totalmente compreendidos (SCRIVENER, 2004) e (DIAMOND, 2004). O domínio da microestrutura dos MBC é essencial para o conhecimento e controle das propriedades e comportamentos que estes materiais apresentam na escala macroscópica, buscando o desenvolvimento de materiais e técnicas construtivas sustentáveis que reflitam a crescente preocupação da gestão de recursos materiais e financeiros e que ponderem as consequências de longo prazo das intervenções construtivas. No entanto, o atual conhecimento da microestrutura e sua relação com o desempenho dos MBC é insuficiente e necessita ser continuamente explorado, para atender à essas necessidades (HEWLETT, 1998) e (BYE, 1999).

A microestrutura dos MBC é determinada essencialmente pelas reações químicas do cimento com a água, sendo influenciada por diversos fatores tais como: o tipo

de cimento (em termos de composição química, mineralogia e grau de finura); a razão água/cimento; o processo de mistura; as condições de cura e a natureza, quantidade e dimensão de adições ou outros aditivos. As reações de hidratação conferem aos MBC uma microestrutura complexa que apresenta variações locais ao nível da composição química, dimensão, morfologia e distribuição espacial das fases. Todos esses aspectos são responsáveis pelo controle da cinética de hidratação do cimento e o seu comportamento como aglomerante. Além disso, a estrutura interna sofre alterações ao longo do tempo, como resultado de processos químicos e físicos que ocorrem nestes materiais em função das condições ambientais a que estarão submetidos. Este conjunto de fatores determinam as propriedades físico-químicas que os materiais constituintes dos cimentos Portland devem apresentar, bem como as suas respectivas quantidades, para atender às necessidades específicas de fabricação e utilização (ABNT NBR 16697, 2018).

## **2.5. As adições minerais como materiais cimentícios suplementares**

### **2.5.1. Os benefícios das adições**

Conforme a necessidade de satisfazer as exigências crescentes da construção civil por materiais cada vez mais resistentes e duráveis, os cimentos foram se desenvolvendo de forma a apresentar diferentes propriedades para a solução dos problemas encontrados, resultando na ampla gama de tipos de cimentos atualmente disponíveis. Diante da necessidade de desenvolvimento do cimento Portland, outros materiais começaram a ser introduzidos em sua composição, dando origem aos denominados cimentos com adições minerais (COUTINHO, 1997).

As adições minerais são materiais inorgânicos, compostos basicamente por compostos silicosos ou silico-aluminosos, que, ao apresentarem elevado grau finura são capazes de desenvolver propriedades pozolânicas e cimentantes, podendo ser utilizadas em substituição parcial dos cimentos, buscando melhorar as características de resistência e durabilidade de argamassas e concretos, tanto no estado fluido quanto no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A incorporação de adições minerais permite a produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, pois provocam mudanças na estrutura

interna da pasta de cimento hidratada. Isto ocorre devido ao fato de que os cimentos com adições minerais têm o seu equilíbrio químico alterado, pois, promovem a fixação do hidróxido de cálcio dando origem a componentes menos ricos em cálcio do que os provenientes da hidratação do cimento Portland, porém, com propriedades ligantes tão importantes quanto às suas. Com isso, a concentração de hidróxido de cálcio é reduzida a limites capazes de inibir as reações expansivas entre sulfatos e aluminatos, o calor de hidratação é diminuído e este tipo de cimento apresenta resistências químicas, físicas e mecânicas em geral superiores às do cimento Portland (COUTINHO, 1997).

As heterogeneidades existentes na microestrutura da pasta de cimento hidratada, devido principalmente à existência de porosidades e formação irregular de cristais na zona de transição interfacial com os agregados, podem ser consideravelmente reduzidas com a introdução das partículas finas presentes nas adições minerais. À medida que as reações pozolânicas e cimentícias estão em curso, ocorrem reações físico-químicas que promovem uma redução gradual no tamanho dos poros e dos produtos cristalinos de hidratação (DAL MOLIN, 2005).

Como efeito químico das adições minerais, temos a sua capacidade de controle da reação com o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento Portland, na formação adicional do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o responsável principal pela resistência das pastas de cimento hidratadas, resultando na diminuição das fissuras de origem térmica, em função de redução do calor de hidratação dos compostos gerados. É importante conhecer a intensidade das reações pozolânicas que se desenvolvem quando da utilização de adições minerais, para que não haja uma redução acentuada da alcalinidade da matriz cimentícia e o comprometimento da camada de passivação do aço em concretos armados.

No comportamento físico, temos o efeito filler, que promove o aumento da densidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições, com tamanhos inferiores às partículas do cimento; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento com consequente diminuição da sua permeabilidade; a alteração da microestrutura da zona de transição interfacial, através da diminuição da sua espessura devido ao maior controle na formação e crescimento dos cristais.

Várias propriedades das argamassas e concretos, em aspectos de resistência e durabilidade, tanto no estado fresco quanto endurecido, são afetadas

positivamente com o uso das adições minerais. De forma resumida, podemos citar:

#### Propriedades do concreto fresco

- Plasticidade e coesão (melhor trabalhabilidade e melhor comportamento reológico em geral);
- Exsudação e segregação (maior volume de finos, maior compacidade da pasta e menor canais de migração de água);
- Redução do consumo de água (efeito dispersor das partículas menores em pozolanas comuns);
- Calor de hidratação (menor estado de energia das reações químicas de hidratação e menor risco de fissuração).

#### Propriedades do concreto endurecido

- Resistência mecânica (maiores resistências à compressão, tração, flexão, diminuição da fluência, diminuição da retração térmica e aumento do módulo de deformação, devido à formação de compostos mais resistentes da matriz cimentícia na ZTI).
- Durabilidade (redução da porosidade e permeabilidade com menor possibilidade de ingresso de agentes nocivos, maior resistência a sulfatos, menor reatividade álcali-agregados, maior resistência à carbonatação, maior resistência ao fogo e aos ciclos de congelamento/descongelamento).

A eficiência de uma adição mineral no comportamento do concreto pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da sua composição química, mineralógica e granulométrica. Porém, de uma maneira geral, os mecanismos pelos quais as adições minerais influenciam as propriedades do concreto fresco e endurecido dependem mais do tamanho, forma e textura das partículas do que da sua composição química (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Entre outros tipos de benefícios decorrentes da utilização das adições minerais, podemos citar a diminuição do teor de clínquer no cimento Portland, o que contribui para a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e reduz o custo de sua produção, uma vez que são utilizados materiais que consomem menos energia no processo produtivo e que podem ser reaproveitados, em vez de serem descartados na natureza, bem como na diminuição significativa do consumo de recursos naturais não renováveis de demonstrando uma importante prática de ação sustentável.

## 2.5.2. Os tipos de adições

As adições minerais, quanto às suas ações físico-químicas, podem ser classificadas em três grupos (MEHTA; MONTEIRO, 1994):

- 1 - Materiais pozolânicos;
- 2 - Materiais cimentantes;
- 3 - Materiais inertes.

### 2.5.2.1. Materiais pozolânicos

São materiais silicosos ou sílico-aluminosos que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, a temperaturas ambientes, para formar compostos com propriedades cimentantes (ABNT NBR 12653, 2015).

A principal reação pozolânica ocorre lentamente, promovendo a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), de forma semelhante ao que é produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios presentes no cimento Portland.

Quanto à sua origem, os materiais pozolânicos são classificados em naturais e artificiais.

Os naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar, que, por si só, apresentam atividade pozolânica e as artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, tais como as cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana de açúcar, sílica ativa etc (NEVILLE, 1997).

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), os materiais pozolânicos são divididos em três classes, conforme indicado na Tab. 3.

**Tabela 3** - Classes de materiais pozolânicos. Fonte: (ABNT NBR 12653, 2015).

| Classificação dos materiais pozolânicos |   |
|---|---|
| Classe                                  | Descrição   |
| N                                       | Pozolanas naturais e artificiais, que obedecem aos requisitos químicos e físicos da Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. |
| C                                       | Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedecem aos requisitos químicos e físicos da Norma.   |
| E                                       | Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C, que obedecem aos requisitos químicos e físicos da Norma.   |

A divisão das pozolanas nestas três classes depende de suas características químicas e físicas, as quais devem ser comparadas com os parâmetros pré-estabelecidas pela norma para a sua classificação.

Os parâmetros mínimos para que um material possa ser considerado pozolânico, são apresentados pelas Tab. 4 e Tab. 5.

**Tabela 4** - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos. Fonte: (ABNT NBR 12653, 2015).

| Requisitos químicos  |                               |               |               |                  |
|--|-------------------------------|---------------|---------------|------------------|
| Propriedades   | Classe de material pozolânico |               |               | Método de ensaio |
|  | N                             | C             | E             |                  |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\geq 70 \%$                  | $\geq 50 \%$  | $\geq 50 \%$  | ABNT NBR NM 22   |
| $\text{SO}_3$  | $\leq 4 \%$                   | $\leq 5 \%$   | $\leq 5 \%$   | ABNT NBR NM 16   |
| Teor de umidade  | $\leq 3 \%$                   | $\leq 3 \%$   | $\leq 3 \%$   | ABNT NBR NM 24   |
| Perda ao fogo  | $\leq 10 \%$                  | $\leq 6 \%$   | $\leq 6 \%$   | ABNT NBR NM 18   |
| Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$                   | $\leq 1,5 \%$                 | $\leq 1,5 \%$ | $\leq 1,5 \%$ | ABNT NBR NM 25   |

**Tabela 5** - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos. Fonte: (ABNT NBR 12653, 2015).

| Requisitos físicos  |                               |              |              |                     |
|---|-------------------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Propriedades  | Classe de material pozolânico |              |              | Método de ensaio    |
|   | N                             | C            | E            |                     |
| Material retido na peneira 45 $\mu\text{m}$                                   | < 20 %                        | < 20 %       | < 20 %       | ABNT NBR NM 15894-3 |
| Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle | $\geq 90$ %                   | $\geq 90$ %  | $\geq 90$ %  | ABNT NBR NM 5752    |
| Atividade pozolânica com cal aos sete dias                                    | $\geq 6$ MPa                  | $\geq 6$ MPa | $\geq 6$ MPa | ABNT NBR NM 5751    |

### 2.5.2.2. Materiais cimentantes

São aqueles capazes de formar produtos de hidratação com características ligantes, como o C-S-H, sem a necessidade do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland. Sua auto-hidratação é lenta, porém quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, sua hidratação é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita, como é o caso da escória granulada de alto-forno (NEVILLE, 1997).

### 2.5.2.3. Materiais inertes

São materiais com elevado grau de finura, praticamente iguais à do cimento Portland, sem atividade química, cuja ação é basicamente criar um efeito físico de empacotamento granulométrico entre as partículas da mistura, reduzindo a porosidade na zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta e os agregados e atuar como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento que não foram totalmente hidratados e/ou pelo preenchimento dos vazios surgidos pelas reações de hidratação ocorridas (efeito microfiller), proporcionando melhoria na constituição da matriz cimentícia e nas propriedades do concreto fresco e endurecido, tais como trabalhabilidade, segregação, permeabilidade, exsudação, capilaridade e fissuração. São constituídos, em sua maior parte, por materiais carbonáticos oriundos de rochas calcárias, calcíticas ou dolomíticas e por materiais quartzosos (NEVILLE, 1997).

A norma NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece os limites mínimos e máximos admissíveis de utilização das adições na composição de cada tipo de cimento Portland, conforme descrito na Tab. 6.

**Tabela 6** - Limites de composição dos tipos de cimento Portland. Fonte: (ABNT NBR 16697, 2018).

| Designação normalizada (tipo)                                 | Sigla               | Classe de resistência | Sufixo   | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material pozolânico | Material carbonático |
|---|---------------------|-----------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
|   |                     |                       |          | (porcentagem em massa)        |                                 |                     |                      |
| Cimento Portland comum  | CP I                | 25, 32 ou 40          | RS ou BC | 95 - 100                      | 0 - 5                           |                     |                      |
|   | CP I-S              |                       |          | 90 - 94                       | 0                               | 0                   | 6 - 10               |
| Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno | CP II-E             |                       |          | 51 - 94                       | 6 - 34                          | 0                   | 0 - 15               |
| Cimento Portland composto com material pozolânico             | CP II-Z             |                       |          | 71 - 94                       | 0                               | 6 - 14              | 0 - 15               |
| Cimento Portland composto com material carbonático            | CP II-F             |                       |          | 75 - 89                       | 0                               | 0                   | 11 - 25              |
| Cimento Portland de alto-forno                                | CP III              |                       |          | 25 - 65                       | 35 - 75                         | 0                   | 0 - 10               |
| Cimento Portland pozolânico                                   | CP IV               |                       |          | 45 - 85                       | 0                               | 15 - 50             | 0 - 10               |
| Cimento Portland de alta resistência inicial                  | CP V <sup>(a)</sup> | ARI                   |          | 90 - 100                      | 0                               | 0                   | 0 - 10               |
| Cimento Portland branco                                       | Estrutural          | 25, 32 ou 40          |          | 75 - 100                      |                                 |                     | 0 - 25               |
|   | Não estrutural      |                       |          | 50 - 74                       |                                 |                     | 26 - 50              |

(a) No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

### 2.5.3. A aplicação das adições em cimentos e concretos

Além das diversas vantagens obtidas na utilização das adições minerais, quanto aos aspectos de sustentabilidade, com vista às questões ambientais, sociais e econômicas, a indústria da construção civil tem buscado fazer uso destes materiais de forma crescente, investindo maciçamente na pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, que possam atender às necessidades crescentes de exigência de estruturas mais leves, resistentes e duráveis.

Sendo assim, as adições minerais passaram a ter um papel preponderante na formulação de cimentos (blendagens) e dosagens de argamassas e concretos que pudessem atender à estas exigências, com maior tecnologia e melhor desempenho.

Para responder a projetos cada vez mais desafiadores, com maiores níveis de solicitações físicas e mecânicas, bem como, de ação de fenômenos químicos de degradação, presentes em obras de alta complexidade tais como prédios altos, pontes com vãos livres extensos, estruturas localizadas em ambientes marinhos e com alta concentração de poluentes, rodovias, instalações industriais, etc, torna-se necessário o uso de produtos que permitam realizar a construção e a reparação destas obras, de forma rápida, segura e eficiente.

Como maior exemplo desta evolução tecnológica, temos a utilização dos concretos de alta resistência à compressão, de alto desempenho (alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade), os concretos auto-adensáveis e os concretos com altos teores de adições pozolânicas e/ou cimentantes (cinzas volantes, escórias granuladas de alto-forno, metacaulim, cristobalita, sílica ativa, cinzas de resíduos agrícolas etc).

A obtenção de melhoria de desempenho dos concretos, necessariamente, passa pela aplicação de métodos que combinam a utilização das adições minerais e os aditivos químicos, seguindo rígidas regras de dosagem, processamento e aplicação destes materiais, para que seja possível obter o máximo de resultado desejado.

O alto desempenho dos concretos, com relação à resistência e à durabilidade, é alcançado pela combinação de três parâmetros:

- 1 - Empacotamento das partículas grossas (agregados);
- 2 - Ajuste granulométrico dos finos (cimento e adições minerais);
- 3 - Controle do estado de dispersão da matriz cimentícia.

Com a otimização simultânea desses três parâmetros no processo de desenvolvimento do traço do concreto é possível alcançar elevada resistência microestrutural, com diminuição da probabilidade de ocorrências de patologias dos elementos construídos (MEHTA, 1999).

Para possibilitar uma alta coesão granulométrica na fração fina dos concretos, a técnica de adicionar composições minerais que possuem diversos tamanhos de partículas, devidamente dimensionados, faz com que sejam preenchidos todos os interstícios do concreto (microporos capilares), de dimensões nanométricas, originados pela evaporação da água de amassamento.

Ainda que a coesão granulométrica ideal seja alcançada, através de um empacotamento eficiente, é imprescindível conhecer a constituição mineralógica e química dessas adições minerais, pois, elas devem garantir as propriedades adequadas de durabilidade do concreto ao longo de toda a sua vida útil frente aos agentes de deterioração (ataque de sulfatos e cloretos, reação álcali-agregados, carbonatação etc). Porém, para se extrair o máximo desempenho da adição mineral adicionada ao concreto, é imprescindível o emprego simultâneo de um agente químico líquido (aditivo tensoativo), responsável pela dispersão das partículas mais finas de dimensões submicrométricas.

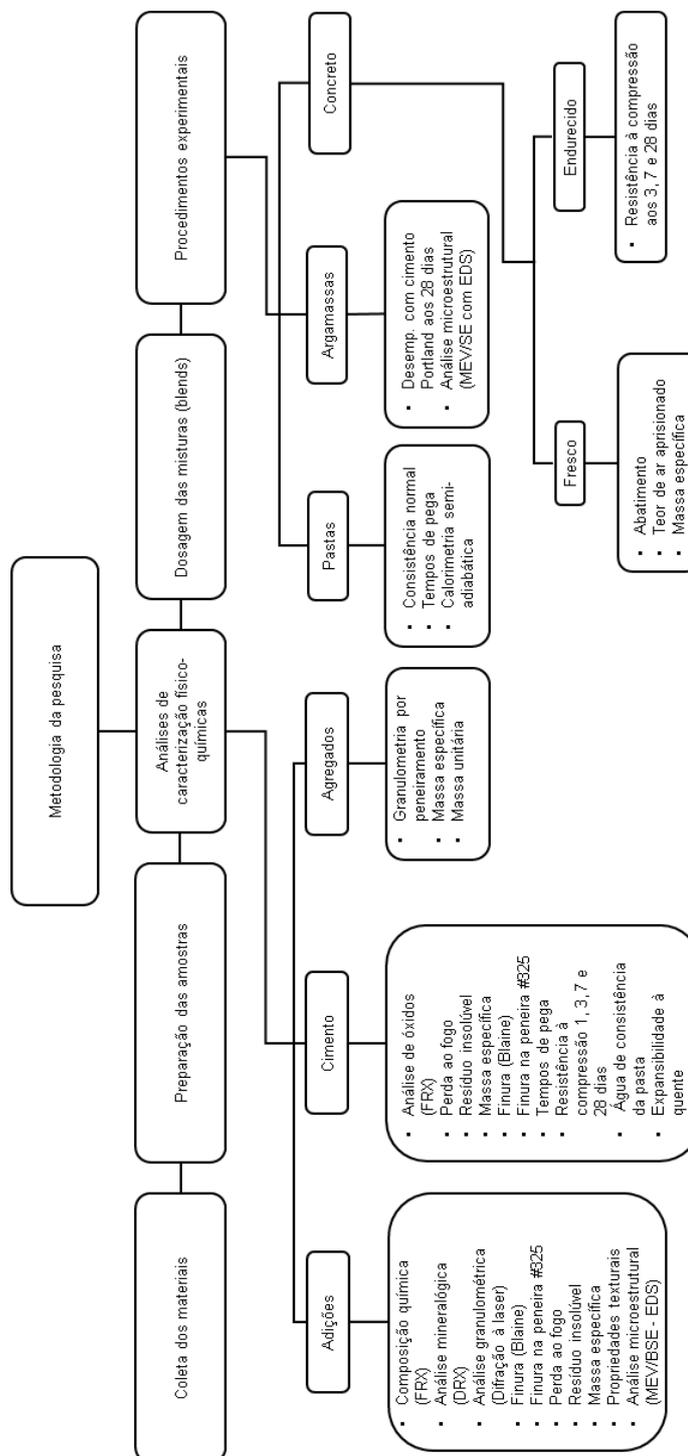
Essa combinação de utilização de adições minerais, aditivos químicos de última geração e otimização granulométrica, possibilitou o desenvolvimento de concretos mais compactos e densos, mais resistentes, menos permeáveis, com menor porosidade, menor exsudação e com melhor comportamento reológico, permitindo dispor de um produto que atenda às necessidades de desempenho seja no estado fresco ou no estado endurecido.

Quanto à substituição de parte do cimento pelas adições minerais, ocorre tanto uma significativa melhora das propriedades e do comportamento dos concretos associados ao consumo de cimento (retração autógena, fissuração por calor de hidratação, pega acelerada etc.), quanto uma diminuição na emissão de gás carbônico durante a fabricação do clínquer.

Sob um outro ponto de vista, estudos mais recentes indicaram que cerca de 25% do total de cimento consumido no mundo é utilizado em concreto armado (SCRIVENER *et al.*, 2018), o que indica uma grande possibilidade de utilização de outros tipos de materiais cimentícios suplementares, em diferentes teores e tipos de aplicação, tal qual pretende-se avançar justamente neste sentido, através de presente pesquisa desenvolvida neste trabalho.

### 3. Metodologia

A pesquisa foi estruturada utilizando uma metodologia constituída de atividades experimentais, visando avaliar as características e o desempenho dos materiais nas condições naturais e processadas, conforme indicado na Fig. 9.



**Figura 9** - Organograma metodológico da pesquisa. Fonte: Própria.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Materiais componentes das pastas, argamassas e concretos

##### 3.1.1.1. Cimento CP V - ARI

O cimento CP V - ARI, utilizado na produção das pastas, argamassas e concretos, foi fornecido pela empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), sendo este, produzido na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG, tendo sido coletado diretamente da pilha de armazenamento dos lotes produzidos para expedição. A opção pelo cimento CP V - ARI justifica-se pelo fato de o mesmo possuir somente material carbonático (filler) como adição, evitando assim possíveis interferências nas reações a serem analisadas durante a pesquisa.

As amostras do cimento CP V - ARI foram enviadas ao laboratório da empresa Cimento Nacional, localizado na cidade de Sete Lagoas - MG, para realização das análises de caracterização físico-químicas e ensaios com as pastas e argamassas e para o laboratório de controle de qualidade do concreto da empresa Valemix, localizado na cidade de Timóteo - MG, para a realização dos ensaios com os concretos nos estados fresco e endurecido.

Para as caracterizações físico-química e mecânica do cimento, foram realizados todos os ensaios exigidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), sendo estes, integralmente realizados no laboratório químico da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG, tendo sido utilizado na pesquisa, os resultados mais recentes constantes no certificado de qualidade do produto fabricado pela empresa, à saber:

- Análise de óxidos (ABNT NBR 14656, 2001);
- Perda ao fogo (ABNT NBR NM 18, 2012);
- Resíduo insolúvel (ABNT NBR NM 15, 2012);
- Massa específica (ABNT NBR 16605, 2017);
- Finura na peneira #325 (ABNT NBR 9202, 1985);
- Área específica -Blaine (ABNT NBR 16372, 2015);
- Tempos de pega (ABNT NBR 16607, 2017);
- Pasta de consistência normal (ABNT NBR 16606, 2017);
- Expansibilidade à quente (ABNT NBR 11582, 2016);
- Resistência à compressão 1, 3, 7 e 28 dias (ABNT NBR 7215, 2019).

### 3.1.1.2. Areias e brita nº 1

A areia normalizada do IPT (frações grossa, média grossa, média fina e fina), utilizada na produção das argamassas, foi fornecida pela empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), com as respectivas características granulométricas já padronizadas pelo fabricante, tendo sido coletada nas embalagens comercializáveis (sacos de 25 kg) e separada conforme as diferentes granulometrias e armazenada em recipientes protegidos contra a exposição de contaminantes e de umidade, no interior do laboratório da empresa Cimento Nacional, localizado na cidade de Sete Lagoas - MG.

A areia artificial (agregado miúdo) e a brita nº 1 (agregado graúdo) foram coletadas em diferentes pontos no interior das pilhas de estocagem comumente utilizadas para a produção e comercialização de concretos nas diferentes características e classes de resistência, no seu estado natural de umidade, armazenadas em recipientes isentos de contaminação, quarteadas e preparadas para as análises de caracterização física e para os ensaios com os concretos nos estados fresco e endurecido, que se realizaram no laboratório de controle de qualidade do concreto da empresa Valemix, localizado na cidade de Timóteo - MG

A areia artificial e a brita nº 1, utilizadas na produção dos concretos, são de natureza geológica gnáissica, provenientes da pedreira Um - Valemix, localizada na cidade de Timóteo - MG, as quais foram submetidas às seguintes análises de caracterização física:

- Granulometria por peneiramento (ABNT NBR NM 248, 2003);
- Massa específica (ABNT NBR 9776, 1998);
- Massa unitária (ABNT NBR NM 45, 2006).

### 3.1.1.3. Aditivo plastificante

Para a produção dos concretos foi utilizado um aditivo plastificante multifuncional de pega normal, denominado Muraplast FK 860, fabricado pela empresa MC Bauchemie, fornecido pela empresa Valemix, com massa específica de 1,08 kg/m<sup>3</sup>, na dosagem de 0,5 % sobre o peso do aglomerante. O aditivo foi empregado com a finalidade de estabilizar as consistências dos concretos, pois, devido à elevada finura e superfície específica das adições utilizadas, poderia haver uma tendência de aglomeração das suas partículas com o cimento, com prejuízos à trabalhabilidade dos mesmos.

### 3.1.2. Resíduos siderúrgicos

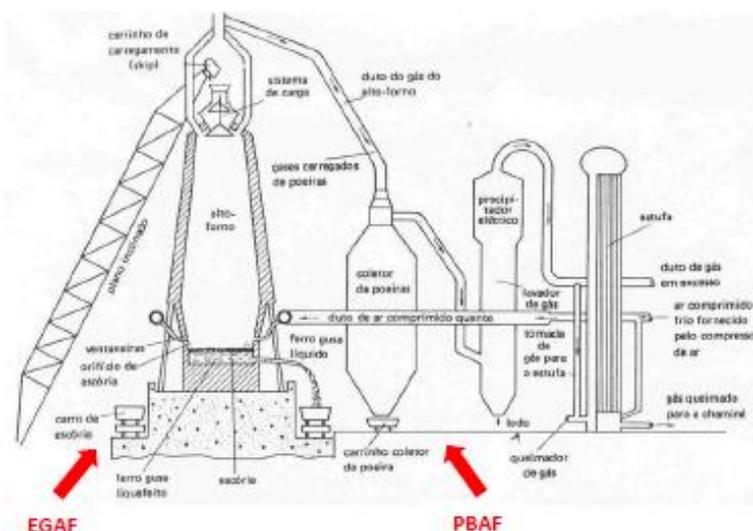
#### 3.1.2.1. Obtenção e caracterização dos materiais no estado natural

Todos os materiais provenientes do processo de fabricação de ferro-gusa (escória granulada e pó do balão) foram gerados no alto-forno à coque da unidade industrial siderúrgica integrada da ArcelorMittal, localizado na cidade de João Monlevade - MG.

Em conformidade com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004), as amostras dos materiais siderúrgicos foram coletadas diretamente na sua fonte de origem, conforme indicado nas Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13, sem qualquer contato com outras substâncias contaminantes; durante a rotina diária de produção do alto-forno, sendo que:

- A escória granulada foi coletada na pilha de estocagem, ao final do processo de granulação e resfriamento de uma corrida de gusa;
- O pó do balão foi coletado por deposição gravitacional do material particulado retido no sistema de filtração à seco.

Os resíduos siderúrgicos foram coletados no seu estado natural de umidade e consistência, tendo sido colocados para secagem ao ar livre, para eliminação do excesso de água e dissipação do calor. Posteriormente, foram acondicionados em recipientes fechados, identificados e enviados aos laboratórios do CEFET-BH / Campus 1 e 2, localizados na cidade de Belo Horizonte - MG, para realização das análises de caracterização físico-químicas, conforme indicado na Fig. 14.



**Figura 10** - Esquema de localização dos pontos de coleta das amostras dos resíduos no alto-forno. Fonte: Própria.



**Figura 11** - Locais de coleta das amostras de resíduos na usina siderúrgica da ArcelorMittal, em João Monlevade-MG. Fonte: Própria.



**Figura 12** - Coleta da escória granulada de alto-forno. Fonte: Própria.



**Figura 13** - Coleta do pó do balão de alto-forno. Fonte: Própria.



**Figura 14** - Amostras dos resíduos coletados para envio ao laboratório. Fonte: Própria.

### 3.1.2.2. Análise de composição química

Foi utilizado o método de Fluorescência de Raios X (FRX), possibilitando a determinação da composição química das amostras, em termos qualitativos e quantitativos. Para esta análise foi utilizado um espectrômetro por dispersão de comprimento de onda sequencial, marca Shimadzu, modelo EDX-720, localizado no Campus I do CEFET-BH. Desta forma, foi possível analisar e quantificar os elementos maiores (principais óxidos de interesse nos estudos com materiais cimentícios), bem como os elementos menores (traços de elementos químicos potencialmente perigosos e prejudiciais à produção de materiais cimentícios).

### 3.1.2.3. Análise mineralógica

Foi aplicado o método de Difração de Raios X (DRX), possibilitando a determinação da presença das fases cristalinas e amorfas presentes na estrutura das amostras, através da comparação dos picos de difração característicos de cada material analisado, com o conjunto de difração padrão do equipamento (banco de dados ICDD-PDF 2003). Para esta análise foi utilizado um difratômetro da marca SHIMADZU XRD, modelo 7000, localizado no Campus I do CEFET-BH, usando radiação Cu ( $\lambda = 1,5418\text{\AA}$ ), produzidos sob condição 40kV e 30mA. Os espectros de difração foram coletados varrendo no intervalo de  $2\theta$ ,  $4^\circ - 80^\circ$  e passo de  $2^\circ/\text{min}$ .

### 3.1.2.4. Análise granulométrica

Foi aplicado o método de difração de laser, possibilitando determinar a distribuição granulométrica das partículas sólidas em estado natural, com diâmetro variando de 0,04 até 500  $\mu\text{m}$ , identificando o tamanho e a frequência de ocorrência destas partículas. Para esta análise foi utilizado um granulômetro da marca CILAS, modelo 1090, localizado no Campus I do CEFET-BH, através do método de análise em meio líquido (via úmida), com as partículas sendo dispersas por ultrassom durante 60 segundos, utilizando água deionizada como solvente, sem adição de agente dispersante e com base no modelo matemático de difração de Fraunhofer. Esta análise permitiu identificar as frações D10, D50 e D90, que correspondem à quantidade de partículas (% da massa da amostra) com diâmetros menores ao valor característico interceptado na curva acumulativa de material passante.

### 3.1.2.5. Processo de moagem

Para se obter uma caracterização granulométrica mais precisa, foi necessário realizar a moagem dos materiais, como forma de se atingir uma granulometria suficientemente fina, possibilitando realizar os ensaios subsequentes (consistência normal, tempos de pega e índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias) e assim, obter maior potencial de reatividade do material, como forma de representar a condição realista a que estes materiais estarão submetidos durante o processo industrial de fabricação do cimento. Estes

trabalhos foram realizados no laboratório de materiais de construção civil, localizado no Campus II do CEFET-BH.

Inicialmente, realizou-se a secagem dos materiais em estufa, com temperatura de 100 °C, com controle a cada hora, até atingir a total perda de umidade e estabilidade da massa. Posteriormente, realizou-se o processo de quarteamento e pesagem das amostras e a moagem dos materiais, tendo sido utilizado um moinho de bolas com jarro de moagem com capacidade de 24,0 l. e esferas de porcelana ( $\varnothing$  25,0 mm e  $\varnothing$  55,0 mm), acionado eletromecanicamente através de sistema de roletes, trabalhando com 65 rpm, por um período de 24 horas para cada batelada. De forma arbitrária, definiu-se que cada batelada deveria consistir no preenchimento de 50% do volume do jarro com a amostra (25%) e as esferas (25%, em volumes iguais conforme os dois diâmetros disponíveis), visando obter o máximo de eficiência no processo de moagem. A cada 12 horas os materiais eram analisados visualmente para verificação da capacidade de cominuição desejada e o processo era reiniciado até que fosse possível confirmar o atingimento das características de granulometria exigidas pelas normas NBR 5752 (ABNT, 2014) e NBR 12653 (ABNT, 2015), sendo então enviados ao laboratório da empresa Cimento Nacional para realização dos ensaios nas pastas e argamassas. A sequência do processo está indicada nas Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17, e Fig. 18.



**Figura 15** - Preparação da carga moedora. Fonte: Própria.



**Figura 16** - Moagem dos materiais de adição. Fonte: Própria.



**Figura 17** - Aspectos da escória granulada antes e após a moagem. Fonte: Própria.



**Figura 18** - Aspectos do pó do balão antes e após a moagem. Fonte: Própria.

### 3.1.2.6. Caracterização dos materiais no estado moído

#### 3.1.2.6.1. Análise de composição química

Uma segunda análise química foi realizada nos materiais processados. Neste caso, as amostras já moídas foram novamente analisadas quanto à sua composição química em termos de óxidos e elementos principais, através do método de Fluorescência de Raios X (FRX), onde foi utilizado um espectrômetro por dispersão de comprimento de onda sequencial, marca Panalytical, modelo Axios Max. Estas análises foram realizadas no laboratório da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), localizado na cidade de Sete Lagoas - MG, conforme indicado na Fig. 19.



**Figura 19** - Equipamento de FRX utilizado nas análises químicas. Fonte: Própria.

#### 3.1.2.6.2. Análise microestrutural

Foram aplicadas as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM - Scanning Electron Microscopy), utilizando o detector de sinal de elétrons retroespalhados (BSE - Backscattering Electron) com sistema de detecção de raios X por Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy), aplicado diretamente nas amostras, sendo preparadas através da fixação das mesmas em fita de cobre para ampliação da condutividade elétrica, possibilitando fazer uma análise visual comparativa quanto às dimensões e formatos das partículas, bem como, a análise da composição química dos materiais.

As análises foram realizadas em um equipamento da marca Phillips, modelo XL 30, localizado no laboratório de metalografia da unidade siderúrgica da ArcelorMittal, localizado na cidade de João Monlevade-MG, conforme indicado na Fig. 20.



**Figura 20** - Equipamento de MEV utilizado nas análises de microestrutura. Fonte: Própria.

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Estudo dos resíduos como adições minerais

#### 3.2.1.1. Definição das blendagens

A definição de proporções de adições minerais para substituição parcial de cimento Portland na produção de argamassas e concretos, varia de acordo com o tipo de material e suas propriedades físico-químicas mais relevantes, que contribuirão de forma mais eficiente no desempenho das misturas, tais como pozolanicidade, ação cimentante ou de preenchimento.

Após a identificação destas propriedades, os materiais selecionados nesta pesquisa, já suficiente moídos, foram criteriosamente combinados, de forma a explorar ao máximo as suas potencialidades como adições.

Os ensaios de caracterização dos resíduos, foram fundamentais para a estratégia de blendagem adotada neste estudo. Pela caracterização química e mineralógica nota-se que a escória granulada de alto-forno (EGAF) apresenta potencial para hidraulicidade (reatividade). Já o pó do balão de alto-forno (PBAF) apresenta picos

de cristalinidade que indicam baixa reatividade com cimento. Assim, adotou-se como base para a blendagem a escória granulada, que foi sendo substituída parcialmente pelo pó do balão, em teores entre 5 % e 25 % (% em massa).

Antes de realizar os procedimentos experimentais, foi realizado um trabalho analítico dos dados disponíveis sobre os materiais pesquisados, com o objetivo de identificar as melhores formulações que pudessem atender às exigências das normas NBR 12653 (ABNT, 2015) e NBR 16697 (ABNT, 2018), em termos de requisitos químicos necessários para o enquadramento destes materiais nas classes de cimentos pozolânicos. A composição das misturas pozolânicas inicialmente analisadas está indicada na Tab. 7.

**Tabela 7** - Composição das misturas analisadas. Fonte: Própria.

| Nº da mistura | Teores das adições |       |
|---------------|--------------------|-------|
|               | EGAF               | PBAF  |
| 1             | 95,00              | 5,00  |
| 2             | 90,00              | 10,00 |
| 3             | 85,00              | 15,00 |
| 4             | 80,00              | 20,00 |
| 5             | 75,00              | 25,00 |

Ao final, verificou-se que a melhor proporção para a obtenção de uma mistura que atendesse a tais requisitos, podendo ser considerada como material pozolânico (MATPOZ - Classe E), encontrava-se na faixa de 85 % de utilização de escória granulada e 15 % de pó do balão.

Também, para que o MATPOZ em estudo pudesse atender os requisitos químicos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018), na composição de cimentos Portland pozolânicos (CP IV), no máximo, em até 50% (% em massa), foram realizadas as seguintes análises químicas para avaliar as características dos materiais na condição de interação (misturados):

### 3.2.1.2. Análise de perda ao fogo

A quantidade de perda ao fogo das misturas foi determinada conforme os procedimentos descritos na norma NBR NM 18 (ABNT, 2012), com a finalidade de avaliar o teor de material orgânico e o grau de hidratação do cimento juntamente com as demais adições.

Este ensaio foi realizado no laboratório químico da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG, conforme indicado na Fig. 21.



**Figura 21** - Preparação das amostras para ensaio de perda ao fogo. Fonte: Própria.

### 3.2.1.3. Análise de resíduo insolúvel

A quantidade de resíduo insolúvel das misturas foi determinada conforme os procedimentos descritos na norma NBR NM 15 (ABNT, 2012), com a finalidade de avaliar o teor de cinzas do cimento juntamente com as demais adições.

Este ensaio foi realizado no laboratório químico da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG, conforme indicado na Fig. 22.



**Figura 22**- Realização do ensaio de resíduo insolúvel em andamento. Fonte: Própria.

#### 3.2.1.4. Análise da massa específica

Foram realizados os procedimentos descritos na norma NBR 16605 (ABNT, 2017), possibilitando obter a massa dos materiais por unidade de volume, incluindo os vazios e os poros internos das partículas das amostras já moídas e secas, tendo sido utilizado um frasco volumétrico Le Chatelier e querosene como reagente. Este ensaio foi realizado no laboratório químico da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG, conforme indicado na Fig. 23.



**Figura 23** - Ensaio para determinação de massa específica em andamento. Fonte: Própria.

#### 3.2.1.5. Análises de finura e da área de superfície específica

Foram utilizados os métodos de peneiramento para determinação do percentual retido na peneira  $45\mu$  (#325), conforme descrito na norma NBR 9202 (ABNT, 1985) e de permeabilidade ao ar (método de Blaine), conforme descrito na norma NBR 16372 (ABNT, 2015), através de um permeabilímetro analógico da marca Solotest, conforme Fig. 24, para determinação da finura e da área de superfície específica dos materiais.

Estes ensaios foram realizados no laboratório químico da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG.



**Figura 24** - Ensaio para determinação de finura Blaine em andamento. Fonte: Própria.

Ao final das análises, verificou-se que o MATPOZ atende a todos os requisitos, com exceção da quantidade de perda ao fogo. Os dados desta etapa da pesquisa estão indicados nas Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10 e Tab. 11.

Este trabalho propiciou as condições para que os ensaios subsequentes com as pastas, as argamassas e os concretos pudessem ser realizados com maior assertividade.

**Tabela 8** - Análise inicial das composições químicas das misturas. Fonte: Própria.

| Formulação de MATPOZ (em atendimento à ABNT NBR 12653, 2015) |       |       |                                       |            |        |
|--|-------|-------|---------------------------------------|------------|--------|
| Composição química dos materiais misturados (%)              |       |       | Teor ótimo de mistura das adições (%) |            |        |
| Parâmetros   | EGAF  | PBAF  | EGAF (85%)                            | PBAF (15%) | MATPOZ |
| R.I. (Resíduo Insolúvel)                                     | 0,21  | 54,01 | 0,18                                  | 8,10       | 8,28   |
| P.F. (Perda ao Fogo)   | 0,73  | 37,02 | 0,62                                  | 5,55       | 6,17   |
| SiO <sub>2</sub>   | 35,73 | 13,12 | 30,37                                 | 1,97       | 32,34  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                               | 6,53  | 6,08  | 5,55                                  | 0,91       | 6,46   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                               | 1,59  | 66,30 | 1,35                                  | 9,95       | 11,30  |
| CaO  | 39,79 | 7,10  | 33,82                                 | 1,06       | 34,89  |
| MgO  | 6,17  | 2,82  | 5,24                                  | 0,42       | 5,67   |
| SO <sub>3</sub>  | 1,58  | 1,30  | 1,34                                  | 0,19       | 1,54   |
| K <sub>2</sub> O   | 0,29  | 0,18  | 0,25                                  | 0,03       | 0,27   |
| Na <sub>2</sub> O  | 0,32  | 0,49  | 0,27                                  | 0,07       | 0,34   |
| Na <sub>2</sub> O eq.  | 0,51  | 0,60  | 0,43                                  | 0,09       | 0,52   |

**Tabela 9** - Condições de atendimento para classificação de MATPOZ. Fonte: Própria.

| Condições de atendimento para classificação de material pozolânico Classe E (requisitos da ABNT NBR 12653, 2015) |             |            |            |
|--|-------------|------------|------------|
| Parâmetros   | Limites (%) | MATPOZ (%) | Condição   |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | ≥ 50        | 50,10      | Atende     |
| SO <sub>3</sub>  | ≤ 5         | 1,54       | Atende     |
| P.F. (Perda ao Fogo)   | ≤ 6         | 6,17       | Não atende |
| Na <sub>2</sub> O eq.  | ≤ 1,5       | 0,52       | Atende     |

**Tabela 10** - Análise comparativa dos teores ótimos de mistura do MATPOZ e do CP V-ARI, para elaboração de cimento CP IV. Fonte: Própria.

| Formulação de Cimento CP IV (em atendimento à ABNT NBR 16697, 2018) |          |        |  |              |               |
|---|----------|--------|--|--------------|---------------|
| Composição química dos materiais misturados (%)                     |          |        | Teor ótimo de mistura dos ligantes (%) |              |               |
| Parâmetros  | CP V-ARI | MATPOZ | CP V-ARI (50%)                         | MATPOZ (50%) | Cimento CP IV |
| R.I. (Resíduo Insolúvel)  | 1,72     | 8,28   | 0,86                                   | 4,14         | 5,00          |
| P.F. (Perda ao Fogo)  | 3,13     | 6,17   | 1,57                                   | 3,09         | 4,66          |
| SiO <sub>2</sub>  | 18,10    | 32,34  | 9,05                                   | 16,17        | 25,22         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 4,35     | 6,46   | 2,18                                   | 3,23         | 5,41          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 2,70     | 11,30  | 1,35                                   | 5,65         | 7,00          |
| CaO   | 60,58    | 34,89  | 30,29                                  | 17,44        | 47,73         |
| MgO   | 1,40     | 5,67   | 0,70                                   | 2,83         | 3,53          |
| SO <sub>3</sub>   | 3,40     | 1,54   | 1,70                                   | 0,77         | 2,47          |
| K <sub>2</sub> O  | 1,02     | 0,27   | 0,51                                   | 0,14         | 0,65          |
| Na <sub>2</sub> O   | 0,07     | 0,34   | 0,04                                   | 0,17         | 0,21          |
| Na <sub>2</sub> O eq.   | 0,74     | 0,52   | 0,37                                   | 0,26         | 0,63          |

**Tabela 11** - Condições de atendimento para classificação de cimento CP IV. Fonte: Própria.

| Condições de atendimento para classificação de cimento CP IV (requisitos da ABNT NBR 16697, 2018) |             |                   |          |
|---|-------------|-------------------|----------|
| Parâmetros  | Limites (%) | Cimento CP IV (%) | Condição |
| P.F. (Perda ao Fogo)  | ≤ 6,5       | 4,65              | Atende   |
| SO <sub>3</sub>   | ≤ 4,5       | 2,47              | Atende   |

### 3.2.2. Procedimentos experimentais

#### 3.2.2.1. Ensaio com as pastas

- Determinação da pasta de consistência normal (ABNT NBR 16606, 2017);
- Determinação dos tempos de pega (ABNT NBR 16607, 2017);
- Determinação da calorimetria semi-adiabática (ensaio não normatizado).

Os ensaios para determinação de consistência normal e tempos de pega foram realizados para avaliação do comportamento reológico das misturas formuladas (A 100, B 9505, B 8515, B 7525, B 6535 e B 5050) em função da viscosidade das pastas e dos seus respectivos parâmetros, tais como quantidade de água, finura dos materiais, composição químico- mineralógica, tipo e teor das adições utilizadas e estão identificados nas Fig. 25 e Fig. 26.



**Figura 25** - Preparação das pastas para realização dos ensaios. Fonte: Própria.



**Figura 26** - Aparelho de Vicat utilizado para determinação dos tempos de pega. Fonte: Própria.

O ensaio para determinação de calorimetria semi-adiabática foi realizado para avaliar a taxa de calor liberado e os tempos de ocorrência das reações de hidratação do cimento juntamente com as demais adições, correlacionando os tempos de início e fim de pega com os períodos de indução e aceleração do fluxo térmico destas reações. Foi utilizado um calorímetro semi-adiabático, com termopares tipo K, operando em temperatura ambiente de 23 °C e umidade do ar em 67 %, conforme indicado na Fig. 27.



**Figura 27** - Calorímetro semi-adiabático utilizado para determinação do calor de hidratação. Fonte: Própria.

Estes ensaios foram realizados no laboratório da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG.

#### 3.2.2.2. Ensaio com as argamassas

- Determinação da atividade pozolânica - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752, 2014).

Os ensaios foram realizados para cada uma das 06 misturas formuladas (A 100: 100% CP-V, B 9505: 95% CP-V + 5% MATPOZ, B 8515: 85% CP-V + 15% MATPOZ, B 7525: 75% CP-V + 25% MATPOZ, B 6535: 65% CP-V + 35% MATPOZ e B 5050: 50% CP-V + 50% MATPOZ), por meio da elaboração de dosagens distintas de argamassas, onde, uma delas foi utilizada como referência (denominada argamassa A), sendo composta somente pelo cimento CP V-ARI, areia normal e água; e as outras, utilizadas como comparação (denominada

argamassa B), sendo compostas pelo cimento CP V-ARI, material pozolânico (MATPOZ) em teores variáveis de substituição sobre o volume de cimento, areia normalizada e água.

Os índices de consistência normal das argamassas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo ensaio, não havendo a necessidade de utilizar aditivo superplastificante. A Tab. 12 indica as quantidades de materiais para a moldagem de um conjunto de 06 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm.

Para cada dosagem de argamassa foram moldados 06 corpos de prova, totalizando 36 unidades, onde 24 unidades foram destinadas para posterior ensaios de ruptura à compressão axial e 12 unidades destinadas para eventuais necessidades de contraprova.

Após a moldagem, os corpos de prova foram curados em câmara úmida por um período de 24 horas. Posteriormente, os mesmos foram retirados das formas, identificados e imersos em tanque de cura com água saturada de cal, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$  até o momento de ruptura, conforme as condições estabelecidas pela normas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 9479 (ABNT, 2006) e indicadas nas Fig. 28, Fig. 29 e Fig. 30.

Para a realização dos ensaios de ruptura à compressão axial, nas idades de 3, 7 e 28 dias, os corpos de prova foram capeados com enxofre, conforme recomendado pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019) e levados para a prensa de rompimento da marca FORNEY, modelo F-25 EX, Classe 1, devidamente calibrada, conforme a norma NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016).

O índice de atividade pozolânica das argamassas foi determinado pela razão entre as resistências médias das argamassas de comparação e as resistências médias das argamassas de referência, expresso em porcentagem, conforme descrito na norma NBR 5752 (ABNT, 2014). A norma NBR 12653 (ABNT, 2015) exige que esse índice seja  $\geq 90\%$ , para materiais pozolânicos Classe E.

Estes ensaios foram realizados no laboratório da empresa Cimento Nacional (Grupo Brennand), na unidade industrial localizada na cidade de Sete Lagoas - MG.

As argamassas que apresentaram melhor desempenho em termos de resistência média à compressão aos 28 dias e maior teor de substituição de cimento, foram submetidas às análises microestruturais através da Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM - Scanning Electron Microscopy), utilizando o detector de sinal de elétrons secundários (SE - Secondary Electron) com sistema de detecção de raios

X por Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy), aplicado diretamente nas amostras, sendo preparadas através da fixação das mesmas em fita de cobre para ampliação da condutividade elétrica, possibilitando a obtenção das imagens com maior qualidade de resolução e melhor identificação dos elementos cristalográficos formados, bem como a indicação da composição química destes elementos.

As análises foram realizadas em um equipamento da marca Phillips, modelo XL 30, localizado no laboratório de metalografia da unidade siderúrgica da ArcelorMittal, localizado na cidade de João Monlevade-MG.

**Tabela 12** - Quantidade de material, em massa, para moldagem de 06 corpos de prova cilíndricos. Fonte: (ABNT NBR 5752, 2014).

| Material                             | Quantidade em massa (g.) |                            |
|--------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                                      | Argamassa A              | Argamassa B <sup>(a)</sup> |
| Cimento Portland CP V - ARI          | 624,0 ± 0,4              | 468,0 ± 0,4                |
| Material pozolânico                  |                          | 156,0 ± 0,2                |
| Areia normalizada IPT <sup>(b)</sup> | 1872,0                   | 1872,0                     |
| Água                                 | 300,0 ± 0,2              | 300,0 ± 0,2                |
| Aditivo superplastificante           |                          | (c)                        |

(a) O material pozolânico e o cimento CP V - ARI devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min., aproximadamente.

(b) Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

(c) Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com a Argamassa A, determinado conforme ABNT NBR 7215, 2019 - Anexo A. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. O uso de aditivo é dispensável quando o índice de consistência da Argamassa B for igual (± 10 mm) ou maior que o da Argamassa A.



**Figura 28** - Câmara úmida e tanque de imersão para cura dos corpos de prova das argamassas. Fonte: Própria.



**Figura 29** - Ensaio de ruptura à compressão axial dos corpos de prova das argamassas em andamento. Fonte: Própria.



**Figura 30** - Conjunto dos corpos de prova após realização dos ensaios à compressão axial. Fonte: Própria.

### 3.2.2.3. Ensaio com os concretos

Os concretos foram dosados utilizando um método particular desenvolvido pela empresa Valemix, considerando as premissas básicas comuns aos demais os métodos, tais como o cálculo da resistência de dosagem, o desvio padrão, a relação água/cimento, o teor de argamassa, o teor de ar aprisionado, o abatimento e o consumo de agregados.

As dosagens foram realizadas de forma a obter concretos com classe de resistência de 30 MPa aos 28 dias, utilizando traços que pudessem apresentar condições ideais de trabalhabilidade e economia de materiais. Devido à situação de se trabalhar com uma combinação de materiais de adição não convencionais na produção de concretos, tomou-se a precaução de realizar o proporcionamento dos mesmos de forma gradual e equilibrada, para que as mudanças de comportamento físico pudessem ser analisadas com bastante critério.

Foram preparadas três famílias de concretos (traços), cada uma contendo três sub-tipos distintos em termos de composição dos seus constituintes (traços rico, básico e pobre); sendo a primeira família utilizada como referência, por conter somente o cimento CP V - ARI como aglomerante e as demais famílias sendo utilizadas como objeto de comparação, por conter as adições minerais pesquisadas que apresentaram melhor desempenho, com bases nos ensaios das pastas e argamassas anteriormente realizados.

O método utilizado fixou os parâmetros de relação água/cimento, teor de argamassa, teor de aditivo e ar aprisionado em todos os traços, com o objetivo de possibilitar uma melhor avaliação do abatimento do concreto.

Buscou-se assim verificar a influência do teor de MATPOZ nos traços de comparação (F 7525 e F 5050), em relação ao traço de referência (F 100), com consumo de aglomerante variando entre 229 kg/m<sup>3</sup> e 380 kg/m<sup>3</sup> para todas as três famílias e os seus respectivos traços. Todos os materiais constituintes foram medidos em massa, com adoção de desvio-padrão de 4,0 MPa, atendendo à classe A de preparo do concreto, conforme a norma NBR 12655 (ABNT, 2015), entretanto, sem atender rigidamente os demais requisitos desta norma, de forma proposital, justamente para avaliar o comportamento dos materiais sob condições mais restritivas em termos de consumo de cimento e água.

A Tab. 13 apresenta a composição geral (em massa), dos traços de concreto produzidos na pesquisa.

**Tabela13** - Quantidade de material, em massa, dos traços de concreto pesquisados.

Fonte: Própria e Valemix.

| Famílias de concreto | Tipo de traço | Cimento (kg) | MATPOZ (kg) | Agreg. miúdo (kg) | Agreg. graúdo (kg) | Água (kg) | Aditivo (kg) | Teor de argam. (%) | Rel. A/C (%) |
|----------------------|---------------|--------------|-------------|-------------------|--------------------|-----------|--------------|--------------------|--------------|
| F 100                | Rico          | 380,00       | 0,00        | 755,00            | 1014,00            | 190,00    | 1,90         | 0,53               | 0,50         |
|                      | Básico        | 283,00       | 0,00        | 846,00            | 972,00             | 198,00    | 1,41         | 0,54               | 0,70         |
|                      | Pobre         | 229,00       | 0,00        | 898,00            | 932,00             | 206,00    | 1,14         | 0,55               | 0,90         |
| F 7525               | Rico          | 285,00       | 95,00       | 754,00            | 1014,00            | 190,00    | 1,90         | 0,53               | 0,50         |
|                      | Básico        | 212,00       | 71,00       | 846,00            | 971,00             | 198,00    | 1,41         | 0,54               | 0,70         |
|                      | Pobre         | 172,00       | 57,00       | 897,00            | 931,00             | 206,00    | 1,14         | 0,55               | 0,90         |
| F 5050               | Rico          | 190,00       | 190,00      | 753,00            | 1013,00            | 190,00    | 1,90         | 0,53               | 0,50         |
|                      | Básico        | 141,00       | 141,00      | 845,00            | 970,00             | 198,00    | 1,41         | 0,54               | 0,70         |
|                      | Pobre         | 114,00       | 114,00      | 896,00            | 931,00             | 206,00    | 1,14         | 0,55               | 0,90         |

Os concretos elaborados tiveram as suas propriedades físicas e mecânicas avaliadas nas seguintes condições:

No estado fresco

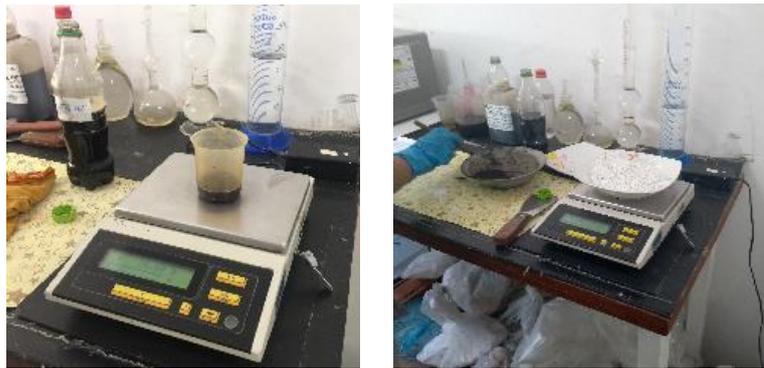
- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998);
- Determinação do teor de ar aprisionado (ABNT NBR 9833, 2009);
- Determinação da massa específica (ABNT NBR 9833, 2009).

Os trabalhos de produção dos concretos foram iniciados realizando a pesagem dos materiais conforme as definições de cálculo das dosagens (parâmetros de consumo do traço), com posterior mistura dos mesmos e realização dos ensaios supracitados.

Foram moldados 54 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm. Após o período de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em tanque de cura com água saturada de cal, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ , até o momento de realização dos ensaios de ruptura à compressão axial, aos 3, 7 e 28 dias.

Os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova, foram realizados conforme prescrito na norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Estes ensaios foram realizados no laboratório de controle de qualidade do concreto da empresa Valemix, localizado na cidade de Timóteo - MG, conforme apresentado nas Fig. 31, Fig. 32, Fig. 33, Fig. 34, Fig. 35 e Fig. 36.



**Figura 31** - Pesagem do aditivo plastificante e das adições. Fonte: Própria.



**Figura 32** - Pesagem do cimento e dos agregados graúdo e miúdo. Fonte: Própria.



**Figura 33** - Mistura dos materiais para a produção dos concretos. Fonte: Própria.



**Figura 34** - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.  
Fonte: Própria.



**Figura 35** - Determinação do teor de ar aprisionado e da massa específica.  
Fonte: Própria.



**Figura 36** - Conjunto de 54 corpos de prova moldados e identificados. Fonte: Própria.

No estado endurecido

- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT NBR 5739, 2018).

Os corpos de prova foram ensaiados à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias, onde, a cada processo de ruptura, os mesmos foram previamente retificados e levados para a prensa de rompimento da marca EMIC, modelo PCE 100 C, Classe 1, devidamente calibrada, conforme a norma NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016), Estes ensaios foram realizados no laboratório de controle de qualidade do concreto da empresa Valemix, localizado na cidade de Timóteo - MG, conforme indicado nas Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39, Fig. 40 e Fig. 41.



**Figura 37** - Processo de retificação das bases dos corpos de prova. Fonte: Própria.



**Figura 38** - Preparação dos corpos de prova para os ensaios de ruptura à compressão. Fonte: Própria.



**Figura 39** - Realização dos ensaios de ruptura à compressão dos corpos de prova.  
Fonte: Própria.



**Figura 40** - Detalhe da identificação da prensa utilizada. Fonte: Própria.



**Figura 41** - Detalhe do certificado de calibração da prensa utilizada. Fonte: Própria.

## 4. Resultados e Discussão

4.1. Resultados das análises de caracterização e ensaios dos materiais componentes das pastas, argamassas e concretos

### 4.1.1. Caracterização físico-química e mecânica do cimento CP V - ARI

Os ensaios indicaram que o cimento utilizado na pesquisa encontrava-se em conformidade com as exigências normativas, onde os resultados estão apresentados na Tab. 14.

**Tabela 14** - Resultados dos ensaios realizados com o cimento CP V - ARI. Fonte: Própria e Cimento Nacional.

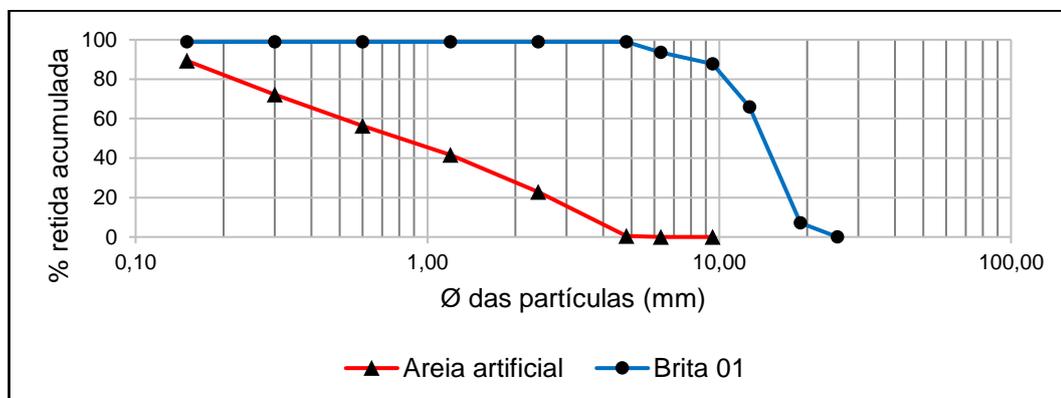
| Ensaio realizado com o cimento CP V - ARI   |                      |                    |   |
|---|----------------------|--------------------|---|
| Ensaio químico                              |                      |                    |   |
| Ensaio                                      | Metodologia          | Unidade            | Resultado                                 |
| Óxido de magnésio (MgO)                     | ABNT NBR 14656, 2001 | %                  | 1,40                                      |
| Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )      |                      |                    | 3,20                                      |
| Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)          |                      |                    | 0,07                                      |
| Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)        |                      |                    | 0,89                                      |
| Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> Oeq.) |                      |                    | Na <sub>2</sub> O +0,658*K <sub>2</sub> O |
| Perda ao fogo                               | ABNT NBR NM 18, 2012 |                    | 4,00                                      |
| Resíduo insolúvel                           | ABNT NBR NM 15, 2012 |                    | 0,80                                      |
| Ensaio físico                               |                      |                    |   |
| Ensaio                                      | Metodologia          | Unidade            | Resultado                                 |
| Massa específica                            | ABNT NBR 16605, 2017 | g/cm <sup>3</sup>  | 3,09                                      |
| Finura na peneira # 325                     | ABNT NBR 9202, 1985  | %                  | 0,40                                      |
| Área específica (Blaine)                    | ABNT NBR 16372, 2015 | cm <sup>2</sup> /g | 4617,00                                   |
| Início de pega                              | ABNT NBR 16607, 2017 | min.               | 157,00                                    |
| Fim de pega                                 |                      |                    | 212,00                                    |
| Pasta de consistência normal                | ABNT NBR 16606, 2017 | %                  | 30,00                                     |
| Expansibilidade à quente                    | ABNT NBR 11582, 2016 | mm                 | 0,00                                      |
| Ensaio mecânico                             |                      |                    |   |
| Ensaio                                      | Metodologia          | Unidade            | Resultado                                 |
| Resistência à compressão (1 dia)            | ABNT NBR 7215, 2019  | MPa                | 30,00                                     |
| Resistência à compressão (3 dias)           |                      |                    | 41,70                                     |
| Resistência à compressão (7 dias)           |                      |                    | 46,40                                     |
| Resistência à compressão (28 dias)          |                      |                    | 55,40                                     |

#### 4.1.2. Granulometria dos agregados

A areia artificial (agregado miúdo) apresentou composição granulométrica uniforme e a brita 01 (agregado graúdo) apresentou composição granulométrica bem graduada, com os demais parâmetros físicos adequados, contribuindo favoravelmente para a utilização dos mesmos na produção de concretos, conforme apresentado na Tab. 15 e na Fig. 42.

**Tabela 15** - Análise granulométrica dos agregados miúdo e graúdo. Fonte: Própria e Valemix.

| Peneiras  |               | Areia artificial |                | Brita 01 |                |
|---|---------------|------------------|----------------|----------|----------------|
| Nº Mesh   | Abertura (mm) | % retida         | % retida acum. | % retida | % retida acum. |
| 1"  | 25,40         |                  |                | 0,00     | 0,00           |
| 3/4"  | 19,00         |                  |                | 7,14     | 7,14           |
| 1/2"  | 12,70         |                  |                | 58,84    | 65,98          |
| 3/8"  | 9,50          | 0,0              | 0,0            | 21,81    | 87,79          |
| 1/4"  | 6,30          | 0,0              | 0,0            | 5,77     | 93,56          |
| 4   | 4,80          | 0,6              | 0,6            | 5,33     | 98,89          |
| 8   | 2,40          | 22,2             | 22,8           | 0,00     | 98,89          |
| 16  | 1,20          | 18,8             | 41,6           | 0,00     | 98,89          |
| 30  | 0,60          | 14,8             | 56,3           | 0,00     | 98,89          |
| 50  | 0,30          | 15,9             | 72,3           | 0,00     | 98,89          |
| 100   | 0,15          | 17,0             | 89,3           | 0,00     | 98,89          |
| Fundo   |               | 10,7             | 100,0          | 1,11     | 100,00         |
| Diâmetro máximo (mm)                            |               | 4,80             |                | 25,00    |                |
| Módulo de finura                                |               | 2,83             |                | 6,88     |                |
| Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )          |               | 2,70             |                | 2,70     |                |
| Massa unitária compactada (kg/dm <sup>3</sup> ) |               | 1,37             |                | 1,46     |                |



**Figura 42** - Curva granulométrica dos agregados miúdo e graúdo. Fonte: Própria e Valemix.

## 4.2. Resultados das análises de caracterização e ensaios dos resíduos siderúrgicos

### 4.2.1. Composição química

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX), indicou que, os materiais analisados são constituídos majoritariamente pelos óxidos dos elementos Fe, Ca, Si, Al e Mg. Esta composição indicou que os resíduos atenderiam à exigência da norma NBR 12653 (ABNT, 2015), a qual determina que o somatório das quantidades de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  deve ser igual ou superior a 50%, para que estes possam ser classificados como materiais pozolânicos (Classe E). A confirmação destes parâmetros, através da realização de novas análises de FRX, específicas para os óxidos mais representativos, possibilitou avançar com as formulações, buscando atender aos requisitos químicos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018), para a produção de cimentos pozolânicos, conforme descrito na metodologia de dosagem das misturas, anteriormente apresentada. A Tab. 16 indica a composição química dos dois resíduos siderúrgicos estudados.

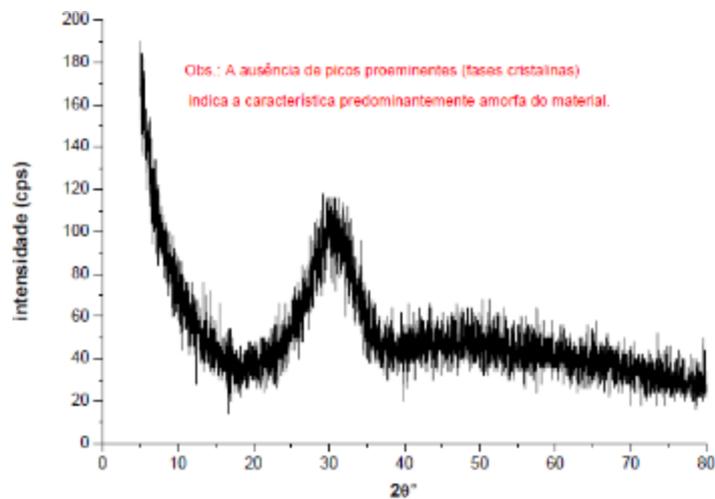
**Tabela 16** - Composição química dos resíduos siderúrgicos. Fonte: Própria.

| Parâmetros   |                         | Composição média (% em massa) |           |
|--------------|-------------------------|-------------------------------|-----------|
|              |                         | EGAF                          | PBAF      |
| Majoritários | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0,50                          | 57,32     |
|              | CaO                     | 46,97                         | 4,82      |
|              | $\text{SiO}_2$          | 32,70                         | 12,41     |
|              | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | 0,12                          | 20,60     |
|              | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 10,41                         | 2,91      |
|              | MgO                     | 3,10                          | 0,56      |
|              | Mn                      | 2,69                          | 0,21      |
| Minoritários | $\text{SO}_3$           | 0,60                          | 1,73      |
|              | $\text{P}_2\text{O}_5$  | 1,500                         | 0,145     |
|              | Cl                      | 0,018                         | 1,103     |
|              | $\text{TiO}_2$          | 0,788                         | 0,144     |
|              | $\text{K}_2\text{O}$    | 0,560                         | 0,190     |
|              | P                       | 0,473                         | 0,028     |
|              | SrO                     | 0,353                         | 0,051     |
|              | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 0,343                         | 0,027     |
|              | Cr                      | 0,235                         | 0,018     |
|              | $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,100                         | 0,120     |
|              | F                       | 0,200                         | 0,010     |
|              | $\text{Y}_2\text{O}_3$  | 0,040                         | 0,024     |
|              | ZnO                     | 0,009                         | 0,043     |
| Zn           | 0,007                   | 0,035                         |           |
| Traços       | CdO                     | < 0,001                       | < 0,001   |
|              | PbO                     | < 0,001                       | < 0,001   |
|              | Br                      | < 0,001                       | < 0,001   |
|              | NiO                     | < 0,001                       | < 0,001   |
|              | S                       | < 0,00001                     | < 0,00001 |

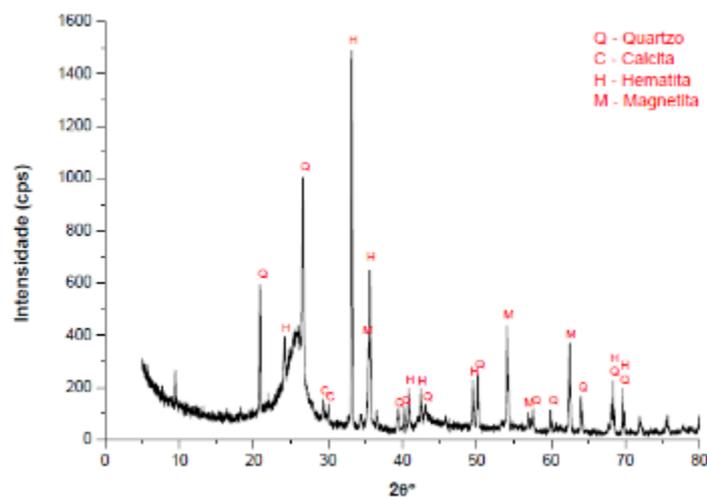
#### 4.2.2. Mineralogia

A análise por Difração de Raios X (DRX) indicou que escória granulada apresenta um comportamento totalmente amorfo, sem a presença de picos definidos relacionados a fases cristalinas, indicando o potencial de reatividade dos compostos químicos como material cimentante. Já o pó do balão apresentou fases cristalinas variadas, com picos bem definidos e presença discreta de pequenos halos amorfos.

As Fig. 43 e Fig. 44 indicam os difratogramas da escória granulada e do pó do balão, respectivamente.



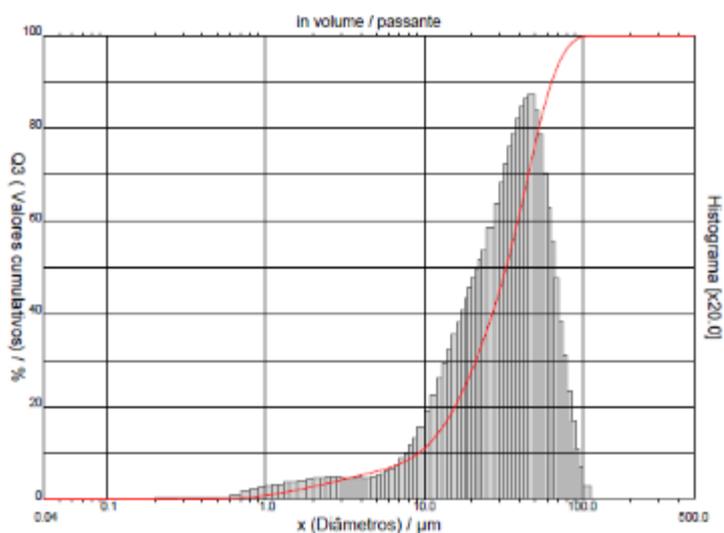
**Figura 43** - Difratograma da escória granulada de alto-forno. Fonte: Própria.



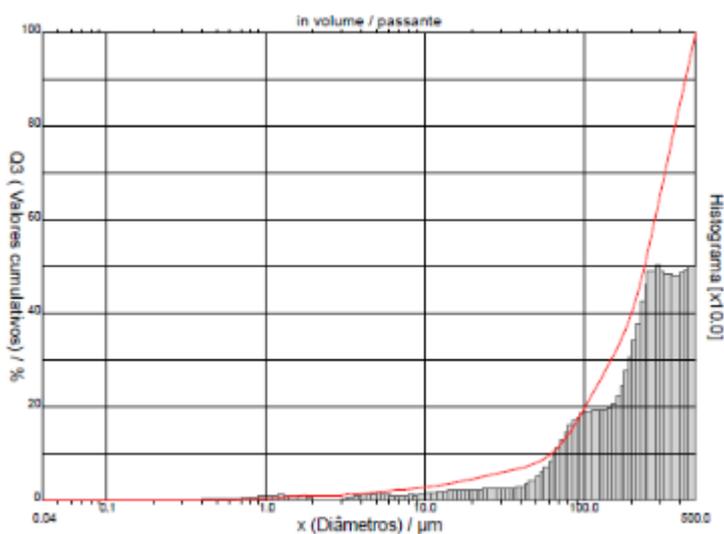
**Figura 44** - Difratograma do pó do balão de alto-forno. Fonte: Própria.

### 4.2.3. Granulometria

As análises granulométricas por difração de laser da escória granulada e do pó do balão, em estado natural, indicaram a necessidade de realizar a moagem dos materiais, para que fosse possível atingir níveis de cominuição compatíveis com as exigências normativas para a classificação de materiais pozolânicos, bem como, promover a compatibilidade com a finura do cimento utilizado e atingir o maior nível possível de interatividade e reatividade entre estes materiais. As Fig. 45 e Fig. 46 indicam as curvas granulométricas dos referidos materiais.



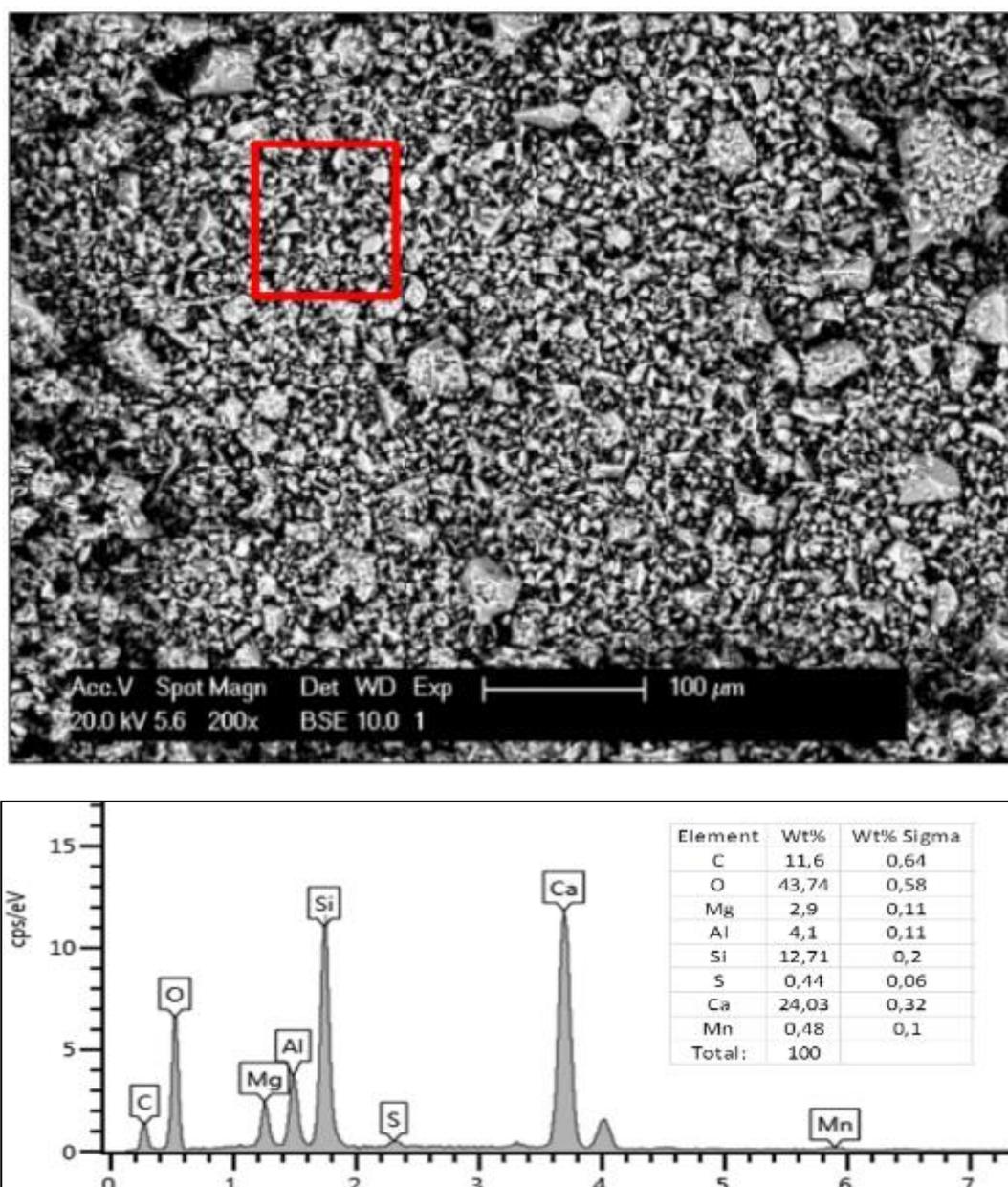
**Figura 45** - Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno. Fonte: Própria.



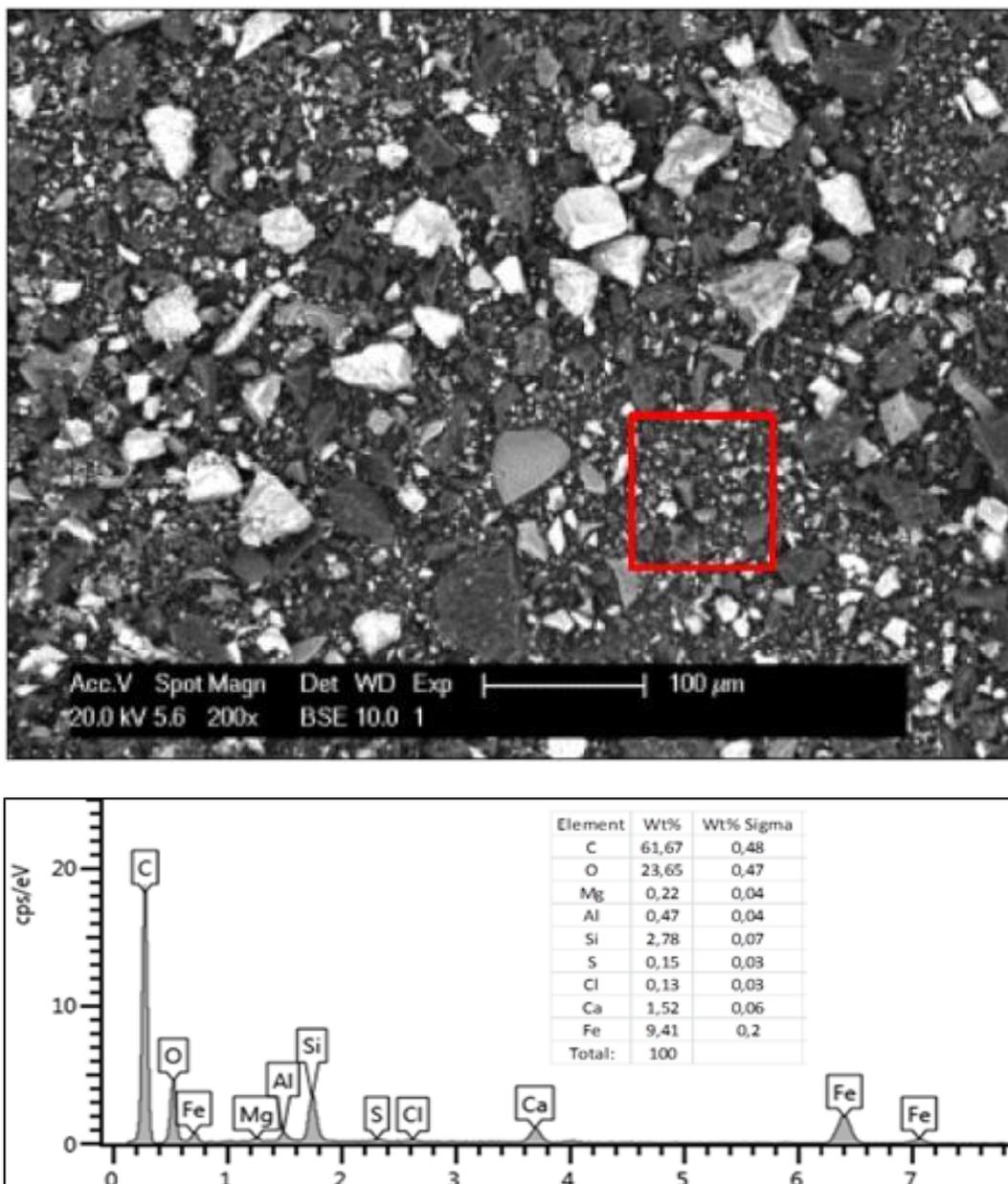
**Figura 46** - Curva granulométrica do pó balão de alto-forno. Fonte: Própria.

#### 4.2.4. Análise microestrutural

A obtenção das imagens pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, possibilitou analisar as características físico-químicas dos materiais de adição, logo após o processo de moagem. Fica nítido a diferença de tamanho entre as partículas, sendo que esta condição se deve à maior presença de óxidos de ferro (hematita e magnetita) no pó do balão, os quais dificultam o processo de cominuição deste material, conforme indicado nas Fig. 47 e Fig. 48.



**Figura 47** - Micrografia BSE e espectro composicional EDS da EGAF após a moagem. Fonte: Própria.



**Figura 48** - Micrografia BSE e espectro EDS composicional do PBAF após a moagem.  
Fonte: Própria.

### 4.3. Resultados dos procedimentos experimentais

#### 4.3.1. Características químicas e físicas das pastas

Os resultados das análises químicas do cimento e das adições pesquisadas, juntamente com os ensaios físicos realizados com as pastas, possibilitaram a elaboração de argamassas que atenderam integralmente os requisitos exigidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme indicado nas Tab. 17 e Tab. 18.

**Tabela 17** - Características químicas das misturas pesquisadas. Fonte: Própria e Cimento Nacional.

| Composição das dosagens (%) |             |             |          | Características químicas (%) |                 |                       |                  |                 |               |                   |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------|------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------|---------------|-------------------|
| CP V-ARI                    | EGAF (85 %) | PBAF (15 %) | Registro | MgO                          | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O eq. | K <sub>2</sub> O | Equiv. Alcalino | Perda ao Fogo | Resíduo Insolúvel |
| 100%                        | 0,00%       | 0,00%       | A 100    | 1,49                         | 3,18            | 0,07                  | 1,04             | 0,75            | 3,81          | 2,03              |
| 95%                         | 4,25%       | 0,75%       | B 9505   | 1,64                         | 3,27            | 0,07                  | 1,01             | 0,73            | 3,77          | 2,41              |
| 85%                         | 12,75%      | 2,25%       | B 8515   | 1,94                         | 3,15            | 0,07                  | 0,83             | 0,62            | 3,65          | 2,69              |
| 75%                         | 21,25%      | 3,75%       | B 7525   | 2,30                         | 2,60            | 0,07                  | 0,89             | 0,66            | 3,78          | 3,10              |
| 65%                         | 29,75%      | 5,25%       | B 6525   | 2,52                         | 2,26            | 0,23                  | 1,17             | 1,00            | 3,82          | 3,61              |
| 50%                         | 42,50%      | 7,50%       | B 5050   | 2,90                         | 1,99            | 0,19                  | 1,41             | 1,12            | 3,99          | 4,30              |

**Tabela 18** - Características físicas das misturas pesquisadas. Fonte: Própria e Cimento Nacional.

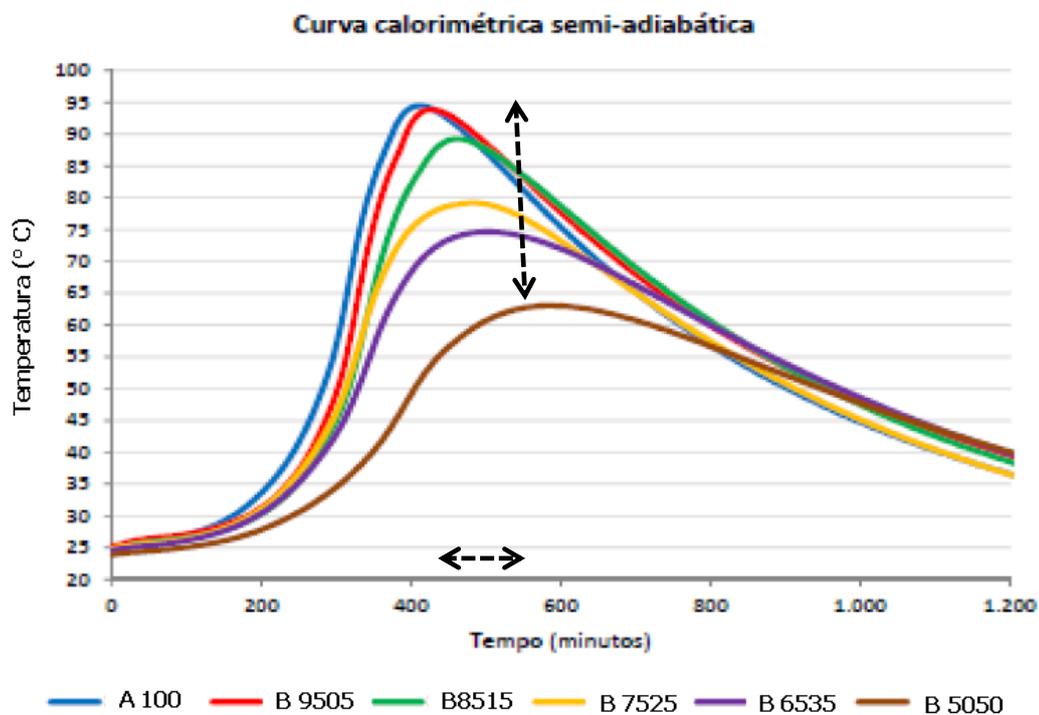
| Composição das dosagens (%) |             |             |          | Características físicas               |                                    |                     |                     |                      |     |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----|
| CP V-ARI                    | EGAF (85 %) | PBAF (15 %) | Registro | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | Retido na # 325 (%) | Consist. Normal (%) | Tempo de Pega (min.) |     |
|                             |             |             |          |                                       |                                    |                     |                     | Início               | Fim |
| 100%                        | 0,00%       | 0,00%       | A 100    | 3,06                                  | 5.364                              | 0,80                | 149,0               | 170                  | 230 |
| 95%                         | 4,25%       | 0,75%       | B 9505   | 3,02                                  | 5.119                              | 1,43                | 155,0               | 195                  | 255 |
| 85%                         | 12,75%      | 2,25%       | B 8515   | 2,97                                  | 4.883                              | 2,59                | 153,0               | 195                  | 255 |
| 75%                         | 21,25%      | 3,75%       | B 7525   | 3,04                                  | 4.931                              | 3,79                | 154,0               | 215                  | 275 |
| 65%                         | 29,75%      | 5,25%       | B 6525   | 2,97                                  | 4.664                              | 5,08                | 153,0               | 225                  | 285 |
| 50%                         | 42,50%      | 7,50%       | B 5050   | 3,97                                  | 4.393                              | 6,89                | 150,8               | 241                  | 301 |

Em termos químicos, notou-se que, à medida que houve a diminuição nos teores de cimento das dosagens, ocorreu um aumento mais significativo no percentual de resíduo insolúvel, devido aos elevados teores de óxidos de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) presentes no pó do balão. As demais características não sofreram variações acentuadas. Em termos físicos, houve variações significativas quanto à diminuição da finura e no aumento do percentual de material retido, que acarretou um aumento dos tempos de início e fim de pega, devido à constituição granulométrica mais grossa do pó do balão, que gerou uma dinâmica de reatividade mais lenta entre os materiais misturados.

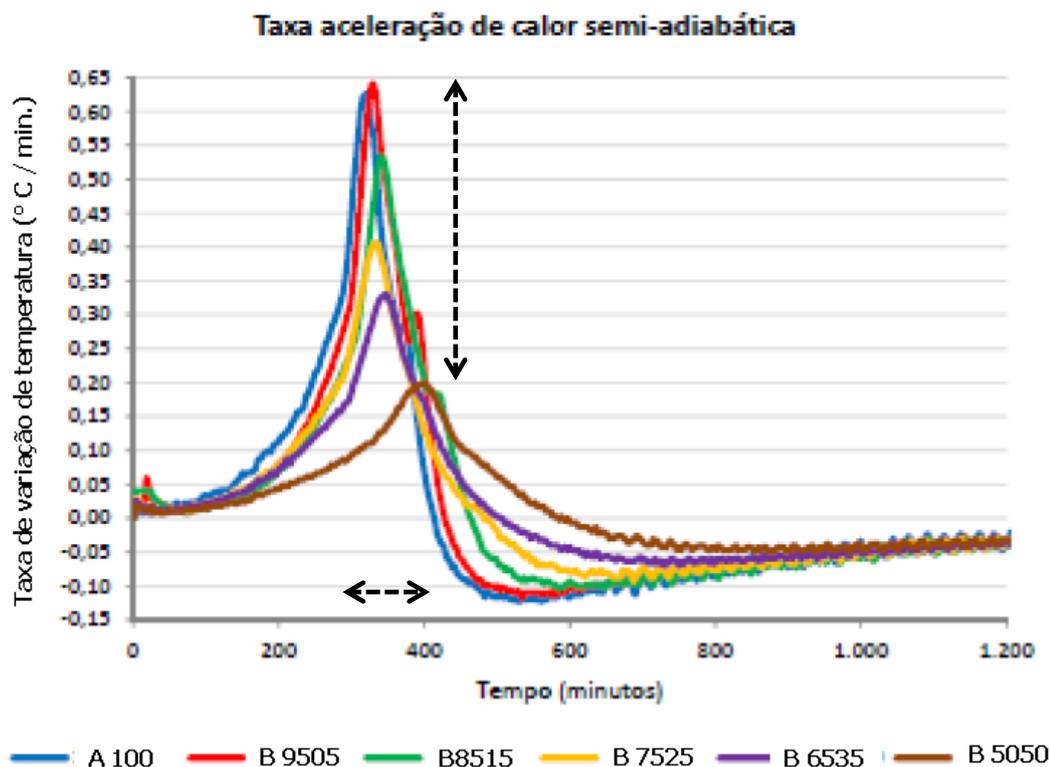
Os resultados dos ensaios de calorimetria das pastas indicaram a redução na liberação de calor total e das respectivas taxas de aceleração durante as reações de hidratação das misturas que continham maior percentual de adições, conforme indicado nas Tab. 19 e Fig. 49 e Fig.50.

**Tabela 19** - Resultados dos ensaios de calorimetria semi-adiabática. Fonte: Própria e Cimento Nacional.

| Mistura | Aglomerante (g.) | Água (g.) | Relação A/C | Temperatura (°C) | Início da reação (min.) | Fim da reação (min.) | Aceleração (°C/min.) |
|---------|------------------|-----------|-------------|------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| A 100   | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 94,50            | 120                     | 411                  | 0,63                 |
| B 9505  | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 93,90            | 147                     | 0,64                 |                      |
| B 8515  | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 89,30            | 150                     | 462                  | 0,53                 |
| B 7525  | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 79,20            | 144                     | 480                  | 0,41                 |
| B 6525  | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 74,70            | 153                     | 501                  | 0,33                 |
| B 5050  | 600,00           | 240,00    | 0,40        | 63,10            | 186                     | 582                  | 0,20                 |



**Figura 49** - Curva calorimétrica semi-adiabática das reações das pastas. Fonte: Própria e Cimento Nacional.



**Figura 50** - Taxa de aceleração de calor semi-adiabática das reações das pastas. Fonte: Própria e Cimento Nacional.

Constatou-se que o aumento no teor de adições (MATPOZ) das misturas, promoveu uma redução significativa no calor de hidratação das pastas ensaiadas, prolongando o atingimento do pico exotérmico da reação, de forma gradativa.

Isto se explica pela menor quantidade dos produtos de hidratação formados, características estas devidas aos menores teores de cimento presentes nas blendagens, fato este que pode ser considerado positivo em termos de durabilidade do concreto, pois, quanto menor a quantidade de calor liberado durante as reações de hidratação, menor será a probabilidade de ocorrências de fissuras.

#### 4.3.2. Características mecânicas das argamassas

As argamassas dosadas com bases nos cálculos dos teores ótimos das adições (85 % de EGAF e 15 % de PBAF) foram submetidas aos ensaios de compressão axial, onde, os resultados obtidos para a idade de 28 dias serviram como base para a determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos, conforme o método de ensaio da norma NBR 5752 (ABNT, 2014) e atendendo

plenamente os requisitos da norma NBR 12653 (ABNT, 2015); também, tendo em vista que a norma NBR 16697 (ABNT, 2018), no item 5.1.4, determina que o índice de atividade pozolânica dos materiais utilizados como adição, deve ser no mínimo de 75% aos 28 dias. Os resultados destes ensaios estão indicados na Tab. 20.

**Tabela 20** - Índices de desempenho das misturas pozolânicas com cimento Portland aos 28 dias. Fonte: Própria.

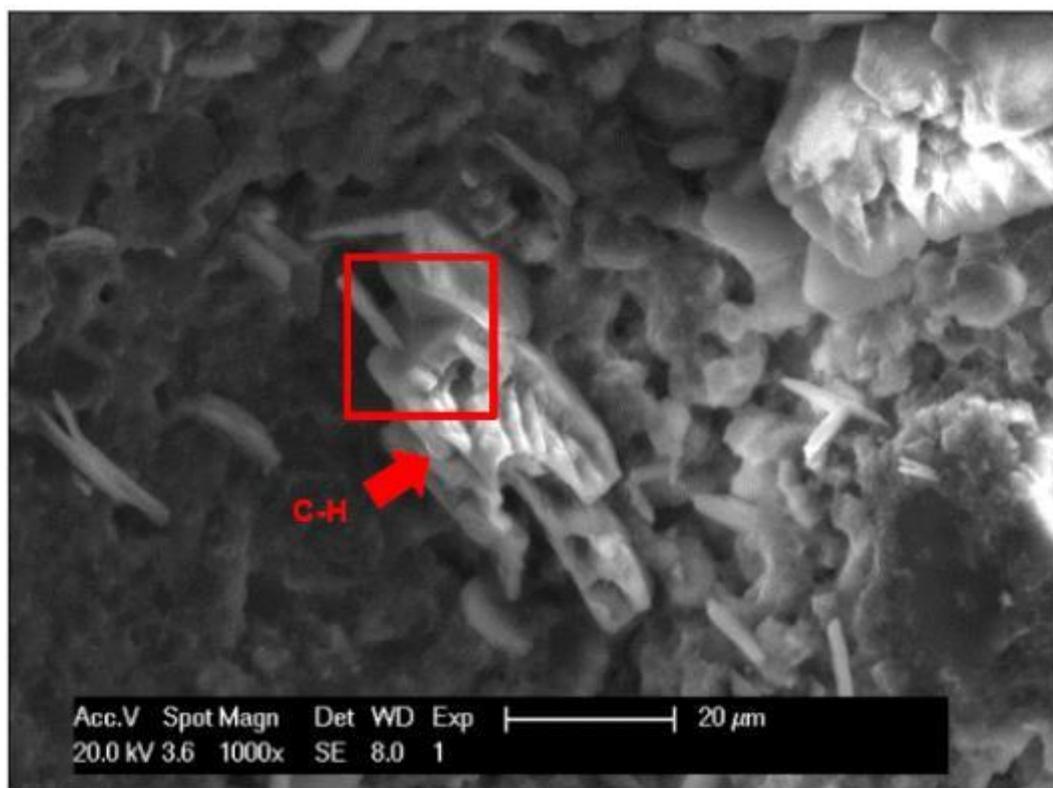
| Tipo de argamassa   | Composição das dosagens (%) |                |             | Nº de identificação dos CP's | Resistência à compressão axial (MPa) |        |         |                                 | Desvio padrão (MPa) | IAP (%) |
|---------------------|-----------------------------|----------------|-------------|------------------------------|--------------------------------------|--------|---------|---------------------------------|---------------------|---------|
|                     | Teor de cimento CP V - ARI  | Teor de MATPOZ |             |                              | 3 dias                               | 7 dias | 28 dias | Resist. média aos 28 dias (MPa) |                     |         |
|                     |                             | EGAF (85 %)    | PBAF (15 %) |                              |                                      |        |         |                                 |                     |         |
| Referência (A 100)  | 100,00                      | 0,00           |             | A 100 - 01                   | 39,25                                | 43,23  | 53,51   | 53,53                           | 0,00                | 100,00  |
|                     |                             |                |             | A 100 - 02                   | 39,23                                | 43,34  | 53,48   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 0,00           | 0,00        | A 100 - 03                   | 39,28                                | 43,41  | 53,59   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | A 100 - 04                   | 39,20                                | 43,39  | 53,54   |                                 |                     |         |
| Comparação (B 9505) | 95,00                       | 5,00           |             | B 9505 - 01                  | 38,17                                | 44,91  | 54,47   | 54,46                           | 0,00                | 101,74  |
|                     |                             |                |             | B 9505 - 02                  | 38,10                                | 44,88  | 54,46   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 4,25           | 0,75        | B 9505 - 03                  | 38,21                                | 44,94  | 54,43   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | B 9505 - 04                  | 38,10                                | 44,92  | 54,48   |                                 |                     |         |
| Comparação (B 8515) | 85,00                       | 15,00          |             | B 8515 - 01                  | 33,89                                | 41,12  | 51,38   | 51,43                           | 0,00                | 96,07   |
|                     |                             |                |             | B 8515 - 02                  | 33,82                                | 41,16  | 51,42   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 12,75          | 0,75        | B 8515 - 03                  | 33,86                                | 41,12  | 51,43   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | B 8515 - 04                  | 33,93                                | 41,18  | 51,48   |                                 |                     |         |
| Comparação (B 7525) | 75,00                       | 25,00          |             | B 7525 - 01                  | 34,37                                | 39,83  | 53,38   | 53,43                           | 0,00                | 99,81   |
|                     |                             |                |             | B 7525 - 02                  | 34,32                                | 39,85  | 53,42   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 21,25          | 3,75        | B 7525 - 03                  | 34,35                                | 39,82  | 53,43   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | B 7525 - 04                  | 34,32                                | 39,83  | 53,48   |                                 |                     |         |
| Comparação (B 6535) | 65,00                       | 35,00          |             | B 6535 - 01                  | 27,85                                | 37,13  | 50,78   | 50,83                           | 0,00                | 94,95   |
|                     |                             |                |             | B 6535 - 02                  | 27,78                                | 37,18  | 50,82   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 29,75          | 5,25        | B 6535 - 03                  | 27,82                                | 37,16  | 50,83   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | B 6535 - 04                  | 27,83                                | 37,11  | 50,88   |                                 |                     |         |
| Comparação (B 5050) | 50,00                       | 50,00          |             | B 5050 - 01                  | 22,92                                | 33,05  | 47,74   | 47,75                           | 0,00                | 89,20   |
|                     |                             |                |             | B 5050 - 02                  | 22,92                                | 33,05  | 47,75   |                                 |                     |         |
|                     |                             | 42,50          | 7,50        | B 5050 - 03                  | 22,95                                | 33,06  | 47,74   |                                 |                     |         |
|                     |                             |                |             | B 5050 - 04                  | 22,94                                | 33,01  | 47,76   |                                 |                     |         |

Nas imagens obtidas das amostras fragmentadas das argamassas selecionadas (B 7525 e B 5050), após rompimento aos 28 dias, foi possível observar a variedade de ocorrências das formações cristalográficas típicas das reações de hidratação dos materiais cimentícios, conforme as diferentes misturas analisadas.

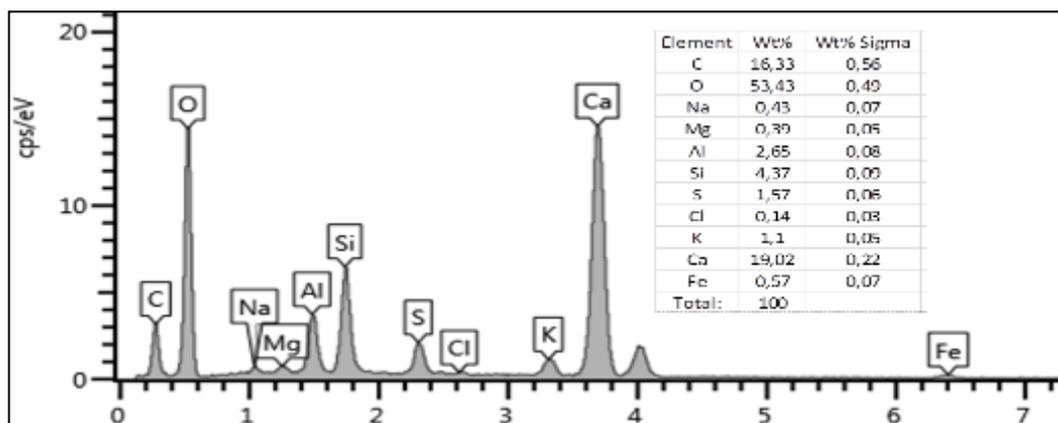
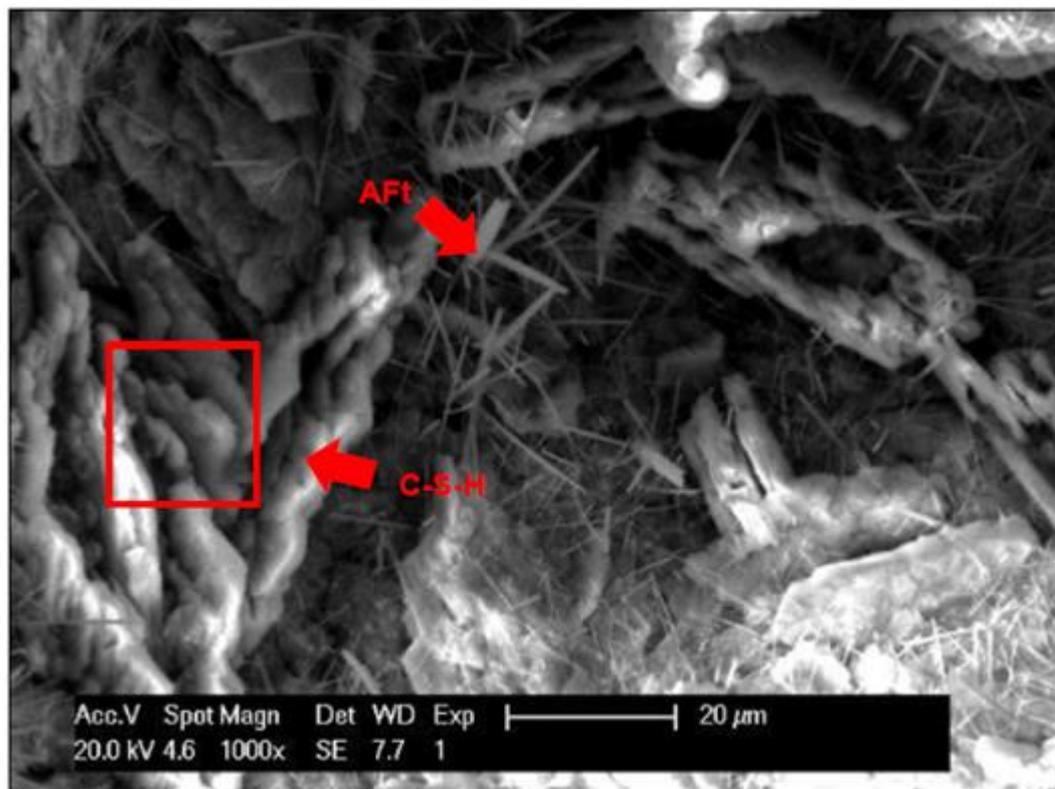
A observação destas imagens juntamente com o indicador de composição química das respectivas formações analisadas, foi importante para o estabelecimento da correlação entre as diferentes fases de surgimento dos cristais e os diferentes teores de adições pesquisados.

As amostras com teor de adições (MATPOZ) de 50 % apresentaram grande presença de C-H (portlandita) e poucos cristais neoformados sugestivos de AFt (etringita primária), conforme indicado na Fig. 51; enquanto que, nas amostras contendo teor de adições de 25 % notou-se uma maior frequência das formações de C-S-H e das fases AFt (etringita primária), indicando a ocorrência de reações pozolânicas neste tipo de mistura, conforme indicado na Fig. 52.

Também, em ambas as amostras não foram encontradas formações de poros e fissuras dignos de nota, indicando uma boa compacidade da matriz cimentícia.



**Figura 51** - Micrografia SE e espectro composicional EDS da mistura contendo 50 % de cimento CP V - ARI e 50% de MATPOZ. Fonte: Própria.



**Figura 52** - Micrografia SE e espectro composicional EDS da mistura contendo 75 % de cimento CP V - ARI e 25% de MATPOZ. Fonte: Própria.

Cabe ressaltar que, para cada tipo de argamassa analisada, foram obtidas diversas imagens em diferentes porções de amostras, sendo que, em cada uma delas verificou-se o mesmo tipo e frequência das respectivas formações cristalográficas aqui representadas, indicando uma homogeneidade na composição estrutural das argamassas. As imagens utilizadas neste trabalho foram selecionadas por apresentarem melhor resolução e nitidez dos aspectos morfológicos das diferentes formações observadas.

#### 4.3.3. Características físicas e mecânicas dos concretos

Como critério para a produção dos concretos, foram utilizadas as dosagens das argamassas que apresentaram melhor desempenho em termos de resistência média à compressão aos 28 dias (argamassa B, contendo 75 % de cimento e 25 % de MATPOZ) e maior teor de substituição de cimento (argamassa B, contendo 50 % de cimento e 50 % de MATPOZ), além da argamassa de referência (argamassa A, contendo 100 % de cimento).

A adoção deste critério resultou na criação de 03 famílias de concretos, denominadas de F 100, F 7525 e F 5050, compostas por 03 tipos de traços (rico, médio e pobre), os quais apresentaram resultados físicos e mecânicos satisfatórios em termos de trabalhabilidade e resistência, com variações de valores dos parâmetros analisados dentro dos limites aceitáveis, conforme indicado nas Tab. 21, Tab. 22 e na Fig. 53.

**Tabela 21** - Resultados dos ensaios físicos dos concretos. Fonte: Própria.

| Famílias de concreto | Tipo de traço | Abatimento (mm) | Ar aprisionado (%) | Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------|-----------------|--------------------|--|
| F 100                | Rico          | 130,00          | 3,52               | 2,37                                   |
|                      | Básico        | 160,00          | 4,10               | 2,32                                   |
|                      | Pobre         | 145,00          | 4,56               | 2,30                                   |
| F 7525               | Rico          | 110,00          | 3,55               | 2,35                                   |
|                      | Básico        | 160,00          | 4,14               | 2,31                                   |
|                      | Pobre         | 150,00          | 4,60               | 2,28                                   |
| F 5050               | Rico          | 140,00          | 3,58               | 2,34                                   |
|                      | Básico        | 160,00          | 4,18               | 2,29                                   |
|                      | Pobre         | 165,00          | 4,65               | 2,27                                   |

Tabela 22 - Resultados dos ensaios mecânicos dos concretos. Fonte: Própria.

| Determinação da resistência à compressão dos concretos |               |              |                              |                            |                                  |                            |
|--|---------------|--------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Família  | Tipo de traço | Idade (dias) | Nº de identificação dos CP's | Resist. à compressão (MPa) | Resist. média à compressão (MPa) | Desvio relativo máximo (%) |
| F 100  | Rico          | 3            | 027/19-01                    | 38,40                      | 38,42                            | 0,04%                      |
|  |               |              | 027/19-02                    | 38,43                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 027/19-03                    | 42,50                      | 42,50                            | 0,00%                      |
|  |               |              | 027/19-04                    | 42,50                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 027/19-05                    | 49,20                      | 48,90                            | 0,61%                      |
|  |               |              | 027/19-06                    | 48,60                      |                                  |                            |
|  | Básico        | 3            | 028/19-01                    | 22,30                      | 22,33                            | 0,13%                      |
|  |               |              | 028/19-02                    | 22,36                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 028/19-03                    | 26,30                      | 26,00                            | 1,15%                      |
|  |               |              | 028/19-04                    | 25,70                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 028/19-05                    | 29,40                      | 29,05                            | 1,20%                      |
|  |               |              | 028/19-06                    | 28,70                      |                                  |                            |
|  | Pobre         | 3            | 029/19-01                    | 14,00                      | 14,09                            | 0,64%                      |
|  |               |              | 029/19-02                    | 14,18                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 029/19-03                    | 16,30                      | 16,55                            | 1,51%                      |
| 029/19-04  |               |              | 16,80                        |                            |                                  |                            |
| 28   |               | 029/19-05    | 18,60                        | 18,40                      | 1,09%                            |                            |
|  |               | 029/19-06    | 18,20                        |                            |                                  |                            |
| F 7525   | Rico          | 3            | 030/19-01                    | 29,20                      | 29,22                            | 0,05%                      |
|  |               |              | 030/19-02                    | 29,23                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 030/19-03                    | 35,70                      | 35,80                            | 0,28%                      |
|  |               |              | 030/19-04                    | 35,90                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 030/19-05                    | 44,60                      | 44,90                            | 0,67%                      |
|  |               |              | 030/19-06                    | 45,20                      |                                  |                            |
|  | Básico        | 3            | 031/19-01                    | 15,70                      | 15,69                            | 0,06%                      |
|  |               |              | 031/19-02                    | 15,68                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 031/19-03                    | 22,40                      | 22,10                            | 1,36%                      |
|  |               |              | 031/19-04                    | 21,80                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 031/19-05                    | 27,10                      | 26,50                            | 2,26%                      |
|  |               |              | 031/19-06                    | 25,90                      |                                  |                            |
|  | Pobre         | 3            | 032/19-01                    | 7,90                       | 7,88                             | 0,25%                      |
|  |               |              | 032/19-02                    | 7,86                       |                                  |                            |
|  |               | 7            | 032/19-03                    | 12,50                      | 12,45                            | 0,40%                      |
| 032/19-04  |               |              | 12,40                        |                            |                                  |                            |
| 28   |               | 032/19-05    | 16,80                        | 16,75                      | 0,30%                            |                            |
|  |               | 032/19-06    | 16,70                        |                            |                                  |                            |
| F 5050   | Rico          | 3            | 033/19-01                    | 17,10                      | 16,98                            | 0,74%                      |
|  |               |              | 033/19-02                    | 16,85                      |                                  |                            |
|  |               | 7            | 033/19-03                    | 27,50                      | 28,45                            | 3,34%                      |
|  |               |              | 033/19-04                    | 29,40                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 033/19-05                    | 38,80                      | 38,90                            | 0,26%                      |
|  |               |              | 033/19-06                    | 39,00                      |                                  |                            |
|  | Básico        | 3            | 034/19-01                    | 8,90                       | 8,93                             | 0,28%                      |
|  |               |              | 034/19-02                    | 8,95                       |                                  |                            |
|  |               | 7            | 034/19-03                    | 15,40                      | 15,50                            | 0,65%                      |
|  |               |              | 034/19-04                    | 15,60                      |                                  |                            |
|  |               | 28           | 034/19-05                    | 23,60                      | 23,30                            | 1,29%                      |
|  |               |              | 034/19-06                    | 23,00                      |                                  |                            |
|  | Pobre         | 3            | 035/19-01                    | 5,00                       | 5,07                             | 1,28%                      |
|  |               |              | 035/19-02                    | 5,13                       |                                  |                            |
|  |               | 7            | 035/19-03                    | 9,50                       | 9,65                             | 1,55%                      |
| 035/19-04  |               |              | 9,80                         |                            |                                  |                            |
| 28   |               | 035/19-05    | 15,70                        | 15,45                      | 1,62%                            |                            |
|  |               | 035/19-06    | 15,20                        |                            |                                  |                            |

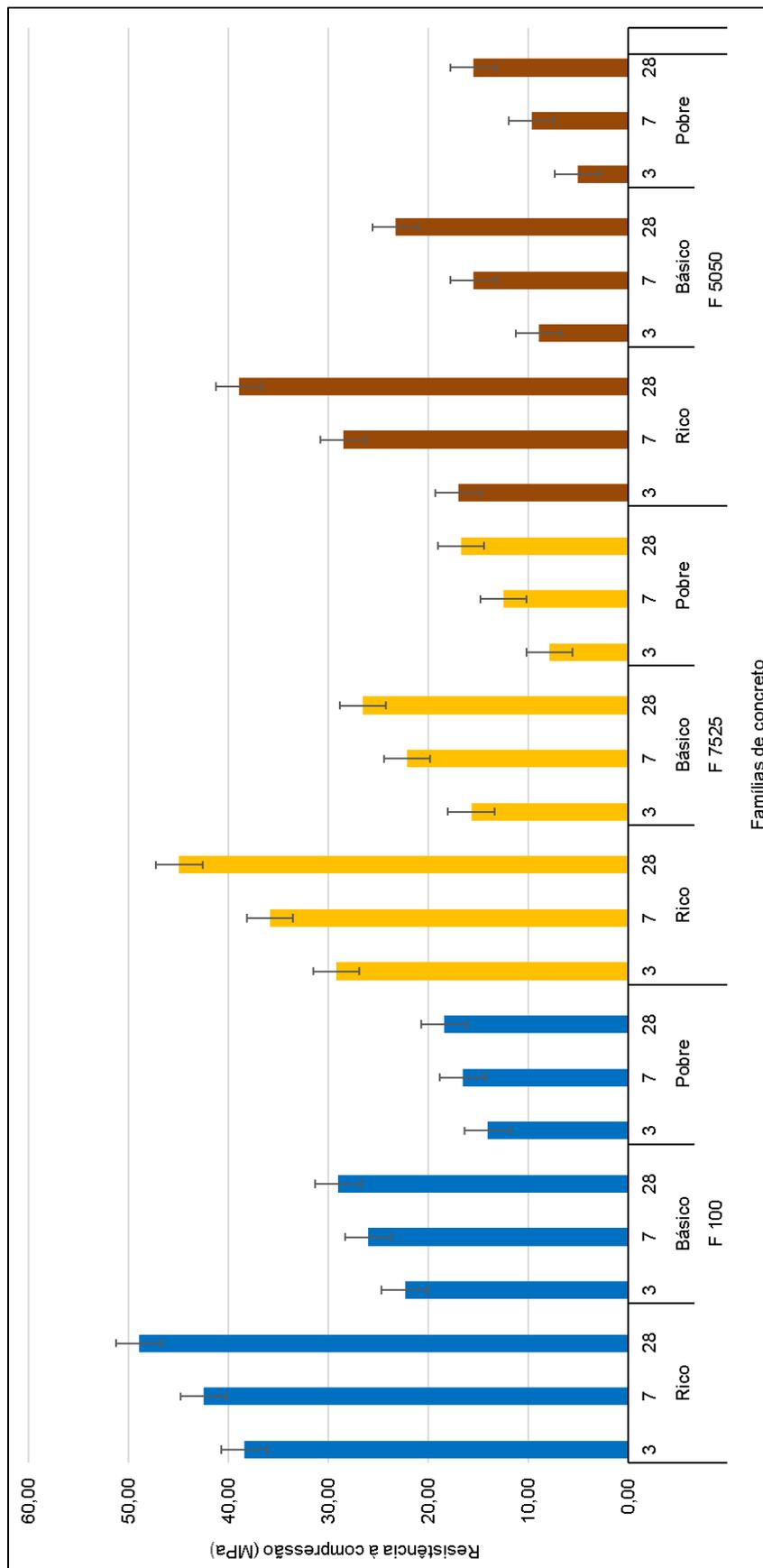
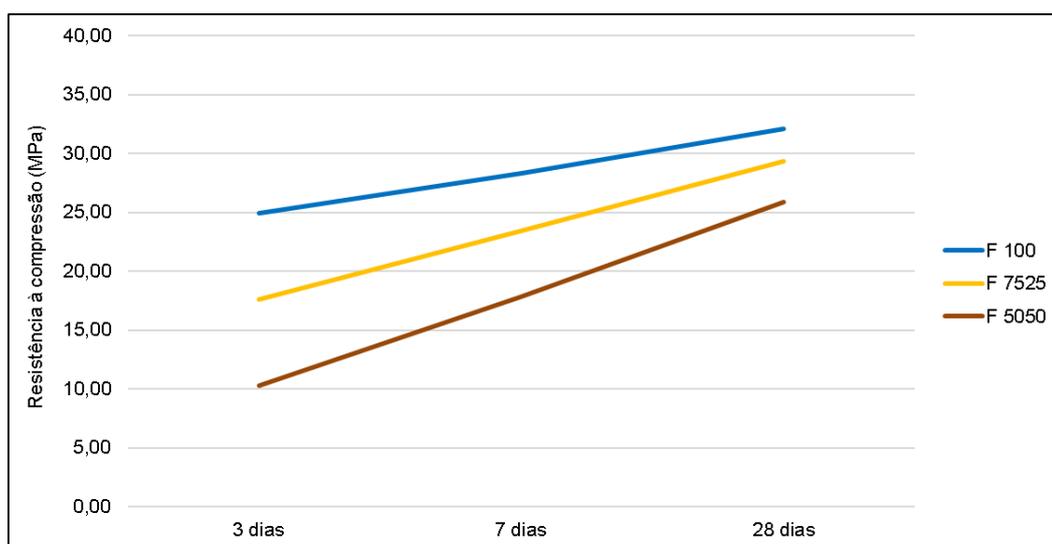


Figura 53 - Resistência média à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias. Fonte: Própria.

As três famílias de concretos, com seus respectivos traços, apresentaram desempenho satisfatório em termos de ganho de resistência à compressão no período de 28 dias, sendo que, nas famílias F7525 e F5050, houve uma evolução mais pronunciada, indicando a ocorrência de reações pozolânicas efetivas. Os dados estão representados na Tab. 23 e na Fig. 54.

**Tabela 23** - Resistência média à compressão das famílias de concretos analisados. Fonte: Própria.

| Família de concreto | Resistência média à compressão (MPa), considerando os 3 tipos de traços (rico, básico e pobre) |        |         |
|---------------------|--|--------|---------|
|                     | 3 dias   | 7 dias | 28 dias |
| F 100               | 24,95  | 28,35  | 32,10   |
| F 7525              | 17,60  | 23,45  | 29,38   |
| F 5050              | 10,32  | 17,87  | 25,88   |



**Figura 54** - Ganho de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias. Fonte: Própria.

## 5. Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

Considera-se que a pesquisa conseguiu cumprir com os objetivos pretendidos, ou seja, utilizar os resíduos gerados na produção de ferro-gusa (escória granulada e pó do balão) de forma combinada, na formulação de misturas pozolânicas para a produção de cimentos e concretos nas classes de resistência entre 30 MPa e 40 MPa, demonstrando o potencial de transformação destes materiais em coprodutos siderúrgicos, com maior valor agregado.

Para alcançar tais resultados, considera-se determinante a realização do processo de moagem dos resíduos, como forma de se obter melhores características de reatividade com o cimento. Entretanto, esta condição pode ser atingida somente com a utilização de equipamentos e processos simplificados, não requerendo investimentos mais sofisticados e onerosos.

A metodologia adotada para a caracterização dos materiais utilizados e para a formulação das misturas mostrou-se acertada, possibilitando obter informações assertivas e direcionar os ensaios nas condições mais adequadas de repetibilidade e reprodutibilidade, conforme as exigências normativas usuais.

De forma geral, também pode-se considerar que a pesquisa cumpriu com o propósito de desenvolver uma forma inovadora de substituição de cimento Portland na produção de cimentos e concretos, contribuindo fortemente com a redução do impacto ambiental nas cadeias produtivas dos setores cimenteiros e siderúrgicos, levando-se em consideração os expressivos números envolvidos nas suas operações industriais.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de avaliar a utilização dos resíduos pesquisados em escala industrial, durante a fabricação de cimentos pozolânicos, realizando a mistura dos mesmos diretamente nos moinhos, para posterior avaliação e certificação do produto obtido.

Devido a possibilidade de utilização das misturas pozolânicas desenvolvidas, em outros tipos de aplicações, sugere-se complementar os ensaios mecânicos como forma de avaliar outros parâmetros, tais como:

- Resistência à tração;
- Módulo de deformação;
- Expansão e retração;
- Comportamento reológico em condições especiais.

Outra etapa importante a ser considerada futuramente é a realização dos ensaios de durabilidade dos concretos, observando as exigências normativas preconizadas pela norma ABNT NBR 12655, 2015, quanto aos requisitos de condição de exposição da estrutura e da qualidade do concreto, tais como:

- Permeabilidade ao gás;
- Permeabilidade à água;
- Exposição a sulfatos;
- Penetração de íons cloreto;
- Carbonatação;
- Reação álcali-agregados;
- Abrasão.

Também, sugere-se realizar os ensaios de solubilização e lixiviação, como forma de assegurar a capacidade de encapsulamento dos resíduos utilizados pela matriz cimentícia das argamassas e concretos.

## 6. Referências Bibliográficas

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland. Boletim técnico.** 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. 27 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325). Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios x - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa específica e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015c.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015d.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7500-1**: Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AÏTCIN, P. C. **High Performance Concrete**. 1st ed. London: E & FN SPON.1998.
- AMORIM, C. C. **Utilização do resíduo do desempoeiramento do alto forno para tratamento de efluentes**. 2010. 170 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- ARCELORMITTAL BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Belo Horizonte, 2017. 86 p.
- BRASIL. **Decreto-lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1989. Estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Consultoria Jurídica do Ministério do Meio Ambiente, Edições Câmara, 2008. 350 p.
- BRASIL. **Decreto-lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras

providências; e legislação correlata. 3 ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017. 80 p.

BYE, G. C. **Portland Cement. Composition, Production and Properties**. London: Thomas Telford Publishing. 2nd ed. 1999.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Brasília, 2008. 28 p.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: CNI, 2016, p. 57.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. 6. ed. Lisboa: LNEC, 1997. 401 p.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: CNI, 2016, p. 57.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo. IBRACON. 2005. p. 345-379.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P.S.R.; BISWAL, S. K; MOHAPATRA, B. K.; MISRA, V.N. **Effective utilization of blast furnace flue dust of integrated steel plants**. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 61-68. 2002.

DIAMOND, S. **The Microstructure of Cement Paste and Concrete: A Visual Primer**. Cement and Concrete Composites, Amsterdam, v. 26, p. 919-933, 2004.

HADLEY, D. W. *et al.* **On the Occurrence of Hollow-Shell Hydration Grains in Hydrated Cement Paste**. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 30, p. 1-6, 2000.

HEWLETT, Peter C. **LEA'S Chemistry of Cement and Concrete**. Amsterdam: Elsevier, 4th ed. 1998.

HUMPHREYS, K.; MAHASANAN, M. **Climate change in toward a sustainable cement industry**. Battelle, OH: World Business Council for Sustainable Development, 2002.

IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2018. 32 p.

IBS - INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Plano de Desenvolvimento do Setor**. Rio de Janeiro, 2009. 52 p. (Relatório do biênio 2007-2009.).

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.; LOPES, L. E. F. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3. ed. New York: Chemical Publishing Co., 1970.

LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.

MACHADO, A. S.; MEXIAS, A. S.; VILELA, A. C. F.; OSÓRIO, E. **Quantificação por DRX dos componentes carbonosos presentes no pó de balão do alto-forno**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v.8, n.4, p. 254-260, 2011.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. Editora PINI. 1994. 581 p.

MEHTA, P. K. **Advancements in concrete technology**. Concrete International. [s. l.], v. 19, p. 69-76, June 1999.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON. 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Editora PINI. 1997. 828 p.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.
- OLIVEIRA, M. R. C.; MARTINS, J. **Caracterização e classificação do resíduo sólido “Pó do Balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: Estudo de um caso na região de Sete Lagoas MG**. Química. Nova, [s. l.], v. 26, n.1, p. 5-9, 2003.
- SAHAJWALLA, V.; GUPTA S. **PCI coal combustion behavior and residual coal char carryover in the blast furnaces of three American steel companies during pulverized coal injection (PCI) at high rates**. Washington, DC: American Iron and Steel Institute, 2005. 8 p.
- SCRIVENER, K. L. **Backscattered Electron Imaging of Cementitious Microstructures. Understanding and Quantification**. Cement and Concrete Composites, Amsterdam, v. 26, p. 935-945, 2004.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 114, p. 2-26, 2018.
- SHEN, L.; QIAO, Y.; GUO, Y.; TAN, J. **Preparation of nanometer-sized black iron oxide pigment by recycling of blast furnace flue dust**. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v.177, p. 495-500. 2010.
- SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatórios anuais**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.snic.org.br>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- SOUZA JÚNIOR, D. S. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente**. 2007. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007, 127p.
- STRUBLE, L.; GODFREY, J., **How sustainable is concrete?** In: International Workshop on Sustainable Development and Technology. Beijing, CHN: Iowa State University, p. 201-211, 2004. (Part II).
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- VOINOVITCH, I. A; RAVERDY, M; DRON, R. **Ciment de laitier granule sans clinker**. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, n. 116, p. 87-90, dec. 1980.
- WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Low-carbon transition in the cement industry**. Roadmap. Paris: IEA, Apr., 2018. 12 p.
- WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel: The permanent material in the circular economy**. Brussels, BEL, 2016. 18 p.